



Prototypische Entwicklung einer körperbasierten Mensch-Computer- Interaktion für Virtual Reality unter Berücksichtigung ergonomischer Faktoren

vorgelegt von:
Ravell Heerdegen
761330

Emailadresse:
ravell.heerdegen@student.reutlingen-university.de

Bachelor in Medien- und Kommunikationsinformatik
SS2019

Erstbetreuerin Prof. Dr. rer. nat. Gabriela Tullius
Zweitbetreuer Prof. Dr. rer. nat. Uwe Kloos
Betriebliche Betreuung Manuel Dixken

Eingereicht am: 13.06.2019

*Diese Arbeit steht unter einer Creative-Commons-Lizenz ("CC BY-NC-SA",
share alike) Attribution 3.0. <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0>*

Abstract

Movies like Iron Man show what future brings for user interfaces. Hovering holographic menues with several data and information, suits with integrated buttons on the arms for abilities, as well as gesture controlled programs. What seems like science fiction in Iron Man, is already reality. The interest in Virtual Reality and devices, which are able to display virtual environments and interact with the same, is growing continuously. The market of technique holds a great palette of controllers, gamepads and other input devices. To use the own body, thus in future the only device needed to work with programs, write texts or communicate with people all over the world, is an actual and attractive trend. To achieve these aspects, for many years there are solutions, which use gestures or controllers to receive input from a user, and do an output of information through a head-mounted display. The own body becomes an input device, through gestures or controllers. To consider are the natural abilities of the human body, like what the human is able to do, and what not. This work answers what a body-based interface for virtual reality in combination with a 3d-modeling application could look like, under the consideration of fundamentals, ergonomics, established designs and guidelines. This work also gives an answer to how a virtual reality application could be designed, to get used by a body-based interface. The purpose of this work is to offer a chance to use a 3d-modeling application in virtual reality, nearly only by using the own body. The developed system, including application and interface, got tested in usability with the system usability scale. The result is a good to excellent usability. Thus the system is suitable for the use as a modeling environment in virtual reality and offers an alternative to gesture controlled or hovering menues served systems for 3d-modeling.

Zusammenfassung

Filme wie Iron Man zeigen was die Zukunft im Bereich Bedienungsoberflächen bringt. Schwebende holografische Menüs mit zahlreichen Daten und Informationen, Anzüge mit eingebauten Buttons auf den Armen zur Steuerung von Fähigkeiten, sowie durch Gesten gesteuerte Programme. Was in Iron Man wie Science Fiction scheint, ist heute schon Realität. Das Interesse an Virtual Reality und Geräten, welche die virtuellen Umgebungen darstellen und mit den selbigen interagieren können steigt kontinuierlich. Auf dem Markt der Technik, finden sich zahlreiche Controller, Gamepads und andere Eingabegeräte.

Den eigenen Körper zu instrumentalisieren, sodass in Zukunft das einzige Instrument um mit Programmen arbeiten, Texte schreiben oder mit anderen Menschen global kommunizieren zu können, ist ein aktuell attraktiver Trend. Dafür erscheinen seit mehreren Jahren Lösungen, welche durch Gesten oder Controller-gestützte Hardware Eingaben von einem Benutzer entgegennehmen und über ein am Kopf befestigtes Headset, die *head-mounted displays*, Informationen wieder ausgeben. Der eigene Körper wird dabei z.B. durch Gesten oder über Controller zum Eingabegerät.

Zu beachten gilt es dabei, was der menschliche Körper kann und was nicht. Diese Arbeit beantwortet, wie ein körperbasiertes Interface für eine Virtual Reality Anwendung mit *Computer-Aided-Design*-Ansatz zum Modellieren von 3D-Objekten aussehen kann, unter der Berücksichtigung von Grundlagen, Ergonomie, verwandten etablierten Designs und Richtlinien.

Auch beantwortet diese Arbeit, wie eine Virtual Reality Anwendung konzipiert sein kann, um von einem körperbasierten Interface bedient werden zu können. Zweck der Lösung ist eine Möglichkeit zu bieten, eine Modellierungs-Anwendung in VR fast ausschließlich mit dem eigenen Körper bedienen zu können. Das entwickelte System bestehend aus Interface und Anwendung, wurde mit dem *System Usability Scale* auf Usability, sprich auf Benutzungsfreundlichkeit getestet. Dabei ergab sich eine gute bis exzellente Usability. Das System eignet sich damit für den Einsatz als Modellierungs-Umgebung in Virtual Reality und bietet eine Alternative zu komplett durch Gesten oder schwebende Interfaces gesteuerte Systeme zur Modellierung von 3D-Objekten.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	7
1.1 Kontext und Motivation	7
1.2 Ziele der Arbeit	9
2 Konzeption und Entwicklung	10
2.1 Grundlagen	10
2.1.1 Virtual Reality	10
2.1.2 Head-mounted displays	11
2.1.3 Eingabegeräte	12
2.1.4 Ergonomie	16
2.1.5 3D Benutzungsoberflächen	17
2.1.6 Körperbasierte Interfaces	19
2.1.7 Anforderungen aus Grundlagen	20
2.2 Hinführung zum Konzept	21
2.2.1 Anwendungsanforderungen	21
2.2.2 Richtlinien	22
2.2.3 Interfacepositionierung	23
2.2.4 Verwandte Ideen und Konzepte	24
2.2.5 Interfaceanforderungen	27
2.2.6 Finales Interfacekonzept	27
2.3 Implementation	29
2.3.1 Verwendete Frameworks und Tools	29
2.3.2 Umsetzung	29
2.3.3 Probleme und Hindernisse	34
2.4 Evaluation	35
2.4.1 Konzeption und Aufbau	35
2.4.2 Durchführung	38
2.4.3 Ergebnisse	39
2.4.4 Diskussion	42
3 Schluss	43
3.1 Fazit	43
3.2 Zukunftsaussichten und Pläne	44

Abbildungsverzeichnis

1	Virtual-Reality Anwendung SwordPlay [Jr et al., 2010]	11
2	HTC Vive Headset	12
3	XBox One Gamepad, vgl. [Ortega et al., 2016]	13
4	Mycestro 3D-Maus Ring, vgl. [Mycestro, 2019]	13
5	3D Dateimanager [Kyritsis et al., 2013, p. 243]	18
6	3DUI Prototyp für VR bei Verwendung eines HMD, vgl. [Alger, 2015]	18
7	Anwendung von OmniTouch [Harrison et al., 2011, p. 446] . .	20
8	Wheelpicker-Modell nach [Ehrlich, 2017, p. 33]	24
9	Interaktion mit Wheelpicker-Modell nach [Ehrlich, 2017, p. 33]	24
10	Pie-Modell nach [Ehrlich, 2017, p. 10]	25
11	Interaktion und Erweiterung des Pie-Modells nach [Ehrlich, 2017, p. 10]	25
12	Interaktion und Erweiterung des <i>3d button menu</i> nach [Ehrlich, 2017, p. 36-37]	26
13	Interaktion mit Kachel-Modell	26
14	Unterarm Prototyp für VR mit Gestenerkennung, vgl. [Corvid-Dude, 2018]	27
15	Finales Konzept <i>decision menu</i>	28
16	Erweiterung des <i>decision menu</i>	28
17	Platzierung anwendungsspezifischer Funktionen	28
18	Interfaceimplementation	32
19	Vive Controller mit Bezeichner	32
20	Teleportationsfunktion	32
21	Markieren und Selektieren eines Würfels	33
22	Verwendung der Translationsfunktion	33
23	Rotieren eines Objektes	33
24	Verwendung der Skalierungsfunktion	34
25	Einblendung eines Funktionstitels bei blinder Bedienung . . .	34
26	Angepasster virtueller Raum für Evaluation	37
27	SUS-Score Interpretation nach [Alathas, 2018]	39
28	SUS-Score Verteilung in Abhängigkeit zur VR-Erfahrung . .	40
29	Am negativsten bewertete Fragen des SUS	40
30	Bewertungen der SUS-Fragen	40
31	VR-Erfahrung aller Testpersonen	41
32	Durchschn. Durchführungszeit aller Erfahrungsstufen	41

Tabellenverzeichnis

1	Eingabearten und Beispielsysteme, a) [Harrison et al., 2010], b) [Mistry et al., 2009], c) [Jofre et al., 2016], d) [Ens et al., 2014]	16
2	Anforderungen aus vorangegangenen Kapiteln	20
3	Anwendungsanforderungen	21
4	Eigenschaften und Merkmale verwandter Interface-Designs . .	26
5	Interfaceanforderungen	27
6	System Usability Scale Fragen nach Reihenfolge sortiert . . .	37

1 Einleitung

1.1 Kontext und Motivation

Virtual Reality (VR) ist eine der aktuell modernsten Techniken, wenn es um die Verarbeitung von Informationen geht [Lanman et al., 2014].

Die Idee, virtuelle Umgebungen darzustellen und mit den selbigen interagieren zu können, ist bis in die zwanziger Jahre des 21. Jahrhunderts zurückzuführen [Zhou and Deng, 2009]. Als der PC und die Bedienung durch Maus und Tastatur berühmt wurde, entstanden parallel dazu neue Ansätze, welche versuchten auf Knöpfe und Tasten zu verzichten. Durch Gesten gesteuerte Systeme eroberten den Markt, darunter das Nintendo Wii System oder Microsoft Kinect [Jofre et al., 2016]. Seit Erscheinen der sogenannten *tracking devices*, also Geräten mit Verfolgungssensoren, hat sich auch die Art und Weise der Ausgabegeräte geändert, mit denen verarbeitete Informationen an einen Benutzer zurückgegeben werden. *Head-mounted displays* (HMDs) sind am oder auf dem Kopf befestigte Bildschirme, welche versuchen den Benutzer in die virtuelle Umgebung direkt einzubinden [Mcgill et al., 2015; Zhou and Deng, 2009]. Dabei wird die Bewegung und Richtung des Kopfes des Benutzers durch Sensoren verfolgt. Das Gefühl zu vermitteln, die virtuelle Realität als echt zu empfinden, sprich eine Immersion zu verspüren, zeichnet HMDs gegenüber normalen Bildschirmen aus [Antonio and Vilas, 2013]. Da aufgrund der HMDs die reale Umgebung nicht mehr wahrgenommen werden kann, wurden neue Eingabearten und Techniken entwickelt, welche mit HMDs und VR kombinierbar sind, sodass Anwendungen weiterhin bedient werden können. Das Zeitalter der Gesten- und Spracherkennung war angebrochen [Lanman et al., 2014; Harrison, 2018]. Gesten werden seither für die Erfüllung von Aufgaben verwendet [Groenewald et al., 2016]. Durch Gesten gesteuerte Systeme benötigen keine weiteren Werkzeuge als Sensoren und Kameras, um Informationen verarbeiten und somit Programme in VR bedienen zu können [Mistry et al., 2009]. Jedoch auch andere Methoden wie durch Druck [Harrison et al., 2010] oder Handschuhe [Jofre et al., 2016] gesteuerte Systeme haben sich etabliert und beim Einsatz in VR als geeignet gezeigt. Die Entwicklung geht aktuell weg von 2D hin zu *3D User Interfaces* (3DUIs). U.a. aus dem Grund, 3D-Interfaces frei in der Welt platzieren zu können [Kyritsis et al., 2013; LaViola et al., 2017]. Die Platzierung von Interfaces beschränkt sich somit nicht mehr auf Bildschirme und schwebende Oberflächen und bietet eine neue Dimension zum Arbeiten. Mit der freien Positionierung von Interfaces kam die Idee von körperbasierten Interfaces auf. Da der Mensch eine gewisse Verbundenheit zum eigenen Körper hat und tagtäglich mit dem selbigen arbeitet,

bietet sich der Körper als Eingabegerät durchaus an [Harrison and Faste, 2014]. Schultern, Arme, Hände und Beine besitzen alle für sich unterschiedliche Eigenschaften, welche sich mehr oder weniger für Interfaces eignen [Harrison and Faste, 2014]. Der Körper bringt jedoch auch neue Herausforderungen mit sich, welche durch die ergonomischen Gegebenheiten des menschlichen Körpers bedingt sind. Der menschliche Körper ist sowohl in Größe und Kraft, als auch in Ausdauer und Mobilität begrenzt. Deshalb gilt es bspw. Interfaces möglichst niedrig zu halten und nahe an den Körper zu bringen, um das Ermüden der Arme durch lange und ausdauernde Aktivitäten zu vermeiden, oder auf komplexe Gesten zu verzichten [LaViola et al., 2017].

Mit der Positionierung auf dem Körper kommt jedoch auch die Frage auf, wie körperbasierte Interfaces gestaltet sein können und sollen, um praktikabel und immersiv zu sein. Die Ideen reichen von Armschienen [Ehrlich, 2017] ähnlichen Designs, bis hin zu an Kuchenstücke erinnernde Modelle, welche auch auf die Hand projiziert werden können. Da der Mensch ein Gefühl für den eigenen Körper hat, können durch ein körperbasiertes Interface, gleich ob nur ein Teil oder der ganze Körper das Interface bilden, Funktionen sogar auswendig und blind ausgeführt werden, wenn ausreichende Übung vorangegangen ist [LaViola et al., 2017]. Die Einsatzgebiete von VR entwickeln sich stetig weiter. U.a. werden VR-Lösungen aktuell in der Medizin [Lakshminarayanan and Moroi, 2017] zu Operationszwecken, oder in der 3D-Modellierung eingesetzt [Vajak, 2017]. Zur 3D-Modellierung gehört z.B. ProBuilder VR von ProCore. ProBuilder VR ermöglicht das Modellieren von 3D-Objekten in VR, bei Tragen eines HMD [ProCore, 2019].

Die Interaktionen werden dabei über schwebende, frei in der virtuellen Umgebung bewegliche Menüs gelöst. Diese Arbeit setzt am gleichen Kontext wie ProBuilder VR an. Eine Lösung für die 3D-Modellierung in VR darzubieten. Dabei wird beantwortet, wie ein körperbasiertes Interface in VR aussehen, und wie das selbige in einer *Computer-Aided-Design* (CAD)-Anwendung zur Interaktion genutzt werden kann. Das entwickelte System soll eine Alternative zu herkömmlichen Lösungen für 3D-Modellierung in VR ohne Körpereinsatz darstellen und den Nutzen eines körperbasierten Interfaces offenlegen. Dafür sollen u.a. etablierte und ähnliche Lösungen verglichen werden und mit in die Entwicklung dieser Arbeit einfließen. Das System soll letztendlich für den Einsatz als 3D-Modellierungs-Umgebung dienen und dafür dementsprechend auf Usability, also auf Benutzungsfreundlichkeit überprüft werden.

Der Kontext dieser Arbeit wird auf Grundlagen eingegrenzt, welche für die Entwicklung einer Modellierungs-Anwendung und einem körperbasierten Interface in VR notwendig sind. Darunter fallen auch Erkenntnisse über die Ergonomie und Richtlinien zur Konzipierung von 3D-Benutzungsoberflächen. Ebenfalls wichtig ist dabei der Vergleich von etablierten Designs und Ar-

beiten, um ein Verständnis von aktuellen Ansätzen und Lösungen zu erhalten, welche einen weiteren Nährwert für die Entwicklung des zu entwickelnden Systems bieten. Dabei wird wiederum ausschließlich auf körperbasierte Ansätze eingegangen, da nur körperbasierte Lösungen für diese Arbeit relevant sind. Darunter die bereits genannten auf Druckerfassung oder Gesten konzipierten Systeme.

1.2 Ziele der Arbeit

Ziel dieser Arbeit war ein körperbasiertes Interface für eine VR-Anwendung mit *Computer-Aided-Design* (CAD)-Ansatz zu entwickeln, zum Erstellen, Manipulieren und Löschen von primitiven Körpern. Das zu entwickelnde System, sollte durch mit dem Körper kombinierbare Aus- und Eingabegeräte bedient werden und durch eine Studie bezüglich der Usability überprüft werden. Dabei wurde auf Grundlagen für die Entwicklung von 3DUIs und Anwendungen in VR eingegangen, sowie Erkenntnisse über die Ergonomie, Richtlinien und verwandte Designs und Arbeiten berücksichtigt.

2 Konzeption und Entwicklung

2.1 Grundlagen

Seit dem Beginn der Entwicklung von Lösungen für VR in den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts, gab es stetig neue und innovative Konzepte, um nicht nur mit, sondern auch in der virtuellen Welt zu interagieren [Novak et al., 2014]. In diesem Kapitel wird zunächst erläutert, um was es sich bei VR genau handelt. Danach wird näher auf *head-mounted displays* (HMDs) eingegangen, welche nach dem ersten Prototypen aus dem Jahre 1968 kontinuierlich weiterentwickelt wurden und heute ein vielversprechendes Ein- und Ausgabegerät für Informationen darstellen [Lanman et al., 2014]. Daran anschließend folgen grundlegende Erläuterungen zu Eingabegeräten wie *tracking devices*, also Geräten mit Verfolgungssensoren, oder *vision-based devices*, welche abhängig vom Blickwinkel eines Benutzers sind.

Die beiden genannten und noch weitere Gerätetypen sind für die Konzeptions-Phase für das zu entwickelnde Interface relevant. Des Weiteren werden Details zur Ergonomie aufgeführt, zusammen mit Möglichkeiten und Grenzen durch den menschlichen Körper. Abschließend wird auf *3D user interfaces* (3DUIs) und *body-based interfaces* (BIs) eingegangen, wodurch der Rahmen für das Grundverständnis dieser Arbeit gegeben wird.

2.1.1 Virtual Reality

VR erfährt seit der technischen Einführung im Jahre 1968 ein andauerndes Interesse. Das Potenzial von VR entfaltet sich sowohl in der Entwicklung neuer Anwendungen, als auch in der Erforschung neuer Anwendungsbereiche und der Verwendung der bereits vorhandenen Methoden und Mittel im Alltag. Grundlegend ist VR eine interaktive Simulation, bei welcher die menschlichen Sinne verstärkt oder manipuliert werden, um während der Nutzung mit einem Computer, einem Benutzer das Gefühl zu geben, tatsächlich in einer virtuellen Umgebung zu sein [Novak et al., 2014].

Einerseits kann der gesamte Körper des Benutzers in die virtuelle Umgebung übertragen werden, andererseits reicht es teilweise aus, bestimmte Körperteile wie z.B. die Hände [Mendes et al., 2017] oder die Finger [Riecke et al., 2018] virtuell abzubilden. Die virtuelle Umgebung besteht dabei aus verschiedenen Objekten, welche untereinander in Beziehung stehen können.

Wahrgenommen werden können die platzierten Objekte visuell, auditiv oder haptisch [Novak et al., 2014]. Das bedeutet, dass Objekte entweder der reinen Visualisierung dienen, z.B. ein Foto in einem Raum, die Akustik unterstützen, z.B. Windgeräusche, oder Interaktionen zulassen wie z.B. ein

Würfel, welcher geworfen werden kann. Dadurch soll dem Benutzer ein immersives Gefühl und eine sogenannte physische als auch mentale Präsenz vermittelt werden [Zhou and Deng, 2009]. Physische Präsenz bedeutet, dass der Benutzer das Gefühl bekommt, mit dem eigenen Körper in der virtuellen Welt zu sein. Mentale Präsenz hingegen bedeutet Ansprüche und Erwartungen an die virtuelle Umgebung zu stellen, und somit ein Teilhabe-Gefühl zu entwickeln. Die mentale Präsenz kann dabei unterschiedliche Stadien annehmen. Von einer puren Verbundenheit mit einem Computer, bis hin zum Gefühl, dass die virtuelle Welt real ist. Je nach Anwendungskontext müssen physische und mentale Präsenz einen bestimmten Grad erreichen [Novak et al., 2014]. Dafür notwendig ist das sensorische Feedback.

Feedback wird größtenteils visuell vermittelt, z.B. durch das Einfärben eines Objektes bei einer Selektion. Feedback kann jedoch auch haptisch oder auditiv übertragen werden. Ebenfalls wichtig, ist die Perspektive mit der die virtuelle Umgebung wahrgenommen wird [Novak et al., 2014].

Die Erste-Person Ansicht spiegelt die Sicht eines Menschen in der Realität wider, möglich sind jedoch auch die Zweite-Person Ansicht, sowie die Dritte-Person Ansicht. Letztere auch bekannt als Vogel- oder ISO-Perspektive, dient dem Überblick einer Situation oder Umgebung aus der Ferne [Novak et al., 2014]. Aufgrund des Kontextes dieser Arbeit wird auf Feedback, Perspektiven und Präsenzen nicht weiter eingegangen.



Abbildung 1: Virtual-Reality Anwendung Sword-Play [Jr et al., 2010]

2.1.2 Head-mounted displays

HMDs sind Geräte, welche auf oder an dem Kopf eines Benutzers platziert werden [Zhou and Deng, 2009]. HMDs unterscheiden sich u.a. in der Qualität der Auflösung, Farbdarstellung, Sichtfeldweite, Interfacedarstellung sowie Beleuchtung [Lakshminarayanan and Moroi, 2017]. Aktuelle Geräte wie die Oculus Rift oder HTC Vive, letztere zu sehen in Abbildung 2, verwenden stereoskopische Anzeigen und Aufzeichnungssysteme, um die Kopfbewegungen eines Benutzers zu erfassen und dreidimensionale Bilder darstellen zu können. Um die genaue Position des Kopfes des Benutzers im virtuellen Raum berechnen zu können, kommen Beschleunigungssensoren und Gyroskope zum Einsatz, welche in die HMDs direkt integriert werden [Zhou and Deng, 2009].



Abbildung 2: HTC Vive Headset

Durch HMDs können u.a. kognitive, psychomotorische oder affektive Fähigkeiten erlernt und verbessert werden. Unter psychomotorische Fähigkeiten fällt bspw. die Geschicklichkeit, unter affektive Fähigkeiten die eigenen Gefühle besser kontrollieren zu können. Im Falle von kognitiven Fähigkeiten kann z.B. das Erinnerungsvermögen verbessert werden [Jensen and Konradsen, 2018]. Um eine positive Erfahrung während der Benutzung eines HMDs zu gewährleisten, ist die sogenannte *Field of View* (FOV), also der Sichtradius entscheidend. Der natürliche Sichtradius eines Menschen befindet sich bei 180 Grad. Aktuelle Geräte wie die HTC Vive erreichen eine FOV von über 100 Grad, was sich positiv auf die Erfahrung und dem damit verbundenen Realitätsgefühl auswirkt. Ebenfalls nennenswert ist der Begriff *motion-* bzw. *cybersickness*. Darunter wird ein Übelkeits- oder Schwindel-

gefühl verstanden, welches bei der Verwendung von HMDs in Verbindung mit VR auftreten kann. *Motionsickness* kann die Immersion beeinträchtigen und dadurch negative Erfahrungen mit HMDs und VR begünstigen. Auch kann *motionsickness* vom Alter, der Erfahrung und des Geschlechts des Benutzers abhängen, was durch diverse Studien nachgewiesen wurde [Jensen and Konradsen, 2018]. Durch die stetige Weiterentwicklung von HMDs, finden die selbigen zunehmend Anwendung in den Bereichen Bildung [Jensen and Konradsen, 2018], Psychologie [Maples-keller et al., 2018], Medizin [Lakshminarayanan and Moroi, 2017] oder in der 3D-Modellierung [Vajak, 2017].

2.1.3 Eingabegeräte

Eingabegeräte sind auch in VR erforderlich, um mit virtuell erstellten Umgebungen interagieren zu können. Je nach Anwendungskontext und Aufgabenstellung können unterschiedliche Eingabegeräte zum Einsatz kommen.

Nach Ortega et al. kann jedes Eingabegerät einer vordefinierten Kategorie zugeordnet werden. Ortega et al. definieren dazu elf Kategorien und Beschreibungen, auf welche unterschiedlich stark aufgrund der Relevanz zur Arbeit eingegangen wird:

Keyboard

Tastaturen werden in 3D-Umgebungen z.B. für die Navigation oder die Kontrollierung eines Systems, bspw. das Auslösen von besonderen Aktionen eingesetzt.

The Mouse and its Descendants

Mäuse und ihre Nachkommen dienen als präzise Eingabegeräte in 3D-Umgebungen. Mäuse können dabei aus mehreren Buttons, sowie einem Rad zum Scrollen und Lichtsensoren für die Erkennung der Mausposition bestehen. Ebenfalls existent sind sogenannte *Trackballs*, bei denen die Positionserkennung über intern verbaute Sensoren und eine bewegliche Kugel zur Interaktion geschieht.

Joystick and the Gamepad

Joysticks und *Gamepads* waren ursprünglich für die Interaktion mit 2D-Umgebungen konzipiert, bspw. für den Einsatz in einem Flugsimulator. Dabei konnte sowohl in x- als auch in y-Richtung operiert werden.

Aktuell sind *Gamepads* mit zwei *Thumbsticks*, also Daumenbuttons, mehreren Schultertasten und Buttons versehen, und sind für 3D-Anwendungen wie z.B. Videospiele konzipiert. Ein aktuelles Modell ist bspw. das XBox One *Gamepad*, zu sehen in Abbildung 3.



Abbildung 3: XBox One Gamepad, vgl. [Ortega et al., 2016]

3D Mouse and 3D User-Worn Mice

3D-Mäuse bieten im Vergleich zu 2D-Mäusen die Möglichkeit, auch in z-Richtung zu operieren. Dadurch kann z.B. der Benutzer einer Anwendung durch den virtuellen Raum manövriert oder Objekte bewegt werden.

Ein Beispiel für eine 3D-Maus welche am Körper des Benutzers getragen werden kann, ist die als Ring fungierende Maus von Mycestro, zu sehen in Abbildung 4. Die Maus von Mycestro unterstützt Gestenerkennung, um mit 3D-Anwendungen interagieren zu können.



Abbildung 4: Mycestro 3D-Maus Ring, vgl. [Mycestro, 2019]

Audio

Unter Audio als Eingabegerät ist z.B. ein Mischpult zu verstehen, welches durch verschiedene auditive Signale, Informationen an einen Computer sendet, welche anschließend verarbeitet werden können.

Inertial Sensing

Bei *inertial-sensing* werden verschiedene Funktionen durch Druck- bzw. Trägheitserfassung ausgelöst. Dabei können mehrere Finger bspw. eine andere Interaktion auslösen, als eine Interaktion mit nur einem Finger.

Je nach Druckstärke können Aktionen unterschieden und somit auch 3D-Anwendungen bedient werden. Ein Beispiel wird später in diesem Kapitel aufgeführt.

Vision-based Devices

Geräte, welche abhängig von dem Blickwinkel und der Umgebung eines Benutzers sind, werden als *vision-based devices* bezeichnet. Dabei können Informationen durch Sensoren und Projektoren in die Umgebung gesendet, oder von der Umgebung empfangen werden.

Data Gloves

Ein *data glove* ist ein Handschuh, welcher verschiedene Sensoren an Fingern und Handgelenk besitzt, um z.B. Gesten abzubilden und dadurch mit 3D-Umgebungen interagieren zu können. Dabei können die Geschwindigkeit, Bewegung und Orientierung eines Fingers erfasst und interpretiert werden.

Psychophysiological Sensing

Psychophysiologische Geräte verarbeiten psychische Informationen wie z.B. die Hirntätigkeit, und physiologische Informationen wie die Motorik, um daraus Aktionen und Befehle abzulesen. Aufgrund der mangelhaften Relevanz zu dieser Arbeit, wird auf Psychophysiologische Geräte nicht weiter eingegangen.

Tracking Devices

Unter die *tracking devices*, sprich Geräte die Verfolgungssensoren verbaut haben, fallen u.a. *finger-tracking*, *hand-tracking*, *head-tracking*, *body-tracking* oder *controller-tracking devices*. Die Verfolgungssensoren erfassen dabei z.B. Geschwindigkeit, Bewegung und Orientierung des dementsprechenden Körperteils oder Gerätes, und eignen sich somit ebenfalls für den Einsatz in 3D-Umgebungen und 3D-Anwendungen.

Treadmills as Input Devices

Laufbänder sind Eingabegeräte, welche speziell für die unlimitierte Beweglichkeit in virtuellen Umgebungen konzipiert sind. Der Benutzer eines Laufbandes, wird am Gerät befestigt und durch zusätzliche Ausrüstung wie z.B. speziell konzipierte Laufschuhe in seiner Bewegung erfasst.

Für diese Arbeit relevant aufgrund der Möglichkeit das Eingabegerät am Körper zu tragen, waren die Kategorien *inertial-sensing*, *vision-based devices*, *data gloves*, *tracking devices* und *treadmills* [Ortega et al., 2016].

Tabelle 1 listet die beschriebenen Eingabearten und dazugehörigen Beispielsysteme zusammengefasst auf. Als Beispiel für *inertial-sensing* dient das von Harrison et al. entwickelte System, abgebildet in Tabelle 1 a), welches durch Druck durch einen oder mehrere Finger bedient werden kann. Je nach Druckstärke und Druckpunkt, können damit die im System verbauten Vibrationssensoren angeregt und somit unterschiedliche Interaktionen durchgeführt werden [Harrison et al., 2010]. Das von Mistry et al. entwickelte System SixthSense, zu sehen in Tabelle 1 b), dient als Beispiel für ein durch Gesten gesteuertes System in der Kategorie *vision-based devices*. Die am Kopf des Benutzers befestigte Kamera erfasst die Hände und die dargestellten Gesten. Der am Kopf befestigte Projektor wirft Informationen und Interaktionselemente auf Oberflächen aus der Umgebung [Mistry et al., 2009].

Ein weiteres Beispiel für ein auf Gesten und Projektoren basierendes System ist LightSpace [Wilson and Benko, 2010]. Bei LightSpace kommen jedoch im Vergleich zu SixthSense keine Marker an Fingern oder Umgebung vor.

Ein durch einen *data glove* gesteuertes System wurde von Jofre et al. entwickelt. Der von Jofre et al. entwickelte Handschuh, dargestellt in Tabelle 1 c), besitzt für jeden Finger eigene Sensoren, welche nicht nur die Bewegungen und dessen Geschwindigkeit, sondern auch die Orientierung der Finger und Hand messen und erfassen können. Im Vergleich zu den *vision-based devices*, kommen beim *data glove* keine Projektoren zum Einsatz, da die Informationen direkt vom Handschuh in die an einem Computer laufenden Anwendungen übertragen werden [Jofre et al., 2016]. Ein System, welches *head-tracking* verwendet, um 3DUIs darzustellen, ist das von Ens et al. entwickelte Projekt *the personal cockpit*, abgebildet in Tabelle 1 d).

Das von Ens et al. entwickelte System, umfasst ein HMD in Form einer Brille und darin verbaute Sensoren. Die verbauten Sensoren erfassen die Richtung in welche der Träger der Brille schaut, und stellt daraufhin verschiedene Interaktionselemente oder Informationen dar [Ens et al., 2014].

Ein populäres Eingabegerät, welches mit *controller-tracking*, VR und HMDs in Verbindung gesetzt wird, ist z.B. der HTC Vive Controller, zu sehen in Tabelle 1 e).

Durch sogenannte *Positioner*, welche im Raum um den Benutzer herum platziert werden, werden nicht nur die Position und Rotation der Controller, sondern wenn gewünscht der gesamte Körper eines Benutzers erfasst. Knöpfe und Touchpads dienen als Eingabemechanismen und können zusammen mit Bewegung und Rotation der Controller sogar Gesten abbilden und so mit einer 3D-Umgebung interagieren [Lee et al., 2017]. Als Beispiel für eine *Treadmill*, also ein Laufband zur Eingabe von Informationen, dient der Virtualizer von Cyberith, dargestellt in Tabelle 1 f). Der Benutzer wird dabei in der Mitte des Gerätes befestigt. Die Bewegungen des Benutzers werden durch speziell konzipierte Laufschuhe erfasst und in Interaktionen umgesetzt [Cyberith, 2019]. Aufgrund der zahlreichen Einsatzmöglichkeiten, der speziell für VR entwickelten Hardware, Gestenerkennung und *body-tracking*, sowie der unmittelbaren Verfügbarkeit, bieten sich die HTC Vive Controller in Kombination mit dem HTC Vive Headset für diese Arbeit am Besten an.

<i>Inertial Sensing</i>	<i>Vision-based Devices</i>	<i>Data Glove</i>
a) Skinput	b) SixthSense	c) Data glove
<i>Head-tracking</i>	<i>Controller-tracking</i>	<i>Treadmill</i>
d) The personal cockpit	e) HTC Vive Controller	f) Cyberith Virtualizer

Tabelle 1: Eingabearten und Beispielsysteme, a) [Harrison et al., 2010], b) [Mistry et al., 2009], c) [Jofre et al., 2016], d) [Ens et al., 2014]

2.1.4 Ergonomie

Ergonomie bedeutet im Kontext dieser Arbeit, die Nützlichkeit eines Interfaces zur Erreichung einer Aufgabe, sowie die Benutzungsfreundlichkeit während der Verwendung eines Interfaces. Ein Interface soll, wenn es ergonomisch entwickelt wird, einem Benutzer helfen, eine Aufgabe einfach, effektiv und mit wenig Aufwand durchführen zu können [Ed and Hutchinson, 2013]. Um z.B. mit virtuellen Objekten oder Umgebungen interagieren zu können, werden u.a. Interfaces benötigt, welche je nach Anwendung unterschiedlich in die 3D-Umgebung eingebunden werden. Dabei sollten nicht nur die Art der Interaktionen, sondern u.a. auch der menschliche Körper mit seinen ergonomischen Möglichkeiten und Limitierungen berücksichtigt werden. Nur somit ist es möglich, Interfaces zu entwickeln, welche komfortabel und effektiv genutzt werden können. Unterschiedliche Interaktionen erfordern unterschiedliche Bewegungen, welche wiederum unterschiedlich komplex und andauernd sein können. Die Interaktionen haben dabei verschiedene stark ausgeprägte Attribute wie Genauigkeit, Geschwindigkeit, Richtung und Dauer. Aufgrund der menschlichen Physiologie können bestimmte Interaktionen länger und präziser oder nur bedingt und umständlich umgesetzt werden, was bei der Implementierung von 3DUIs in VR zu beachten ist [LaViola et al., 2017]. Die menschliche Hand z.B. bietet durch ihre praktikable Ergonomie eine umfangreiche Palette an Einsatzmöglichkeiten.

Darunter das Greifen oder Halten eines Gegenstandes, oder die Möglichkeit Gesten und Posen darzustellen. Ein unangenehmes Maß an Kraft, Dauer und Wiederholung einer Aufgabe, kann sich negativ auf die Erfahrung mit einem System auswirken, gleich wie gut ein Interface entwickelt wurde.

Ein weiterer wichtiger Aspekt in der Gestaltung von 3DUIs unter Berücksichtigung der Ergonomie des Menschen, ist das sogenannte *Gorilla arm syndrome*. Darunter wird das Ermüden der Arme durch lang andauernde und unbequeme Posen verstanden. Interfaces, welche auf Augenhöhe oder sogar darüber platziert sind, begünstigen den Gorilla-Arm Effekt.

Darum sollten Interfaces möglichst niedrig gehalten oder Interaktionen näher an den Körper gebracht werden. Das Greifen eines weit entfernten Objektes könnte bspw. durch eine Pointer-Technik ermöglicht werden, um das Ausstrecken des Armes zu vermeiden [LaViola et al., 2017; Hincapie-Ramos et al., 2014]. Ein weiteres Anzeichen für Ermüdung ist ein Haltungswechsel. Deshalb sollten Posen bevorzugt werden, welche komfortabel und energiesparend durchgeführt werden können und somit, die Bequemlichkeit und Leichtigkeit unterstützen.

Interfaces, welche sich am Arm oder auf der Hand befinden, haben dabei in Studien großen Zuspruch gefunden, da sich Arm- bzw. Handinterfaces ergonomisch günstig anbieten und viel Raum als auch Möglichkeiten für Interaktionen bieten [Harrison and Faste, 2014]. Komfort ist jedoch nicht gewährleistet unter reiner Berücksichtigung der aufgeführten Aspekte. Komfort ist ebenfalls bedingt, durch die Darstellung der Interfaces, bezogen auf Form und Gestalt [LaViola et al., 2017].

2.1.5 3D Benutzungsoberflächen

3DUIs erfahren seit der Alltagstauglichkeit von VR stetig wachsenden Zuspruch und Anwendung. 3DUIs unterscheiden sich in erster Linie von zweidimensionalen UIs durch die gegebenen *degree of freedom* (DOF) [Weiß et al., 2018; Mendes, 2018; LaViola et al., 2017]. Die DOF geben an, inwieweit in einer virtuellen Umgebung mit virtuellen Objekten interagiert werden kann, bzw. wie stark die Operationsvielfalt im virtuellen Raum ausgeprägt ist.

Bei 2DUIs beschränkt sich die Interaktion auf Operationen in x und y Richtung. Das bedeutet, dass 2DUIs wie z.B. ein Dateimanager und dessen Elemente nur in der x und y Richtung positioniert werden können [Kyritsis et al., 2013]. Bei 3DUIs hingegen kommt die Tiefe durch die z-Achse hinzu, wodurch sowohl dreidimensionale Manipulation als auch Rotation ermöglicht werden [Jr et al., 2010]. Die dazugekommene Tiefe kann jedoch auch zu höheren Fehlerraten in der Ausführung von Aufgaben führen, bspw. beim Selektieren eines Objektes, welches sich dicht neben und kaum hinter einem anderen Objekt befindet. Die Bevorzugung von 3DUIs gegenüber 2DUIs hängt demnach von der Anwendung und dessen Kontext ab.

Kyritsis et al. haben bspw. nachgewiesen, dass sich ein 3D-Dateimanager, aufgezeigt in Abbildung 5, in Verbindung mit VR nur anbietet, wenn die Darstellung der Dateien durch große und auffällig eingefärbte Symbole gegeben ist [Kyritsis et al., 2013]. Eine Eigenschaft die 3DUIs gegenüber 2DUIs mit sich bringen, ist die Vielfalt der Darstellung und Interaktion.

So können 3DUIs bspw. frei in der virtuellen Umgebung platziert [Jr et al., 2010], und/oder durch Gesten [LaViola, 2014] gesteuert werden. Die Komplexität von 3DUIs reicht von Interfaces welche sich bei Kopfdrehungen während des Tragens eines HMD mit bewegen, um die Position des 3DUI zu ändern, bis hin zu komplexen Modellierungs- oder Designinteraktionen.

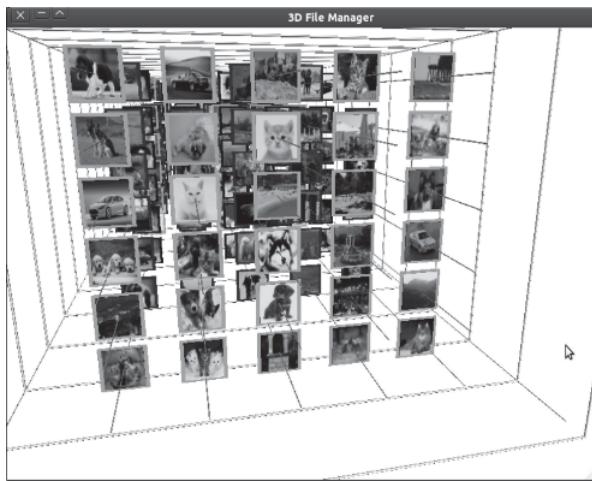


Abbildung 5: 3D Dateimanager [Kyritsis et al., 2013, p. 243]

Mike Alger hat zahlreiche Prototypen mit unterschiedlichen Anwendungszwecken entwickelt, welche den Nutzen von 3DUIs in VR bei Verwendung eines HMD verdeutlichen [Alger, 2015]. Abbildung 6 zeigt einen dieser Prototypen, bei welchem die Verwaltung und Interaktion mit Dokumenten im Vordergrund steht.

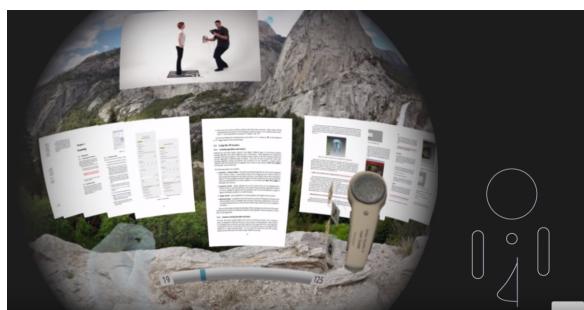


Abbildung 6: 3DUI Prototyp für VR bei Verwendung eines HMD, vgl. [Alger, 2015]

Eingesetzt werden 3DUIs u.a. auch in den Bereichen Videospiele, Unterhaltung, Simulation, Bildung oder der Medizin [LaViola et al., 2017]. Da sich 3DUIs so unterschiedlich komplex und vielfältig im Design ausprägen können, wirken sich die selbigen auch unterschiedlich auf die *user experience* (UX), also die Erfahrung, welche Benutzer bei Verwenden eines Interfaces erlangen, aus [Stuerzlinger and Wingrave, 2011]. Um eine einfache und positive Nutzung von 3DUIs sicherstellen zu können, haben Burmester et

al. bspw. Interaktionsmuster definiert, welche einen Standard in der Entwicklung von dreidimensionalen Interfaces, u.a. auch für VR-Anwendungen bieten sollen. Die definierten Interaktionsmuster sind weiterhin in Entwicklung und werden an technologische Gegebenheiten und Neuerungen wenn nötig angepasst [Burmester et al., 2018].

2.1.6 Körperbasierte Interfaces

Body-based Interfaces (BIs) versuchen sowohl die Ein- als auch die Ausgabe von Informationen über den menschlichen Körper zu bewerkstelligen [Harrison and Faste, 2014]. Das Ziel ist, den menschlichen Körper so zu instrumentalisieren, sodass keine externen Geräte mehr wie z.B. Smartphones benötigt werden, um Daten verarbeiten, Anwendungen nutzen oder mit anderen Menschen global kommunizieren zu können [Harrison et al., 2010]. Berücksichtigt werden sollte dabei nicht nur die Ergonomie, sondern auch die Nutzergruppe, für die ein BI entwickelt wird. Harrison and Faste haben dazu herausgefunden, dass bestimmte Positionen für körperbasierte Interfaces von Frauen und Männern unterschiedlich streng empfunden wurden. Für die anwesenden Frauen z.B. , war ein Interface im Schulter- oder Oberarmbereich unvorstellbar, da es zu privat oder unangenehm wäre. Allgemein akzeptabel und angenehm, war bei dem Experiment wiederum der Unterarm- und Handbereich [Harrison and Faste, 2014]. Durch die emotionale Verbundenheit zum eigenen Körper ist es möglich, verschiedenste Arten von körperbasierten Interfaces anzuwenden und zu entwickeln. Die Vielfältigkeit zeigt sich anhand der folgenden Beispiele. Skinput ist ein BI, welches die durch den Körper geleiteten Impulse eines Fingerschlages aufzeichnet und interpretiert.

Je nach Stärke und Dauer eines Impulses, können unterschiedliche Aktionen durchgeführt werden [Harrison et al., 2010]. OmniTouch von Harrison et al., zu sehen in Abbildung 7, nutzt eine Microsoft Kinect als Tiefenkamera sowie einen Projektor welche auf der Schulter des Benutzers befestigt werden, um Interfaces ausgehend von der Position des Trägers, beliebig auf Hände und Arme zu projizieren. Die Finger des Trägers werden dabei aufgezeichnet. Durch Gesten oder simple Berührungen auf dem BI können Benutzer z.B. Objekte skalieren oder zeichnen [Harrison et al., 2011].

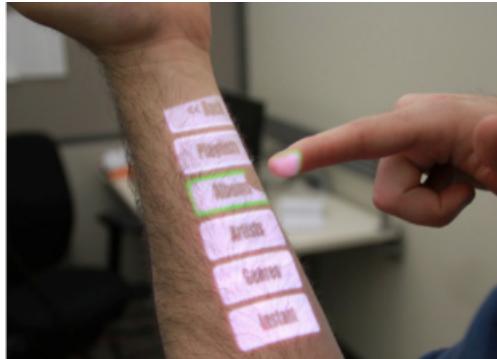


Abbildung 7: Anwendung von OmniTouch [Harrison et al., 2011, p. 446]

Ein weiteres Beispiel stellt PalmRC dar. Bei PalmRC wird die Handfläche eines Menschen zum Eingabegerät für Aktionen mit einem TV-Gerät. Die Handfläche besitzt dabei imaginäre Markierungen, an die diverse Funktionen gekoppelt sind, bspw. das Umschalten eines Programmes oder das Hoch- und Runterscrollen durch die Senderliste [Dezfuli et al., 2012]. BIs haben durch die Verbundenheit zum eigenen Körper den Vorteil, leicht bedienbar und einprägsam zu sein. Ein statisches Interface kann somit einfach erlernt und sogar mit geschlossenen Augen und ausreichender Übung bedient werden [Harrison and Faste, 2014].

2.1.7 Anforderungen aus Grundlagen

Aus den aufgeführten Fakten der vorhergegangenen Kapitel, erschließen sich die Anforderungen aufgelistet in Tabelle 2, welche beim Design- und Entwicklungsprozess zusätzlich berücksichtigt werden.

Sensorisches Feedback für Aktionen wie Selektion bieten
Zweihändige Gesten vermeiden
Interface auf Unterarm oder Hand platzieren
Ruheposen zur Erholung bereitstellen
Interaktionsmuster in Designphase berücksichtigen

Tabelle 2: Anforderungen aus vorangegangenen Kapiteln

2.2 Hinführung zum Konzept

In diesem Kapitel wird näher auf die Aspekte eingegangen, welche sowohl für die Entwicklung der Anwendung als auch für das Interface relevant sind. Zunächst folgen Anforderungen, welche sowohl für das Interface als auch für die Anwendung gestellt werden. Anschließend werden Richtlinien aufgelistet, welche bei der Entwicklung des Interfaces berücksichtigt werden.

Danach folgt ein Abschnitt über die Wahl der Position des Interfaces.

Dabei wird näher darauf eingegangen, welche Vorteile der menschliche Arm mit sich bringt, und warum sich speziell der Unterarm im Kontext dieser Arbeit als beste Wahl für ein Interface anbietet. Im Anschluss daran folgen Konzepte von bereits etablierten Designs, sowie Beschreibungen, weshalb ein Design für eine Anwendung mit Modellierungsansatz und körperbasierter Eingabe in VR geeignet oder nicht geeignet ist. Abschließend wird das finale Konzept für den Prototypen aufgezeigt und beschrieben.

2.2.1 Anwendungsanforderungen

Aus dem Kontext der Arbeit, den aufgeführten ergonomischen Einschränkungen und dem Austausch mit Experten des Fraunhofer IAO in Stuttgart, sind Anforderungen für die zu entwickelnde Anwendung entstanden, welche in Tabelle 3 aufgelistet sind.

1.	Primitive Körper wie Würfel und Kugeln können erstellt und gelöscht werden
2.	Einzelne Objekte sind selektierbar
3.	Erstellte Objekte können in Position, Rotation und Größe manipuliert werden
4.	Der Benutzer bekommt Informationen zur Benutzung von Funktionen
5.	Die Rotation und Translation eines selektierten Objektes ist durch eine einhändige Geste möglich
6.	Selektierte Objekte können deseletiert werden
7.	Die Anwendung kann vom Benutzer beendet werden

Tabelle 3: Anwendungsanforderungen

2.2.2 Richtlinien

Bei der Entwicklung von 3DUIs können diverse Richtlinien und Vorgaben beachtet werden, welche für eine positive UX bei der Verwendung des zu entwickelnden Interfaces sorgen sollen [Burmester et al., 2018].

Die Richtlinien und Vorgaben beziehen sich dabei u.a. auf ergonomische Gegebenheiten, als auch auf technische und andere äußere Faktoren.

Ein wichtiger Punkt für die Verwendung von Interfaces durch Gesten und Touch, ist die Komplexität und Natürlichkeit der Interaktionen [Mendes, 2018]. Funktionen wie Selektion oder Objektmanipulation sollten einfach und natürlich gestaltet sein. Das Greifen eines Objektes in der Realität kann z.B. demnach exakt in VR nachgestellt werden, um die Immersion zu erhöhen. Ebenfalls sollten die DOF so weit wie möglich, wenn möglich, reduziert werden, um die Fehlerrate zu verringern und einer Überforderung vorzubeugen. Auch *bi-manual interactions*, also zweihändige Interaktionen, sollten aufgrund der eventuellen Komplexität vermieden werden, da dadurch der Gorilla-Arm Effekt, in Kapitel 2.1.4 bereits erläutert,

gefördert wird [Mendes, 2018]. Funktionen, welche auf dem Arm der nicht dominierenden Hand platziert werden, sollten nach Stuerzlinger und Wingrave so angebracht werden, sodass andere Funktionen weder geschnitten noch überlagert werden [Stuerzlinger and Wingrave, 2011]. Auch sollten nach Stuerzlinger et al. schwebende Objekte an andere Objekte befestigt werden, sodass ein natürliches Gefühl für die Elemente entsteht. Für die Selektion und Manipulation von Objekten im virtuellen Raum, sollte außerdem die Überdeckung und Tiefenwahrnehmung berücksichtigt werden.

Objekte welche so weit vom Benutzer entfernt sind, sodass ein simples Greifen nicht mehr ausreicht, sollten durch Techniken wie Pointer oder *ray-casting* selektier- und manipulierbar gemacht werden [Jr et al., 2010]. Für die Rotation von Objekten, bedarf es einer Lösung, welche das Handgelenk kaum belastet und die Ergonomie des selbigen berücksichtigt. Ebenso wichtig ist die Entfernung von Funktionen und Interaktionsmöglichkeiten vom Benutzer zum Interface. Weit entfernte Elemente verursachen Zittern und Ungenauigkeit, wodurch die Fehlerrate erhöht und eine negative Erfahrung in der Benutzung mit dem Interface und der Anwendung erlangt wird [Jr et al., 2010]. Des Weiteren sollten nach Riecke et al. klammernde oder packende Gesten vermieden und eher auf einhändige, simple Gesten gesetzt werden [Riecke et al., 2018]. Jedoch gilt es nicht nur das Interface und die Interaktionen so einfach wie möglich zu halten, sondern auch die Umgebung. Wichtig hierbei ist das Feedback bei der Verwendung von 3DUIs [LaViola et al., 2017]. Das temporäre und dreidimensionale Feedback sollten dabei übereinstimmend sein, sprich die Bewegungen des Benutzers in der virtuellen

Umgebung sind auf die natürlichen Bewegungen des Benutzers in der Realität abgestimmt, um ein positives Nutzererlebnis herzustellen und aufrechtzuerhalten. Zusätzlich in Betracht gezogen werden kann die Textur und der Stil des Interfaces. Je echter und hochwertiger das Interface gestaltet ist, desto mehr wird von der Interaktion und der Anwendung erwartet. Ein gezeichneter oder Karikatur ähnlicher Stil ist bei simplen Anwendungen zu bevorzugen, da sowohl das Erlernen als auch das Verstehen des Interfaces dadurch erleichtert wird [LaViola et al., 2017].

2.2.3 Interfacepositionierung

Die Position eines Interfaces ist mitunter ausschlaggebend, ob eine Anwendung komfortabel und praktisch benutzt werden kann. Aufgrund der bereits beschriebenen ergonomischen Gegebenheiten und dem Hintergrund, dass das Interface in einem Modellierungskontext verwendet werden soll, konnten diverse Positionen und Umsetzungen von vornherein ausgeschlossen werden. Die zusätzliche Dimension, welche durch 3D hinzu kommt, bringt zwar Probleme wie Überdeckung oder falsche Tiefeneinschätzung mit sich, wirkt sich jedoch positiv auf die Immersion aus und bietet gerade aufgrund der zusätzlichen Tiefe, neue Möglichkeiten für Interaktionen [Stuerzlinger and Wingrave, 2011]. Die Arme haben sich als praktisches Mittel in der Arbeit mit VR erwiesen, da durch die horizontale Ausdehnung genügend Platz für diverse Funktionen vorhanden ist [Harrison et al., 2010]. Außerdem sind Arme gut beweglich und benötigen keine unbequemen Bewegungen um anvisiert werden zu können, was während der Benutzung eines HMD aufgrund der eingeschränkten FOV wichtig ist. Auch aufgrund von zweihändigen Funktionen, bietet sich der Unterarm für ein Interface an. Die nicht dominierende Hand kann dabei die Funktionen visualisieren, während die andere Hand die Funktionen selektiert und verwendet. Die Präzision wird durch die körperbasierte Lösung ebenfalls erhöht, da das Ausstrecken und Heben der Arme, um mit einem Interface interagieren zu können, nicht mehr notwendig ist. Zittern und Verzerrung, was zu ungenauen Eingaben führt, sowie die Ermüdung der Arme fällt damit weg [LaViola et al., 2017; Jr et al., 2010; Hincapie-Ramos et al., 2014]. Auch kann das körperbasierte Interface durch die Nähe zum eigenen Körper, recht große und eindeutige Elemente enthalten, welche die Menünavigation erleichtern können [Stuerzlinger and Wingrave, 2011]. Des Weiteren können durch das Arm-Interface die dazugehörigen Elemente so platziert werden, dass kein Element ein anderes überdeckt. Aktivierte Funktionen blenden nicht benötigte Funktionen aus, oder erweitern ihren Kontext durch Anordnung der Unterlemente in andere Richtungen, sodass andere Funktionen sichtbar bleiben [Harrison and Faste, 2014].

Aufgrunddessen dass in der Realität fliegende oder schwebende Objekte an einem anderen Objekt befestigt sind, bieten sich die Arme als Interfaceposition an, da somit eine Immersion der Verbindung zur Hand und zum eigenen Körper aufgebaut wird [Stuerzlinger and Wingrave, 2011].

Durch die Verbindung zum eigenen Körper ist es durchaus möglich, nach einer gewissen Zeit an Übung, das Interface auch blind bedienen zu können [LaViola et al., 2017].

2.2.4 Verwandte Ideen und Konzepte

Die folgenden Designideen für das Interface unterscheiden sich sowohl in Form als auch in Komplexität, auf welche jeweils eingegangen wird.

Für diese Arbeit war es wichtig, ein Interface zu entwickeln, welches durch direkte Eingabemechanismen wie Touch bedient werden kann. Somit konnten Ansätze für Pointer-Techniken in der Designphase ausgeschlossen werden.

3D Wheel picker

Die erste Idee war ein nach Ehrlich sogenannter *wheelpicker*, zu sehen in Abbildung 8. Beim *wheelpicker* werden die verfügbaren Interaktionen auf einem Wheel, sprich einem runden Körper platziert. Der *wheelpicker* kann beliebig breit gestaltet werden. Die Funktionen können durch eine simple Rotation des Armes visualisiert oder auch je nach Winkel und gewünschter Funktionalität deaktiviert werden [Ehrlich, 2017].



Abbildung 8: Wheelpicker-Modell nach [Ehrlich, 2017, p. 33]

Nachteil des Wheelpicker-Ansatzes ist jedoch die Bedienung. Das blinde Bedienen des *wheelpicker* wird durch die zusätzlich benötigte Rotation des Armes erschwert. Der Ansatz des Deaktivierens von Funktionen welche nicht im korrekten Winkel liegen, kann die blinde Bedienung zusätzlich erschweren.

Auch kann die Nichtsichtbarkeit von Bedienelementen aufgrund der Rotation des Armes die Bedienung erschweren [LaViola et al., 2017]. Ebenfalls kann es aufgrund der Anbringung der Funktionen zu Überdeckungen während der Bedienung kommen, zu sehen in Abbildung 9.

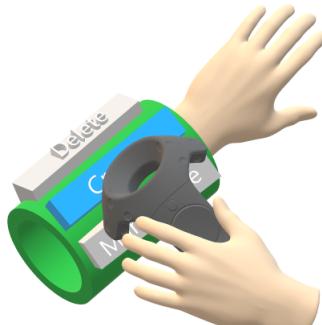


Abbildung 9: Interaktion mit Wheelpicker-Modell
nach [Ehrlich, 2017, p. 33]

Pie menu

Eine weitere Idee war ein an von LaViola et al. angelehntes *radial-* bzw. so genanntes *pie menu*, visualisiert in Abbildung 10. Das *pie menu* ist ein kreisförmiges Interface, bei dem die Elemente in gleichmäßigen Abständen nebeneinander platziert werden. Das *pie menu* ist im Vergleich zum *wheelpicker* ein 2D-Modell und bietet dadurch keine Tiefe [LaViola et al., 2017].



Abbildung 10: Pie-Modell nach [Ehrlich, 2017, p. 10]

Beim *pie menu* wird auch keine Rotation benötigt, um versteckte Funktionen sichtbar zu machen. Somit wird das Erlernen des Interfaces und die damit verbundene blinde Bedienung gegenüber dem *wheelpicker* erleichtert.

Nachteil des *pie menu* ist wiederum die Überdeckung sowie die Anbringung der Elemente auf unterschiedlicher Höhe und Breite, was eine erhöhte Lernkurve zur Folge hat.

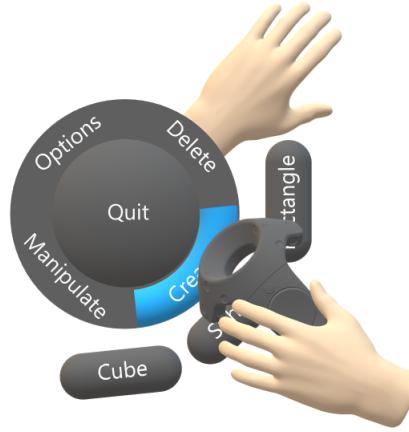


Abbildung 11: Interaktion und Erweiterung des Pie-Modells nach [Ehrlich, 2017, p. 10]

3D button menu

Auf Grundlage des *pie menu* entstand der dritte Entwurf, zu sehen in Abbildung 12. Das *3d button menu* unterscheidet sich nur leicht vom *pie menu*, bietet jedoch eine bessere Sichtbarkeit und einheitlich große Elemente.

Auch bei diesem Modell entsteht teilweise Überdeckung. Aufgrund der Zweidimensionalität der Elemente fehlt auch hier die Tiefe, was die Bedienung des Interfaces erleichtert [LaViola et al., 2017]. Die Erweiterung gestaltet sich beim Kugel-Modell jedoch als schwierig, da eingeschlossene Elemente existieren, welche bei Erweiterung noch mehr Bedienelemente überdecken und das Interface überladen.

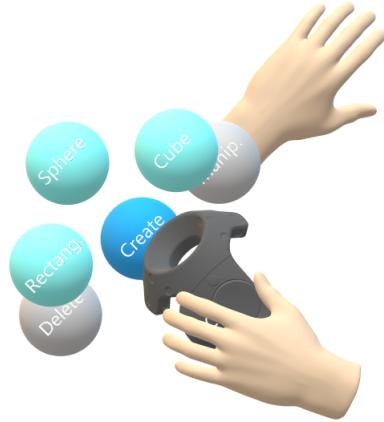


Abbildung 12: Interaktion und Erweiterung des *3d button menu* nach [Ehrlich, 2017, p. 36-37]

Kachel-Modell

Das bekannte Kachel-Modell von Microsoft wurde ebenfalls in Betracht gezogen, zu sehen in Abbildung 13. Das Kachel-Modell besteht ausschließlich aus zweidimensionalen Rechtecken, und bietet wie das *pie menu* oder das Kugel-Modell keine Tiefe. Vorteilhaft hierbei ist wiederum die simple Anordnung der Elemente. Die Kacheln werden über-, unter oder nebeneinander angeordnet und besitzen alle die gleichen Maße. Die Erweiterung des Kachel-Modells gestaltet sich in der hier beschriebenen Visualisierung schwierig, da ebenfalls wie beim Kugel-Modell eingeschlossene Elemente existieren, welche bei Erweiterung andere Elemente überdecken könnten.

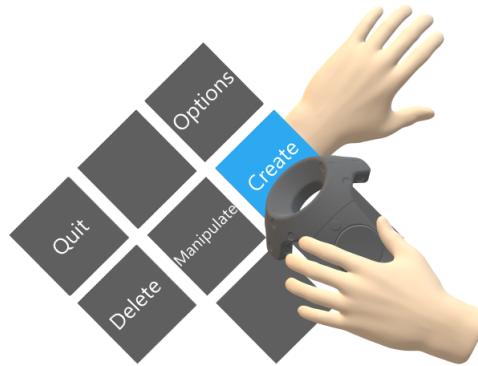


Abbildung 13: Interaktion mit Kachel-Modell

Tabelle 4 listet die Merkmale und Eigenschaften der genannten Designs zusammengefasst auf.

Designtyp	Eigenschaften und Merkmale
<i>3d wheel picker</i>	Deaktivierung nicht relevanter Funktionen durch Rotation, Tiefe und Rotation erschweren blinde Bedienung, Überdeckung durch Tiefe
<i>pie menu</i>	Keine Tiefe, Keine Rotation, Verdeckung, unterschiedliche Höhen und Breiten der Elemente
<i>3d button menu</i>	Einheitliche Elemente, Keine Tiefe, Überdeckung, eingeschlossene Elemente, Überladung
Kachel-Model	Keine Tiefe, einheitliche Elemente, Eingeschlossene Elemente, Überdeckung

Tabelle 4: Eigenschaften und Merkmale verwandter Interface-Designs

Ein qualitativ hochwertiger Prototyp für ein Unterarm-Interface für VR, ist das vom YouTube-Kanal "CorvidDude" veröffentlichte Konzept, zu sehen in Abbildung 14. Das von CorvidDude entwickelte System, bietet Gestenerkennung, sowie ein an einen 3D *Wheel picker* angelehntes Interface.

Bei CorvidDude's Interface werden die UI-Elemente neben- und untereinander angebracht und können durch direkte Interaktion bedient werden [CorvidDude, 2018].



Abbildung 14: Unterarm Prototyp für VR mit Gestenerkennung, vgl. [CorvidDude, 2018]

2.2.5 Interfaceanforderungen

Aus den vorangegangenen Richtlinien, Vorzügen der Positionierung und den Eigenschaften und Merkmale der verwandten Designs, entstanden die in Tabelle 5 aufgelisteten Anforderungen für die Gestaltung des prototypischen Interfaces.

1.	Die Bedienung des Interfaces bezieht den eigenen Körper mit ein
2.	Das Interface kommt ohne Scrollen oder zusätzliche Rotationsmechanismen aus
3.	Die Interface-Elemente sind zweidimensional und einheitlich gestaltet
4.	Es werden keine Elemente eingeschlossen die schwer zu erweitern sind
5.	Die Erweiterung einer Funktion überdeckt keine anderen Funktionen
6.	Es werden auffällige Farben für selektierte, aktivierte und erweiterte Funktionen verwendet
7.	Der Benutzer erhält unterstützendes Feedback wenn das Interface blind bedient wird
8.	Funktionen, welche nicht zur Interaktion mit virtuellen Objekten gedacht sind, unterscheiden sich in beliebiger Weise von den interaktiven Funktionen

Tabelle 5: Interfaceanforderungen

2.2.6 Finales Interfacekonzept

Der folgende Entwurf repräsentiert das finale Konzept für den zu entwickelnden Prototypen. Auf Grundlage der festgelegten Anforderungen und Richtlinien sowie des vorher beschriebenen Kachel-Modells und dessen Vorteile, entstand die Idee eines Designs, welches für weniger Überdeckung und Überladung sorgen soll. Dem in Abbildung 15 visualisierten Interface wird der Name *decision menu* gegeben, da es einer Auswahl bekannt von Fragebögen oder Computer-Abfragen ähnelt, bei welchen die Auswahlmöglichkeiten unter- bzw. nebeneinander platziert werden. Das *decision menu* besteht wie das Kachel-Modell aus zweidimensionalen Bedienelementen, welche jedoch in der ersten Ebene nur nebeneinander angeordnet werden und somit Komplexität reduzieren.

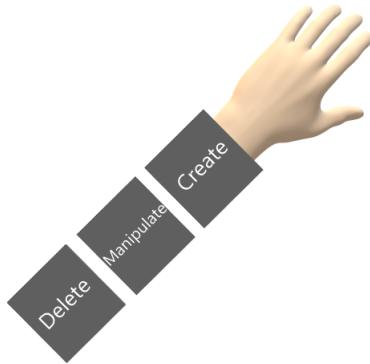


Abbildung 15: Finales Konzept *decision menu*

Überdeckung findet aufgrund der horizontalen Ausrichtung der Elemente verringert statt. Die Erweiterung des *decision menu* gestaltet sich leichter als bei den vorherigen Entwürfen, da es keine eingeschlossenen Elemente mehr gibt. Die Erweiterung der Funktionen wird durch Über- bzw. Unterordnung der neuen Elemente gelöst. Dadurch werden keine anderen Funktionen überdeckt und bleiben auch bei Erweiterung einer Funktion komplett sichtbar. Die Bedienung wird beim *decision menu* nicht nur durch die Kacheloptik, sondern auch durch die simple Positionierung derselbigen erleichtert. Eine blinde Bedienung ist somit einfacher als bei den vorherigen Modellen, da sowohl Überdeckung als auch Überladung geringer sind.

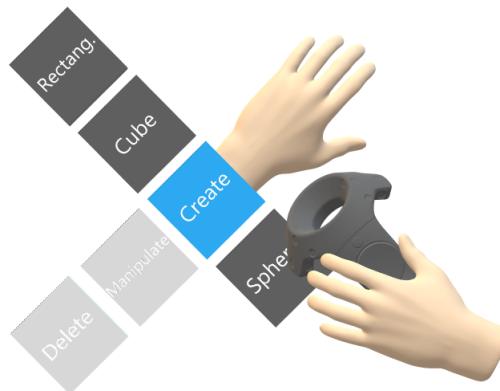


Abbildung 16: Erweiterung des *decision menu*

Funktionen welche keine Auswirkungen auf die virtuell platzierten Objekte haben oder damit nicht in Zusammenhang stehen, werden an der Unterseite des Armes platziert. Dadurch wird die Oberseite entlastet und einer ungewollten Fehlauswahl vorgebeugt.

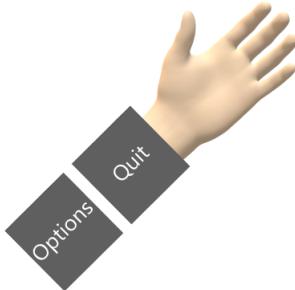


Abbildung 17: Platzierung anwendungsspezifischer Funktionen

2.3 Implementation

Dieses Kapitel beschreibt die Umsetzung des Prototypen und der dazugehörigen Anwendung. Zunächst werden die Tools und Frameworks erläutert, welche für die Implementation der Funktionen und Umgebung zu Hilfe genommen werden. Anschließend wird die praktische Realisierung in Textform zusammengefasst wiedergegeben. Dabei wird auf Probleme und besondere Ereignisse oder Hindernisse näher eingegangen.

2.3.1 Verwendete Frameworks und Tools

Zur Entwicklung der VR-Anwendung und des dazugehörigen körperbasierten Interfaces, werden diverse Programme verwendet, die sowohl VR-Unterstützung als auch nützliche Extras bieten. Unity vom Unternehmen *Unity Technologies*, dient als Spiel-Engine und Entwicklungsumgebung. Verwendet wird dabei die Version 2018.3.11f1. Zum Schreiben des benötigten Codes wird Microsoft's Visual Studio Code verwendet. Für die Codeerkennung von Unity wird eine dementsprechende Erweiterung in Visual Studio Code integriert. Zur Benutzung des Vive Headsets sowie der Vive Controller und Vive Kameras, wird das Tool SteamVR [Valve Corporation, 2014] in Unity importiert. SteamVR ist ausgestattet mit zahlreichen vordefinierten Funktionen und Möglichkeiten, mit VR-Hardware interagieren und VR-Anwendungen entwickeln zu können. Um das Gefühl für den eigenen Körper in VR zu

erhöhen und damit die Qualität der Immersion zu verbessern, wird die Unity-Erweiterung FinalIK [RootMotion, 2014] verwendet. FinalIK nutzt u.a. die Vive Hardware und erfasst die Beschaffenheit des Körpers des Trägers und kann dadurch eine vollständige virtuelle Kopie des Trägers und seiner Bewegungen im virtuellen Raum simulieren. Dadurch ist ein qualitativ hochwertiges Abbilden des Interfaces auf den Körper des Benutzers möglich.

2.3.2 Umsetzung

Die Umsetzung setzt sich zusammen aus Elementen, welche die Anwendung und dessen Gestaltung betreffen, als auch aus Elementen speziell für das Interface und die damit verbundenen Interaktionen. Zunächst wird die virtuelle Umgebung beschrieben, in welcher das Interface benutzt werden kann. Anschließend folgen Erläuterungen zur Implementation des Interfaces und der damit verbundenen Interaktion als auch Beschreibungen der Interface-Funktionen und der Benutzung der selbigen.

Anwendung

Die Anwendung ist schlicht und praktikabel gestaltet, da der Fokus dieser Arbeit auf dem Interface und der Verwendung dessen liegt. Die Umgebung besteht aus einem viereckigen Raum ohne Decke, dadurch soll sich der Benutzer nicht eingeengt fühlen und Platz nach oben für Manipulationen haben. Der Boden des Raumes wird mit einer Teleportations-Komponente versehen. Dadurch kann sich ein Benutzer bei Verwendung der entsprechenden Funktion, im Raum an beliebige Positionen und fest im Raum platzierte Teleportationspunkte teleportieren, um mit Objekten zu interagieren oder die Umgebung aus einem anderen Blickwinkel betrachten zu können. Jede Wand wird mit einer Kollidierungs-Komponente versehen. Somit kann der Benutzer nicht ungewollt aus dem Raum fallen. Der Boden und die Wände besitzen schlichte, unauffällige Texturen, sodass sich der Raum nicht ungewöhnlich oder fremd anfühlt. Auch alle erstellbaren Objekte besitzen Texturen.

Die Texturen der primitiven Körper bestehen jedoch ausschließlich aus einfachen Farben wie rot, grün oder blau. Die Texturen der Objekte werden bewusst in den RGB-Farben gehalten, um die Objekte unterscheiden zu können und die Objekte für jeden subjektiven Kontext passend zu machen. Das Modell des Benutzers ist eine von FinalIK mitgelieferte Vorlage, welche an einen Crashtest-Dummy angelehnt ist.

Das Modell nimmt dadurch keine geschlechterspezifische Rolle an, was für eine positive Benutzererfahrung bei allen Geschlechtern sorgen soll.

Das Modell wird mit einer hautähnlichen Farbe versehen, um ein natürlicheres Gefühl bei der Verwendung und Interaktion mit dem Modell herzustellen.

Interface

Das Interface wird am nicht dominanten Arm des Dummy-Modells angebracht. Durch das FinalIK-Plugin können dem Dummy-Modell sogenannte *Bones* und Kalibrierungs-Komponenten zugeordnet werden. Somit kann das Dummy-Modell an den Körper eines Benutzers angepasst werden, um für eine größere Immersion und genauere Eingaben sowie Bewegungen zu sorgen. Der Arm teilt sich somit in mehrere *Bones* auf, welche bei der Positionierung und Fixierung des Interfaces hilfreich sind. Das Interface selbst besteht aus einem *Canvas*, welches im *WorldSpace* platziert wurde.

Durch die *WorldSpace* Einstellung, wird die Anbringung am Arm des Benutzers erst möglich, da ein im *ScreenSpace* platziertes Interface direkt vor einer Kamera platziert wird und im dreidimensionalen Raum nicht frei beweglich ist, was für diese Arbeit jedoch wichtig ist. Die Rotation und Translation des Interfaces wird hauptsächlich durch das Modell und die zugeordneten *Bones* sowie ein Rotationsskript von FinalIK geregelt. Da das Interface jedoch bei ausschließlicher Verwendung der FinalIK-Komponenten noch nicht am Arm fixiert ist und sich mit dem Arm auch noch nicht mitdreht, wird ein zusätzliches selbstgeschriebenes Skript eingebaut, welches das Interface am Arm fixiert und abhängig von der Hand-Rotation mitdreht.

Auf der ersten Ebene, welche sich auf der oberen Seite des Unterarms befindet, werden die objektspezifischen Funktionen angebracht. Darunter die Funktionen zur Manipulation und Erstellung von Objekten, in der Anwendung *Manipulate* und *Create* genannt. Die englische Sprache wird für alle Interaktionen, Hinweise und Bezeichnungen verwendet, um die Anwendung international einsetzbar zu machen. Die objektspezifischen Funktionen der ersten Ebene werden nebeneinander angebracht und erstrecken sich somit auf der horizontalen Achse des Armes des Dummy-Modells.

Die zweite Ebene der objektspezifischen Funktionen, erstreckt sich auf der vertikalen Achse des Armes. Das bedeutet, dass erweiterte Funktionen über oder unter den Funktionen der ersten Ebene angebracht sind, ohne die erste Ebene zu verdecken. Zur Erweiterung der Manipulationsfunktion gehören die Standard-Manipulationen *Translate*, *Rotate* und *Scale*, auf welche später in diesem Kapitel eingegangen wird. Die Erweiterung der *Create*-Funktion umfasst die drei primitiven Körper Würfel, Kugel und Zylinder.

Anwendungsspezifische Funktionen bzw. Funktionen ohne weitere Kategorisierung, werden auf der unteren Seite des Unterarms des Dummy-Modells

angebracht. Dadurch soll der Fokus der Interaktion auf die Objekte verstärkt werden und die Komplexität und Bedienung des Interfaces verringert und erleichtert werden. Zu den nicht kategorisierten bzw. anwendungsspezifischen Funktionen gehört das Löschen von Objekten, in der Anwendung *Delete* genannt, und das Beenden der Anwendung, in der Anwendung mit *Quit* tituliert. Die *Quit*-Funktion befindet sich bewusst weiter hinten am Unterarm, um die Wahrscheinlichkeit eines versehentlichen Schließens der Anwendung zu verringern. Zusätzliche oder neue Funktionen können beliebig auf den Achsen auf der Ober- oder Unterseite des Armes platziert werden, wenn die Ebenen und deren Bedeutung berücksichtigt wird.

Die erste Ebene symbolisiert Obermenüs, wohingegen die zweite Ebene Untermenüs bzw. Funktionen ohne weitere Unterkategorien darstellt.

Aufgeklappte, aktive und markierte Funktionen werden farblich hervorgehoben, um ein visuelles Feedback bei der Bedienung des Interfaces zurückzugeben. Nach Vos reagieren Menschen besonders auf gelbe oder grüne sowie auf helle Farben [Vos, 1978]. Daraus resultieren die vergebenen Farben für die verschiedenen visuellen Feedbacks bei der Verwendung des Interfaces, zu sehen in Abbildung 18. Aufgeklappte Funktionen werden demnach türkis dargestellt, aktivierte Funktionen gelb und markierte Funktionen hellblau. Die Standardfarbe für alle Funktionen ist weiß.

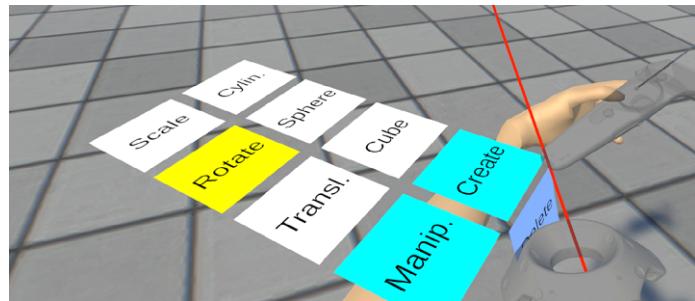


Abbildung 18: Interfaceimplementation

Funktionen

In diesem Abschnitt werden die Interface- und Anwendungsfunktionen und deren Benutzung näher erläutert. Dabei wird der Zweck jeder Funktion beschrieben und die Verwendung und Auswirkung verdeutlicht. Um die Bedienung der Controller besser zu verstehen dient Abbildung 19, welche die verschiedenen Buttons visualisiert.



Abbildung 19: Vive Controller mit Bezeichner

Die Teleportation des Benutzers wird durch eine Touchpad-Funktion ermöglicht. Dazu wird das Touchpad des rechten Controllers gedrückt und gehalten, und anschließend ein beliebiger Punkt im Raum anvisiert. Die Teleportation wird durch eine gestrichelte Kurve und einen Auftreffpunkt repräsentiert, wie in Abbildung 20 zu sehen. Nach Loslassen des Touchpad-Buttons wird der Benutzer zum ausgewählten Ort teleportiert.

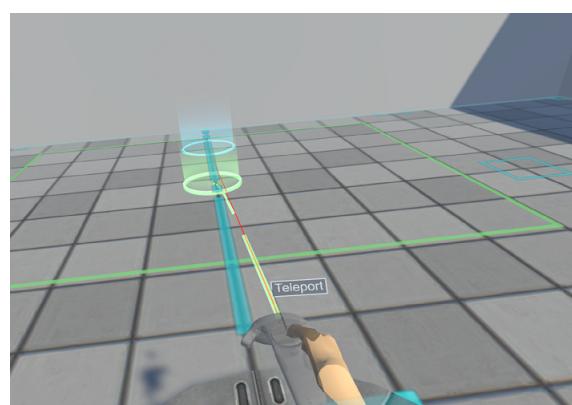


Abbildung 20: Teleportationsfunktion

Objekte werden durch das Markieren eines Körper-Buttons und anschließendes Drücken des Trigger-Buttons des rechten Controllers erstellt und in der Mitte des Raumes platziert.

Um ein Objekt zu (de-)selektieren, wird eine Laserpointer-Technik verwendet. Dadurch kann auch mit weiter entfernten Objekten gearbeitet werden, ohne in deren unmittelbarer Nähe sein zu müssen. Der Laserpointer wird am rechten Controller angebracht und besitzt zwei Farben, welche den aktuellen Status des Laserpointers darstellen. Die Nichtverwendung wird durch einen roten, die Aktivierung durch einen blauen Strahl repräsentiert.

Wird der Trigger-Button des rechten Controllers gedrückt, während ein selektierbares Objekt anvisiert wird, so wird das Objekt ausgewählt und gelb eingefärbt, um die Selektion, visualisiert in Abbildung 21, zu bestätigen.

Die Deselektion wird durch erneutes Drücken des Trigger-Buttons ausgeführt.

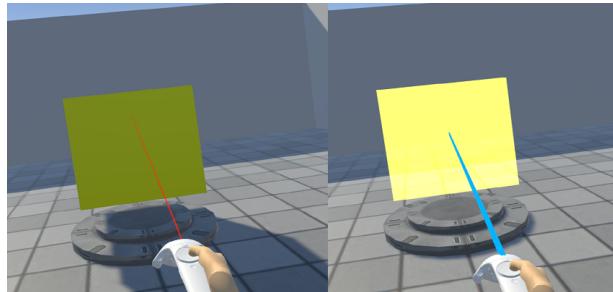


Abbildung 21: Markieren und Selektieren eines Würfels

Die Translation von selektierten Objekten, zu sehen in Abbildung 22, setzt die Aktivierung der Translations-Funktion voraus. Ist die Funktion aktiviert, so kann ein Objekt durch das Drücken und Halten des linken Grip-Buttons frei im Raum bewegt werden. Wird der Grip-Button losgelassen so verweilt das Objekt an der zuletzt erreichten Position.

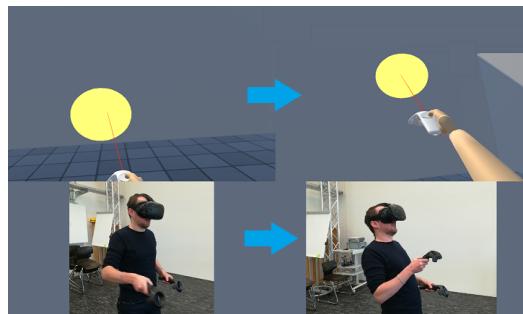


Abbildung 22: Verwendung der Translationsfunktion

Eine Rotation setzt ebenfalls eine Aktivierung der Funktion voraus, als auch ein selektiertes Objekt. Sind beide Voraussetzungen gegeben, kann ein Objekt wie in Abbildung 23 durch Drücken und Halten des linken Grip-Buttons am rechten Controller sowie eine beliebige Rotationsrichtung rotiert werden.

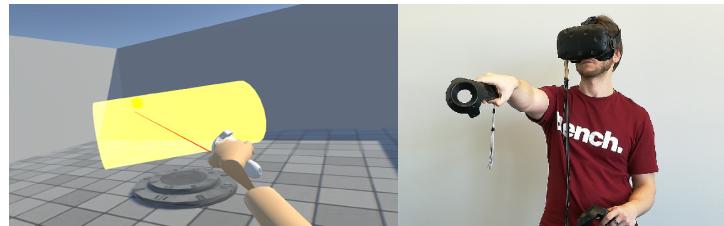


Abbildung 23: Rotieren eines Objektes

Die Skalierung ist in dieser Arbeit die einzige Funktion, die eine zweihändige Geste voraussetzt. Nach Aktivierung der Funktion und Auswählen eines Objektes kann ein Objekt skaliert werden, indem der rechte Grip-Button des linken und der linke Grip-Button des rechten Controllers gedrückt und gehalten werden, und die Controller voneinander weg oder zueinander hin bewegt werden. Die Skalierungs-Geste entspricht der Vergrößern-Verkleinern-Geste, bekannt aus der Verwendung eines Smartphones. Abbildung 24 verdeutlicht die Funktionsweise.

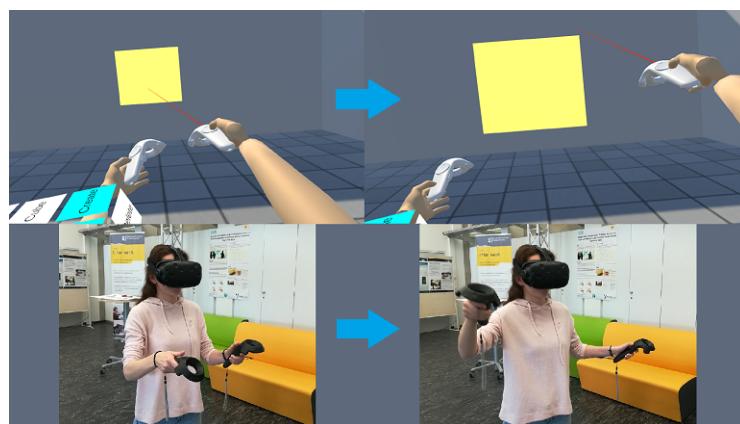


Abbildung 24: Verwendung der Skalierungsfunktion

Das Löschen von Objekten, setzt ein ausgewähltes Objekt voraus. Eine Markierung und anschließende Aktivierung durch den Trigger-Button des rechten Controllers löscht das ausgewählte Objekt und hebt die Auswahl auf.

Der Benutzer hat die Möglichkeit die Anwendung jederzeit zu beenden. Dazu wird der Quit-Button markiert und mit Drücken des Trigger-Buttons des rechten Controllers bestätigt. Der Benutzer gelangt daraufhin ins Steam-VR-Hauptmenü zurück.

Um das Interface blind bedienen zu können, wird eine Technik verwendet, welche den aktuellen Sichtbereich des Benutzers speichert und überprüft, ob eine Funktion momentan markiert, aber nicht zu sehen ist. Ist eine Funktion markiert aber nicht sichtbar, so wird der Titel des markierten Buttons wie in Abbildung 25 vor der virtuellen Kamera angezeigt.

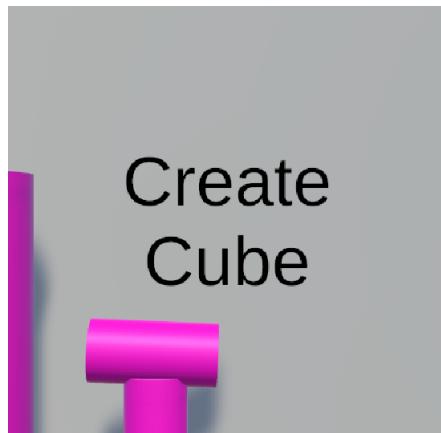


Abbildung 25: Einblendung eines Funktionstitels bei blinder Bedienung

2.3.3 Probleme und Hindernisse

Bei der Entwicklung und Implementation des Interfaces als auch der damit verbundenen Funktionen, kommt es regelmäßig zu Verzögerungen.

Aufgrund der unterschiedlichen Komplexität dauern Lösungen unterschiedlich lange und nehmen dadurch einen wesentlichen Teil bei der Entwicklung ein. Problematisch ist der Umgang mit den Erweiterungen. Da SteamVR und FinalIK von unterschiedlichen Herstellern entwickelt werden, kommt es teilweise zu Interferenzen bei der Implementation, woraufhin Lösungen gefunden werden müssen, um beide Erweiterungen ohne Fehler verwenden zu können. Um die Interferenzen aufzulösen, werden Funktionsabschnitte gebildet.

Das bedeutet, dass z.B. die Translations-Funktion zu sehen in Abbildung 22, ausschließlich Skripte und Komponenten des SteamVR-Plugins verwendet. Das Dummy-Modell hingegen verwendet nur Skripte des FinalIK-Plugins. Dadurch wird vermieden, dass sich Skripte in der Verarbeitung von Informationen oder Kommunikation stören. Auch die Rotation von Objekten

gestaltet sich als schwierig, da eine Lösung implementiert werden soll, welche abhängig von der aktuellen Position des Benutzers zu jeder Zeit die gleichen Aktionen ausführt. Das bedeutet, dass die unterschiedlichen Achsen von Objekt und Benutzer gespiegelt und passend übersetzt werden müssen, je nachdem in welchem Winkel der Benutzer zum Objekt steht, da nur somit eine stetig übereinstimmende visuelle Repräsentation der Rotation möglich ist. Ein weiteres Hindernis ist die Platzierung auf und die Rotation des Interfaces mit dem Arm des Dummy-Modells, da sich der Arm standardmäßig nicht mit der Hand mit rotiert. Dadurch müssen zusätzliche Skripte entwickelt und weitere mitgelieferte Komponenten eingebunden und konfiguriert werden. Ein kleines, jedoch wichtiges Feature, welches mehrmals angepasst werden muss, ist die Interaktion der Bedienelemente. Die Buttons des Interfaces direkt mit dem Controller bedienen zu können, darunter das Aufklappen und Aktivieren von Funktionen, stellt sich als schwierig heraus, wird jedoch mit ansteigendem Wissen und Kreativität zunehmend einfacher und schließlich gelöst. Kleinere Probleme wie Fehlkonfigurationen, Versuch und Irrtum Ansätze oder Ausfälle der Hardware erschweren und verzögern die Implementation zusätzlich, jedoch nicht gravierend.

2.4 Evaluation

In diesem Abschnitt wird näher auf die Evaluation des entwickelten Systems, bestehend aus Anwendung und Interface, eingegangen. Dabei wird u.a. erläutert mit welcher Methode evaluiert wird, wie die dabei verwendeten Räumlichkeiten und Variablen aussehen, wie das System bewertet wird und wie die Ergebnisse und deren Interpretation ausgefallen sind.

2.4.1 Konzeption und Aufbau

Die Evaluation des Systems wurde nach dem DECIDE-Framework von Rogers et al. konzipiert und durchgeführt. DECIDE steht dabei für *Determine the goals, Explore the questions, Choose the evaluation methods, Identify the practical issues, Decide how to deal with the ethical issues, Evaluate, analyze, interpret, and present the data* [Rogers et al., 2011"]. Das Ziel der Evaluation war, die Usability und Bedienung des Systems insbesondere für eine Gruppe von Studenten im Alter von ca. 20 bis 30 Jahren zu überprüfen. Usability wird in dieser Arbeit nach der ISO Norm 9241 betrachtet und untersucht. Dabei wird unter Usability die Effektivität, Effizienz und Zufriedenheit eines Benutzers bei der Erreichung von bestimmten Zielen in speziellen Umgebungen verstanden [W3C and Matt, 2002]. Mit der Evaluation sollten z.B. die Fragen beantwortet werden, ob das System auch für Personen ohne

VR-Erfahrung geeignet ist, oder ob es einen Unterschied bei der Verwendung und Bewertung des Systems zwischen Männern und Frauen gibt. Zur Überprüfung der Usability lag eine Usability Studie nahe, um das Ziel zu erreichen. Alternativen wie ein Cognitive Walkthrough [Polson et al., 1992] oder eine heuristische Evaluierung [Nielsen and Molich, 1990] wurden aufgrund des Ziels und der Fragestellung nicht weiter betrachtet.

Die Evaluierungsstudie beinhaltete die Bearbeitung von 38 Aufgaben aus dem CAD Kontext. Die Aufgaben wurden in die Kategorien "Bewegung", "Manipulation", "Interface" und "Anwendung" aufgeteilt. Unter die Kategorie "Bewegung" fällt bspw. das Teleportieren des Benutzers zu einer vorgegebenen Koordinate. Typische Aufgaben aus dem CAD Kontext sind z.B. das Erstellen oder Drehen eines primitiven Körpers, welche der Kategorie der "Manipulation" zugeordnet werden. Zur Kategorie "Interface" zählt z.B. das blinde Bedienen des Interfaces und zur Kategorie "Anwendung" das Beenden der Applikation. Die Aufgaben sind nach Schwierigkeit sortiert, angefangen bei leichten Aufgaben wie dem Teleportieren, über moderate Aufgaben wie ein Objekt zu bewegen, bis hin zu schweren Aufgaben wie das blinde Interagieren mit dem Interface und erstellten Objekten. Alle Aufgaben der Evaluation sind im Anhang nachzulesen. Durch die iterative Entwicklung des Systems und zugehörigen internen Tests innerhalb der Arbeitsgruppe wurde vermutet, dass jeder Proband im Schnitt 10% der Usability Fehler entdeckt. Dadurch wurde für die Studie festgelegt, dass mindestens 20 Personen geprüft werden, gemäß der geschätzten Wahrscheinlichkeit zur Ermittlung von Usability Problemen. Ziel war somit mindestens 90% der Usability Probleme zu entdecken [MeasuringU, 2019]. Zur Untersuchung der Usability wurde deshalb der standardisierte *System Usability Scale* (SUS) von J. Brooke [Jordan et al., 2014, p. 189-196] als Grundlage für die Befragung der Testpersonen verwendet. Dadurch ist es möglich, die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit mit Ergebnissen anderer Arbeiten zu vergleichen. Der SUS beinhaltet die folgenden zehn Fragen, aufgelistet in Tabelle 6, welche das System und dessen Usability durch Werte von 1 für "Stimme überhaupt nicht zu" bis 5 für "Stimme voll und ganz zu" bewertbar und überprüfbar macht. Der SUS wechselt dabei durchgehend positiv und negativ behaftete Fragen ab.

1.	I think that I would like to use this system frequently
2.	I found the system unnecessarily complex
3.	I thought the system was easy to use
4.	I think that I would need the support of a technical person to be able to use this system
5.	I found the various functions in this system were well integrated
6.	I thought there was too much inconsistency in this system
7.	I would imagine that most people would learn to use this system very quickly
8.	I found the system very cumbersome to use
9.	I felt very confident using the system
10.	I needed to learn a lot of things before I could get going with this system

Tabelle 6: System Usability Scale Fragen nach Reihenfolge sortiert

Die erhaltenen Werte der Fragen werden nach dem SUS-Bewertungsmodell von J. Brooke berechnet. Dabei werden die Antwortwerte jeweils um 1 verringert, sodass die Werte von 0 bis 4 reichen. Eine 0 entspricht keiner Zustimmung, eine 4 vollster Zustimmung. Die Zustimmung wird bei negativ behafteten Fragen für die Bewertung umgekehrt. Die erhaltenen Werte jeder Testperson werden zusammengezählt und mit 2.5 multipliziert. Der daraus resultierende Wert entspricht dem erzielten SUS-Score, welcher von 0 bis 100 reicht. 100 Punkte entsprechen demnach einer perfekten Usability, 0 Punkte hingegen einer miserablen Usability [Jordan et al., 2014, p. 189-196]. Zusätzlich zum SUS wurde die Umfrage durch Fragen nach der bisherigen Erfahrung mit VR und HMDs sowie dem Alter und dem Geschlecht erweitert. Die Beschreibung der VR-Erfahrung erstreckt sich von "Ich habe noch nie von VR und HMDs gehört" über "Ich habe schon einmal mit VR und HMDs gearbeitet oder gespielt" bis hin zu "Ich verwende VR Hardware regelmäßig und kenne mich gut aus". Die Räumlichkeit in der die Evaluationsdurchführung stattfindet, wurde mithilfe des SteamVR-Plugins auf circa 4.0 x 3.0 Meter gemessen. Die gemessene Größe und damit die Limitierung der Bewegungsfreiheit, wurde dem Träger der HTC Vive bei der Durchführung durch rote Linien auf dem Bildschirm angezeigt. Der Raum bietet helle Deckenleuchten und ist somit unabhängig von äußereren Umweltgegebenheiten verwendbar.

Ebenfalls wurde der virtuelle Raum, zu sehen in Abbildung 26, für die Evaluation angepasst. Die Testumgebung wurde mit Objekten gefüllt, welche sowohl als Orientierungshilfe zur Erfüllung der gestellten Aufgaben, als auch als Möglichkeit zur Interaktion dienten.

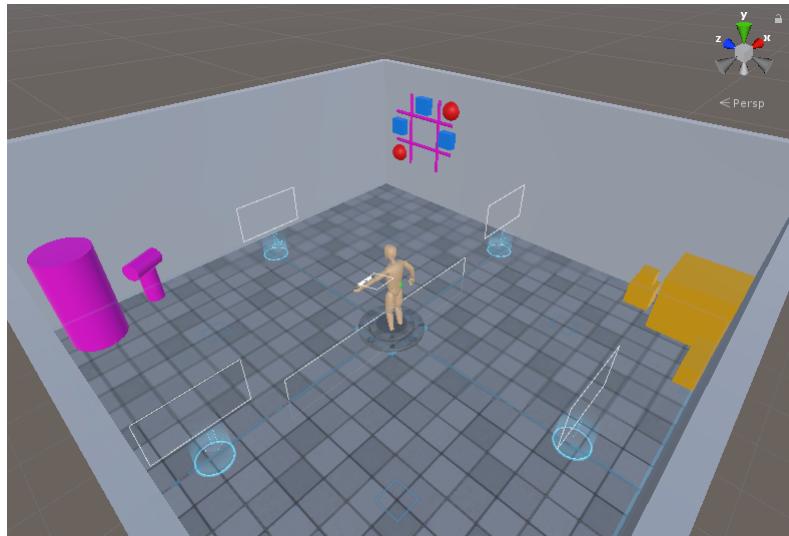


Abbildung 26: Angepasster virtueller Raum für Evaluation

Zusätzlich wurde festgelegt, einer Testperson bei Übelkeit oder Schwindel die Ausrüstung unverzüglich abzunehmen. Das Recht der Testperson auf die Umfrage verwirkt danach jedoch nicht. Der Test und die Umfrage wurden in einer Pilotstudie mit zwei Personen im Alter von 22 bzw. 36 Jahren getestet. Dabei ergab sich, dass Aufgaben teilweise noch zu ungenau beschrieben sind und die Kalibrierung nochmals überarbeitet werden muss, da die aktuell implementierte Kalibrierung beim Benutzen von Funktionen zurückgesetzt wird und die Testpersonen die UI-Elemente somit nicht mehr bedienen können. Um Testpersonen für die Evaluation zu sammeln, wurde eine Online-Umfrage erstellt, in welcher eine Person sich in verschiedene Zeitintervalle an einem festgelegten Tag eintragen konnte. Zusätzlich wurden Rundmails an Studenten der Informatik Fakultät vor Ort gesandt. Die ethischen Regelungen werden u.a. in 2.4.2 beschrieben.

2.4.2 Durchführung

Die Evaluation wurde in einem lichtdurchfluteten Raum mit Raumtemperatur durchgeführt. Die Teilnehmer wurden bei Eintreffen persönlich begrüßt und die eigene Person vorgestellt. Männer und Frauen wurden in beliebiger Reihenfolge nacheinander über einen Testzeitraum von acht Stunden hinweg getestet. Dafür musste jeder Proband vorab eine Einverständniserklärung unterzeichnen, welche nochmals auf die anonymisierte Datenauswertung hinwies, und bekam daraufhin ein Einleitungsvideo zu sehen, welches auf die anschließenden Aufgaben vorbereitete und die Verwendung des Interfaces darstellte. Jeder Testperson wurde in gleichem Maße bei der Verwendung der Ausrüstung und der Einnahme der Startposition geholfen. Zu Anfang jedes Testdurchlaufes wurde die Testperson über ein Kalibrierungs-Skript und zwei Tastendrücke kalibriert, um das Dummy-Modell auf die tatsächliche Größe des Testers oder der Testerin anzupassen, und somit die Bedienung des Interfaces zu erleichtern. Für jede Testperson wurde die Zeit für die Erfüllung aller Aufgaben gestoppt. Die Höchstdauer für die Erfüllung aller Aufgaben betrug 20 Minuten. Jeder Testperson wurden die gleichen Aufgabestellungen gegeben, Hilfestellungen wenn nötig geboten, und Hinweise aufgesagt. Die Aufgaben wurden wenn gewünscht wiederholt und Aufgabenstellungen nochmals aufgesagt. Nach einem Testdurchlauf wurde die jeweilige Testperson gebeten die Umfrage auszufüllen und damit den Test abzuschließen. Probleme wie das Ausfallen der Hardware oder die Falschkalibrierung der Testperson, wurde über den Neustart der Anwendung und dem erneuten Einnehmen der Startposition gelöst. Traten Probleme inmitten des Testes auf, so wurde die Anwendung neu gestartet, und die zuletzt aktive Aufgabe wiederholt. Wurde einem Benutzer beim Testen schlecht oder äußerte ein Tester den Wunsch die Anwendung und den Test zu beenden, so wurde dem Tester die Ausrüstung unverzüglich abgenommen und die Anwendung beendet. Das Recht des Testers auf die Umfrage verwirkte damit jedoch nicht. Nach erfolgreichem Abschließen des Testes durch Ausfüllen der Evaluations-Umfrage, hatte jeder Proband die Möglichkeit aus einer Schale ein Bonbon zu nehmen. Jede Testperson wurde persönlich verabschiedet und der selbigen nochmals ein Dankeschön für die Teilnahme ausgesprochen.

2.4.3 Ergebnisse

Getestet wurden insgesamt 22 Personen zwischen 19 und 32 Jahren mit Informatik-Affinität. Die Testpersonen umfassten 13 Männer und 9 Frauen. Die durchschnittliche Durchführungszeit aller Personen beläuft sich auf 7 Minuten. Im Durchschnitt haben die Männer 6 Minuten und 45 Sekunden, die Frauen 8 Minuten und 12 Sekunden für alle Aufgaben benötigt.

Die Auswertung aller Fragebögen ergibt einen SUS-Score des Systems von 1765 von 2200 möglichen Punkten. Die erreichten Punkte ergeben umgerechnet in Prozent einen Wert von 80,23%. Die erzielten 80,23% (95% Konfidenzintervall, Minimum 74%, Maximum 86,5%) ergeben für die Usability nach dem SUS-Bewertungsmodell zu sehen in Abbildung 27 die Note B bis A, was einer guten bis exzellenten Usability entspricht. Dem entwickelten System kann demnach eine Eignung für junge Erwachsene für die Modellierung von 3D-Objekten in VR bei Verwendung eines körperbasierten Interfaces zugeschrieben werden.

SUS Score	Grade	Adjective Rating
> 80,3	A	Excellent
68 – 80,3	B	Good
68	C	Okay
51 – 68	D	Poor
< 51	F	Awful

Abbildung 27: SUS-Score Interpretation
nach [Alathas, 2018]

Der Männeranteil hat die Usability des Systems umgerechnet in Prozent mit 82,12%, der Frauenanteil mit 77,5% eingeschätzt. Die Differenz von Männern und Frauen beträgt demnach 4,62%. Der Männeranteil hat das System somit besser eingeschätzt, als der Frauenanteil. Der niedrigste errechnete SUS-Score entspricht 47,5, der höchste Wert 100 Punkten. In Abbildung 28 sind die erreichten SUS-Scores und deren Streuung aufgeführt, zusammen mit dem Durchschnitt und der Standardabweichung jeder Erfahrungsstufe.

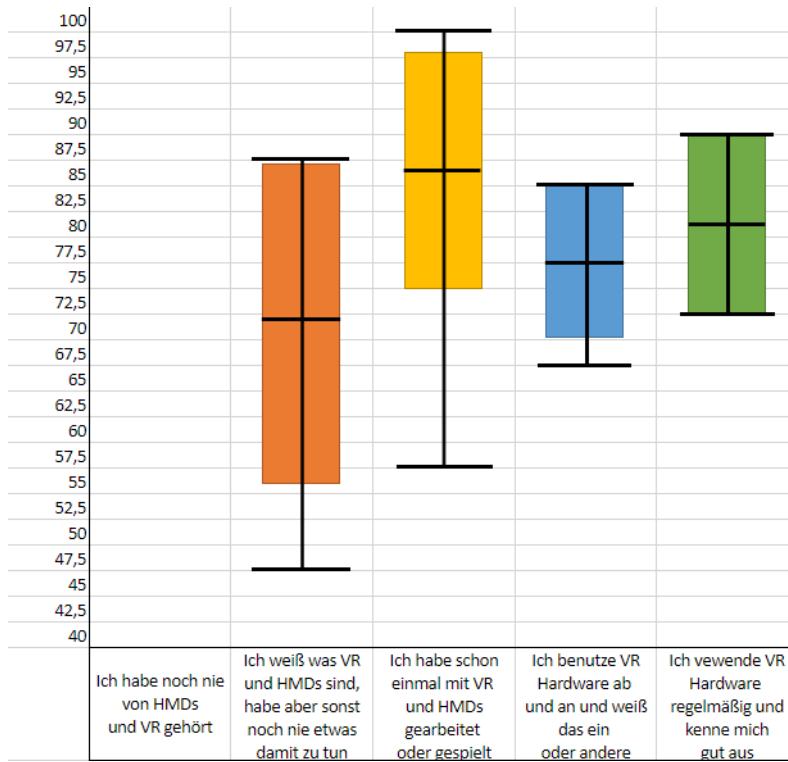


Abbildung 28: SUS-Score Verteilung in Abhängigkeit zur VR-Erfahrung

Die Frage mit den meisten 4-er Wertungen ist Frage 2, welche eine positive Aussage ist, mit 14 4-er Wertungen. Die am negativsten bewerteten Fragen sind Frage 4, 6 und 10. Die Verteilung in Abbildung 29 zeigt die Anzahl der vergebenen Negativwerte der jeweiligen Frage.

SUS Frage	Anzahl Werte unter 2
4	0 1 1 1 1
6	1 1 1 1
10	0 1 1 1 0

Abbildung 29: Am negativsten bewertete Fragen des SUS

Die größte Differenz zwischen Männern und Frauen, besteht bei Frage 4 und 7. Dabei ist eine Differenz zu messen von 5,4% bzw. 10,10%. Die am höchsten bewertete Frage der Männer ist Frage 9 mit 46 von 52 möglichen Punkten, die am höchsten bewerteten Fragen der Frauen sind Frage 3 und 7 mit jeweils 32 von 36 Punkten. Abbildung 30 zeigt das erreichte Maximum

und Minimum, sowie Durchschnitt und Standardabweichung jedweder SUS-Frage. Dabei entspricht die Zahl 4 einer vollen Zustimmung, die Zahl 1 einer totalen Ablehnung nach dem SUS-Bewertungsmodell.

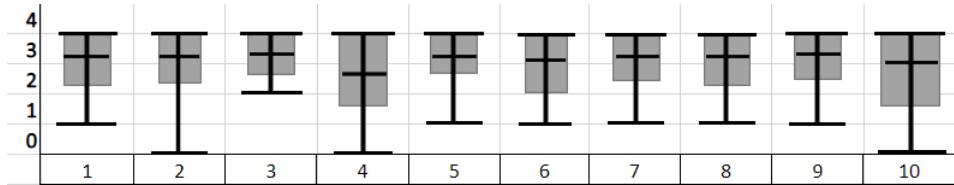


Abbildung 30: Bewertungen der SUS-Fragen

Abbildung 30 verdeutlicht auch, dass für jede Frage Top-Bewertungen von 4 Punkten erreicht wurden, wohingegen für nur drei Fragen Werte von 0 vergeben wurden. Die Erfahrung von Männern und Frauen, abgebildet in Schaubild 31, verteilt sich auf die Werte 1 bis 4, bzw. 1 bis 3.

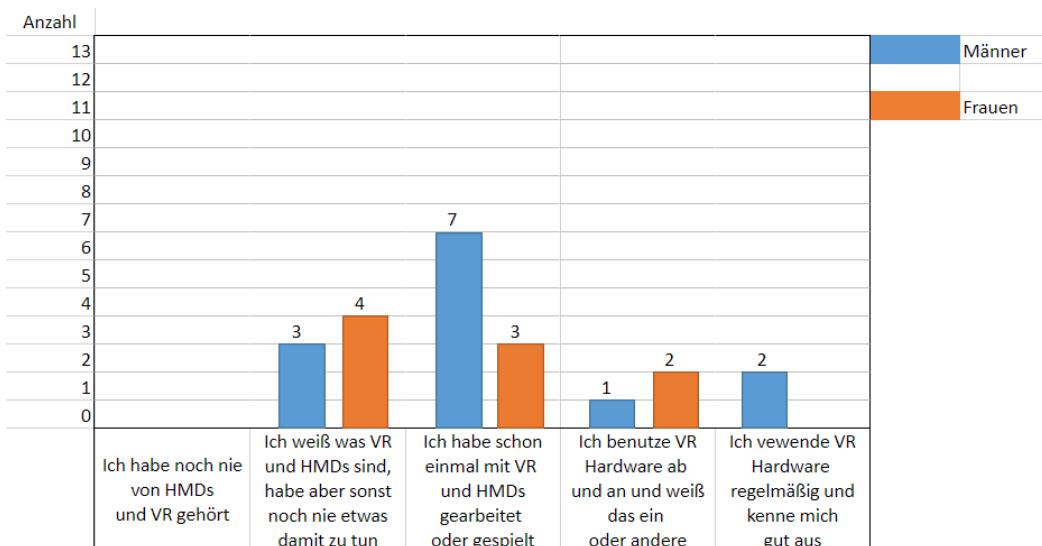


Abbildung 31: VR-Erfahrung aller Testpersonen

Die durchschnittliche Durchführungszeit pro Erfahrungsstufe ist in Abbildung 32 visualisiert. Danach gibt es eine Differenz von einer bis knapp drei Minuten zwischen den erfahrensten und den weniger erfahrenen Testpersonen. Eine kontinuierliche Verkürzung der Durchführungszeit abhängig von der VR-Erfahrung kann damit ausgeschlossen werden.

VR-Erf.	Durchschn. Zeit
1	7,5 Min
2	7 Min
3	8,25 Min
4	6 Min

Abbildung 32: Durchschn. Durchführungszeit aller Erfahrungsstufen

Verglichen mit dem auf Gestenerkennung und -Steuerung basierenden System für 3D-Modellierung in VR von Alkemade et al., wobei 11 Personen zwischen 22 und 31 Jahren ebenfalls mit der SUS-Studie getestet wurden, erreicht das in dieser Arbeit entwickelte System einen geschätzt 20% höheren SUS-Score. Das entwickelte System dieser Arbeit hat bezüglich Frage 4 eine ähnliche Differenz zwischen Männern und Frauen wie das System von Alkemade et al. [Alkemade et al., 2017]. Demnach bräuchten die weiblichen Testpersonen von Alkemade et al.’s System, ebenfalls eher technische Unterstützung bei der Verwendung des Systems, als die getesteten Männer.

Auf mündliche Nachfrage zur Usability des Systems, gaben fünf von 22 Personen an, dass die Selektion von Funktionen umständlich oder gar nicht möglich war. Zwei Personen bemängelten die blinde Bedienung, da die Suche der Funktionen aufgrund der Platzierung zu lange dauerte und umständlich war. Hingegen eine Person stufte die blinde Bedienung als intuitiv und gut ein. Auch die Implementation der Manipulationstechniken wurde von zwei Personen als mangelhaft bewertet, da sich sowohl Rotation als auch Skalierung für die getesteten Personen unnatürlich und schwammig anfühlten. Eine weitere Person bemängelte die fehlende Linkshänder-Unterstützung sowie die fehlende Kalibrierung an breitere Arme. Die Immersion durch das Dummy-Modell wurde von zwei Personen als sehr gut bewertet. Eine perfekte Eignung für den Einsatz als körperbasiertes Interface wurde dem System in dem aktuellen Zustand von einer Person abgesagt, da die Interaktionen noch nicht natürlich genug seien.

2.4.4 Diskussion

Die Usability-Einschätzung von Männern und Frauen lässt sich bedingt auf die vorhandene VR-Erfahrung zurückführen. Die Männer weisen nach Abbildung 31 mehr durchschnittliche Erfahrung auf, als die Frauen.

Auch existieren nur bei den Männern Personen mit einer sehr guten VR-Erfahrung. Frage 4 weist die größte Differenz zwischen Männern und Frauen auf, was durch die vorhandene VR-Erfahrung bedingt sein könnte.

Die Männer, gleich welchem Erfahrungsgrad, haben demnach weniger Probleme mit dem System gehabt, und würden das System eher ohne technische Hilfe bedienen können. Die Differenz in der Bewertung der Usability von 4,62% zwischen Männern und Frauen, könnte ebenfalls auf die VR-Erfahrung zurückgeführt werden. Der Frauenanteil hat demnach das System als schlechter empfunden, was durch die fehlende Erfahrung mit der Hardware oder mangelnden Vergleichen bedingt sein könnte. Nach der Differenz von 1,5 Minuten in der Durchführungszeit zwischen Männern und Frauen, hatten die getesteten Frauen ungefähr 21,5% mehr Zeit für die Erfüllung der Aufgaben gebraucht, was wiederum an der mangelnden Erfahrung mit der verwendeten Technik liegen könnte. Generell kann jedoch keine klare Relation zwischen Erfahrung und benötigter Zeit hergestellt werden, da die Durchführungszeiten wie in Abbildung 32 dargestellt, keiner klaren Linie folgen und sogar erfahrene Personen länger für die Aufgaben benötigt haben als die weniger erfahrenen Testpersonen. Die Verteilung der Durchführungszeiten könnte einerseits an der Erfahrung liegen, andererseits an persönlichen Eigenschaften wie Ehrgeiz bei der Erfüllung der Aufgaben. Frage 4 und Frage 10 weisen nach Abbildung 29 die meisten negativen Wertungen auf. Darunter sind 60% bzw. 80% der Negativwertungen von Frauen.

Frage 6 weist eine Ausgeglichenheit zwischen Männern und Frauen auf.

Der Vergleich von allen Personen mit einer VR-Erfahrung von 1, was einer Erfahrung von "Ich weiß was VR und HMDs sind, habe aber sonst noch nie etwas damit zu tun gehabt" entspricht, bringt eine durchschnittliche Bewertung der Usability des Systems von 72,14%. Die beste Bewertung von 100% stammt von einer männlichen Testperson mit einer VR-Erfahrung von 2, die schlechteste Bewertung mit 47,5% von einer männlichen Testperson mit der VR-Erfahrung von 1. Ob eine Relation zwischen Erfahrung und SUS-Score vorliegt, müsste durch statistische Tests nachgewiesen werden.

Aufgrund der Einschätzung in Abbildung 28 wird keine Abhängigkeit zwischen Erfahrung und SUS-Score vermutet. Die Streuung der Werte der Personen mit VR-Erfahrung 2 repräsentiert die größte Akzeptanz des Systems sowie die geringste negative Streuung im Allgemeinen. Personen, welche schon einmal mit VR und HMDs gearbeitet haben, haben demnach das Sys-

tem am Besten bewertet. Frage 9 weist u.a. keine eindeutige Verteilung der Werte abhängig von der vorhandenen VR-Erfahrung auf. Sowohl Männer als auch Frauen haben Frage 9, mit Werten von 2 bis 4, bzw. 1 bis 4 bewertet, unabhängig von der vorhandenen VR-Erfahrung. Die Verteilung aller Werte lässt sich so interpretieren, dass Personen mit guter bis sehr guter VR-Erfahrung Referenzen kennen und Vergleiche ziehen können, was in die Einschätzung der Usability des entwickelten Systems mit eingeflossen sein könnte. Personen mit weniger VR-Erfahrung,bzw. Personen die noch nie mit VR und HMDs gearbeitet haben, könnten mit dem System teilweise überfordert gewesen sein.

3 Schluss

3.1 Fazit

Entwickelt wurde ein VR-System, welches aus einer CAD-Anwendung und einem körperbasierten Interface besteht und mit der aktuellen HTC Vive Technik getestet und evaluiert wurde. Anwendung und Interface wurden nach wissenschaftlichen Richtlinien, Vergleichen und Einbeziehungen von verwandten Designs und ergonomischen Gegebenheiten des Menschen konzipiert und implementiert. Für die Konzeption wurden Grundlagen zu u.a. *head-mounted displays* und 3D Benutzungsoberflächen sowie der aktuelle Stand der Technik berücksichtigt. Die Anwendung bietet Bewegungsmechanismen für den Benutzer, sowie Funktionen zur Erstellung, Löschung, Manipulation und Selektion von Objekten. Die Manipulation umfasst die Translation, Rotation und Skalierung von Objekten. Ebenfalls kann die Anwendung durch entsprechendes visuelles Feedback blind bedient und auf Wunsch beendet werden. Das Interface und dessen Funktionen befinden sich auf dem virtuellen Arm des Benutzers und können durch die HTC Vive Controller bedient werden. Die Anwendung benutzt das SteamVR- und FinalIK-Plugin für die Verwendung von VR-Hardware, bzw. für die Kalibrierung des Benutzers mit dem implementierten virtuellen Dummy-Modell von FinalIK. Die Usability des Systems wurde mit dem System Usability Scale von J. Brooke überprüft und erreichte dabei eine Wertung von 80,23%, was einer guten bis exzellenten Usability entspricht. Die getesteten Personen wiesen dabei eine geringe bis sehr gute Erfahrung mit VR auf.

3.2 Zukunftsaussichten und Pläne

Das Ergebnis der Evaluation zeigt, dass sich das entwickelte körperbasierte Interface für eine CAD-Anwendung in VR unter der Verwendung von jungen Erwachsenen durchaus anbietet und sogar im Vergleich zu einem durch Gesten gesteuerten System bessere Ergebnisse bezüglich der Usability aufweist. Der erzielte SUS-Score von 80,23% bietet jedoch auch Potenzial nach oben. Das System müsste eventuell mit einer größeren Gruppe von Personen getestet werden, um eine stichhaltigere Aussage bezüglich der Usability und dem Einsatz des Systems treffen zu können. Generell denkbar ist jedoch eine deutliche Verbesserung der Usability durch Optimierung des Interfaces und dessen Funktionen. Die Kalibrierung des Benutzers müsste ebenfalls überarbeitet werden, um sich besser an den Körper eines Benutzers anzupassen. Eine Spiegelung des Interfaces und damit eine Linkshänder-Unterstützung, könnte den Eindruck der Usability für Linkshänder erheblich verbessern und die Reichweite des Systems erweitern. Auch können zukünftige Optimierungen und natürlichere Manipulationstechniken die Usability verbessern und die Immersion erhöhen. Erweiterungen der Anwendung, wie das Extrudieren von einzelnen Seiten eines Objektes, das Selektieren mehrerer Objekte und Gruppieren mehrerer ausgewählter Objekte sowie Touchpad-Eingaben für Bewegung und Rotation des Benutzer-Modells könnten die Anwendung positiv erweitern und die Usability erhöhen. Zukünftig denkbar ist auch eine virtuelle Physik zu implementieren, sodass 3D-Objekte wenn gewünscht auch im physikalisch korrekten Raum getestet und visualisiert werden können.

Danksagung

Ich möchte in erster Linie meiner Betreuerin Frau Prof. Dr. rer. nat. Tullius danken. Für eine tolle Unterstützung beim Entwickeln und Evaluieren dieser Arbeit, als auch für die reibungslose Kommunikation und aufmunternden Worte. Vielen vielen Dank. Ebenfalls bedanke ich mich beim Fraunhofer IAO in Stuttgart und dort speziell bei Herrn Dixken für die hervorragende betriebliche Betreuung als auch bei Herrn Dr. Bues für die einmalige Gelegenheit diese Arbeit in Kooperation anfertigen zu dürfen. Auch bedanke ich mich bei allen Testern für die guten Ergebnisse und den spaßigen Evaluations-Tag. Des Weiteren möchte ich mich bei meinen Freunden bedanken, welche mir immer wieder Mut gemacht haben und darunter explizit einem, welcher auch ein einzigartiger und zuverlässiger Taxi-Service zur Arbeit und zurück war. Auch danke ich meinen Freunden und allen Korrekturlesern für das umfangreiche Testen und Verbessern meiner Arbeit durch konstruktive Kri-

tik und ausdauernde Test-Sessions. Ich danke allen Zuhörern meines Vortrages beim Kolloquium für das gegebene Feedback und die positive Resonanz. Besonders bedanken möchte ich mich vor allem auch bei meiner Familie und dabei insbesondere bei meiner Mutter. Für tägliche Verpflegung, für das Auto, welches ich manchmal unbedingt gebraucht habe, um zur Universität zu gelangen, für die stärkenden Reden morgens und abends, nachdem immer wieder kleine Erfolge bei der Entwicklung der Arbeit gefeiert wurden, für die ganze exzellente Fürsorge und den Rundum-Sorglos-Tarif zum Nullpreis für Daheim.

Referenzen

- Hadi Alathas. How to Measure Product Usability with the System Usability Scale (SUS) Score, 2018. <https://uxplanet.org/how-to-measure-product-usability-with-the-system-usability-scale-sus-score-69f3875b858f> aufgerufen am 22.05.2019.
- Mike Alger. Visual Design Methods for Virtual Reality. *Personal Website*, page 98, 2015.
- Remi Alkemade, Fons J. Verbeek, and Stephan G. Lukosch. On the Efficiency of a VR Hand Gesture-Based Interface for 3D Object Manipulations in Conceptual Design. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 33(11):882–901, 2017. ISSN 15327590.
- Yuri Antonio and Gonçalves Vilas. Overview of Virtual Reality Technologies. *Interactive Multimedia Conference*, 2013.
- Michael Burmester, Kristin Haasler, Katharina Schippert, Vivien Engel, Ralph Tille, Daniel Reinhardt, and Joern Hurtienne. Lost in space? 3d-interaction-patterns für einfache und positive nutzung von 3d interfaces. In Steffen Hess and Holger Fischer, editors, *Mensch und Computer 2018 - Usability Professionals*, pages 53–66, Bonn, 2018. Gesellschaft für Informatik e.V. Und German UPA e.V.
- CorvidDude. VR spatial UI design exercise, 2018. https://www.youtube.com/watch?v=y_s3HZpaOLI aufgerufen am 20.05.2019.
- Cyberith. 2nd Gen VR Treadmill, Cyberith Virtualizer ELITE 2, 2019. <https://www.cyberith.com/virtualizer-elite/> aufgerufen am 20.05.2019.
- Niloofar Dezfuli, Mohammadreza Khalilbeigi, Jochen Huber, Florian Mueller, and Max Muehlhaeuser. Palmrc: Imaginary palm-based remote control for eyes-free television interaction. In *Proceedings of the 10th European Conference on Interactive TV and Video*, EuroITV ’12, pages 27–34, New York, NY, USA, 2012. ACM. ISBN 978-1-4503-1107-6.
- Aaron Marcus Ed and David Hutchison. *Design, User Experience, and Usability. Web, Mobile, and Product Design*, volume 8015. 2013. ISBN 978-3-642-39252-8.
- Jan Ehrlich. Exploring Mid-air Interaction for Menu Control in Virtual Reality with regard to Task Performance and User ' s Preference. *Faculty*

of Mathematics and Computer Science Department of Computer Science, 2017.

Barrett Ens, Rory Finnegan, and Pourang P Irani. The personal cockpit: A spatial interface for effective task switching on head-worn displays. *Proceedings of the 32nd annual ACM conference on Human factors in computing systems - CHI '14*, pages 3171–3180, 2014.

Celeste Groenewald, Craig Anslow, Junayed Islam, Chris Rooney, Peter Passmore, and William Wong. Understanding 3D Mid-Air Hand Gestures with Interactive Surfaces and Displays : A Systematic Literature Review. *Proceedings of British HCI 2016 Conference Fusion*, pages 1–13, 2016.

Chris Harrison. The HCI Innovator ' s Dilemma. *Princeton University Press*, 2018.

Chris Harrison and Haakon Faste. Implications of location and touch for on-body projected interfaces. In *Proceedings of the 2014 Conference on Designing Interactive Systems*, DIS '14, pages 543–552, New York, NY, USA, 2014. ACM. ISBN 978-1-4503-2902-6.

Chris Harrison, Desney Tan, and Dan Morris. Skinput: Appropriating the body as an input surface. In *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '10, pages 453–462, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN 978-1-60558-929-9.

Chris Harrison, Hrvoje Benko, and Andrew D. Wilson. Omnitouch: Wearable multitouch interaction everywhere. In *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '11, pages 441–450, New York, NY, USA, 2011. ACM. ISBN 978-1-4503-0716-1.

Juan David Hincapie-Ramos, Xiang Guo, Paymahn Moghadasian, and Pourang Irani. Consumed endurance: A metric to quantify arm fatigue of mid-air interactions. In *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '14, pages 1063–1072, New York, NY, USA, 2014. ACM. ISBN 978-1-4503-2473-1.

Lasse Jensen and Flemming Konradsen. A review of the use of virtual reality head-mounted displays in education and training. *Education and Information Technologies*, 23(4):1515–1529, 2018. ISSN 1573-7608.

Luis N. Jofre, Graciela B. Rodriguez, Yoselie M. Alvarado, Jacqueline M. Fernandez, and Roberto A. Guerrero. Non-verbal communication interface

using a data glove. *CACIDI 2016 - Congreso Argentino de Ciencias de la Informatica y Desarrollos de Investigacion*, 2016.

P.W. Jordan, B. Thomas, I.L. McClelland, and B. Weerdmeester. *Usability Evaluation In Industry*. CRC Press, 2014. ISBN 9781498710411.

Joseph J Laviola Jr, Richard L Marks, and Richard Marksplaystationsony.com. An introduction to 3d spatial interaction with video game motion controllers sony computer entertainment america. *ACM SIGGRAPH '10*, 2010.

M. Kyritsis, S. R. Gulliver, S. Morar, and R. Stevens. Issues and benefits of using 3d interfaces: Visual and verbal tasks. In *Proceedings of the Fifth International Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems*, Medes '13, pages 241–245, New York, NY, USA, 2013. ACM. ISBN 978-1-4503-2004-7.

Vasudevan Lakshminarayanan and Sayoko E Moroi. Head-Mounted Display Technology for Low-Vision Rehabilitation and Vision Enhancement. *American Journal of Ophthalmology*, 176:26–32, 2017. ISSN 0002-9394.

Douglas Lanman, Henry Fuchs, Mark Mine, Ian McDowall, and Michael Abrash. Put on your 3d glasses now: The past, present, and future of virtual and augmented reality. In *ACM Siggraph 2014 Courses*, Siggraph '14, pages 12:1–12:173, New York, NY, USA, 2014. ACM. ISBN 978-1-4503-2962-0.

Joseph J. LaViola, Ernst Kruijff, Ryan P. McMahan, Doug Bowman, and Ivan P. Poupyrev. *3D User Interfaces: Theory and Practice*. Addison-Wesley usability and HCI series. Addison-Wesley, Boston, 2nd edition edition, 2017. ISBN 978-0-13-403432-4.

Joseph J. LaViola, Jr. An introduction to 3d gestural interfaces. In *ACM Siggraph Courses*, Siggraph '14, pages 25:1–25:42, New York, NY, USA, 2014. ACM. ISBN 978-1-4503-2962-0.

Seokwon Lee, Kihong Park, Junyeop Lee, and Kibum Kim. User study of vr basic controller and data glove as hand gesture inputs in vr games. *Proceedings - 2017 International Symposium on Ubiquitous Virtual Reality, ISUVR 2017*, pages 1–3, 2017.

Jessica L Maples-keller, Brian E Bunnell, Sae-jin Kim, O Barbara, and Behavioral Sciences. The use of virtual reality technology in the treatment

of anxiety and other psychiatric disorders. *Harvard Review of Psychiatry*, pages 103–113, 2018.

Mark McGill, Daniel Boland, Stephen Brewster, and Roderick Murray-Smith. A Dose of Reality : Overcoming Usability Challenges in VR Head-Mounted Displays. *ACM 978-1-4503-3145*, pages 2143–2152, 2015.

MeasuringU. MeasuringU: Sample Size Calculator for Discovering Problems in a User Interface, 2019. https://measuringu.com/problem_discovery/ aufgerufen am 05.06.2019.

D Mendes. A survey on 3d virtual object manipulation : From the desktop to immersive virtual environments. *Major Revision from Eurographics Conference*, pages 1–25, 2018.

D. Mendes, D. Medeiros, M. Sousa, R. Ferreira, A. Raposo, A. Ferreira, and J. Jorge. Mid-air modeling with boolean operations in vr. In *2017 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, pages 154–157, 2017.

Pranav Mistry, Pattie Maes, and Liyan Chang. Wuw - wear ur world: A wearable gestural interface. In *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, CHI EA '09, pages 4111–4116, New York, NY, USA, 2009. ACM. ISBN 978-1-60558-247-4.

Mycestro. Mycestro – A 3D wearable, gesture-control mouse... and more!, 2019. <http://mycestro.com/> aufgerufen am 20.05.2019.

Jakob Nielsen and Rolf Molich. Heuristic evaluation of user interfaces. *CHI '90 Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 1990. ISSN 09214526.

Domen Novak, Matjaz Mihelj, and Samo Begus. *Virtual Reality Technology and Applications*. Springer Dordrecht, 2014. ISBN 9789400769090.

Francisco R. Ortega, Fatemeh Abyarjoo, Armando Barreto, Naphtali Rishe, and Malek Adjouadi. *Interaction Design for 3D User Interfaces: The World of Modern Input Devices for Research, Applications, and Game Development*. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2016. ISBN 1482216949, 9781482216943.

Polson, Lewis, Rieman, and Wharton. Cognitive Walkthroughs, A Method for Theory-Based Evaluation of User Interfaces. *Elsevier*, pages 741–773, 1992.

ProCore. ProBuilder VR — ProCore, 2019.
<http://www.procure3d.com/probuilder-vr/> aufgerufen am 02.06.2019.

Bernhard E. Riecke, Joseph J. LaViola, Jr., and Ernst Kruijff. 3d user interfaces for virtual reality and games: 3d selection, manipulation, and spatial navigation. In *ACM Siggraph 2018 Courses*, Siggraph '18, pages 13:1–13:94, New York, NY, USA, 2018. ACM. ISBN 978-1-4503-5809-5.

Yvonne Rogers, Helen Sharp, and Jenny Preece. *Interaction design: beyond human-computer interaction ;3rd ed.* J Wiley & Sons, Chichester West Sussex UK, 2011”.

RootMotion. FinalIK Plugin, 2014. <http://www.root-motion.com/final-ik.html> aufgerufen am 06.04.2019.

Wolfgang Stuerzlinger and Chadwick A. Wingrave. *The Value of Constraints for 3D User Interfaces*, pages 203–223. Springer Vienna, Vienna, 2011. ISBN 978-3-211-99178-7.

Denis Vajak. Combining Photogrammetry , 3D Modeling and Real Time Information Gathering for Highly Immersive VR Experience. *2017 Zooming Innovation in Consumer Electronics International Conference (ZINC)*, pages 82–85, 2017.

Valve Corporation. SteamVR Plugin, 2014.
<https://steamcommunity.com/steamvr> aufgerufen am 01.05.2019.

Judd Vos. Colorimetric and photometric properties of a 2 degree fundamental observer. *Color Research and Application*, pages 125—128, 1978.

Marja W3C and Matt. Exploring Usability Enhancements in W3C Process - Usability - ISO 9241 definition;, 2002.
<https://www.w3.org/2002/Talks/0104-usabilityprocess/slide3-0.html> aufgerufen am 17.05.2019.

Y. Weiß, D. Hepperle, A. Sieß, and M. Woelfel. What user interface to use for virtual reality? 2d, 3d or speech—a user study. In *2018 International Conference on Cyberworlds (CW)*, pages 50–57, 2018.

Andrew D. Wilson and Hrvoje Benko. Combining multiple depth cameras and projectors for interactions on, above and between surfaces. In *Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, UIST '10, pages 273–282, New York, NY, USA, 2010. ACM. ISBN 978-1-4503-0271-5.

Ning-Ning Zhou and Yu-Long Deng. Virtual reality: A state-of-the-art survey. *International Journal of Automation and Computing*, pages 319–325, 2009. ISSN 1751-8520.

Anhang

Aufgaben der Testpersonen bei der Evaluation

1. Drücken und halten Sie das rechte Touchpad um die Teleportationsfunktion zu aktivieren, zielen Sie auf einen beliebigen Teleportationspunkt bis der Marker einrastet und lassen Sie die Taste los
2. Drehen Sie sich, sodass Sie in die Mitte des Raumes blicken
3. Führen Sie den rechten Controller zum "Create-Button" bis dieser markiert wird
4. Drücken Sie den Trigger-Knopf des rechten Controllers um die Funktion aufzuklappen
5. Markieren Sie die Funktion "Cube" und bestätigen Sie mit dem rechten Trigger-Knopf
6. Führen Sie den Laserpointer auf den soeben erstellten Cube
7. Drücken Sie den Trigger-Knopf des rechten Controllers, um den Cube zu selektieren
8. Führen Sie den rechten Controller zum "Manipulate-Button" bis dieser markiert wird
9. Drücken Sie den Trigger-Knopf des rechten Controllers um die Funktion aufzuklappen
10. Markieren Sie die Funktion "Translate" und bestätigen Sie mit dem rechten Trigger-Knopf, sodass diese gelb wird
11. Zielen Sie mit dem rechten Controller auf den erstellten Cube
12. Drücken und halten Sie den linken Grip-Button des rechten Controllers
13. Bewegen Sie nun den Würfel auf den größten orangenen Würfel, welchen Sie im Raum finden, wenn notwendig, teleportieren Sie sich näher zu den Objekten hin, die Teleportation kann beliebig im Raum stattfinden
14. Deselektieren Sie den Würfel indem Sie mit dem rechten Controller auf den Würfel zeigen und den Trigger-Knopf drücken

15. Drücken und halten Sie das rechte Touchpad um die Teleportationsfunktion zu aktivieren, zielen Sie auf einen beliebigen Teleportationspunkt bis der Marker einrastet und lassen Sie die Taste los
16. Markieren Sie die Funktion "Cylinder" und bestätigen Sie mit dem rechten Trigger-Knopf
17. Führen Sie den Laserpointer auf den soeben erstellten Cylinder
18. Drücken Sie den Trigger-Knopf des rechten Controllers, um den Cylinder zu selektieren
19. Führen Sie den rechten Controller zum "Manipulate-Button" bis dieser markiert wird, ist die Funktion schon aufgeklappt, führen Sie den Controller zur Funktion "Rotate" bis diese markiert wird, und drücken Sie den Trigger-Knopf des rechten Controllers sodass diese gelb wird
20. Zielen Sie mit dem rechten Controller auf den erstellten Cylinder
21. Drücken und halten Sie den linken Grip-Button des rechten Controllers
22. Rotieren Sie den Cylinder um 90 Grad nach links
23. Rotieren Sie den Cylinder um 45 Grad zu Ihnen hin, dafür bewegen Sie Ihre Hand horizontal, falls die Bewegung unkomfortabel wird oder der Winkel nicht ausreicht, lassen Sie den Gripbutton los, bewegen Sie Ihre Hand in eine komfortable Position und führen Sie die Rotation erneut aus
24. Wenn die Rotation erreicht wurde, selektieren Sie die Funktion "Translate" und bewegen den Cylinder auf den pinken Cylinder, welchen Sie im Raum finden, sodass sich der Buchstabe T bildet
25. Deselektieren Sie den Cylinder
26. Drücken und halten Sie das rechte Touchpad um die Teleportationsfunktion zu aktivieren, zielen Sie auf einen beliebigen Teleportationspunkt bis der Marker einrastet und lassen Sie die Taste los
27. Markieren Sie die Funktion "Sphere" und bestätigen Sie mit dem rechten Trigger-Knopf
28. Selektieren Sie die erstellte Kugel
29. Wählen Sie die Funktion "Scale" mit dem rechten Controller aus und bestätigen Sie mit dem Trigger-Knopf sodass diese gelb wird

30. Finden Sie das TicTacToe-Wandbrett im Raum
31. Die erstellte Kugel soll in die Mitte des Brettes passen. Drücken und halten Sie den inneren Gripbutton des rechten und linken Controllers und bewegen Sie die Controller auseinander, um die Kugel zu vergrößern, bewegen Sie die Controller zueinander, um die Kugel zu verkleinern. Lassen Sie die GripButtons los wenn die Bewegung unbehaglich wird und starten Sie die Skalierung von vorn
32. Bewegen Sie die Kugel in die Mitte des Brettes, dazu können Sie sich auch teleportieren, damit die Perspektive einfacher wird
33. Deselektieren Sie die Kugel indem Sie auf die Kugel mit dem Laserpointer zielen und drücken Sie den Trigger-Knopf
34. Selektieren Sie einen der drei TicTacToe-Würfel
35. Führen Sie nun den rechten Controller auf die Funktion "Delete", dazu müssen Sie gegebenenfalls Ihren Arm drehen, drücken Sie den Trigger-Knopf um den markierten Würfel zu löschen
36. Selektieren Sie einen weiteren TicTacToe-Würfel
37. Versuchen Sie den selektierten Würfel blind zu löschen, ohne auf das Interface zu schauen
38. Versuchen Sie blind die Funktion "Quit" auf dem Interface zu finden und drücken Sie den Trigger-Knopf, um die Anwendung zu beenden