



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES

FAKULTÄT FÜR MATHEMATIK UND INFORMATIK
FACHBEREICH INFORMATIK

In Kooperation mit
°CENTIGRADE

Eingabe diskreter numerischer Werte in Virtual Reality

Masterthesis

Dominic Gottwalles

Masterstudium Medieninformatik

März 2017

Betreuer:

André Zenner,
Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH,
Saarbrücken, Deutschland

Frederic Frieß,
Centigrade GmbH,
Frankfurt am Main, Deutschland

Gutachter:

Prof. Dr. Antonio Krüger,
Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH,
Saarbrücken, Deutschland

Frederic Frieß,
Centigrade GmbH,
Frankfurt am Main, Deutschland

vorgelegt am:

30. März 2017

Universität des Saarlandes
Fakultät für Mathematik und Informatik
Fachbereich Informatik
66123 Saarbrücken
Deutschland

Eidesstattliche Erklärung:

Ich erkläre hiermit an Eides Statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Statement in Lieu of an Oath:

I hereby confirm that I have written this thesis on my own and that I have not used any other media or materials than the ones referred to in this thesis.

Einverständniserklärung:

Ich bin damit einverstanden, dass meine (bestandene) Arbeit in beiden Versionen in die Bibliothek der Informatik aufgenommen und damit veröffentlicht wird.

Declaration of Consent:

I agree to make both versions of my thesis (with a passing grade) accessible to the public by having them added to the library of the Computer Science Department.

Saarbrücken, 30. März 2017

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich in aller Form den Personen danken, die mir die Realisierung dieser Arbeit ermöglicht haben.

An erster Stelle bedanke mich recht herzlich bei André Zenner für die erstklassige Betreuung, die kompetenten Ratschläge und das Korrekturlesen der Thesis. Zudem bedanke ich mich bei Frederic Frieß für die technische Betreuung und die hilfreichen Anregungen sowie das Bewerten der Thesis. Ebenfalls danken möchte ich Prof. Dr. Antonio Krüger für die Kooperation mit der Firma Centigrade, das hilfreiche Feedback und die Bereitschaft, die Thesis zu bewerten.

Außerdem danke ich Thomas Immich – stellvertretend für die Firma Centigrade – für die finanzielle Unterstützung und das Bereitstellen notwendiger Hardware.

Des Weiteren bin ich Saskia Hehl sehr dankbar für ihr abschließendes Korrekturlesen der Thesis.

Ein weiterer Dank gilt meiner Familie, die mich während meines gesamten Studiums sowohl mental als auch finanziell unterstützte.

Zu guter Letzt danke ich allen Teilnehmern der beiden Studien.

Abstract

The industrial context imposes specific requirements on interactive virtual reality applications. Additional interaction hardware, like controllers or proxies, can constrain the factory employee, so a solution without auxiliary devices is aimed for. One solution could be a gesture-based approach. However, many interactions performed with the hand in mid-air provide only limited or no haptic feedback. Therefore, in this master's thesis, an on-hand input method for virtual reality was conceptualized and implemented, that exploits the dual-sided haptic feedback of an on-body interaction. The interface was designed for the use case of machine configuration in the virtual environment, and enables the input of discrete numerical values. A pre-study, that addresses research questions about the hand orientation and the layout of the interface, was conducted with low-fidelity prototypes. Finally, a high-fidelity prototype was implemented. In an explorative study, the influence of different haptic feedback types, the effect on immersion, the fun and strain, the naturalness, the usability, the performance and user preferences of different input methods were investigated. For this, the prototype was evaluated together with five other input methods in an industrial scenario. The input methods for comparison were chosen to cover different haptic feedback types and state-of-the-art solutions. Among them was a controller input, which achieved, altogether, the best results. Moreover the findings exposed the current limitations in hand tracking and their consequences for the user experience. In the presence of prominent mismatches between virtual and real hand positions, additional haptics appeared distracting compared to the use of no haptic feedback. So a single-handed input method without haptics is currently recommended for the industrial field of application. However, taken as a whole, the results showed that the on-hand input is worth to be further developed.

Kurzfassung

Der industrielle Kontext stellt spezielle Anforderungen an interaktive Virtual Reality-Anwendungen. Zusätzliche Interaktionshardware, wie beispielsweise Controller oder Proxy-Objekte, kann den Fabrikangestellten behindern. Daher ist eine Lösung anzustreben, die ohne solche Zusatzgeräte auskommt. Ein möglicher Lösungsansatz ist eine gestenbasierte Interaktion. Allerdings erhält der Benutzer bei Gesten, die er in der Luft ausführt, nur eingeschränkte oder keine haptische Rückmeldung. Daher wurde in dieser Arbeit eine handflächenbasierte Eingabemethode für Virtual Reality konzipiert und implementiert, die das zweiseitige haptische Feedback einer On-Body-Interaktion ausnutzt. Das Interface wurde für den Anwendungsfall der Maschinenkonfiguration entworfen und ermöglicht die Eingabe diskreter numerischer Werte. Mit Hilfe von Low-Fidelity-Prototypen wurde eine Vorstudie durchgeführt, die sich mit der Handorientierung und dem Layout des Interfaces beschäftigte. Schließlich wurde ein High-Fidelity Prototyp implementiert, der mit fünf weiteren Eingabemethoden in einem industriellen Szenario evaluiert wurde. Diese Studie untersuchte den Einfluss verschiedener Typen haptischen Feedbacks, die Auswirkung auf die Immersion, den Spaß und die Anstrengung, die Natürlichkeit, die Usability, die Leistungsfähigkeit und Nutzerpräferenzen. Bei der Auswahl der Eingabemethoden wurden verschiedene Typen haptischen Feedbacks und State-of-the-Art Methoden berücksichtigt. Darunter war ein Controller-basiertes Eingabeverfahren, das insgesamt die besten Resultate erzielte. Die Ergebnisse deckten außerdem die aktuellen Einschränkungen im Bereich Hand-Tracking und deren Folgen für die User Experience auf. Im Falle einer bemerkbar hohen Diskrepanz zwischen virtueller und realer Handstellung störte die zusätzliche Haptik verglichen mit Eingabemethoden ohne haptisches Feedback. Daher ist derzeit für den industriellen Anwendungsfall eine einhändige Eingabemethode ohne Haptik zu empfehlen. Dennoch zeigten die Ergebnisse, dass es erstrebenswert ist, die Entwicklung der handflächenbasierten Eingabemethoden weiter zu verfolgen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	1
1.1	Motivation	1
1.1.1	Virtual Reality	2
1.1.2	Eingabemethoden für Virtual Reality	4
1.1.3	Haptische Interaktion in Virtual Reality	6
1.1.4	Virtual Reality in der Industrie	6
1.2	Forschungsziele	8
1.3	Gliederung	9
2	Verwandte Arbeiten	11
2.1	Reality-Virtuality Kontinuum	11
2.2	Haptik in Virtual Reality	13
2.2.1	Aktive Haptik	14
2.2.2	Passive Haptik	15
2.2.3	Hybride Typen	16
2.2.4	Kurzzusammenfassung	17
2.3	On-Body Interfaces	17
2.4	Imaginary Interfaces	19
2.5	Leap Motion Virtual Reality Interfaces	20
2.6	Numerische Eingabe in Virtual Reality	23
2.6.1	Mit Eingabegerät	23
2.6.2	Ohne Eingabegerät	24
3	Handflächenbasiertes Interface	29
3.1	Eingabekonzept	29
3.2	Vorstudie	30
3.2.1	Forschungsfragen	30
3.2.2	Low-Fidelity Prototypen	32
3.2.3	Experiment	34
3.3	Ergebnisse	37
3.3.1	Handausrichtung	38

3.3.2	Tastenanordnung und -nummerierung	40
3.4	Diskussion und Schlussfolgerung	41
4	Eingabemethoden	45
4.1	Eingabe mit den Händen	45
4.1.1	Ohne Haptik	45
4.1.2	Mit aktiver Haptik	46
4.1.3	Mit passiver Haptik	47
4.2	State-of-the-Art Methoden	49
4.3	Gegenüberstellung	52
5	Implementierung	53
5.1	Virtual Reality System	53
5.2	Probleme	57
5.3	Lösungen	58
5.3.1	Handoptimierung	58
5.3.2	Erkennung der Handberührung	59
5.4	Proxy	63
5.5	Kurzzusammenfassung	64
6	Hauptstudie	65
6.1	Forschungsfragen	65
6.2	Aufbau	66
6.3	Ablauf	66
6.4	Design	70
7	Ergebnisse	73
7.1	Teilnehmer	73
7.2	Leistung und Effizienz	74
7.2.1	Eingabezeit	74
7.2.2	Interaktionszeit	78
7.2.3	Erfolgsrate	78
7.2.4	Korrekturen	79
7.3	Teilnehmerbewertungen	81
7.3.1	Persönliche Rangordnung	81

7.3.2	SUS-Score	82
7.3.3	Andere Charakteristika	85
7.4	Auffälligkeiten und Beobachtungen	91
7.5	Subjektive Rückmeldungen	92
8	Diskussion	95
8.1	Ergebnisse und Beobachtungen	95
8.1.1	Leistung und Effizienz	95
8.1.2	Charakteristika der Interaktion	98
8.1.3	Controllereingabe	100
8.1.4	Gesamtbewertungen	100
8.2	Schlussfolgerungen	102
9	Zusammenfassung und Ausblick	105
9.1	Zusammenfassung	105
9.1.1	Ziele	105
9.1.2	Ergebnisse	106
9.1.3	Schlussfolgerungen	107
9.2	Empfehlungen für zukünftige Arbeiten	107
	Anhang	109
	A Fragenkatalog der Hauptstudie	109
	Verzeichnisse	113
	Abbildungen	113
	Tabellen	117
	Algorithmen	119
	Abkürzungen	121
	Literatur	123

Kapitel 1

Einführung

1.1 Motivation

Das vergangene Jahr 2016 war ein bedeutendes Jahr für *Virtual Reality*. Nach dem Release der ersten Hardware für den Konsumentenmarkt gewinnt diese Technologie zunehmend an Bedeutung. Aber nicht nur Endanwender im Gaming- und Entertainmentbereich beschäftigen sich mit den neuen Möglichkeiten, die diese Technologie erschafft, sondern auch der industrielle Sektor erkundet schon länger dessen Potenzial im industriellen Einsatzgebiet.

Neben passiv erlebbaren Anwendungen, die keine direkte Interaktion des Nutzers erfordern, sondern lediglich das visuelle Erkunden einer virtuellen Umgebung ermöglichen, nimmt die Anzahl interaktiver Anwendungen immer mehr zu. Dabei stellen die Einsatzgebiete, wie zum Beispiel Entertainment, Industrie, Visualisierung oder Schulung und Forschung, jeweils eigene Anforderungen an das Bedienkonzept. Es zeigt sich, dass traditionelle Bedienkonzepte aus dem *Personal Computing*¹ sich als eher ungeeignet herausstellen und die Anforderungen zunehmend auf natürliche Interaktion hindeuten [3,4]. Natürliche Interaktion bedeutet, dass der Benutzer äquivalent zum realen Leben in der virtuellen Realität agiert. Zusätzliche Hardware ermöglicht dem Benutzer, eine virtuelle Repräsentation seiner eigenen Hände zu sehen und Gesten auszuüben, die erkannt und auf die virtuelle Welt angewendet werden (siehe Abbildung 1.1). Durch den Einsatz physikalischer Objekte, die von zugehörigen virtuellen Objekten repräsentiert

¹ Als *Personal Computing* bezeichnet man die „persönliche Datenverarbeitung durch den Endbenutzer am individuellen Arbeitsplatz zur Lösung arbeitsplatzspezifischer Probleme“ [1,2]. Dieser Begriff wurde in der Zeit eingeführt, in der die damaligen teuren *Personal Computer* hauptsächlich am Arbeitsplatz Anwendung fanden. Nach deren Einzug in das private Umfeld lässt sich dieser Begriff jedoch weiter ausdehnen.



Abbildung 1.1: Illustration eines Benutzers, der in *Virtual Reality* durch Handgesten die Form eines virtuellen Würfels manipuliert. Hierbei sieht er virtuelle Repräsentationen seiner eigenen Hände [5].

werden und dem Benutzer haptische Rückmeldung bei der Interaktion liefern, kann die virtuelle Welt sogar greifbar gemacht werden.

Mit Hilfe moderner Technologien sind mehrere Interaktionsformen für VR entstanden, die unterschiedliche Charakteristika aufweisen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde eine selbst konzipierte Eingabemethode umgesetzt, die zusammen mit anderen Eingabelösungen in einer explorativen Studie anhand eines ausgewählten Anwendungsfalls untersucht wurde.

1.1.1 Virtual Reality

Definition: „*Virtuelle Realität ist eine mittels Computer simulierte Wirklichkeit oder künstliche Welt, in die Personen mithilfe technischer Geräte sowie umfangreicher Software versetzt und interaktiv eingebunden werden.*“ [6]

Viele kennen Virtual Reality (VR) oder vergleichbare Konzepte schon länger aus Science-Fiction Filmen (siehe Abbildung 1.2). Das Konzept der VR ist nicht besonders neu und die erste Hardware existiert bereits seit einigen Jahrzehnten. Jedoch war diese zur damaligen Zeit noch sehr teuer und brachte einige Limitation mit sich. Dazu gehörten eine geringe Rechenleistung, Bildauflösung und -frequenz. Ein wirklich immersives² VR-Erlebnis konnte daher nicht erreicht werden. Ihre Bekanntheit beschränkte sich größtenteils auf den Forschungsbereich.

²Immersion beschreibt den Eindruck, in eine virtuelle Welt vertieft oder tief einbezogen zu sein [7]. Je stärker das Gefühl ist, in die virtuelle Welt vertieft zu sein, desto höher ist die Immersion.



Abbildung 1.2: Vision der VR-Technologie aus dem Science-Fiction Film *Johnny Mnemonic* (1995) (Quelle: youtube.com, Abrufdatum: 27. März 2017).

Durch die Stimulation mehrerer Sinne der visuellen, auditiven, olfaktorischen, gustatorischen oder haptischen Wahrnehmung ermöglicht VR das Erleben virtueller Umgebungen auf eine derartig überzeugende Weise, dass der Nutzer sie als real wahrnehmen kann. Bei modernen VR-Systemen wird üblicherweise das Bild mit einer stereoskopischen und dreidimensionalen Darstellung durch ein sogenanntes Head Mounted Display (HMD) direkt vor den Augen und unter Ausschluss des realen Nutzerumfelds angezeigt.

Das amerikanische Unternehmen *Oculus VR* begann 2013 erstmals mit der Auslieferung eines modernen HMD. Bei der ersten Version seiner VR-Brille (siehe Abbildung 1.3) handelte es sich allerdings zunächst um ein sogenanntes *Development Kit*³. Mit dieser bezahlbaren Hardware konnten Softwareentwickler Anwendungen entwickeln, mit denen das Konzept VR überzeugend erlebt werden konnte. Ein Jahr später begann das Unternehmen bereits mit der Auslieferung der zweiten Generation seines Prototyps, dem *Development Kit 2*. Dieser wies einige Hardwareverbesserungen auf, wie zum Beispiel eine höhere Auflösung und Bildfrequenz sowie eine Positionsbestimmung des Headsets. Seit 2016 ist eine nochmals weiterentwickelte Version, die sogenannte *Oculus Rift*, erstmals frei auf dem Konsumentenmarkt erhältlich. Andere Hersteller, wie *HTC* und *Sony*, zogen im gleichen Jahr noch mit der Auslieferung ihrer eigenen VR-Brillen, der *HTC Vive* und *Playstation VR* nach.

VR ist also schließlich im Konsumentenbereich angekommen und erreicht damit eine größere Zielgruppe. Keines der Unternehmen veröffentlichte seither

³Dieser Prototyp war an Entwickler und VR-Enthusiasten gerichtet und nicht auf dem freien Konsumentenmarkt erhältlich.



Abbildung 1.3: Bild des ersten *Oculus Rift Development Kits* (Quelle: wikipedia.org, Abrufdatum: 27. März 2017).

konkrete Verkaufszahlen ihrer Produkte. Allerdings berichtete *The New York Times* auf Grundlage des *Virtual Reality Industry Report 2016* [8] Schätzungen der Zahlen [9]. Demnach soll *Oculus VR* in etwa 360 000, *HTC* 450 000 und *Sony* 750 000 Verkäufe im Jahr 2016 erzielt haben. Aufgrund der zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten in unterschiedlichen Bereichen und der inzwischen bezahlbaren und zudem leistungsstarken Hardware, ist VR auf dem besten Weg, eine *Ubiquitous Technology*⁴ zu werden.

1.1.2 Eingabemethoden für Virtual Reality

Wie bereits am Anfang des Kapitels erwähnt, werden VR-Anwendungen zunehmend interaktiver. Hierbei lassen sich aktuelle Interaktionstechniken in drei Kategorien einteilen: Controller-basierte Interaktion, Interaktion mit Hilfe der Blickrichtung (*Head-Gaze*) und gestenbasierte Interaktion mit den Händen.

Für derzeitige VR-Hardware, wie beispielsweise die *Oculus Rift* oder *HTC Vive*, sind zugehörige Controller verfügbar (siehe Abbildung 1.4), die teilweise sogar gebündelt mit den HMD mitgeliefert werden. Die Position der Controller im Raum kann über ein zugehöriges Trackingsystem erkannt werden, sodass mit den Bedienelementen des Controllers in Kombination mit dessen Position oder über eine Bewegungsgeste interagiert werden kann.

Neben dieser bereits etablierten Interaktionstechnik, ist die Interaktion mit Hilfe der Blickrichtung in aktuellen Anwendungen ebenfalls weit verbreitet. Ein Vorteil

⁴Als *Ubiquitous Technology* wird eine Technologie bezeichnet, die fest im Alltag der Menschen verankert und wesentlicher Bestandteil des täglichen Lebens ist [10].



Abbildung 1.4: Bild eines Benutzers der *Oculus VR* während der Interaktion mit den zugehörigen *Oculus Touch*-Controllern (Quelle: fortune.com, Abrufdatum: 27. März 2017).

dieses Verfahrens ist, dass hierfür keine zusätzliche Hardware benötigt wird. Der Benutzer kann durch die Ausrichtung seines Kopfes ein virtuelles Bedienelement selektieren. Das Auslösen des fokussierten Steuerelementes ist oftmals über eine sogenannte *Dwell Time* gelöst. Das bedeutet, dass der Benutzer das zugehörige Element, beispielsweise ein Button, eine bestimmte Zeit lang anvisieren muss, damit dieses betätigt wird. Ein Nachteil dieses Vorgehens ist das sogenannte *Midas Touch Problem* [11]. Dieses beschreibt die Problematik, dass das System nicht zwischen einem bewussten Fokussieren zur Interaktion oder dem reinen Erkunden der Umgebung unterscheiden kann, sodass Aktionen auch ungewollt ausgelöst werden können. Es gibt allerdings wissenschaftliche Arbeiten, die sich speziell Lösungen dieses Problems widmen [12].

Zunehmend relevanter wird die Erkennung handbasierter Gesten, welche eine natürliche Art der Interaktion darstellen. Durch den Einsatz von Infrarot-Tiefenkameras, wie beispielsweise der *Leap Motion*, und dem heutigen Wissen im Bereich *Computer Vision* können die Hände des Benutzers rekonstruiert und ausgeübte Mikrogesten erkannt sowie deren Aktionen auf die virtuelle Welt angewendet werden. Während sich bereits viele wissenschaftliche Arbeiten mit gestenbasierten Interaktionen und deren Einsatzmöglichkeiten in VR beschäftigen [13–16], wird diese Interaktionsform im Konsumentenbereich derzeit noch selten eingesetzt. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass die benötigte Hardware nicht standardmäßig mit den VR-Brillen mitgeliefert wird und von Drittanbietern zusätzlich beschafft werden muss. Allerdings zeigte sich bereits durch andere

Systeme außerhalb des VR-Umfeldes, wie beispielsweise durch die Bedienung über die *Microsoft Kinect*, dass diese Art der Interaktion zwischen Mensch und Computer erfolgreich eingesetzt werden kann.

1.1.3 Haptische Interaktion in Virtual Reality

Andererseits bringt eine rein gestenbasierte Interaktion einen wesentlichen Nachteil mit sich. Während man beim Berühren von Objekten in der realen Welt haptische Rückmeldung erhält, wartet man beim virtuellen Interagieren mit den eigenen Händen vergeblich auf haptisches Feedback. Langfristig gesehen wird allerdings die ausschließliche Stimulation der visuellen und auditiven Sinne nicht hinreichend für ein realistisches VR-Erlebnis sein [17]. Forscher fanden bereits heraus, dass haptische Rückmeldung das Benutzererlebnis und die Immersion in VR signifikant verbessern kann [3, 18–22]. Zudem zeigen Studien, dass der Einsatz haptischer Rückmeldung Fehlbedienungen minimieren kann [23].

Die wissenschaftlichen Arbeiten im Umfeld von Haptik in VR unterscheiden grundlegend zwei Arten: aktive und passive Haptik [24].

Beim Einsatz aktiver Haptik wird die wahrgenommene Rückmeldung durch ein Gerät, das über physische Aktoren verfügt, ausgelöst. Diese Aktoren können unterschiedlicher Natur sein, sodass beispielsweise Vibrationen, Kräfte oder Bewegungen auf den Benutzer ausgeübt werden können. Üblicherweise sind diese Geräte allerdings für eine bestimmte Art der Rückmeldung oder spezielle Einsatzgebiete konzipiert. Weiterhin decken diese Geräte nicht das ganze Spektrum an Haptik ab, das man im realen Leben erfahren kann, und lösen somit das Problem der fehlenden Haptik in VR nicht ganzheitlich.

Passive haptische Systeme können diese Lücke schließen. Sie unterscheiden sich wesentlich von Aktiven, da sie keine physischen Aktoren zum Ausüben aktiver Kräfte verwenden. Stattdessen werden Objekte eingesetzt, welche die gleiche oder eine ähnliche Form und Beschaffenheit repräsentierter virtueller Gegenstände haben. Diese Objekte werden auch als *Proxy*-Objekte bezeichnet. Der Benutzer erhält hier rein durch das Berühren oder Halten eines *Proxy*-Objekts (siehe Abbildung 1.5) haptische Rückmeldung.

1.1.4 Virtual Reality in der Industrie

Auch wenn VR derzeit am häufigsten von Endanwendern im Gaming- und Entertainmentumfeld genutzt wird, bietet diese Technologie Potenzial für viele weitere Bereiche, darunter auch der industrielle Sektor [26].

Wenn heutzutage von *Industrie 4.0*⁵ gesprochen wird, fällt häufig auch das Stichwort Virtual Reality [28]. Der Entwicklungsprozess moderner Produktionsma-

⁵ „Das Schlagwort Industrie 4.0 beschreibt die sogenannte „Vierte Industrielle Revolution“. Diese zeichnet sich dadurch aus, dass digital gesteuerte Systeme in der produzierenden Industrie unter Nutzung von Internet-Technologien kommunizieren“ [27].



Abbildung 1.5: Bild eines Benutzers eines stabförmigen *Proxy*-Objekts, welches in der virtuellen Welt durch einen gehaltenen hölzernen Ast repräsentiert wird [25].

schienen involviert die Zusammenarbeit unterschiedlicher Fachbereiche und wird mit der Anforderung konfrontiert, eine möglichst kurze Entwicklungszeit bis zur Marktfreigabe zu benötigen [29]. Das traditionelle Entwicklungsvorgehen, basierend auf funktionsfähigen Prototypen, eignet sich daher eher weniger. Durch virtuelle Modelle und die VR-Technologie lässt sich jedoch eine große Anzahl an Variationen kostengünstig und schnell testen, sodass die Maschine mit einer geringen Anzahl physischer Prototypen optimiert werden kann [30]. Weiterhin ließen sich durch eine virtuelle Inbetriebnahme einer Maschine oder ganzer Produktionslinien Fehler bereits in frühen Entwicklungsphasen beseitigen, bevor diese im produktiven Einsatz zu hohen finanziellen Kosten führen könnten.

Ein besonders attraktives Einsatzgebiet ist auch die Simulation von Arbeitssituationen zu Trainingszwecken [32–34]. Auf diese Weise können Mitarbeiter geschult werden, ohne die laufende Produktion zu unterbrechen oder zu verlangsamen. Zudem führen mögliche Fehlbedienungen zu keinen gesundheitlichen oder finanziellen Schäden [35].

Ein wichtiger Anwendungsfall im industriellen Kontext stellt in jedem Fall die Eingabe numerischer Werte dar [36]. Sowohl zur parametrischen Konfiguration von Maschinen als auch zur Steuerung der Produktion, beispielsweise durch die Stückzahl oder Typennummer des zu produzierenden Werkstücks, ist die Eingabe numerischer Werte ein wesentlicher Bestandteil im Arbeitsalltag eines Industriearbeiters. Daher wird auch an industrielle VR-Anwendungen die Anforderung gestellt, ein Eingabekonzept für numerische Werte zu unterstützen. Da zusätzliche Eingabegeräte, wie beispielsweise Controller, den Benutzer bei

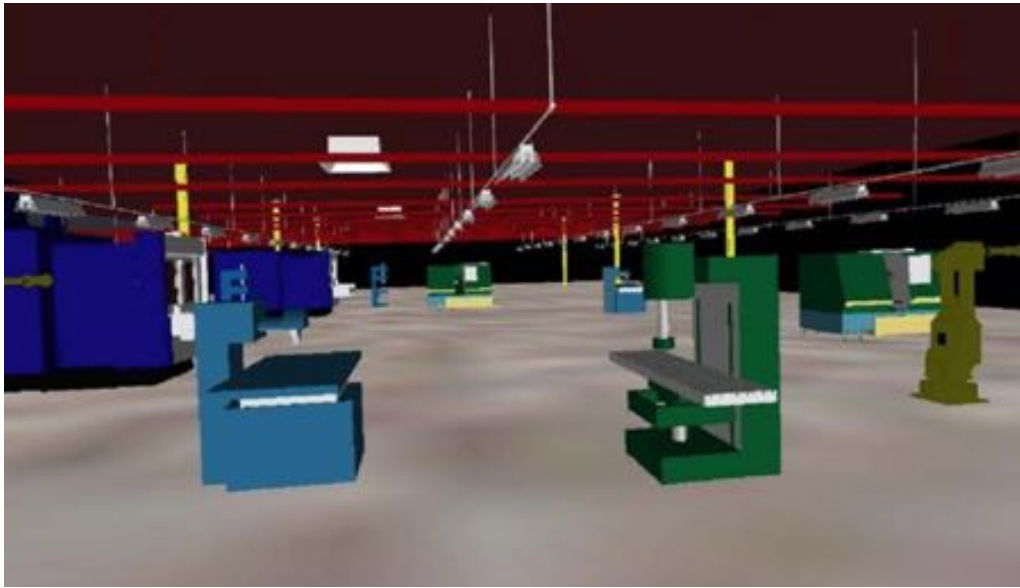


Abbildung 1.6: Beispiel einer industriellen virtuellen Umgebung. Das Bild stammt aus einer Arbeit [31] aus dem Jahr 2007, weshalb der niedrige Detailgrad und die Auflösung nicht dem fortgeschrittenen Stand aktueller Anwendungen entspricht.

seiner Arbeit behindern oder im Falle eines *Proxy*-Objekts in seiner Bewegung einschränken können, ist an dieser Stelle eine Lösung ohne zusätzliche Hilfsmittel erstrebenswert.

1.2 Forschungsziele

Diese Thesis beschäftigt sich mit Eingabemethoden für diskrete numerische Werte in Virtual Reality. Dabei liegt ein Fokus auf der Konzeption und Umsetzung einer Lösung, die auf keine zusätzlichen Hilfsmittel zur Interaktion angewiesen ist und somit die Anforderungen an den Einsatz in industriellen Anwendungen erfüllt. Im Konkreten soll die Arbeit folgenden Ziele abdecken:

Exploration von Eingabemethoden für diskrete numerische Werte

Auf Grund der (vor allem im industriellen Kontext) hohen Relevanz der Eingabe numerischer Werte in VR, sollen im Rahmen der Arbeit mögliche Eingabemethoden exploriert werden. Hierbei sollen unterschiedliche Arten haptischer Rückmeldung betrachtet werden, um im Folgenden deren Einfluss auf das Benutzererlebnis untersuchen zu können. Des Weiteren sollen bereits etablierte Eingabeverfahren berücksichtigt werden. Diese Arbeit beschränkt sich zunächst auf die Eingabe diskreter Werte.

Konzeption einer Eingabemethode für den industriellen Einsatz

Infolge der genannten Anforderungen an industrielle VR-Anwendungen soll eine Eingabemethode für numerische Werte entwickelt werden, deren Interaktion keine zusätzliche Hardware voraussetzt, welche den Benutzer in der Freiheit seiner Hände oder seiner Bewegung einschränken könnte. Zudem soll diese Eingabemethode über haptische Rückmeldung verfügen, die das Benutzererlebnis und die Immersion in VR verbessern und zur Minimierung von Fehlbedienungen beitragen kann.

Experimentelle Untersuchung der Eingabemethoden

Im Anschluss an die Implementierung der Eingabemethoden sollen diese anhand eines Anwendungsfalles experimentell untersucht und miteinander verglichen werden. Hierbei soll einerseits die Leistung und Effizienz der Eingabemethoden untersucht werden, da dies wichtige Kriterien für den produktiven Einsatz im industriellen Kontext sind. Außerdem sollen neben der Usability verschiedene andere Charakteristika der Interaktion untersucht und die Präferenz der Benutzer bestimmt werden.

1.3 Gliederung

Der verbleibende Teil der Thesis ist wie folgt strukturiert: Als Grundlage werden im nächsten Kapitel einige **Verwandte Arbeiten** behandelt, darunter neben Arbeiten im VR-Umfeld auch **On-Body Interfaces** im Allgemeinen. Im darauffolgenden Kapitel **Handflächenbasiertes Interface** wird zu Beginn das **Eingabekonzept** der handflächenbasierten Eingabemethode vorgestellt und im Anschluss – zur Ermittlung des Designs des Interfaces – eine Vorstudie und deren Ergebnisse besprochen. Anschließend wird im Kapitel **Eingabemethoden** die Umsetzung dieser und fünf weiterer Eingabemethoden vorgestellt, die später in einer Hauptstudie untersucht wurden. Auf Implementierungsdetails wird im angrenzenden Kapitel **Implementierung** eingegangen. Im darauffolgenden Kapitel wird die bereits angesprochene **Hauptstudie** im Detail beschrieben. Deren Ergebnisse werden in den beiden anschließenden Kapiteln **Ergebnisse** und **Diskussion** zusammengefasst, beziehungsweise diskutiert. Schlussendlich beinhaltet das letzte Kapitel **Zusammenfassung und Ausblick** eine **Zusammenfassung** der Thesis und spricht einige **Empfehlungen für zukünftige Arbeiten** aus.

Ein **Abbildungsverzeichnis**, **Tabellenverzeichnis**, **Algorithmenverzeichnis** und **Abkürzungsverzeichnis** sowie das **Literaturverzeichnis** sind am Ende der Thesis zu finden.

Kapitel 2

Verwandte Arbeiten

In diesem Kapitel werden Arbeiten und Forschungsergebnisse vorgestellt, die in einem Zusammenhang zu dieser Thesis stehen. Zunächst werden mit dem **Reality-Virtuality Kontinuum** grundlegende Konzepte und Begriffe eingeführt, die verwandt mit Virtual Reality sind. Anschließend wird die Thematik **Haptik in Virtual Reality** aufgegriffen und die verschiedenen Typen haptischen Feedbacks mit zugehörigen Beispielen beschrieben. Für die handflächenbasierte Eingabemethode sind die Forschungsergebnisse aus dem Bereich **On-Body Interfaces** und **Imaginary Interfaces** relevant, die im Anschluss behandelt werden. Danach werden zwei **Leap Motion Virtual Reality Interfaces** vorgestellt, die an das Konzept der *On-Body Interfaces* anschließen. Das Kapitel wird mit den bisherigen Arbeiten im Bereich **Numerische Eingabe in Virtual Reality** abgeschlossen.

2.1 Reality-Virtuality Kontinuum

Im Zusammenhang mit VR werden oftmals auch die Begriffe Augmented Reality (AR) oder Mixed Reality (MR) verwendet, deren Konzepte zwar artverwandt sind, sich aber dennoch voneinander unterscheiden. Milgram und Colquhoun beschäftigten sich in ihrer Arbeit [37] mit einer zugehörigen Klassifizierung und führten hierzu weitere Begrifflichkeiten ein.

Eine Grundlage der Klassifizierung bildet die Bestimmung der Realität und der Virtualität. Zwar existieren rein reale und rein virtuelle Umgebungen, allerdings gibt es auch Vermischungen, sodass sich beide Extrema nicht gegenseitig ausschließen, sondern zusammen ein Reality-Virtuality (RV) Kontinuum bilden (siehe Abbildung 2.1). Bei der reinen Realität ist die Umgebung (oder auch Welt genannt) ausschließlich unmodelliert, wohingegen sie im Falle einer reinen Virtualität vollständig computer-modelliert wurde und visuell durch ein

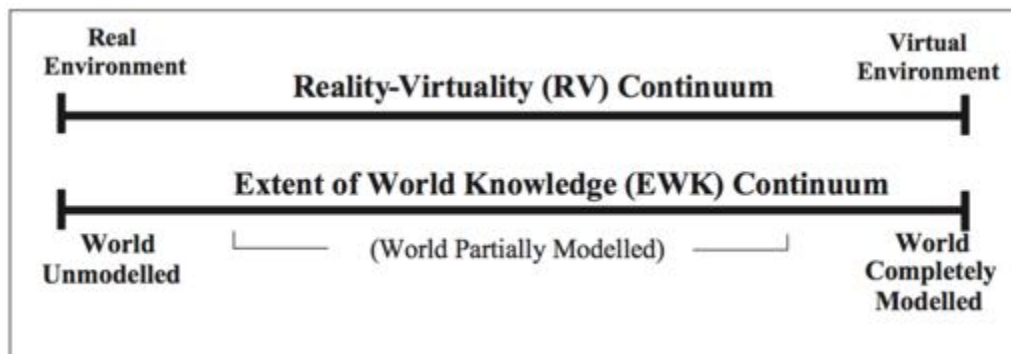


Abbildung 2.1: Gegenüberstellung des Reality-Virtuality Kontinuums und des Extent of World Knowledge Kontinuums [37].

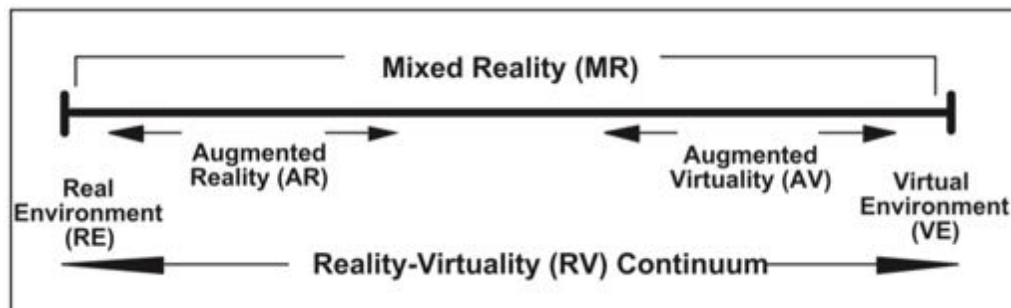


Abbildung 2.2: Definition von Mixed Reality im Kontext des Reality-Virtuality Kontinuums [37].

Rendering dargestellt wird. Bildmaterial, das aus einem Sampling-Prozess entstand, wie beispielsweise photographische Bilder oder Videos, wird auch als unmodelliert angesehen. Diese beiden Extrema (unmodellierte und vollständig modellierte Welt) spannen ein weiteres, verwandtes Kontinuum auf, das Extent of World Knowledge (EWK) Kontinuum.

Milgram und Colquhoun definieren Mixed Reality (MR) als den Bereich zwischen der reinen Realität und der reinen Virtualität, in dem die Welt teilweise modelliert und teilweise unmodelliert ist, wobei die beiden Extrema ausgeschlossen werden (siehe Abbildung 2.2). MR-Systeme stimulieren also die Sinne des Benutzers mit realen wie auch virtuellen Reizen. Abhängig vom Grad der Realität und der Virtualität, beziehungsweise dem Verhältnis der modellierten und unmodellierten Bestandteile der Welt, unterscheiden sich diese Systeme allerdings voneinander, sodass MR in zwei weitere Bereiche unterteilt wird. Die Umgebungen von Augmented Reality (AR)-Systemen bestehen hauptsächlich aus realen Bestandteilen, und haben einen geringen virtuellen Anteil. Die reale Welt steht hier also im Vordergrund und wird nur mit wenigen virtuellen Elementen angereichert. Bei der Augmented Virtuality (AV) hingegen liegt der Fokus auf der modellierten Welt, die mit wenigen realen Elementen ergänzt wird.

In der ursprünglichen Publikation von Milgram und Colquhoun lag der Fokus hauptsächlich auf der visuellen Darstellung realer oder virtueller Inhalte. Moderne VR-Systeme setzen allerdings nicht nur auf visuelle Reize, sondern auch auf die Stimulation weiterer Sinne, wie beispielsweise durch den Einsatz haptischen Feedbacks. Andere Wissenschaftler wenden diese Taxonomie daher auch auf weitere Dimensionen an [24]. Demnach lässt sich ein VR-System (wie es in dieser Thesis betrachtet wird), in dessen Interaktion ein *Proxy*-Objekt (siehe Unterabschnitt 2.2.2) oder die passive Haptik eines *On-Body Interfaces* (siehe Abschnitt 2.3) involviert ist, als Augmented Virtuality (AV) und somit auch als Mixed Reality (MR) einstufen. Dazu gehören auch Eingabemethoden, die in dieser Thesis vorgestellt werden.

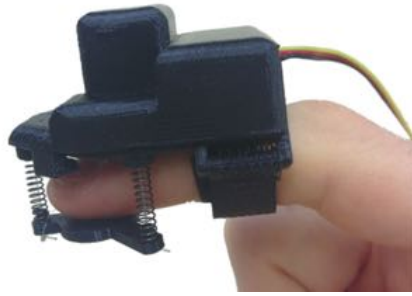
2.2 Haptik in Virtual Reality

Haptik ist ein wesentlicher Bestandteil des realen Lebens. Durch das Berühren, Er tasten oder Verformen von Objekten erhält der Mensch wesentliche Informationen darüber, um welche Art von Objekt es sich handelt und was seine Eigenschaften sind. Das Erkunden von Gegenständen oder Materialien auf diese Weise, ist eine instinktive Handlung eines jeden Menschen, die auch dazu dient, ihn vor Gefahren oder Verletzungen zu schützen. Dementsprechend relevant ist Haptik auch für VR. Denn das Ziel von Virtual Reality ist es, wie der Name schon zu erkennen gibt, das Gefühl einer Realität zu vermitteln, auch wenn diese virtuell ist.

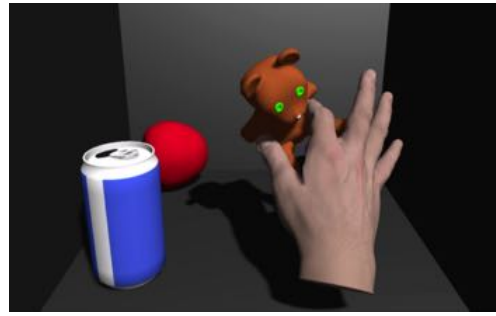
Ein wesentliches Problem stellen Situationen in VR dar, in denen der Benutzer mit Körperteilen durch solide Objekte hindurch gleitet, was ein Gegensatz zu den physikalischen Gesetzen der Realität ist. Wenn Menschen Objekte sehen, entwickeln sie intuitiv eine Erwartung, wie sich diese anfühlen könnten. Wenn diese Erwartung nicht erfüllt wird oder der Mensch in seiner Wahrnehmung getäuscht wird, löst dies ein Gefühl der Unnatürlichkeit aus, das sich dementsprechend negativ auf die Immersion in VR auswirken kann [38]. Srinivasan und Basdogan stellten fest, dass die Fähigkeit, ein Objekt in einer virtuelle Umgebung berühren zu können, neben dem Sehen (oder Hören) ein Immersionsgefühl vermittelt, das auf keine andere Weise erreicht werden kann [3].

Aus diesen Gründen ist es unvermeidbar, Haptik in VR-Systeme zu integrieren, damit sich der Benutzer in der virtuellen Umgebung so verhalten kann, wie er es aus der Realität gewohnt ist. Solche Systeme, in denen Haptik neben der grafischen Darstellung und dem Ton als zusätzliche Dimension integriert ist, werden als multimodale VR-Systeme bezeichnet [38].

Eine gängige Klassifizierung haptischen Feedbacks ist die in aktive Haptik und passive Haptik. Durch das Kombinieren dieser beider Typen lassen sich auch hybride Typen bilden.



(a) Tragbares, haptisches Gerät.



(b) Berühren eines virtuellen Objektes.

Abbildung 2.3: Bilder des haptischen Systems von Scheggi et al. [39], das dem Benutzer taktile Rückmeldung beim Berühren eines virtuellen Objekts liefert.

2.2.1 Aktive Haptik

Aktive haptische Geräte stimulieren den haptischen Sinn des Benutzer durch physische Aktoren. Diese werden über den Computer gesteuert und vermitteln durch das Ausüben von Kräften den Eindruck, dass ein virtuelles Objekt berührt wird. Die zugehörige Software, welche die physikalischen Aktoren steuert, kann zur Vermittlung einer überzeugend realen Haptik komplexe Algorithmen verwenden. Diese weisen deutliche Ähnlichkeiten zu den Algorithmen auf, die in der Computergraphik zum Rendering visueller Darstellungen verwendet werden.

Es existieren viele aktive haptische Systeme, die schon seit längerem im Konsumentenbereich Einsatz finden. Vor allem im Gaming-Bereich werden viele Force Feedback Joysticks eingesetzt, die aktive Haptik auslösen, also aktiv Kräfte auf den Benutzer ausüben, um ein realistischeres Steuerungsgefühl zu vermitteln. Hierfür werden beispielsweise in Force Feedback Lenkrädern Servomotoren eingesetzt, die den Widerstand und die Kräfte, die bei der Steuerung eines realen Fahrzeugs auftreten können, simulieren. Aber auch die in der Hand gehaltenen Controller gängiger Spielkonsolen verwenden Vibrationsmotoren, die dem Benutzer haptische Rückmeldung liefern können. Diese simulieren zwar nicht realistisch die Kräfte, die der Benutzer während der Spielsituation in der Realität erfahren würde, unterstützen ihn dennoch dabei zu bemerken, was in dem Spiel passiert.

Scheggi et al. [39] entwickelten ein haptisches System für VR, das dem Benutzer taktile Rückmeldung beim Berühren eines virtuellen Objekts liefert. Hierfür werden an den Fingern des Benutzers kleine haptische Geräte angebracht, die – über Servomotoren gesteuert – eine Kraft auf die Fingerspitze ausüben können (siehe Abbildung 2.3a). Die Bewegung der Hand wird über eine *Leap Motion*-Tiefenkamera verfolgt, wodurch der Benutzer eine virtuelle Handrepräsentation bewegen und sich virtuellen Objekten annähern kann (siehe Abbildung 2.3b). Bei der Berührung dieser werden über die haptischen Geräte entsprechende Kräfte ausgelöst, die die Berührung mit dem Objekt simulieren.

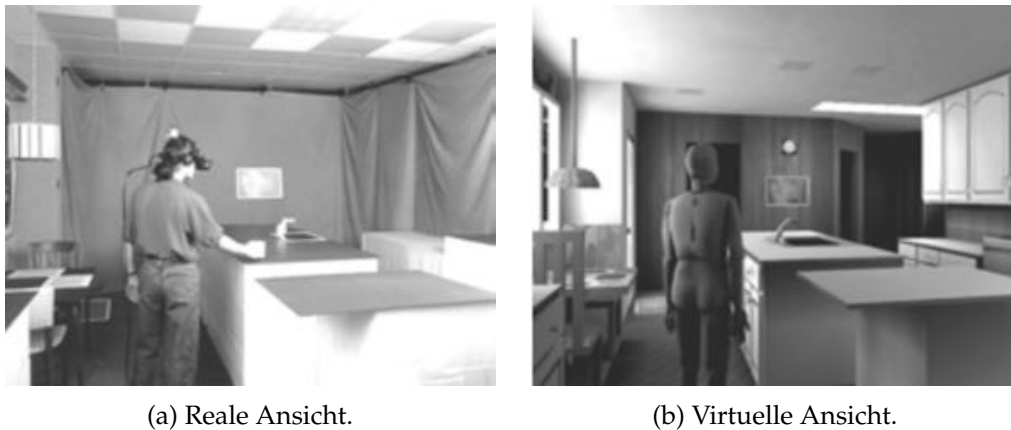


Abbildung 2.4: Bilder des *Passive Haptic Kitchen* von Insko [20].

Studien zeigen, dass der Einsatz aktiver Haptik in VR den Realismus und die Immersion steigern kann [3, 18–22]. Aber auch Fehlbedienungen können durch haptische Rückmeldung minimiert werden [23].

2.2.2 Passive Haptik

Passive haptische Systeme hingegen unterscheiden sich wesentlich von aktiven, da sie keine physischen Aktoren zum Ausüben aktiver Kräfte verwenden. Stattdessen werden in VR meist physikalische Objekte eingesetzt, die sogenannten *Proxy*-Objekte, die dem Benutzer bei einer Berührung haptische Rückmeldung liefern. Diese haben die gleiche oder ähnliche Form und Beschaffenheit repräsentierter virtueller Gegenstände und geben dem Benutzer bei der Interaktion das Gefühl, dass er mit dem virtuellen Objekt interagiert. Die Position und Ausrichtung dieser Objekte wird meist über ein Trackingsystem verfolgt, sodass die Darstellung des zugehörigen virtuellen Objekts dementsprechend angepasst werden kann.

Es gibt viele wissenschaftliche Arbeiten, die sich mit passiver Haptik in VR im Zusammenhang mit *Proxy*-Objekten beschäftigen. Ein Beispiel ist das *Passive Haptic Kitchen* von Insko [20] (siehe Abbildung 2.4). Er konstruierte eine Küchenumgebung aus günstigen Materialien (beispielsweise Styropor und Sperrholz) und untersuchte wie architektonische Elemente die Immersion und das räumliche Lernvermögen verbessern.

Passive Haptik kann in VR allerdings nicht nur durch *Proxy*-Objekte eingesetzt werden, sondern auch durch die Interaktion mit dem eigenen Körper. Kohli und Whitton [40] entwickelten beispielsweise ein System, bei dem der Benutzer in VR haptische Rückmeldung bei der Bedienung eines Interfaces durch die Berührung der eigenen Hand erhält. Hierzu musste der Benutzer seine nichtdominante Hand hinter das Bedienelement legen, damit dieses aktiv wird und mit dem Zeigefinger der dominanten Hand bedient werden kann (siehe Abbildung 2.5).

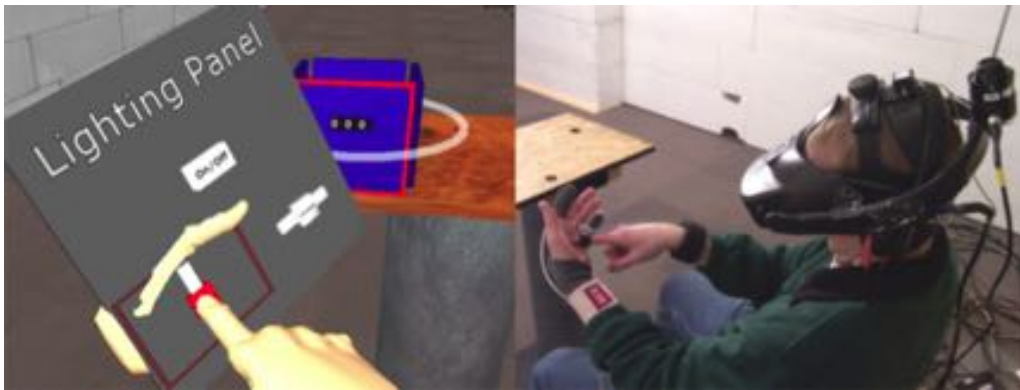


Abbildung 2.5: Bild der *Haptic Hand* von Kohli et al. [40]

Hierbei erhält der Benutzer bei der Interaktion durch die Berührung der Handfläche passive haptische Rückmeldung.

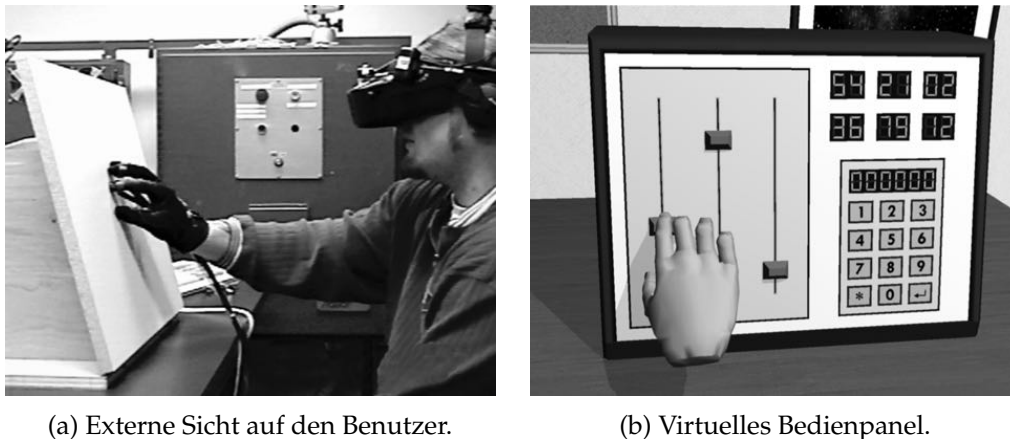
Studien zeigen, dass passive Haptik das Präsenzgefühl des Benutzers in virtuellen Umgebungen und die Effektivität von Trainings- oder Simulationsanwendungen verbessern kann [20].

2.2.3 Hybride Typen

Es gibt haptische Systeme, die nicht eindeutig in aktive oder passive Haptik eingeordnet werden können, da sie Charakteristika beider Kategorien aufweisen. Dies sind beispielsweise *Proxy*-Objekte, die zusätzlich mit physischen Aktoren, welche vom Computer gesteuert werden, kombiniert wurden. Ein konkretes Beispiel wäre ein *Proxy*-Objekt, das zusätzliche Vibrationsmotoren besitzt (beispielsweise ein VR-Controller), die eine Kollision dieses Objekts mit einem anderen durch eine Vibration simulieren.

Ein weiteres Beispiel für einen hybriden Typ ist das VR-System von Borst und Volz [24], welches ein *Proxy*-Objekt, das aus einer physischen Platte bestand, mit einem Force Feedback Handschuh kombiniert (siehe Abbildung 2.6). Das *Proxy*-Objekt repräsentiert ein virtuelles Bedienpanel und liefert dem Benutzer bei Berührung passive haptische Rückmeldung. Zusätzlich simuliert der Force Feedback Handschuh den Kontakt mit den Schiebegriffen oder den Tasten des Interfaces.

Die Ergebnisse einer Studie von Borst und Volz zeigen, dass der hybride Typ, im Vergleich zu einer Lösung mit aktiver Haptik alleine, zu einer signifikant besseren Leistung führen kann und ferner von den Teilnehmern präferiert wurde. Jedoch fielen die Ergebnisse betreffend der Leistung nicht besser aus als die der zugehörigen Lösung mit rein passiver Haptik. Dennoch lässt sich schlussfolgern, dass die Kombination von *Proxy*-Objekten mit aktiver Haptik ein großes Potenzial für die zukünftige Interaktion in VR bietet.



(a) Externe Sicht auf den Benutzer.

(b) Virtuelles Bedienpanel.

Abbildung 2.6: Hybrides haptisches VR-System von Borst und Volz [24].

2.2.4 Kurzzusammenfassung

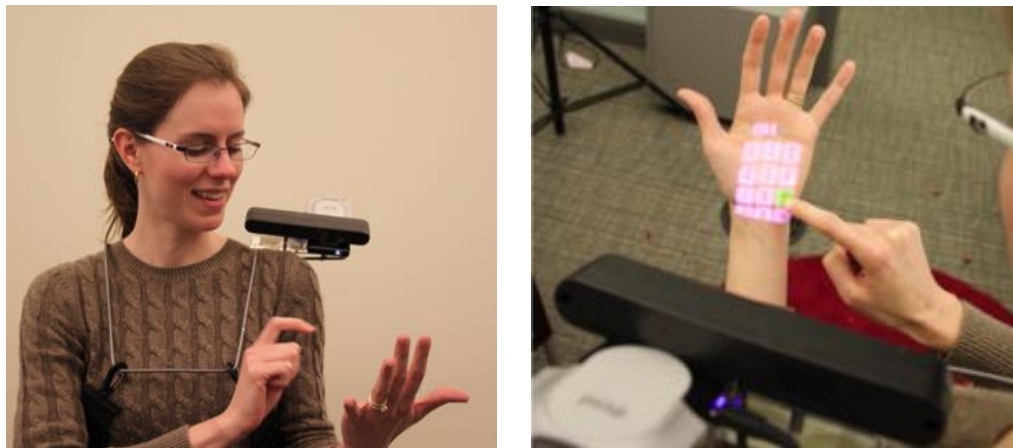
Dieser Abschnitt griff die Thematik der Haptik und deren Einfluss auf die Interaktion in VR aus dem Kapitel **Einführung** wieder auf und stellte die verschiedenen Typen von Haptik mit zugehörigen Beispielen genauer dar. Der wissenschaftliche Beitrag in diesem Bereich ist so umfangreich, dass die erwähnten Arbeiten nur einen geringen Auszug darstellen. Zenner lieferte in seiner Masterarbeit [25] eine detailliertere und umfangreichere Zusammenfassung des Forschungsstandes zum Zeitpunkt des Jahres 2016. Dennoch verdeutlichte der Abschnitt den Einfluss von Haptik auf die Interaktion in VR und zeigte deren Relevanz für die Entwicklung der Eingabemethoden in dieser Thesis auf.

2.3 On-Body Interfaces

Konzept: „The use of the body itself as both an input and output platform.“ [41]

Traditionelle Bedienkonzepte von Computern basieren auf physischen Geräten, die vom Benutzer mit der Hand oder den Fingern bedient werden. Die textuelle Eingabe über die Tastatur und die Verwendung der Maus im Rahmen des WIMP-Paradigmas⁶ sind die am weitesten verbreiteten Eingabeverfahren. Der Einsatz von Computern außerhalb des klassischen Desktop-Bereichs nimmt allerdings stark zu und findet oftmals auch dann statt, wenn die Hände oder Augen des Benutzers mit seiner Umgebung beschäftigt sind. *On-Body Interfaces* hingegen unterstützen Eingabemöglichkeiten, die stets verfügbar sind und den Benutzer nicht während seiner alltäglichen Aktivitäten hindern [43].

⁶WIMP steht für Windows, Icons, Menus und Pointer. Das Akronym bezeichnet das Grundkonzept grafischer Benutzerschnittstellen (GUIs) und wird oftmals auch als Synonym verwendet [42].



(a) Auf der Schulter befestigte Hardware. (b) *On-Body Interface* auf der Handfläche.

Abbildung 2.7: Bilder des *OmniTouch*-Systems [45].

Eine Studie von Harrison und Faste [44] ergab, dass der Unterarm und die Hand die Stellen des Körpers sind, die sich am besten für *On-Body Interfaces* eignen und zudem auch von den Benutzern akzeptiert werden. Ein großer Vorteil liegt in der hohen Mobilität und Beweglichkeit dieser Körperregion. Zudem sind es keine Körperbereiche, die geschlechtsspezifische oder persönliche Problematiken hervorrufen.

Daher beschäftigt sich ein Großteil der wissenschaftlichen Arbeiten mit *On-Body Interfaces* im Bereich des Arms und der Hand. Zur Realisierung solcher Interfaces werden meist Picobeamer, die das Bild an die gewünschte Körperstelle projizieren, und Tiefenkameras, die zur Erkennung der Interaktion dienen, eingesetzt. Bei *OmniTouch* [45] wurde die zugehörige Hardware auf den Schultern des Benutzers angebracht (siehe Abbildung 2.7). *SixthSense* [46] verwendet einen auf dem Kopf angebrachten Projektor und anstelle einer Tiefenkamera eine RGB-Kamera. Diese erkennt farbliche Marker, die an den Fingern angebracht werden. Andere Systeme bestehen aus mehreren kombinierten Tiefenkameras und Beamern, die im Raum verteilt angebracht sind [41,47]. *Skininput* [48] hingegen verwendet zur Erkennung der Körperberührung ein bio-akkustisches Sensorfeld, das am Arm angebracht wird (siehe Abbildung 2.8).

Ein wesentlicher Vorteil von *On-Body Interfaces* ist die Propriozeption und passive Haptik, die der Benutzer bei der Interaktion erfährt [49]. Studien zeigten, dass die Propriozeption dem Benutzer ermöglicht, schnell und akkurat Körperstellen zu treffen, ohne die Körperbereiche abzutasten oder zwingend die Augen darauf zu richten [48].

On-Body Interfaces scheinen auf Grund der Propriozeption, der passiven Haptik und da sie keine zusätzlichen Eingabegeräte benötigen, die den Benutzer in der Freiheit seiner Hände einschränken könnten, besonders vielversprechend zu sein, um die Anforderungen an Eingabemethoden in industriellen VR-Anwendungen



(a) Am Arm befestigtes Sensorsystem.

(b) On-Body Interface auf dem Unterarm.

Abbildung 2.8: Bilder des SkinInput-Systems [48].

zu erfüllen. Daher wurde im Rahmen der Thesis auch ein *On-Body Interface* für Virtual Reality entwickelt, das auf der virtuellen Handfläche angebracht ist und die Eingabe diskreter numerischer Werte unterstützt.

2.4 Imaginary Interfaces

Konzept: „Instead of receiving feedback from a screen, all visual “feedback” takes place in the user’s imagination.“ [50]

Der Begriff *Imaginary Interface* wurde erstmals von Gustafson et al. [51] geprägt, die darunter Interfaces verstehen, die eine räumliche Interaktion mit leeren Händen und ohne visuelle Rückmeldung ermöglichen. Ein großer Vorteil besteht (wie bei den *On-Body Interfaces*) darin, dass für die Interaktion kein zusätzliches Eingabegerät in die Hand genommen werden muss und die Bedienung somit jederzeit und ohne Verzögerung stattfinden kann.

Mit dem Begriff „*transfer learning*“ bezeichneten Gustafson et al. die Methode, das Wissen der Bedienung eines physischen Gerätes instinktiv auf ein *Imaginary Interface* anzuwenden [52, 53]. In einem Anwendungsfall untersuchten sie, wie ein Smartphone über ein *Imaginary Interface* auf der Handfläche bedient werden kann. Die Handfläche liefert dem Benutzer nicht nur haptisches Feedback bei der Berührung, sondern deren charakteristische Form ermöglicht es ihm auch, Segmente der Hand oder Finger mit Funktionen zu assoziieren. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass das visuelle Gedächtnis des Menschen (teilweise) die konventionelle visuelle Rückmeldung auf einem Bildschirm ersetzen kann, und Interfaces somit nicht zwingend darauf angewiesen sind. Benutzer sind in der Lage ein *Imaginary Interface* akkurat zu bedienen, indem sie die Bedienung eines korrespondierenden physischen Gerätes nachahmen (siehe Abbildung 2.9).

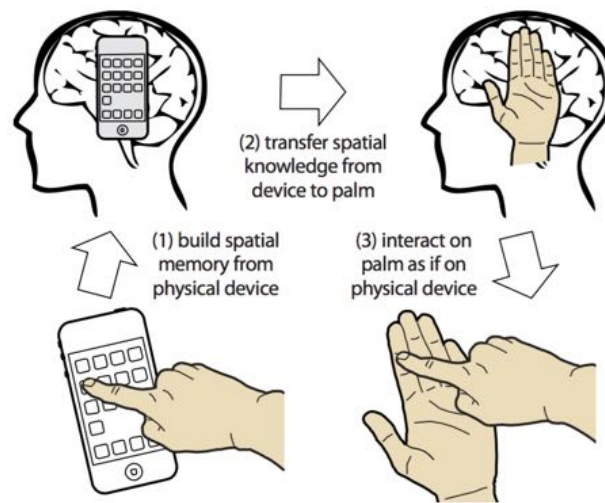


Abbildung 2.9: Illustration der Übertragung der Bedienung eines realen Interfaces auf die eines korrespondierenden *Imaginary Interfaces* [52].

Dezfuli et al. [54] beschäftigten sich in einer Arbeit damit, wie ein Fernseher über ein *Imaginary Interface* auf der Handfläche bedient werden kann. Hierzu untersuchten sie zunächst in einer explorativen Studie die konzeptionellen Möglichkeiten. Ein Großteil der Teilnehmer äußerte, dass das Halten der Hand in diagonalen Ausrichtung am natürlichsten und daher am wenigsten anstrengend sei. Hierbei verwendeten sie die nichtdominante Hand als Eingabefläche, auf der sie mit dem Zeigefinger der dominanten Hand interagierten. Außerdem identifizierten sie Stellen der Hand, die auch dann leicht zu treffen sind, wenn der Blick nicht auf die Hand gerichtet ist. In einer weiteren Studie untersuchten Dezfuli et al., wie akkurat diese Stellen blind getroffen werden können (siehe Abbildung 2.10a). Im Anschluss entschieden sie sich dazu, die Navigations- und Menüasten auf die leicht zu treffenden Stellen der Handfläche zu legen (siehe Abbildung 2.10b).

Ein Großteil des Wissens aus dem Bereich der *Imaginary Interfaces* lässt sich auch auf *On-Body Interfaces* übertragen und spricht dafür, dass *On-Body Interfaces* nach dem Erlernen der Interaktion ohne visuelle Aufmerksamkeit bedient werden können. Die Erkenntnisse über die Relevanz der Handorientierung soll als Grundlage für die Entwicklung der handflächenbasierten Eingabemethode in dieser Thesis dienen.

2.5 Leap Motion Virtual Reality Interfaces

Die *Leap Motion Gallery* ist eine zentrale Plattform für den Austausch von VR-Anwendungen und -Tools, die von der Community unter Verwendung der *Leap*

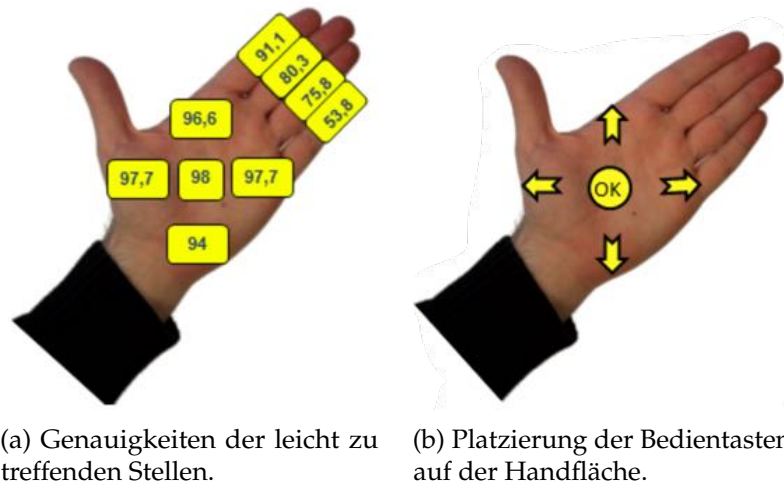


Abbildung 2.10: Ergebnisse der Studie von Dezfuli et al. [54], ein *Imaginary Interface* auf der Handfläche für die Bedienung eines Fernsehers.

Motion -Tiefenkamera zum Tracken der Hände entwickelt wurden. Dort zu finden ist auch das *Hovercast VR Interface* von Kinstner [55–57].

Bei dem *Hovercast VR Interface* handelt es sich um ein individualisierbares Menü-Interface für VR-Anwendungen, welches leicht abgesetzt im Bereich der Finger, beziehungsweise Fingerspitzen, an einer der beiden Hände angehängt ist (siehe Abbildung 2.11). Durch ein Hovern des Zeigefingers der anderen Hand über einem Bedienelement kann der Benutzer mit dem Interface interagieren. Hierbei unterstützt das Interface verschiedene Bedienelemente, wie beispielsweise Buttons, Sliders, Checkboxes, und verschachtelte Menüebenen, innerhalb derer der Benutzer vor und zurück navigieren kann. Da die Elemente des Interfaces sich nicht auf der Handfläche befinden, sondern seitlich neben den Fingerspitzen, beziehungsweise über den Fingern, erhält der Benutzer bei der Interaktion keine haptische Rückmeldung.

Ein ähnliches Interface-Konzept ist in der *Leap Motion*-Anwendung *Planetarium* eingesetzt. Hier ist das Interface allerdings nicht im Bereich der Hand, sondern im Bereich des Unterarms angehängt (siehe Abbildung 2.12).

Diese Arbeiten zeigen typische Hand-, beziehungsweise Arm-Interfaces, wie man sie in heutigen VR-Anwendungen finden kann. Derzeit existieren in Konsumenten-Anwendungen allerdings noch keine typischen *On-Body Interfaces*, die sich direkt auf dem Körper befinden und bei der Interaktion passive Haptik liefern.



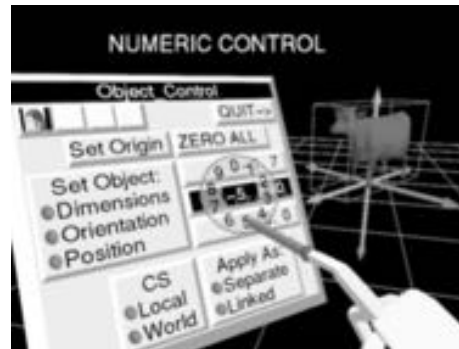
Abbildung 2.11: Bild des *Hovercast VR-Interfaces* [56].



Abbildung 2.12: Bild des am Arm befestigten VR-Interfaces der *Leap Motion-Anwendung Planetarium* [58] (Quelle: blog.leapmotion.com, Abrufdatum: 27. März 2017).



(a) Spinnerdarstellung.



(b) Kreisdarstellung.

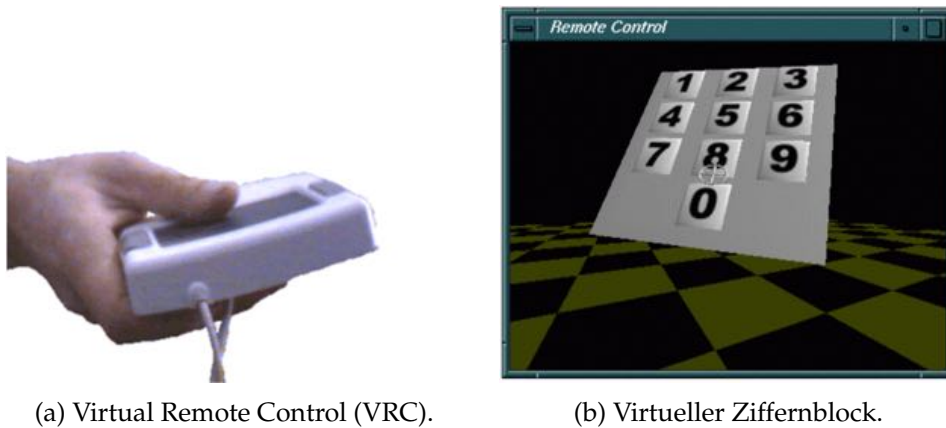
Abbildung 2.13: Zwei verschiedene Darstellungen bei der selektiven Auswahl einzelner Ziffern aus der Arbeit von Mine [59].

2.6 Numerische Eingabe in Virtual Reality

2.6.1 Mit Eingabegerät

Mine [59] befasste sich 1997 bereits mit Propriozeption bei der Interaktion in VR. Hierbei entwickelte er ein System, mit dem der Benutzer mit virtuellen Repräsentationen seiner Hände interagieren konnte. Zur Realisierung setzte er ein magnetisches Tracking-System ein, über welches die Position der beiden Hände des Benutzers bestimmt werden konnte. Zusätzlich verwendete er zwei Controller, mit deren Hilfe es möglich war, Aktionen mit ausgewählten Bedienelementen auszuführen. Die Auswahl der Bedienelemente erfolgte – abhängig von der Handausrichtung – über einen Strahl, der aus dem Zeigefinger einer virtuellen Handrepräsentation austrat. In seiner Arbeit befasste er sich auch mit numerischer Eingabe und stellte zwei verschiedene Darstellungen bei der selektiven Auswahl einzelner Ziffern vor (siehe Abbildung 2.13). Bei der Darstellung der Ziffern in einem Spinner (siehe Abbildung 2.13a) wurde er von früheren mechanischen Rechengeräten inspiriert, bei denen der Benutzer mit einem Stift über einen vertikalen physischen Slider den Wert einer Ziffernstelle auswählen konnte. Einen Vorteil sah er allerdings in der Kreisdarstellung der Ziffern (siehe Abbildung 2.13b), da der Benutzer auf Grund der Propriozeption schnell die Bewegung zur Auswahl einer bestimmten Ziffer erlernen würde, und das Interface somit mit weniger Aufmerksamkeit bedient werden könne.

Rorke und Bangay [60] beschäftigten sich mit der Entwicklung eines Interfaces, das sich bewegen lässt, um zu vermeiden, dass ausgewählte Bereiche der virtuellen Umgebung verdeckt werden. Hierfür verwendeten sie ein kleines Touchpad, dessen Position ebenfalls über ein magnetisches Trackingsystem bestimmt wurde (siehe Abbildung 2.14a). Das Eingabefeld wurde in der virtuellen Umgebung an der aktuellen Position dieses Touchpads, auch Virtual Remote Control (VRC) genannt, platziert. Mit Hilfe der VRC konnte der Benutzer einen Cursor über das



(a) Virtual Remote Control (VRC).

(b) Virtueller Ziffernblock.

Abbildung 2.14: Eingabemethode für numerische Werte in VR von Rorke und Bangay [60] mit beweglichem Eingabefeld.

virtuelle Eingabefeld (siehe Abbildung 2.14b) bewegen und auf diese Weise eine Ziffer des Eingabefeldes auswählen. Durch ein anschließendes Tippen auf der VRC wurde die ausgewählte Ziffer bestätigt.

Chen et al. [61] befassten sich im Zusammenhang mit der Konstruktion zusammengesetzter virtueller Objekten in VR mit der Entwicklung einer Eingabemethode für diskrete und kontinuierliche numerische Werte. Eine wesentliche Anforderung lag in der Präzision der Werteingabe, da die Objekte möglichst genau in der virtuellen Umgebung positioniert werden mussten. Daher setzten sie zur Interaktion zwei physische Geräte nach einer *Stift und Tablet*-Metapher (siehe Abbildung 2.15a) ein, die eine präzise Bedienung des entworfenen Slider-Interfaces (siehe Abbildung 2.15b) ermöglichen sollten. Das Interface, mit dem über eine virtuelle Repräsentation des Stiftes interagiert werden konnte, wurde an der Position des Tablets in der virtuellen Umgebung platziert. Neben dem Slider-Interface setzten sie für die Eingabe diskreter Werte einen Ziffernblock ein (siehe Abbildung 2.15c).

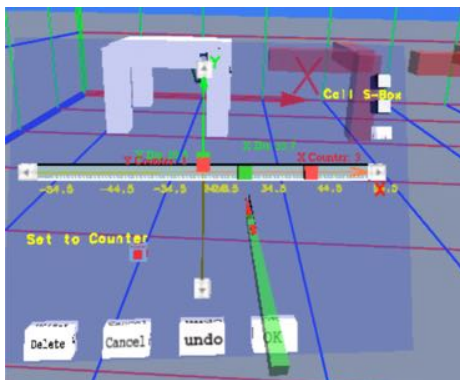
2.6.2 Ohne Eingabegerät

Die Eingabemethoden der bisher vorgestellten Arbeiten waren alle auf ein oder mehrere Eingaberäte angewiesen. Ausgehend von der Motivation, dass diese Geräte die Aufmerksamkeit des Nutzers auf sich ziehen und ihn dadurch von seiner eigentlichen Tätigkeit ablenken, stellte Lepouras in seiner Arbeit [62] zwei gestenbasierte Eingabetechniken vor. Diese sollten auf Grund zugehöriger Interaktionsmetaphern zusätzlich intuitiv zu bedienen und einfach zu erlernen sein. Zur Erkennung der Gesten setzte er zwei unterschiedliche Datenhandschuhe ein.

Die *5DT Gloves Numeric Input Technique* basiert auf der Verwendung der Hände im Alltag zum Zeigen von Zahlen. Hier bedeutet die Anzahl ausgestreckter Finger die zugehörige Zahl. Damit auch die Eingabe von Zahlen möglich ist, die



(a) Verwendete Eingabegeräte.



(b) Slider für kontinuierliche Eingabe.



(c) Ziffernblock für diskrete Eingabe.

Abbildung 2.15: Eingabemethode von Chen et al. [61] zur Eingabe numerischer Werte bei der Konstruktion zusammengesetzter virtueller Objekte in VR.



(a) 5DT Gloves Numeric Input Technique.

(b) Pinch Gloves Numeric Input Technique.

Abbildung 2.16: Von Lepouras [62] entwickelte, gestenbasierte Eingabemethoden für numerische Werte in VR.

größer als die Zahl 10 sind und somit nicht mit zwei Händen gezeigt werden können, adaptierte er dieses Vorgehen. Die Eingabe einer Zahl erfolgt über das aufeinanderfolgende Zeigen der einzelnen Ziffern (siehe Abbildung 2.16a). Zusätzliche Gesten waren notwendig, um eine Ziffer oder Zahl zu bestätigen und weitere Funktionalitäten, wie beispielsweise das Löschen einer Ziffer oder die Eingabe eines negativen Vorzeichens, zu unterstützen. Diese waren allerdings nicht intuitiv und somit auch nicht einfach zu erlernen.

Das zweite Eingabeverfahren *Pinch Gloves Numeric Input Technique* basiert auf dem Vorgehen von Kindern, wenn sie zu zählen lernen [63]. Hierbei wird über die Berührung eines Fingers dessen numerische Bedeutung eingegeben. Normalerweise werden durch Berühren der Finger der nichtdominanten Hand mit dem Zeigefinger der dominanten Hand die Zahlen von 1 bis 5 gezählt, und durch Tauschen der Hände die Zahlen 6 bis 10. Um ebenfalls bei dieser Eingabemethode die Eingabe größerer Zahlen zu unterstützen, werden auch hier nacheinander die einzelnen Ziffern der Zahlen eingegeben. Allerdings galt es noch ein Mehrdeutigkeitsproblem zu lösen: Das Berühren der Zeigefinger beider Hände könnte entweder die Ziffer 2 oder 7 bedeuten. Außerdem musste es eine Möglichkeit geben, die Ziffer 0 einzugeben. Lepouras passte das Eingabeverfahren dahingehend an, dass mit dem Zeigefinger der dominanten Hand auf den Fingern der nichtdominanten Hand die Ziffern 1 bis 5 und mit dem Mittelfinger die Ziffern 6 bis 9 und die 0 eingegeben werden. Auch bei dieser Eingabemethoden sind wieder zusätzliche Gesten zum Bestätigen der Zahl und für weitere Funktionalitäten notwendig, die zu erlernen waren.

Die Ergebnisse einer Studie zeigen, dass die *5DT Gloves Numeric Input Technique* zwar als intuitiver empfunden wurde, die Interaktion allerdings anstrengender als bei der *Pinch Gloves Numeric Input Technique* war.

Zwar gibt es Arbeiten, die sich bereits speziell mit numerischer Eingabe in VR beschäftigten, allerdings liegen diese zeitlich schon weiter zurück und haben sich nur eingeschränkt mit dem Vergleich mehrerer Eingabemethoden befasst. Im Rahmen dieser Arbeit soll diese Thematik daher wieder aufgegriffen werden.

Außerdem sollen mehrere Eingabemethoden mit aktuellen Technologien implementiert und miteinander verglichen werden.

Kapitel 3

Handflächenbasiertes Interface

In diesem Kapitel wird eine selbst konzipierte Eingabemethode beschrieben, die sich für den industriellen Einsatz eignen soll. Zunächst wird deren Eingabekonzept vorgestellt. Im Anschluss wird von einer Studie und deren Ergebnissen berichtet, die durchgeführt wurde, um Fragestellungen bezogen auf das Interface zu klären. Gegen Ende des Kapitels werden die Ergebnisse der Studie diskutiert und Schlussfolgerungen getroffen.

3.1 Eingabekonzept

Aufgrund der in Unterabschnitt 1.1.4 beschriebenen Anforderungen an VR-Interaktion im industriellen Kontext, soll im Rahmen dieser Arbeit ein VR-Interface entwickelt werden, das keine zusätzlichen Hilfsmittel (zum Beispiel Controller oder *Proxy*-Objekte) zur Interaktion benötigt. Dennoch soll die Eingabemethode über haptisches Feedback verfügen, um dem Benutzer in weiteren Dimensionen (nicht nur visuell und auditiv) Rückmeldung zu geben und mögliche Fehlbedienungen zu minimieren.

Die Anforderungen motivierten ein *On-Body Interface*, das mit den Händen bedient werden kann. Somit sind keine weiteren Interaktionshilfsmittel notwendig und der Benutzer erhält bei Berührung des eigenen Körpers passive haptische Rückmeldung. Die Handfläche der nichtdominanten Hand wird als Anzeige- und Interaktionsfläche genutzt, auf der mit dem Zeigefinger der dominanten Hand interagiert wird. Da der Benutzer die Berührung sowohl auf der Hand als auch am Zeigefinger spürt, erhält er dadurch eine zweiseitige haptische Rückmeldung. Verwandte Arbeiten zeigten bereits, dass diese Art der Interaktion neben dem haptischen Feedback auf Grund der propriozeptiven Wahrnehmung einen weiteren Vorteil mit sich bringt [64]. Demnach soll der Benutzer ein solches

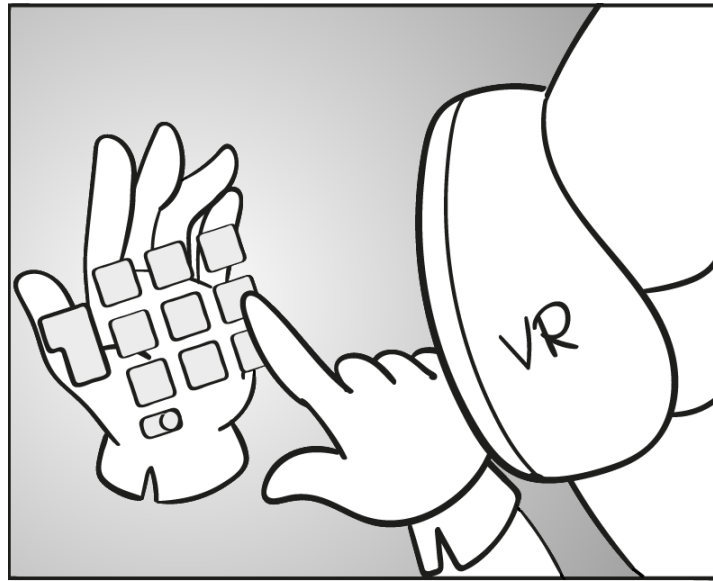


Abbildung 3.1: Illustration des Konzepts des Handflächenbasierten Interfaces.

Interface ohne visuelle Aufmerksamkeit auf die Hände relativ effizient bedienen können. Abbildung 3.1 zeigt eine Illustration des daran anschließenden Konzepts. Dort ist zu erkennen, dass der Benutzer eine virtuelle Präsentation seiner beider Hände in VR hat und das Interface an der Handfläche seiner nichtdominanten Hand befestigt ist, welches er mit dem Zeigefinger seiner dominanten Hand bedient.

Im Folgenden soll dieses Konzept auf den Anwendungsfall der Eingabe diskreter numerischer Werte spezifiziert werden.

3.2 Vorstudie

Um die noch unklare Struktur und das Aussehen des Interfaces auf der Hand zu bestimmen, wurde eine Vorstudie mit *Low-Fidelity* Prototypen durchgeführt, die darauf abzielte, hierfür relevante Fragestellungen zu beantworten.

3.2.1 Forschungsfragen

Eine Fragestellung betrifft die Orientierung der nichtdominanten Hand und die Ausrichtung des Interfaces. Darüber hinaus ist die Orientierung auch für die Gestaltung des Interfaces relevant. Die Hand bietet auf Grund ihrer charakteristischen und im Vergleich zu konventionellen Interaktionsflächen außergewöhnlichen Form einen speziellen Designraum. Abhängig von der Orientierung könnten die Form der Hand und deren einzelne Bestandteile, wie zum Beispiel Fingerglieder, das Design des Interfaces beeinflussen. Dezfuli et al. [54]

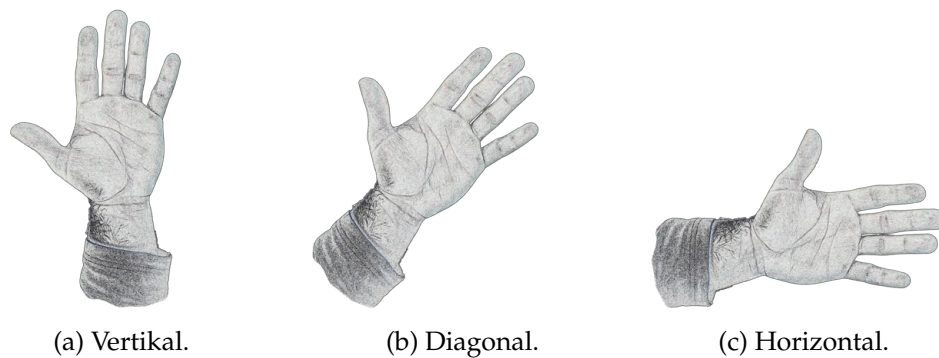


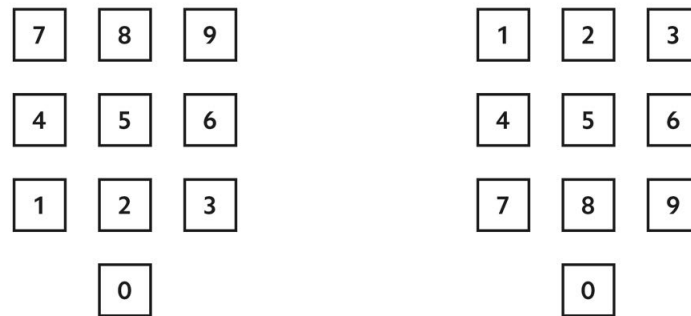
Abbildung 3.2: In der Vorstudie betrachtete Handausrichtungen.

ermittelten bereits in einer Studie, in der sie die Hand als *Imaginary Interface* zur Fernsteuerung eines Fernsehers nutzen, dass die diagonale Ausrichtung der Hand in diesem Zusammenhang als komfortabelste Handhaltung wahrgenommen wird. Diese Beobachtung soll in der Vorstudie am Anwendungsfall der Eingabe diskreter numerischer Werte überprüft werden. Hierfür wurden in der Studie die vertikale, diagonale und horizontale Ausrichtung der Hand (siehe Abbildung 3.2) betrachtet.

Des Weiteren soll ermittelt werden, wie die Zifferntasten des Interfaces angeordnet und nummeriert werden müssen, um zu einer bestmöglichen Bedienung zu verhelfen. Hierbei hat sich die Ziffernblockanordnung der Tasten bereits im Alltag etabliert und ist weit verbreitet. Eine Alternative ist die Anordnung der Tasten in geschwungenen Reihen, die zu einer ergonomischen Bedienung verhelfen kann. Bei der Nummerierung gibt es zwei gängige Verfahren: die aufsteigende Nummerierung der Tasten *von unten nach oben*, und die *von oben nach unten* (siehe Abbildung 3.3). Die aufsteigende Nummerierung *von unten nach oben* (siehe Abbildung 3.3a) wird hauptsächlich auf Ziffernblöcken in rechnerischem Zusammenhang verwendet, wie zum Beispiel bei einem Taschenrechner. Die Ziffernblöcke gängiger analoger Personal Computer (PC)-Tastaturen sind ebenfalls in dieser Reihenfolge nummeriert. Die aufsteigende Nummerierung *von oben nach unten* (siehe Abbildung 3.3b) ist im Kontext der Eingabe von Telefonnummern oder auf Fernbedienungen von Fernsehern vorzufinden.

Im Rahmen des Experiments sollen folgende Hypothesen untersucht werden:

- **H1.1:** Die diagonale Haltung der Hand wird als am wenigsten anstrengend empfunden.
- **H1.2:** Die diagonale Haltung der Hand wird zur Eingabe präferiert.
- **H1.3:** Die Ziffernblockanordnung der Tasten wird gegenüber der Anordnung in geschwungenen Reihen präferiert.
- **H1.4:** Die aufsteigende Nummerierung der Zifferntasten *von unten nach oben* wird präferiert.



(a) Aufsteigend von unten nach oben. (b) Aufsteigend von oben nach unten.

Abbildungung 3.3: Zwei gängige Nummerierungen von Zifferntasten.

3.2.2 Low-Fidelity Prototypen

Für die Vorstudie wurden *Low-Fidelity* Prototypen angefertigt, welche die Klärung der aufgestellten Fragestellungen ohne technische Limitationen ermöglichten. Hierfür wurden Einweghandschuhe verwendet, deren Handinnenseiten mit dem Interface-Layout beschriftet wurden.

Zur Bestimmung der Handausrichtung wurden in jeder Ausrichtung (diagonal, vertikal und horizontal) jeweils zwei Prototypen angefertigt (siehe Abbildung 3.4). Hierbei sollte auch das Potenzial erkundet werden, die Fingerglieder der Hand für das Interface auszunutzen. Daher wurde in der vertikalen und horizontalen Ausrichtung jeweils ein Prototyp erstellt, dessen Interface sich hauptsächlich auf den Fingern befindet (**P1.4** und **P1.6**), und einer mit Positionierung der Tasten auf der Handfläche (**P1.3** und **P1.5**). In der diagonalen Ausrichtung bot sich ein äquivalentes Einsetzen der Fingerglieder nicht an, da die Tasten nicht in einer Blockanordnung auf die Fingerglieder verteilt werden konnten. Um dennoch für die Vorstudie in jeder Handausrichtung die gleiche Anzahl an Prototypen zu disponieren, wurde **P1.2** entworfen, bei dem die Vorzeichenaste an einer anderen Stelle als bei **P1.1** positioniert wurde. Bei allen Handschuhprototypen zur Bestimmung der Handausrichtung wurde eine Ziffernblockanordnung der Tasten mit aufsteigender Nummerierung *von unten nach oben* zu Grunde gelegt. Aufgrund der besonderen Charakteristik des Handballen, der aus der Handfläche herausragt, sich somit abgrenzt und leicht zu treffen ist, wurde dort – falls möglich – die Taste zum Bestätigen positioniert.

Zur Bestimmung der Tastenanordnung wurden die traditionelle Ziffernblockanordnung und eine ergonomische Anordnung mit gebogenem Layout betrachtet. Für die Ziffernnummerierung wurde die aufsteigende Nummerierung *von unten nach oben* und *von oben nach unten* berücksichtigt. Daraus resultierten bei der geschwungenen Anordnung die Handschuhprototypen **P2.5** (aufsteigende



P1.1: Vorzeichen oben.



P1.2: Vorzeichen links.

(a) Diagonale Handausrichtung.



P1.3: Auf der Handfläche.



P1.4: Auf den Fingern.

(b) Vertikale Handausrichtung.



P1.5: Auf der Handfläche.



P1.6: Auf den Fingern.

(c) Horizontale Handausrichtung.

Abbildung 3.4: Prototypen zur Bestimmung der Handausrichtung.

Nummerierung *von unten nach oben*) und **P2.6** (aufsteigende Nummerierung *von oben nach unten*). Äquivalent zum Vorgehen bei **P1.1** und **P1.2**, wurden bei der Ziffernblockanordnung mit der jeweiligen Nummerierung zwei Prototypen erstellt, bei denen die Positionierung der Vorzeichenaste abgewandelt wurde. Eine Übersicht ist in Abbildung 3.5 zu finden. Alle Handschuhprototypen zur Bestimmung der Tastenanordnung und Ziffernnummerierung wurden unter Annahme von **H1.2** für eine diagonale Handausrichtung entworfen. Die Taste zum Bestätigen wurde – falls möglich – ebenfalls auf dem Handballen positioniert. Die Prototypen **P1.1** und **P2.1**, sowie **P1.2** und **P2.2** stimmen somit überein.

3.2.3 Experiment

Im Folgenden wird das Experiment der Vorstudie, die zur Klärung der in Unterabschnitt 3.2.1 erläuterten Fragestellungen zum Interface-Design durchgeführt wurde, im Detail beschrieben.

Design

Das Design des Experiments war ein *Within-Subject Design*. Die unabhängige Variable war der Handschuhprototyp (siehe Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5). Die abhängige Variablen waren:

- Bewertung der Anstrengung (für **H1.1**)
- Gesamtbewertung des Prototyps (für **H1.2**, **H1.3** und **H1.4**)

Die Teilnehmer wurden in zwei Gruppen aufgeteilt, die unterschiedliche Prototypen verwendeten. Der ersten Gruppe (**G1**) wurden die Prototypen zur Bestimmung der Handausrichtung (siehe Abbildung 3.4) zugeordnet, der anderen (**G2**) die zur Bestimmung der Ziffernanordnung und -nummerierung (siehe Abbildung 3.5). Innerhalb der Gruppen wurde die Reihenfolge der Handschuhe mittels *Latin Square*-Design ausgeglichen.

In Tabelle 3.1 sind die Eingabeaufgaben zusammengefasst, die dem Teilnehmer, beziehungsweise der Teilnehmerin⁷ gestellt wurden. Alle sind mit einem nicht-deterministischen Zufallsgenerator⁸ erzeugt worden. Die Eingaben wurden so konzipiert, dass der Teilnehmer sich mit allen Funktionen des Interfaces vertraut machen konnte.

Die Teilnahme an dem Experiment wurde auf Rechtshänder beschränkt.

⁷Auf die explizite Nennung der weiblichen Form wird im Folgenden der Einfachheit halber verzichtet.

⁸<https://www.random.org>



P2.1: Vorzeichen oben.



P2.2: Vorzeichen links.

(a) Ziffernblockanordnung mit aufsteigender Nummerierung *von unten nach oben*.



P2.3: Vorzeichen oben.



P2.4: Vorzeichen links.

(b) Ziffernblockanordnung mit aufsteigender Nummerierung *von oben nach unten*.

P2.5: Aufsteigende Nummerierung *von unten nach oben*.P2.6: Aufsteigende Nummerierung *von oben nach unten*.

(c) Ergonomische Anordnung.

Abbildung 3.5: Prototypen zur Bestimmung der Tastenanordnung und Ziffernnummerierung.

Aufgabensatz	Einzugebene Zahlen			
1	90887	1,812	-7730	790 → 798
2	91237	6,974	-1805	358 → 357
3	52249	3,774	-4063	123 → 122
4	67975	2,668	-9456	997 → 996
5	63131	4,512	-8714	443 → 447
6	39097	2,142	-4503	879 → 874

Tabelle 3.1: Eingabeaufgaben der Vorstudie bestehend aus 4 unterschiedlichen Aufgaben pro Aufgabensatz, davon jeweils eine 5-stellige Ganzzahl, eine 4-stellige Fließkommazahl, eine 4-stellige negative Ganzzahl und eine 3-stellige Ganzzahl, deren letzte Ziffer anschließend an die Eingabe zu korrigieren war.

Durchführung

Nach der Begrüßung des Teilnehmers wurde er über den Verlauf des Experiments aufgeklärt. Mögliche Fragen des Teilnehmers wurden direkt vom Experimentator beantwortet. Die Kommunikation verlief ausschließlich in der Muttersprache des Teilnehmers. Damit die Handschuhprototypen bei allen Teilnehmern gleichermaßen gut passen, wurden sie in zwei Größenversionen angefertigt (S/M und L/XL). Daher wurde zu Beginn des Experiments zunächst mit einem Handschuhmuster die Handschuhgröße des Teilnehmers bestimmt. Diese bestimmte darüber, in welcher Größe ihm die Prototypen im Weiteren vorgelegt werden. Um mögliche Fehlbedienungen oder andere Auffälligkeiten im Nachhinein auswerten zu können, bekam der Teilnehmer eine kleine Kamera am Kopf befestigt, welche die Interaktion mit den Prototypen aufzeichnete.

Danach wurde ihm der erste Handschuhprototyp gereicht, den er anschließend über die linke Hand anzog. Ihm wurde zunächst Zeit gelassen, um sich das Interface anzuschauen, bevor er mit den Eingabeaufgaben beginnen sollte. Sobald er bereit war, wurden ihm die Zahlen nacheinander auf einem Papier vorgezeigt, die er anschließend auf dem Handschuh abtippen sollte (siehe Abbildung 3.6). Nachdem er alle vier Eingaben getätigt hatte, wurden ihm Fragen zu dem Prototypen gestellt, die er mit einer Bewertung auf einer Likert-Skala⁹ beantwortete. Die Fragen (inklusive der Likert-Skala) wurden dem Teilnehmer auf einem Papier vorgelegt, jedoch übernahm der Experimentator das Ankreuzen der abgegebenen Bewertung, sodass der Teilnehmer weiterhin mit beiden Händen mit dem Prototypen experimentieren konnte.

Nachdem er alle Fragen zu einem Handschuh beantwortet hatte, zog er diesen aus und bekam den nächsten gereicht, mit dem er ebenfalls wieder Eingaben tätigte und diesen im Anschluss anhand der gleichen Fragen bewertete. Gegen Ende des Experiments, nachdem der Teilnehmer alle Handschuhprototypen verwendet hatte, wurde ihm ein unbeschrifteter Handschuh gegeben, den er anziehen

⁹Die Likert-Skala ist eine besondere Form der Wertesakala, die nach ihrem Erfinder *Rensis Likert* benannt wurde [65].



Abbildung 3.6: Bild aus Teilnehmersicht im Experiment der Vorstudie während der Eingabe einer negativen Ganzzahl mit dem Handschuhprototypen **P1.1**.

und mit einem Stift so beschriftet sollte, wie sein persönliches Wunschdesign aussehen würde. Im Anschluss wurde er aus dem Experiment entlassen.

3.3 Ergebnisse

An der Studie nahmen insgesamt 12 Personen freiwillig teil, die gleichmäßig in die beschriebenen Teilnehmergruppen aufgeteilt wurden, sodass jede Gruppe aus 6 Teilnehmern bestand.

Unter den Teilnehmern in **G1** waren 5 Männer und 1 Frau mit einem durchschnittlichen Alter von 32,5 Jahren, in **G2** 4 Männer und 2 Frauen mit einem durchschnittlichen Alter von 30 Jahren. Alle Teilnehmer waren Rechtshänder, der Fall einer gleichmäßig ausgeprägten Händigkeit kam nicht vor.

5 Teilnehmer in **G1** gaben an, „oft“ Zahlen im Alltag oder Beruf einzugeben und dafür den Ziffernblock einer analogen Tastatur zu verwenden, 1 Teilnehmer gibt „gelegentlich“ Zahlen ein und nutzt dafür am häufigsten die Ziffernreihe auf einer Smartphone-Tastatur. Die Hälfte der Teilnehmer aus **G2** geben „oft“ Zahlen ein und verwenden dafür ebenfalls einen Ziffernblock einer analogen Tastatur. Die andere Hälfte der Teilnehmer tätigt „gelegentlich“ Zahleneingaben, 2 Personen davon am häufigsten mit dem Ziffernblock einer analogen Tastatur, 1 Person mit einem analogen Taschenrechner.

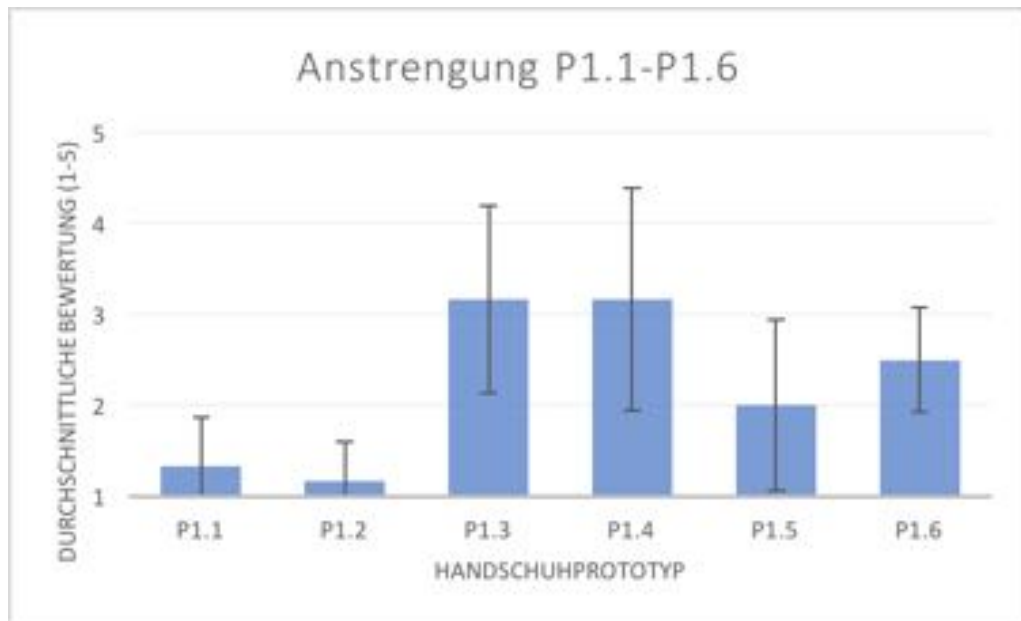


Abbildung 3.7: Durchschnittliche Bewertung der Anstrengung der Handschuhprototypen zur Bestimmung der Handausrichtung auf einer Likert-Skala (1-5) mit 95 % Konfidenzintervallen.

In der Gruppe **G1** verwendeten alle Teilnehmer die Handschuhprototypen in der Größe S/M, in **G2** 3 Teilnehmer in S/M und 3 Teilnehmer in L/XL.

3.3.1 Handausrichtung

Die folgenden Ergebnisse basieren auf den abgegebenen Bewertungen von **G1**.

Die Teilnehmer bewerteten auf einer Skala von 1 = „überhaupt nicht anstrengend“ bis 5 = „sehr anstrengend“, wie anstrengend sie die Bedienung des jeweiligen Handschuhs empfanden. In Abbildung 3.7 ist zu erkennen, dass die beiden vertikal ausgerichteten Prototypen **P1.3** ($M = 3,17$, $SD = 0,983$) und **P1.4** ($M = 3,17$, $SD = 1,169$) als deutlich anstrengender bewertet wurden als die übrigen. Am wenigstens anstrengend war die Verwendung der diagonal ausgerichteten Handschuhprototypen **P1.1** ($M = 1,33$, $SD = 0,516$) und **P1.2** ($M = 1,17$, $SD = 0,408$).

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 23,167$, $p < 0,001$, $N = 6$) zeigt, dass es hinsichtlich der Anstrengung einen signifikanten Unterschied zwischen den Prototypen zur Bestimmung der Handausrichtung gibt. Die Post-hoc-Analyse (Dunn-Bonferroni-Tests) ergab, dass sich **P1.1** signifikant von **P1.3** unterscheidet, ebenso **P1.2** von **P1.3** und **P1.4**. Die Ergebnisse sind in Tabelle 3.2 dargestellt. Somit wurden die Handschuhprototypen mit vertikaler Handausrichtung signifikant anstrengender bewertet als die diagonal ausgerichteten Prototypen. Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen keine Signifikanz auf.

Zwischen den Handschuhprototypen		z	p _{korrigiert}
P1.1	P1.3	3,086	= 0,030
P1.2	P1.3	3,318	= 0,014
	P1.4	3,086	= 0,030

Tabelle 3.2: Signifikant ausgefallene Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für die durchschnittliche Bewertung der Anstrengung der Prototypen zur Bestimmung der Handausrichtung. Für alle Tests gilt $N = 6$, $\alpha = 0,05$.

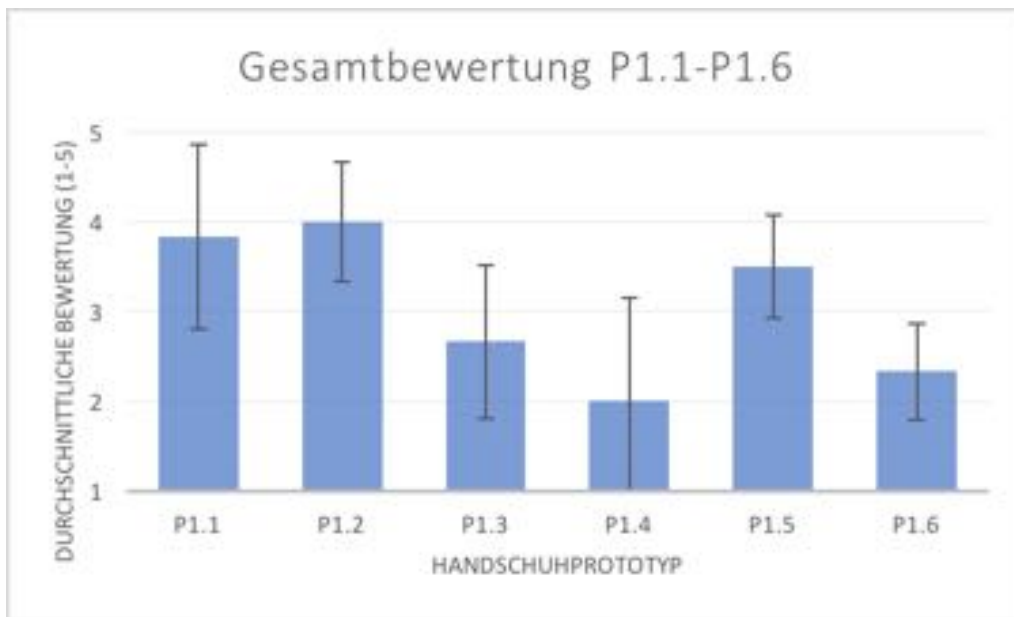


Abbildung 3.8: Durchschnittliche Gesamtbewertung der Handschuhprototypen zur Bestimmung der Handausrichtung auf einer Likert-Skala (1-5) mit 95 % Konfidenzintervallen.

Die Teilnehmer bewerteten auf einer Skala von 1 = „sehr schlecht“ bis 5 = „sehr gut“, wie gut sie das Layout des jeweiligen Handschuhs fanden. In Abbildung 3.8 ist zu erkennen, dass die beiden diagonal ausgerichteten Prototypen **P1.1** ($M = 3,83$, $SD = 0,983$) und **P1.2** ($M = 4,00$, $SD = 0,632$) am besten bewertet wurden. Auffällig ist auch, dass die Prototypen mit den Layouts auf den Fingern – in vertikaler Ausrichtung **P1.4** ($M = 2,00$, $SD = 1,095$) und in horizontaler **P1.6** ($M = 2,33$, $SD = 0,516$) – deutlich schlechter bewertet wurden als der jeweils andere Prototyp in gleicher Handausrichtung mit dem Layout auf der Hand – in vertikaler **P1.3** ($M = 2,67$, $SD = 0,816$) und in horizontaler Ausrichtung **P1.5** ($M = 3,50$, $SD = 0,548$).

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 19,503$, $p < 0,001$, $N = 6$) zeigt, dass es einen signifikanten Unterschied in der Gesamtbewertung der Prototypen zur Bestimmung der Handausrichtung gibt. Die Post-hoc-Analyse (Dunn-Bonferroni-

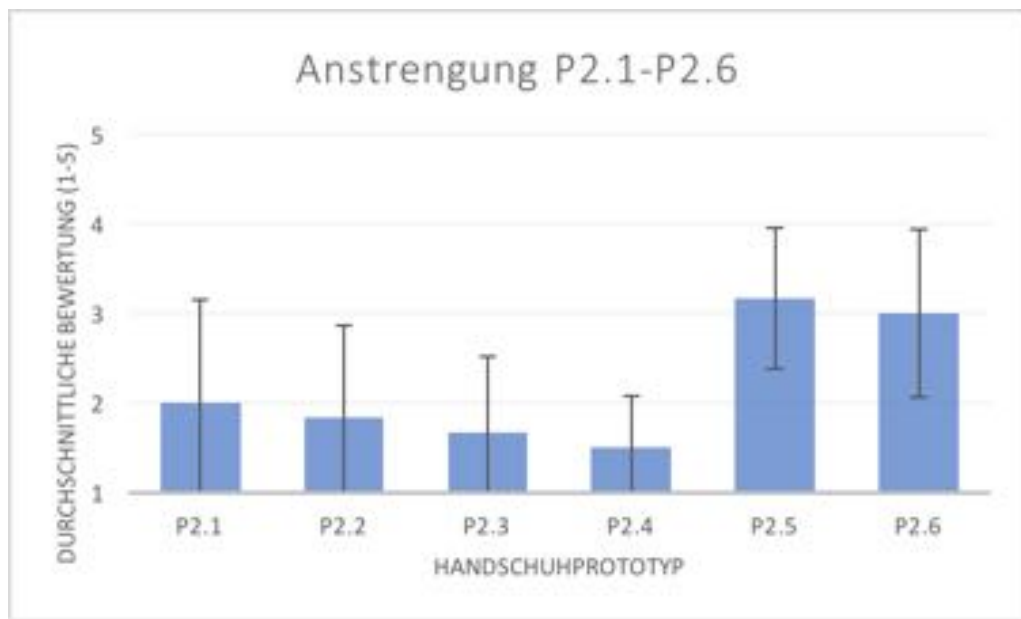


Abbildung 3.9: Durchschnittliche Bewertung der Anstrengung der Handschuhprototypen zur Bestimmung der Tastenanordnung und -nummerierung auf einer Likert-Skala (1-5) mit 95 % Konfidenzintervallen.

Tests) ergab, dass sich **P1.2** mit dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ signifikant von **P1.4** unterscheidet ($z = -3,086$, $p_{\text{korrigiert}} = 0,030$, $N = 6$). Somit erreichte **P1.4** eine signifikant geringere Gesamtbewertung als **P1.2**. Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen keine Signifikanz auf.

3.3.2 Tastenanordnung und -nummerierung

Die folgenden Ergebnisse basieren auf den abgegebenen Bewertungen von **G2**.

Die Teilnehmer bewerteten auf einer Skala von 1 = „überhaupt nicht anstrengend“ bis 5 = „sehr anstrengend“, wie anstrengend sie die Bedienung des jeweiligen Handschuhs empfanden. In Abbildung 3.9 ist zu erkennen, dass die beiden Prototypen mit geschwungener Tastenanordnung **P2.5** ($M = 3,17$, $SD = 0,753$) und **P2.6** ($M = 3,00$, $SD = 0,894$) im Vergleich zu den übrigen als deutlich anstrengender bewertet wurden. Am wenigsten anstrengend war die Verwendung des Handschuhprototypen **P2.4** ($M = 1,50$, $SD = 0,548$).

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 18,867$, $p < 0,001$, $N = 6$) zeigt, dass es hinsichtlich der Anstrengung einen signifikanten Unterschied zwischen den Prototypen zur Bestimmung der Tastenanordnung und -nummerierung gibt. Die Post-hoc-Analyse (Dunn-Bonferroni-Tests) ergab jedoch, dass kein signifikanter Unterschied vorhanden ist. Die Ergebnisse sind für die Fälle, die ohne Bonferroni-Korrektur des Signifikanzwertes signifikant ausgefallen sind, in Tabelle 3.3 zusammengefasst.

Zwischen den Handschuhprototypen		z	p	p _{korrigiert}
P2.5	P2.2	-2,546	= 0,011	= 0,163
	P2.3	-2,700	= 0,007	= 0,104
	P2.4	-2,855	= 0,004	= 0,065
P2.6	P2.1	-2,237	= 0,025	= 0,379
	P2.2	-2,237	= 0,025	= 0,379
	P2.3	-2,392	= 0,017	= 0,252
	P2.4	-2,546	= 0,011	= 0,163

Tabelle 3.3: Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für die durchschnittliche Bewertung der Anstrengung der Prototypen zur Bestimmung der Tastenanordnung und -nummerierung. Es sind die Fälle aufgeführt, in denen eine Signifikanz bei Nichtanpassung des Signifikanzwertes aufgetreten ist. Für alle Tests gilt $N = 6$, $\alpha = 0,05$.

Die Teilnehmer bewerteten auf einer Skala von 1 = „sehr schlecht“ bis 5 = „sehr gut“, wie gut sie das Layout des jeweiligen Handschuhs fanden. In dem Säulendiagramm in Abbildung 3.10 ist zu erkennen, dass die beiden Prototypen mit geschwungenem Layout **P2.5** ($M = 2,67$, $SD = 1,366$) und **P2.6** ($M = 2,83$, $SD = 1,472$) am schlechtesten bewertet wurden. Zwischen den übrigen Handschuhprototypen ist kein wesentlicher Unterschied erkennbar.

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 7,958$, $p = 0,153$, $N = 6$) zeigt, dass es keinen signifikanten Unterschied in der Gesamtbewertung zwischen den Handschuhprototypen zur Bestimmung der Tastenanordnung und -nummerierung gibt.

3.4 Diskussion und Schlussfolgerung

Im Folgenden werden die vorherigen Ergebnisse diskutiert und die Verbindung zu den aufgestellten Hypothesen hergestellt, um anschließend eine Entscheidung hinsichtlich des finalen Layouts treffen zu können.

Handausrichtung

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verwendung beider Prototypen mit diagonalen Handausrichtung (**P1.1** und **P1.2**) deutlich als am wenigsten anstrengend empfunden wurden. Der Unterschied zu den anstrengendsten Prototypen **P1.5** und **P1.6** (in vertikaler Ausrichtung) ist sogar trotz der geringen Teilnehmerzahl bei dem Experiment signifikant ausgefallen. Die horizontal ausgerichteten Prototypen wurden zwar im Gegensatz zu den vertikalen als weniger anstrengend bewertet, die Probanden empfanden sie aber noch deutlich anstrengender als die diagonal ausgerichteten Prototypen. Auffällig bei der Beobachtung der Teilnehmer während des Experiments war, dass die horizontalen Prototypen leicht diagonal gehalten wurden, wohingegen die vertikalen akkurat ausgerichtet

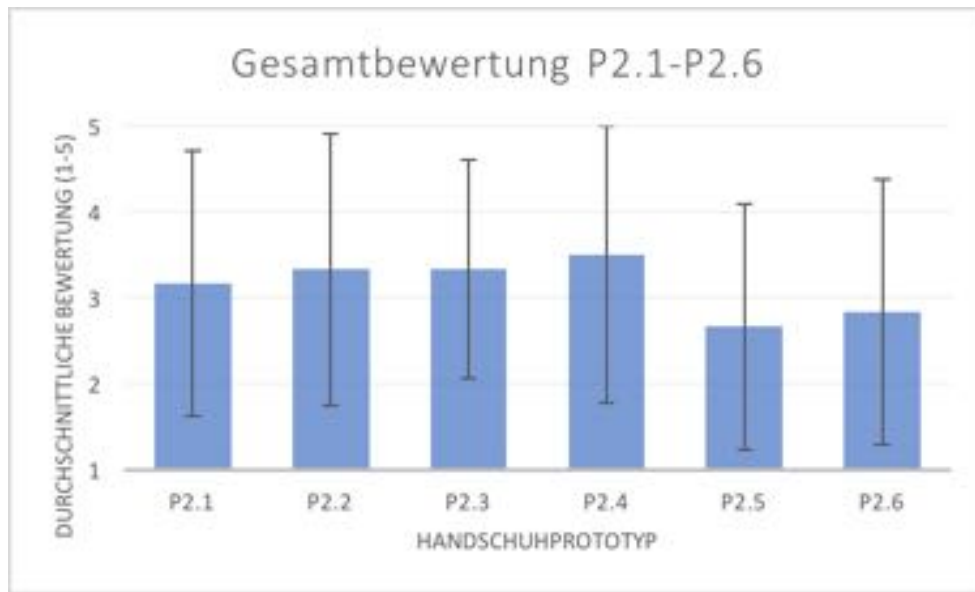


Abbildung 3.10: Durchschnittliche Gesamtbewertung der Handschuhprototypen zur Bestimmung der Tastenanordnung und -nummerierung auf einer Likert-Skala (1-5) mit 95 % Konfidenzintervallen.

wurden. Dies könnte eine Ursache dafür gewesen sein, dass die horizontalen Prototypen als weniger anstrengend bewertet wurden. Die Ergebnisse unterstützen die Hypothese **H1.1** die angibt, dass die diagonale Haltung der Hand den Probanden am wenigsten anstrengend erscheint.

Die Resultate der Gesamtbewertung der Prototypen zu Bestimmung der Handausrichtung legen die Vermutung nahe, dass die Anstrengung einen Einfluss auf den Gesamteindruck hat. Die diagonal ausgerichteten Prototypen wurden am besten bewertet, die vertikalen Handschuhprototypen auf der Handfläche (**P1.3**) und auf den Fingern (**P1.4**) schlechter als das entsprechende Gegenstück in horizontaler Ausrichtung (**P1.5** und **P1.6**). Die Ergebnisse bestätigen somit die Hypothese **H1.2**. Das Ausnutzen der Fingerglieder für das Design des Interfaces wurde von den Teilnehmern nicht akzeptiert, was daran zu erkennen ist, dass beide Prototypen (**P1.4** und **P1.6**) schlechter bewertet wurden als der andere Prototyp in der jeweiligen Handausrichtung (**P1.3** und **P1.5**).

Tastenanordnung und -nummerierung

Ein Großteil der Teilnehmer aus **G2** äußerte, dass die Anstrengung der Bedienung aller Prototypen physisch identisch wäre, und sie die mentale Anstrengung bewerteten, welche bei der ungewohnten geschwungenen Tastenanordnung höher gewesen wäre. Das spiegelt sich auch in den Ergebnissen wider, da die beiden Prototypen **P2.5** und **P2.6** mit geschwungener Tastenanordnung die höchsten Durchschnittswerte bei der Bewertung der Anstrengung aufweisen. Zusammen

mit den beiden niedrigsten Durchschnittswerten in der Gesamtbewertung bekräftigen die Resultate somit **H1.3**, auch wenn die Unterschiede zu den anderen Prototypen nicht groß und auf Grund der geringen Teilnehmerzahl nicht signifikant ausfielen.

Zwischen der aufsteigenden Nummerierung *von unten nach oben* und *von oben nach unten* zeigen die Ergebnisse keine deutlichen Unterschiede. Auch wenn die Gesamtbewertungen der Prototypen mit der Nummerierung *von oben nach unten* (**P2.3**, **P2.4** und **P2.6**) minimal besser ausgefallen sind als das jeweilige Pendant mit der Nummerierung *von unten nach oben* (**P2.1**, **P2.2** und **P2.5**), ist dieser Unterschied nicht nachweisbar signifikant. Dennoch widersprechen die Ergebnisse der aufgestellten Hypothese **H1.4**, die besagt, dass die aufsteigende Nummerierung der Zifferntasten *von unten nach oben* präferiert wird.

Finales Layout

Die Ergebnisse und die beiden damit bestätigten Hypothesen **H1.1** und **H1.2** motivierten die Wahl der diagonalen Ausrichtung und Positionierung des finalen Layouts auf der Handfläche. Bezieht man sich auf die Resultate hinsichtlich der Bestimmung der Tasten-anordnung, erscheint die Verwendung einer herkömmlichen Anordnung in einem Ziffernblock sinnvoll. Des Weiteren wurde die aufsteigende Nummerierung der Tasten *von unten nach oben* ausgewählt, auch wenn Hypothese **H1.4** nicht bestätigt werden konnte. Diese Entscheidung hatte den Beweggrund, dass ein Großteil der Teilnehmer angab, im Alltag oder Beruf am häufigsten Eingaben mit einem Ziffernblock einer analogen Tastatur zu tätigen, welche ebenfalls diese Art der Nummerierung aufweist und mit der somit potenzielle Nutzer des Interfaces am ehesten vertraut sein könnten. Auf der Basis subjektiver Rückmeldungen wurde die Vorzeichen-Taste links neben der „0“ positioniert, da die Teilnehmer vermehrt den Wunsch äußerten, dass sich die Funktionalität des Vorzeichens und des Dezimalpunkts nicht weit voneinander entfernt befinden sollen. Die Umpositionierung hatte zur Folge, dass die „0“-Taste aus Platzgründen verkleinert wurde und somit die gleiche Größe wie die anderen Wertetasten hat.

Mit dem finalen Interface (siehe Abbildung 3.11) wurde schließlich das im Abschnitt 3.1 beschriebene Eingabekonzept als *High-Fidelity* Prototyp implementiert. Einzelheiten der Eingabemethode sind im folgenden Kapitel 4 beschrieben.



Abbildung 3.11: Handschuhprototyp mit dem finalen Layout des handflächenbasierten Interfaces.

Kapitel 4

Eingabemethoden

In diesem Kapitel werden neben der handflächenbasierten Eingabemethode fünf weitere vorgestellt, die zusammen in einer anschließenden Studie evaluiert wurden¹⁰. Bei der Auswahl und Konzeption der Eingabemethoden wurden verschiedene Arten haptischen Feedbacks berücksichtigt, um im Weiteren deren Einfluss zu untersuchen. Zudem wurden zwei State-of-the-Art Methoden zur Interaktion in VR abgedeckt. Alle Eingabemethoden verfügen über identisches visuelles und auditives Feedback beim Auslösen einer Taste.

4.1 Eingabe mit den Händen

Im Folgenden werden neben der Umsetzung der handflächenbasierten Eingabemethode drei weitere Methoden vorgestellt, in deren Interaktion die Hände des Benutzers und deren virtuelle Repräsentation in VR involviert sind. Dabei liefern – bis auf eine – alle Varianten unterschiedliche Arten haptischen Feedbacks.

4.1.1 Ohne Haptik

Bei der Eingabemethode **In Air** (siehe Abbildung 4.1) sieht der Benutzer eine virtuelle Repräsentation seiner beiden Hände in VR. Das zu bedienende Interface befindet sich fixiert schwebend im Raum vor ihm. Indem er mit dem Zeigefinger seiner dominanten Hand eine Taste durchdringt, kann er mit dem Interface interagieren. Hierfür befindet sich an der Fingerkuppe des Zeigefingers eine kleine Kugel, die verdeutlicht, womit die Tasten durchdrungen werden sollen.

¹⁰Um die Eingabemethoden unter möglichst identischen Bedingungen zu evaluieren, ist daher auf den abgebildeten Bildern zu der jeweilige Eingabemethode immer das Interface-Layout aus Abbildung 3.11 zu sehen.

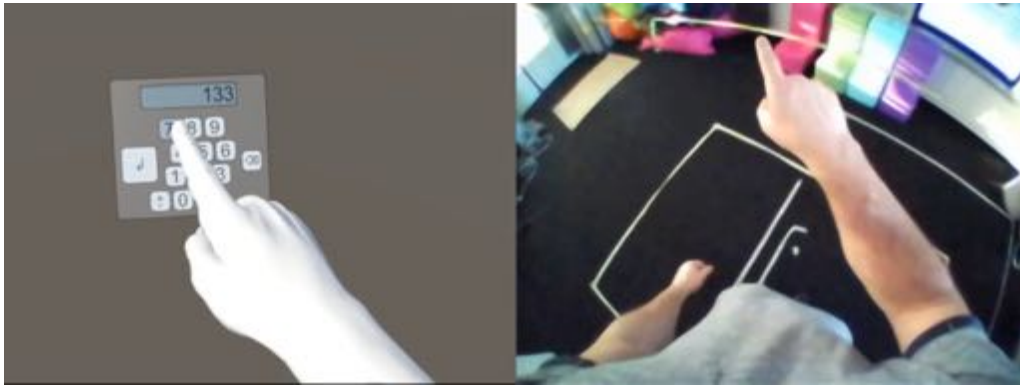


Abbildung 4.1: Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit **In Air**.



(a) Normal. (b) Selektiert. (c) Gedrückt.

Abbildung 4.2: Zustände einer Eingabetaste.

Der Benutzer erhält somit keine haptischen Rückmeldung beim Auslösen einer Taste. Das erfolgreiche Auslösen einer Taste wird ihm jedoch visuell und auditiv vermittelt. Ebenfalls sieht der Benutzer einen Hover-Effekt an einer Taste, wenn er sich mit dem Zeigefinger dieser annähert. Bei dieser Eingabemethode ist keine zusätzliche Hardware zur Interaktion notwendig und erfüllt somit die in Unterabschnitt 1.1.4 beschriebene Anforderung zum Einsatz im industriellen Kontext.

4.1.2 Mit aktiver Haptik

Während bei der Eingabemethode **In Air** das Interface im Raum fixiert ist, lässt sich das Eingabefeld bei **In Air on Controller** bewegen. Hierfür ist das Interface oberhalb eines Controllers angehängt, den der Benutzer in seiner nichtdominanten Hand hält und frei ausrichten kann (siehe Abbildung 4.3). Die Interaktion erfolgt äquivalent zu der von **In Air**, wohingegen der Benutzer bei **In Air on Controller** beim Auslösen einer Taste aktives haptisches Feedback durch Vibration des gehaltenen Controllers erhält. Auch hier wird das Annähern zu einer Taste durch einen Hover-Effekt visualisiert. Anstatt einer virtuellen Repräsentation seiner nichtdominanten Hand sieht der Anwender bei dieser Eingabemethode ein Modell des verwendeten Controllers.

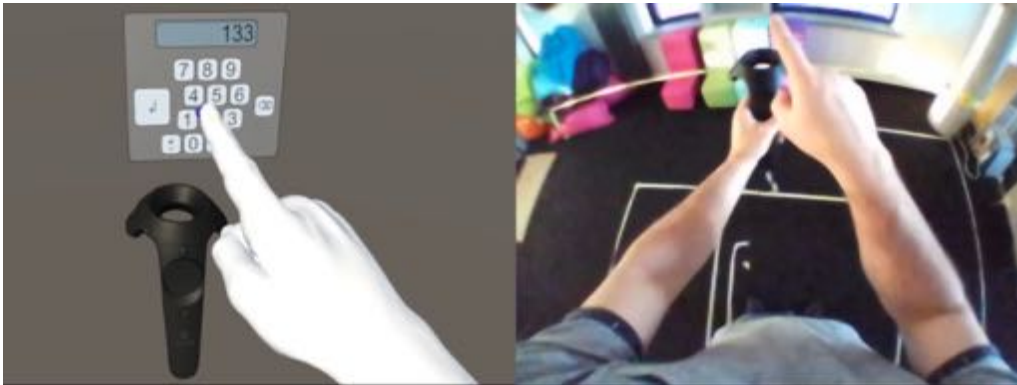


Abbildung 4.3: Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit **In Air on Controller**.

4.1.3 Mit passiver Haptik

Nachfolgend wird eine Eingabemethode beschrieben, die durch die Verwendung eines *Proxy*-Objekts einseitige passive Rückmeldung bereitstellt. Außerdem wird die Umsetzung der handflächenbasierten Eingabemethode vorgestellt, in deren Interaktion zweiseitig passive Rückmeldung involviert ist.

Einseitig passiv

Bei **Proxy** ist das Eingabefeld so positioniert, dass es sich auf einem *Proxy*-Objekt befindet, sodass der Benutzer beim Betätigen einer Taste das *Proxy*-Objekt berührt und somit die wahrgenommene Berührung natürliches haptisches Feedback verleiht (siehe Abbildung 4.4). Auch hier interagiert der Benutzer mit dem Zeigefinger seiner dominanten Hand und sieht eine virtuelle Repräsentation seiner beiden Hände. Das Annähern zu einer Taste des Interfaces wird hier ebenfalls durch einen Hover-Effekt sichtbar gemacht.

Zweiseitig passiv

In Abbildung 4.5 ist die Umsetzung der handflächenbasierten Eingabemethode zu sehen. Die beiden Hände des Benutzers sind in VR repräsentiert und leicht oberhalb der Handfläche der nichtdominanten Hand befindet sich das Interface. Dieses wird beim Schließen der Hand ausgeblendet und beim Öffnen wieder eingeblendet. Der Benutzer interagiert mit dem Zeigefinger der dominanten Hand mit dem Interface und berührt beim Auslösen einer Taste die Handfläche, wodurch er durch die wahrgenommene Berührung auf der Handfläche und auf der Fingerkuppe des Zeigefingers zweiseitige haptische Rückmeldung erhält. Äquivalent zu den Eingabemethoden **In Air**, **In Air on Controller** und **Proxy** wird durch einen Hover-Effekt auf den Tasten die Annäherung des Zeigefingers visualisiert.

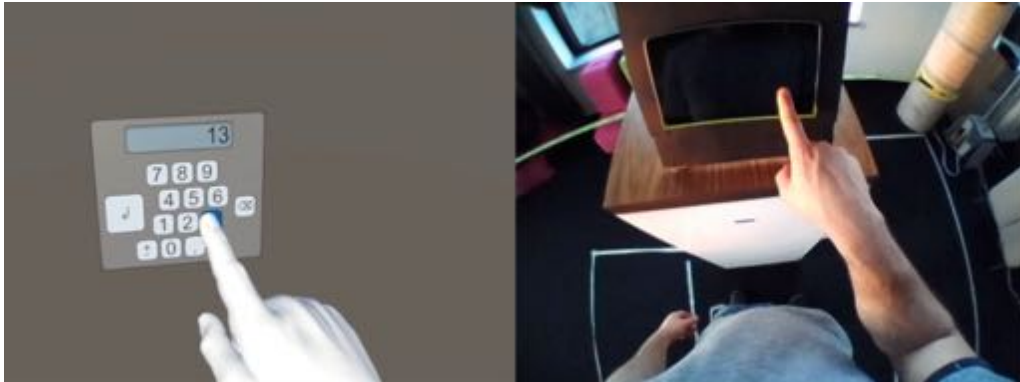


Abbildung 4.4: Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit **Proxy**.



Abbildung 4.5: Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit **On Hand**.

4.2 State-of-the-Art Methoden

Nachfolgend werden zwei Eingabemethoden beschrieben, deren Interaktionsformen in aktuellen VR-Anwendungen am häufigsten verbreitet sind. Darunter ist eine direkte Eingabe über einen Controller und eine mit Hilfe des *Head-Gaze*.

Controller

Bei der Eingabemethode **Controller** diente die State-of-the-Art alphanumerischen Eingabe, die mit dem SteamVR-Plugin für Unity3D mitgeliefert wird (siehe Abbildung 4.7), als Orientierung. Anstatt die Schnittstelle der API direkt zu verwenden, wurde die Funktionalität reimplementiert, um bei der Gestaltung des Interfaces mehr Freiheiten zu haben und die gleiche Darstellung wie bei den anderen Eingabemethoden verwenden zu können. Die Interaktion verläuft jedoch äquivalent zu der Funktionalität, die mit der API mitgeliefert wird.

Der Benutzer sieht ein Modell des Controllers in VR, aus dessen oberen Ende ein virtueller Strahl austritt. Mit Hilfe dieses Strahls kann der Benutzer durch Zeigen auf eine Taste des Interfaces (*Pointing*) diese selektieren. Die Selektion der Taste wird mit dem gleichen Hover-Effekt, der bei den bisherigen Eingabemethoden verwendet wurde, visualisiert (siehe Abbildung 4.8). Durch das Betätigen des Controllerbuttons kann der Benutzer die Taste, auf die er gerade mit dem Strahl zeigt, auslösen. Beim Auslösen der Taste erhält er jedoch kein zusätzliches haptisches Feedback durch eine Vibration des Controllers.

Neben dieser Art der Interaktion hat der Benutzer noch eine zweite Möglichkeit. Sobald er seinen Daumen auf das Touchpad des Controllers legt, wird der aus dem Controller austretende Strahl ausgeblendet und ein virtueller Cursor erscheint auf dem Interfacepanel. Durch das Bewegen des Fingers auf dem Touchpad kann der Benutzer diesen Cursor bewegen. Sobald er sich oberhalb einer Taste des Interfaces befindet, wird diese selektiert und kann durch Klicken des Touchpads ausgelöst werden. Auch hier wird die Selektion der Interfacetaste durch den gleichen Hover-Effekt wie bei den anderen Eingabemethoden dargestellt (siehe Abbildung 4.9). In gleicher Weise wie bei der Interaktion durch das Zeigen mit dem Strahl und dem Auslösen über den Controllerbutton, erhält der Benutzer



Abbildung 4.6: Ansicht des Controllers (1 – Button, 2 – klickbares Touchpad).



Abbildung 4.7: VR-Keybord von *SteamVR* [66].

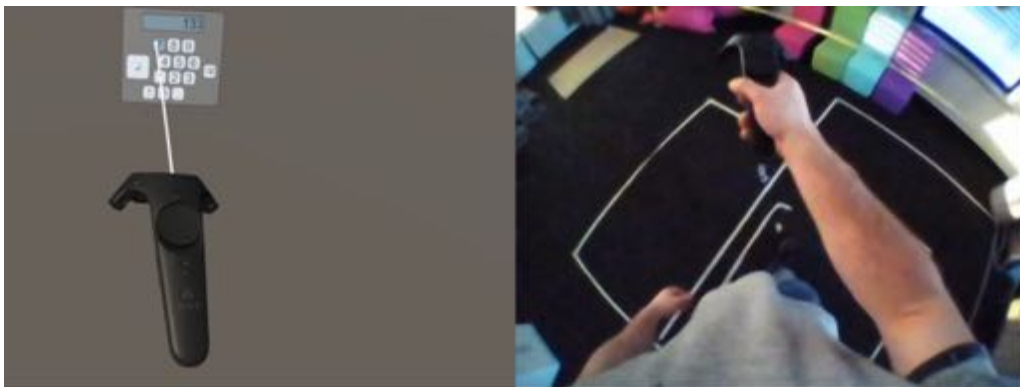


Abbildung 4.8: Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit **Controller** durch *Pointing*.

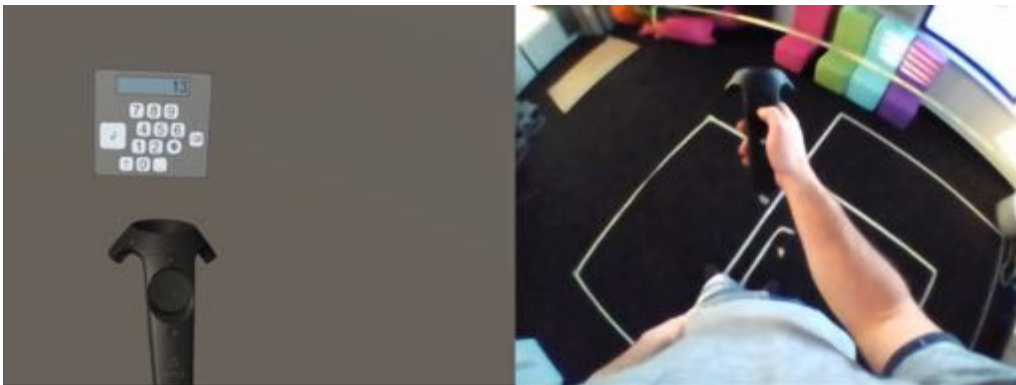


Abbildung 4.9: Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit **Controller** mit dem Touchpad.

hier beim Auslösen einer Taste ebenfalls keine zusätzliche haptische Rückmeldung durch eine Vibration des Controllers. Jedoch wird ein leichter Impuls über den Controller erzeugt, wenn der Cursor über eine neue Taste wandert. Sobald der Benutzer den Daumen vom Touchpad nimmt, wird der Cursor wieder ausgeblendet und der aus dem Controller austretende Strahl erscheint.

Head-Gaze

Bei der Eingabe **Head-Gaze** kann der Benutzer einen Button durch die Ausrichtung seines Kopfes selektieren. Hierfür wird, sobald er seinen Kopf auf das Interface hinlenkt, in der Mitte seines Sichtfelds ein kleiner Punkt (*Reticle*¹¹) angezeigt (siehe Abbildung 4.10). Dieser dient dem Benutzer als Orientierungshilfe. Wenn der Benutzer seinen Kopf so ausrichtet, dass sich der Orientierungspunkt auf einer Taste des Interfaces befindet, wird diese selektiert. Die Selektion wird wieder, wie bei den anderen Eingabemethoden, durch einen Hover-Effekt dargestellt. Anstatt das Auslösen des Buttons über eine *Dwell Time* zu realisieren, wurde hierfür zusätzlich ein Controller eingesetzt. Diese Entscheidung hat den Hintergrund, dass in der anschließenden Studie die Eingabemethoden auch hinsichtlich ihrer Effizienz untersucht werden sollten, weshalb **Head-Gaze** unter der Verwendung der *Dwell Time* außer Konkurrenz gefallen wäre, beziehungsweise die *Dwell Time* zusätzlich hätte herausgerechnet werden müssen. Somit kann der Benutzer den aktuell anvisierten Button durch Betätigung der Kontrollertaste auslösen. Beim Auslösen der Taste des Interfaces erhält der Benutzer zusätzlich haptisches Feedback durch eine Vibration des Controllers. Die Intensität und Dauer der Vibration fällt äquivalent zu der haptischen Rückmeldung bei **In Air on Controller** aus.

¹¹Ein *Reticle* wird im Deutschen als eine Art Fadenkreuz bezeichnet.

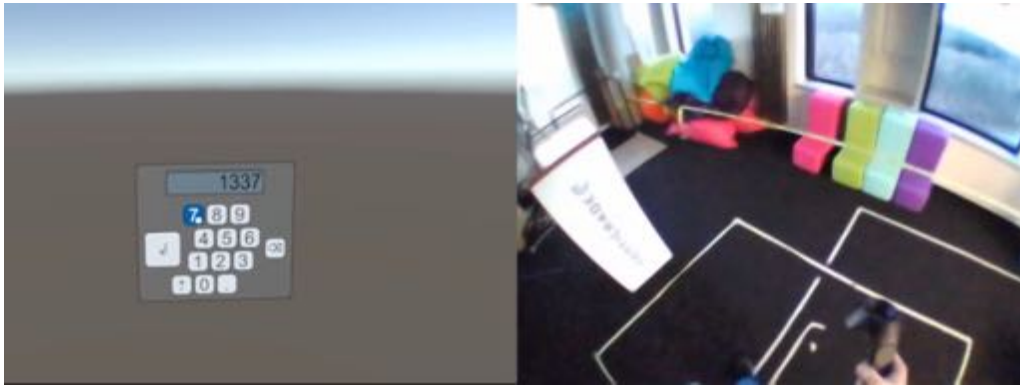


Abbildung 4.10: Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit **Head-Gaze**.

Eingabemethode	Hände integriert	Controller involviert	Interface fixiert	Haptische Rückmeldung
In Air	beide	nein	ja	nein
In Air on Controller	dominante	ja	nein	aktiv
Proxy	beide	nein	(ja)	einseitig passiv
On Hand	beide	nein	nein	zweiseitig passiv
Controller	nein	ja	ja	(aktiv/passiv)
Head-Gaze	nein	ja	ja	aktiv

Tabelle 4.1: Gegenüberstellung aller sechs umgesetzten Eingabemethoden unter den Gesichtspunkten der Integration der Hände, der Einbeziehung des Controllers in die Interaktion, der Fixierung des Interfaces im Raum und der haptischen Rückmeldung.

4.3 Gegenüberstellung

In Tabelle 4.1 ist eine Gegenüberstellung aller sechs Eingabemethoden zu finden. Zwar wurde bei der Umsetzung von **Proxy** ein Controller verwendet, jedoch ist dieser bei der Eingabemethode kein Bestandteil der Interaktion. Dieser wurde lediglich dafür verwendet, das Interface akkurat und dynamisch an der Position des *Proxy*-Objekts auszurichten. Somit ist das Interface semi-fixiert, da es durch das Verschieben des *Proxy*-Objekts bewegt werden kann. Details der Implementierung werden im folgenden Kapitel 5 besprochen.

Bei der Eingabemethode **Controller** erhält der Benutzer zwar keine aktive haptische Rückmeldung beim Auslösen einer Taste, jedoch bewirkt die Betätigung der Controllertaste – beziehungsweise des Touchpads – passive haptische Rückmeldung. Unter der Verwendung des Touchpads zur Interaktion wird außerdem beim Bewegen des Cursors über eine Taste des Interfaces durch einen leichten Vibrationsimpuls aktive Haptik eingesetzt.

Kapitel 5

Implementierung

In diesem Kapitel wird auf technische Aspekte der Implementierung eingegangen. Zunächst wird die grundlegende Umsetzung des VR-System geschildert. Anschließend werden Problemstellungen formuliert, die auf Grund aktueller technischer Limitationen auftraten. Ebenfalls werden deren Lösungen skizziert. Weiterhin wird die Konstruktion des *Proxy*-Objekts beschrieben. Abschließend ist eine Kurzzusammenfassung der involvierten Hardware-/Softwarebestandteile und deren Zusammenspiel aufgeführt.

5.1 Virtual Reality System

Im Folgenden wird auf die allgemeinen Hardware- und Softwarvoraussetzungen eingegangen, die für die Umsetzung der Eingabemethoden (ohne Berücksichtigung speziell aufgetretener Probleme) und für das Experiment der anschließenden Hauptstudie notwendig waren.

Hardware

Als VR-HMD wurde eine *HTC Vive* verwendet. Die zugehörige Software lief auf einem PC, der wie folgt ausgestattet, die Systemvoraussetzungen¹² der *HTC Vive* erfüllte: Intel® Core™ i7-6700 @ 4.00GHz, NVIDIA GeForce™ GTX 1080, 32 GB RAM. Die Positions- und Bewegungserkennung des Nutzers erfolgte über das *Lighthouse*-System von *VALVE*, deren beide Basisstationen diagonal gegenüberliegend angebracht und auf einen abgegrenzten Bewegungsbereich

¹²Empfohlene PC-Mindestanforderungen: Intel® Core™ i5-4590 oder AMD FX™ 8350 (gleichwertig bzw. besser), NVIDIA GeForce™ GTX 1060 oder AMD Radeon™ RX 480 (gleichwertig bzw. besser), mindestens 4 GB RAM [67].



Abbildung 5.1: Bild der an der *HTC Vive* befestigten *Leap Motion*-Kamera.

ausgerichtet wurden. Zur Wiedergabe auditiver Effekte wurde ein Sennheiser HD-201 Headset (Stereosound) eingesetzt. Die Integration der Hände des Nutzers in die virtuelle Realität, wurde mit Hilfe einer Infrarot-Tiefenkamera des Herstellers *Leap Motion* umgesetzt, welche auf der Vorderseite des HMD mittig mit einer zur Kamera zugehörigen Befestigung angebracht wurde (siehe Abbildung 5.1). Für die Eingabemethoden **In Air on Controller** und **Controller** wurde der zur *HTC Vive* zugehörige Controller eingesetzt.

Framework

Als grundlegendes Framework für die softwareseitige Umsetzung wurde die *Unity Engine*¹³ (Unity3D) 5.4.1 verwendet. Zur Ansteuerung der *HTC Vive* wurde das *SteamVR Plugin* 1.1.1 für *Unity3D* eingesetzt, das alle notwendigen Funktionalitäten zur Integration des HMD, des Controllers und des *Lighthouse*-Systems zur Positionsbestimmung der involvierten *HTC Vive* -Hardwarekomponenten mitbringt. Zur Integration der Hände in VR wurde das *Leap Motion Orion SDK* 3.0.0 für *Unity3D* verwendet. Dieses liefert alle grundlegend notwendigen Funktionalitäten zur Erhaltung der Positionsdaten der Handknochen und -gelenke sowie virtueller Repräsentationen der Hände des Benutzers, die in Echtzeit aktualisiert werden.

¹³*Unity Engine* ist eine Laufzeit- und Entwicklungsumgebung des Unternehmens *Unity Technologies* für Spiele.

Handinteraktion

Zur Realisierung der handbasierten Eingabemethoden **In Air**, **In Air on Controller**, **Proxy** und **On Hand** wurde jede Taste des Eingabefeldes mit jeweils zwei *Box Colliders* versehen. Einer der *Box Colliders* hatte die Funktion, das Auslösen der Taste bei Berührung hervorzurufen, und der andere war für den Hover-Effekt zuständig, der beim Annähern des Zeigefingers an eine Taste dargestellt wurde. Dieser *Box Collider* ist daher etwas länger (siehe Abbildung 5.2). Die *IsTrigger*-Eigenschaft der *Box Colliders* wurde aktiviert, sodass beim Ein- und Austreten eines anderen Objekts, das eine *Rigidbody*-Komponente besitzt, jeweilige Methoden zum Verarbeiten der Ereignisse aufgerufen werden. Hierfür wurde der kleinen Kugel, die an der Fingerkuppe des Zeigefingers der dominanten Hand fixiert war, eine *Rigidbody*-Komponente hinzugefügt.

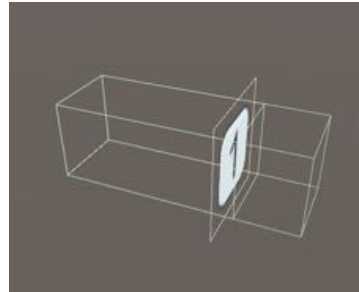


Abbildung 5.2: Ansicht auf die beiden *Box Colliders* einer Taste.

Um zu vermeiden, dass bei einem seitlichen Eindringen in den inneren *Box Collider* der zugehörige Button ausgelöst wird, wird beim Eintreten die Eintrittsrichtung bestimmt und nur im Falle des Eindringens von der oberen Seite des *Box Collider* die Taste ausgelöst. Dies hat den Hintergrund, dass in der Interaktion zum Betätigen eines Buttons, im Besonderen bei den Eingabemethoden **In Air** und **In Air on Controller**, das Eindringen in *Box Colliders* umliegender Buttons involviert sein kann. Durch das beschriebene Vorgehen wird somit das versehentliche Auslösen einer umliegenden Taste durch ein seitliches Abrutschen oder auch Durchdringen eines Buttons in der Rückwärtsbewegung von hinten vermieden. Da es abhängig von der aktuellen Bildrate vorkommen kann, dass das *Trigger Event* erst verspätet ausgelöst wird, sodass die anschließende Berechnung der Eintrittsrichtung nicht zwingend das richtige Ergebnis liefert, wird in diesem Falle auf die Position der Kugel beim Eintreten in den äußeren *Box Collider* zurückgegriffen (siehe Algorithmus 1).

Experiment der Hauptstudie

Neben der Integration des VR-Systems und der Implementierung der Eingabemethoden wurde im Rahmen dieser Thesis auch die Szene und die Logik des Experiments der Hauptstudie entwickelt. Die Szene wurde selbst konzipiert und aus freien Modellen und Texturen aus dem *Unity Asset Store*¹⁴ konstruiert. Die Logik der Szene und des Experimentenablaufs wurde durch mehrere Skripte implementiert. Darüber hinaus wurden alle Messergebnisse zur späteren Auswertung automatisiert in eine *Comma Separated Values* (CSV)-Tabelle geschrieben. Details der Szene und des Ablaufs der Studie werden in Kapitel 6 beschrieben.

¹⁴<https://www.assetstore.unity3d.com/> (Abrufdatum 27. März 2017)

Button class**Class member:**

outerEnteringPosition (the origin of the sphere when entering the outer collider);

Function OnOuterColliderEntered

Data: otherCollider (the other collider)

```

if otherCollider == sphere then
    | outerEnteringPosition := sphere.origin;
    | OnSelect ();
end

```

end

Function OnInnerColliderEntered

Data: otherCollider (the other collider)

```

if otherCollider == sphere then
    | if HitDirection(sphere.origin, innerCollider) == Top then
    | | OnPress ();
    | else if HitDirection(outerEnteringPosition, innerCollider) == Top then
    | | OnPress ();
    | end
end

```

end

Function HitDirection

Data: Origin (the origin position), Object (the object to hit)

Result: Direction from that *Object* is hit by a ray casted from *Origin* towards *Object* (Top, Bottom, Left, Right, Front, Back).

```

var rayHit := cast ray against UI layer from Origin towards Object;
if rayHit.normal equals rayHit.transform.up then return Top;
if rayHit.normal equals -rayHit.transform.up then return Bottom;
if rayHit.normal equals rayHit.transform.forward then return Front;
if rayHit.normal equals -rayHit.transform.forward then return Back;
if rayHit.normal equals rayHit.transform.right then return Right;
if rayHit.normal equals -rayHit.transform.right then return Left;

```

end

Algorithmus 1: Vorgehen zum Selektieren und Auslösen einer Eingabetaste bei den handbasierten Eingabemethoden. Die beiden *Box Colliders* sind so angeordnet, dass die *Up-Direction* der *Transform*-Komponenten parallel zu der Taste in Richtung Benutzer zeigt.

5.2 Probleme

Aktuelle handbasierte Eingabemethoden in VR, die mit der *Leap Motion* umgesetzt sind, wie zum Beispiel das *Hovercast VR-Interface* [56], basieren auf einer Interaktion, in der sich die beiden Hände nicht überlagern. Das hat den Hintergrund, dass die Verfolgung (Tracking) und die Rekonstruktion der Hand insbesondere in diesem Fall nicht sehr robust und akkurat sind. Diese Problematik zeigte sich deutlich bei der Eingabemethode **On Hand**, da der Zeigefinger der dominanten Hand bei der Interaktion die Handfläche oder Finger der nicht-dominanten Hand überdeckt. Im Konkreten sind dadurch folgenden Probleme aufgetreten:

- **Verlieren eines Hand-Trackings:** Abhängig von der Größe der überlagernden Fläche und des Umgebungslichts kommt es vor, dass das Tracking einer oder beider Hände komplett verloren geht. Das bedeutet, dass die API von *Leap Motion* in diesem Fall keinerlei Handdaten mehr liefert und die virtuelle Handrepräsentationen verschwinden. Am häufigsten tritt das Problem in unserem Anwendungsfall auf, wenn man mit dem Zeigefinger der dominanten Hand versucht, Stellen an der oberen Seite der anderen Hand, insbesondere den anderen Zeigefinger, zu erreichen. In diesem Fall überlagert nicht nur der Zeigefinger der dominanten Hand die andere Hand, sondern befindet sich auch der Handrücken über dieser. Bei starker direkter Sonneneinstrahlung, welche die Infrarotstrahlung der *Leap Motion*-Kamera beeinträchtigt, zeigt sich das Problem jedoch auch unabhängig von der Handposition.
- **Abknicken des Zeigefingers:** Beim Annähern des Zeigefingers an die Handfläche der anderen Hand zum Betätigen einer Interface-Taste wird das Tracking des Zeigefingers inakkurat, was sich durch ein zunehmendes Abknicken des Fingers zeigt. Dies beeinträchtigt zum einen die Wahrnehmung des Benutzers, da somit die reale Haltung des Fingers und die virtuelle Repräsentation nicht übereinstimmen. Daneben hat das Problem jedoch auch die Folge, dass bei einer schnelleren Eingabe versehentlich die Taste unterhalb der gewollten betätigt wird, da dem Abknicken des Zeigefingers nur schwer entgegen gewirkt werden kann. Das Problem zeigt sich aber nicht nur bei der Eingabemethode **On Hand**, sondern auch bei der Interaktion mit einem *Proxy*-Objekt.
- **Flippen der Finger:** Bei einer Überlagerung des Zeigefingers mit Fingern der anderen Hand, flippen die überlagerten Finger unkontrolliert in der Ausstreckung, da die *Leap Motion*-Software Probleme hat, die Finger zu rekonstruieren. Damit ist gemeint, dass sich der Grad der Ausstreckung unkontrolliert und schnell verändert, sodass sich die Repräsentation eines Fingers im nächsten Augenblick ohne Veränderung der Krümmung – beziehungsweise der Ausstreckung – des realen Fingers abwandelt. Dieses

Problem ist relevant, da bei **On Hand** eine Taste des Interfaces auf dem kleinen Finger der nichtdominanten Hand positioniert ist.

- **Diskrepanzproblem:** Besonders stark macht sich bei der Eingabemethode **On Hand** eine Diskrepanz zwischen real und virtuell bemerkbar. Das bedeutet, dass das virtuelle Bild nicht genau mit der realen Haltung, beziehungsweise realen Position der Handknochen und -gelenke übereinstimmt. Dies ist beim Lösungsansatz, das Hand-Tracking über eine entfernt angebrachte Infrarotkamera zu verwirklichen, die Folge der noch nicht ganz ausgereiften aktuellen Technologie. Im Konkreten zeigt sich das darin, dass unter Umständen der Zeigefinger der dominanten Hand bereits die Handfläche der nichtdominanten Hand berührt, obwohl die virtuellen Repräsentationen beider Hände noch etwas weiter voneinander entfernt sind. Dies führt dazu, dass Tasten des handflächenbasierten Interfaces nicht erreichbar sind und das passive haptische Feedback nicht mit dem Auslösen einer Taste übereinstimmt.

5.3 Lösungen

Das Problem **Verlieren eines Hand-Tracking** wurde in der Arbeit weitgehend ignoriert, da das Interface nicht an kritischen Stellen angebracht war, die das Problem besonders stark hervorriefen. Des Weiteren wurde für die Hauptstudie der Raum, in dem das Experiment stattfand, abgedunkelt, sodass die Einwirkung eines direkten Sonnenlichts auch kein Problem darstellte. Im Falle eines verloren gegangenen Trackings musste der Benutzer lediglich beide Hände offen der Infrarotkamera zuwenden, damit sie wieder erkannt wurden.

Das Augenmerk galt den Problemen, die die Interaktion gravierend beeinträchtigten. Die Lösungen werden im Folgenden vorgestellt.

5.3.1 Handoptimierung

Das **Abknicken des Zeigefingers** wurde wie folgt gelöst: Sobald sich der Zeigefinger innerhalb einer bestimmten Distanz zum Interface befindet, werden die Daten der *Leap Motion*-API so überschrieben, dass der Zeigefinger gerade fixiert ist. Eine Voraussetzung für die reale und virtuelle Übersteinstimmung besteht darin, dass die Nutzer den Zeigefinger bei der Interaktion ausgestreckt halten. Notwendig war diese Handoptimierung für die Eingabemethoden **On Hand** und **Proxy**. Um jedoch in dem Experiment der Hauptstudie vergleichbare Bedingungen für alle handbasierten Eingabemethoden zu erhalten, wurde die Maßnahme auch bei **In Air** und **In Air on Controller** getroffen.

Äquivalent zu diesem Vorgehen wurde auch das Problem **Flippen der Finger** bei der Eingabemethode **On Hand** gelöst. Wenn sich der Zeigefinger der dominanten Hand innerhalb einer bestimmten Distanz über der nichtdominanten Hand

befindet, werden deren Fingerdaten so überschrieben, dass die Finger gerade ausgestreckt sind.

5.3.2 Erkennung der Handberührung

Etwas umfangreicher fiel die Lösung des **Diskrepanzproblems** aus. Auch hier war das Problem besonders für die Eingabemethoden **On Hand** und **Proxy** relevant, da das passive haptische Feedback möglichst akkurat mit dem Auslösen der Taste synchronisiert werden musste. Da die grundsätzliche Verbesserung der Handerkennung mit der *Leap Motion*-Kamera innerhalb des Rahmens der Thesis nicht lösbar gewesen wäre, wurden domänenspezifische Lösungen gefunden. Im Folgenden wird der Lösungsansatz für **On Hand** vorgestellt. Das Vorgehen bei der Eingabemethode **Proxy** ist in Abschnitt 5.4 beschrieben.

Besonders kritisch war die Diskrepanz zwischen real und virtuell bei der Eingabemethode **On Hand** in dem Fall, wenn zwar der Zeigefinger der dominanten Hand die nichtdominante Hand bereits berührt, sich die virtuellen Repräsentationen allerdings noch nicht berühren. Das führt dazu, dass der innere *Box Collider* unter Umständen nicht erreicht und die Taste somit nicht ausgelöst werden kann. Um diesem Problem entgegen zu wirken, wurde der Ansatz verfolgt, die Berührung auf einem anderen Weg zu erkennen, um anschließend den nächstgelegenen Button auszulösen. Hierfür kam eine Smartwatch mit Beschleunigungsmesser zum Einsatz, die am Handgelenk der nichtdominanten Hand befestigt wurde. Im ersten Schritt wurden die aufgezeichneten Beschleunigungsdaten bei einem Tippen des anderen Zeigefingers auf der Handfläche analysiert. In Abbildung 5.3 ist der Verlauf der Beschleunigungsdaten aller drei Achsen visualisiert. Die Achsenausrichtung ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

Bei der Analyse und Beobachtung der Hand stellte sich heraus, dass die Bewegung der Hand nach unten, gefolgt von einer anschließenden Rückwärtsbewegung, charakteristisch für die Handberührung ist. Auf Grundlage der in Abbildung 5.5 dargestellten Schwellen (*thresholds*) und Verzögerungen (*delays*) im Werteverlauf, wurde ein Algorithmus entwickelt, der die Handberührung bei der Interaktion mit **On Hand** erkennt (siehe Algorithmus 2). Im Falle eines erkannten Ereignisses, wird dieses über das mit der Smartwatch verbundene Smartphone an die *Unity3D*-Anwendung weitergeleitet. Dort wird nach dem Empfangen des Ereignisses die Taste des Interfaces ausgelöst, innerhalb deren äußeren *Box Collider* sich aktuell die Kugel an der Fingerkuppe des Zeigefingers befindet. Da die implementierte Erkennung allerdings im Falle einer sanften Interaktion nicht zwingend hinreichend für die Berührung ist, wurde diese Logik zusätzlich zum Auslösen der Taste über den inneren *Box Collider* aktiviert. Um ein doppeltes Auslösen der Taste durch den *Box Collider* und zusätzlich die Berührungserkennung zu vermeiden, wurde festgelegt, dass der Button innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls ($d_{trigger}$) nur einmal ausgelöst werden kann.



Abbildung 5.3: Verlauf der Beschleunigungsdaten der Smartwatch am linken Arm beim Tippen mit dem rechten Zeigefinger auf der linken Hand.



Abbildung 5.4: Ausrichtung der Achsen des Beschleunigungsmessers am Arm des Benutzers.

Data: the sensor event including the acceleration data

Result: detects if a touch happened

Variables:

hasShakedIn (flag whether shake-in was detected or not);

isAboveT (flag whether th was reached or not);

isBelowNegT (flag whether $-th$ was reached or not);

startTimeIn (the point in time when th was reached);

startTimeOut (the point in time when $-th$ was reached);

isAboveTin (flag whether th_{in} was reached or not);

isBelowTout (flag whether th_{out} was reached or not);

foreach *incoming sensor event* **do**

 zAccel := the acceleration z-data;

 currentTime := the current time;

if *hasShakedIn* **then**

if $\neg isBelowNegT \text{ AND } zAccel \leq -th$ **then**

 isBelowNegT := true;

 startTimeOut := currentTime;

end

if $isBelowNegT \text{ AND } zAccel \leq th_{out}$ **then**

 isBelowTout := true;

else if $isBelowNegT \text{ AND } zAccel > -th$ **then**

if $isBelowTout \text{ AND } (currentTime - startTimeOut) \leq d_{out}$ **then**
 TOUCH DETECTED;

end

 isBelowNegT := false;

 isBelowTout := false;

 hasShakedIn := false;

end

end

if $\neg isAboveT \text{ AND } zAccel \geq th$ **then**

 hasShakedIn := false;

 isAboveT := true;

 startTimeIn := currentTime;

end

if $isAboveT \text{ AND } zAccel \geq th_{in}$ **then**

 isAboveTin := true;

else if $isAboveT \text{ AND } zAccel < th$ **then**

if $isAboveTin \text{ AND } (currentTime - startTimeIn) \leq d_{in}$ **then**
 hasShakedIn := true;

end

 isAboveT := false;

 isAboveTin := false;

end

end

Algorithmus 2: Algorithmus zum Erkennen des Tippens des Zeigefingers auf der Hand.

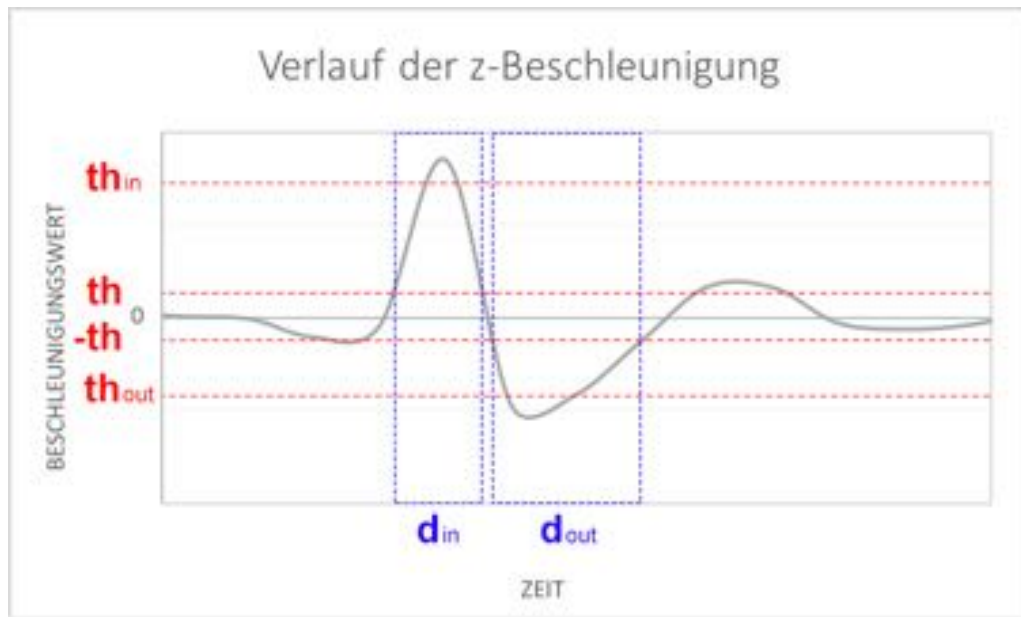


Abbildung 5.5: Charakteristiken in dem Verlauf der z-Beschleunigung.

Nach dem Experimentieren während der Entwicklung und einer informellen Vorstudie mit 3 Teilnehmern ergaben sich für das Experiment der Hauptstudie folgende Variablenzuordnungen:

- $th := 0,1 \text{ (m/s}^2\text{)}$
- $th_{in} := 0,9 \text{ (m/s}^2\text{)}$
- $th_{out} := 0,4 \text{ (m/s}^2\text{)}$
- $d_{in} := 300 \text{ (ms)}$
- $d_{out} := 400 \text{ (ms)}$
- $d_{trigger} := 400 \text{ (ms)}$

Als Hardware wurde eine LG G Watch R eingesetzt, die mit einem Samsung A5 Smartphone verbunden war. Für die Sensorereignisse des Beschleunigungsmessers der Smartwatch wurde eine Abtastperiode von $20\,000 \mu\text{s}$ verwendet.

Für die Erkennung der Handberührung wurde bewusst eine Methode ausgewählt, in der keine touchbasierten Handschuhe oder Folien involviert sind, damit die passive haptische Rückmeldung beim Berühren der Hand möglichst natürlich bleibt.

5.4 Proxy

Für die Eingabemethode **Proxy** wurde das verwendete *Proxy*-Objekt selbst konstruiert. Als Grundlage diente eine hölzerne Staffelei, an der ein *HTC Vive* Controller angebracht wurde (siehe Abbildung 5.6). Die Verwendung des Controllers hatte den Hintergrund, dass das virtuelle Interface so positioniert und ausgerichtet werden musste, dass es sich im Raum genau an der Stelle des *Proxy*-Objekts befindet. Um im Falle eines Verschiebens des *Proxy*-Objekts eine Neupositionierung, beziehungsweise Kalibrierung, zu umgehen, wurde der *HTC Vive* Controller eingesetzt. Dessen Lageinformation wurde dynamisch zur Laufzeit über das *Steam VR Plugin* ausgelesen. Das virtuelle Interface wurde anschließend ausgehend von dieser Lageinformation mit einer bestimmten Positions- und Rotationsverschiebung, die einmalig bestimmt werden musste, angeordnet.

Zum Lösen des **Diskrepanzproblems** und der genauen Synchronisierung der passiven haptischen Rückmeldung mit dem Auslösen einer Taste, wurde als Interaktionsfläche des *Proxy*-Objekts ein Tablet eingesetzt, dessen Berührungseignisse an die *Unity3D*-Anwendung gesendet werden und – äquivalent zu dem Vorgehen bei **On Hand** – im Falle einer Berührung der nächstgelegene Button ausgelöst wird. Im Gegensatz zu der Lösung bei **On Hand** wurde allerdings bei **Proxy** eine Taste ausschließlich auf der Basis

der Berührungseignisse ausgelöst, und die inneren *Box Colliders* deaktiviert, da auch sanfte Berührungen mit dem kapazitiven Touchscreen erkannt wurden. Die an der Staffelei angebrachte Halterung des Tablets wurde selbst modelliert und mit einem 3D-Drucker hergestellt. Als Tablet wurde ein *Asus Nexus 7* eingesetzt. Bei den ersten Tests mit dem *Proxy*-Objekt stellte sich heraus, dass das Hand-Tracking der *Leap Motion* auf Grund der Struktur der Staffelei beeinträchtigt wurde. Daher wurde an der Vorderseite der Staffelei eine Abdeckung angebracht.



Abbildung 5.6: Bild des *Proxy*-Objekts (1 – *HTC Vive* Controller, 2 – Tablet, 3 – Staffelei, 4 – Halterung für Tablet, 5 – Abdeckung für Staffelei)

5.5 Kurzzusammenfassung

Als Kurzzusammenfassung ist in Abbildung 5.7 eine Architekturübersicht der involvierten Hardware- und Softwarebestandteile für die Implementierung der Eingabemethoden und des Experiments dargestellt.

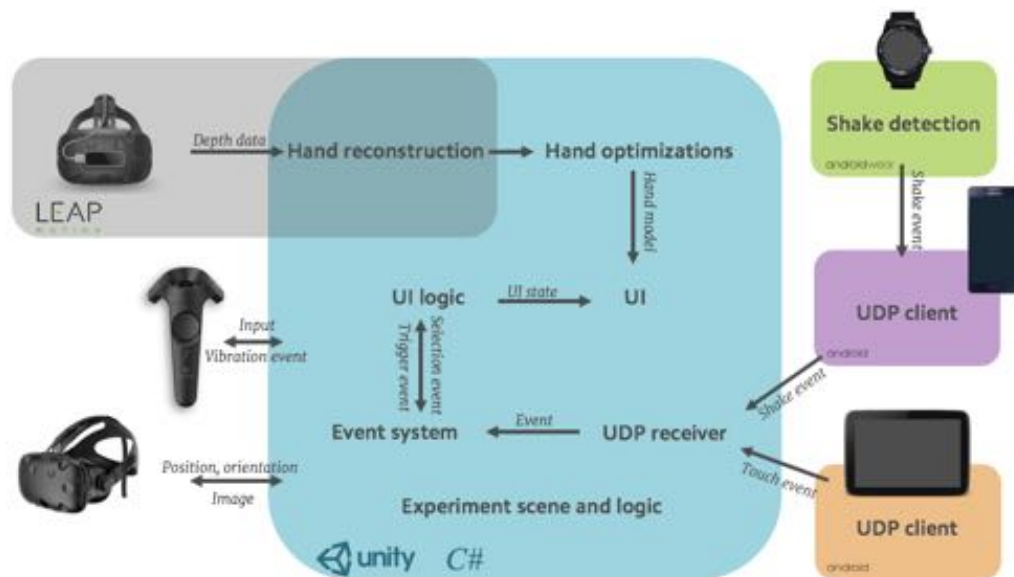


Abbildung 5.7: Architekturübersicht der involvierten Hardware- und Softwarebestandteile.

Kapitel 6

Hauptstudie

Die in Kapitel 4 vorgestellten Eingabemethoden sollen in einer explorativen Studie evaluiert werden. Im Rahmen dieses Kapitels wird das hierfür durchgeführte Experiment im Detail beschrieben. Zunächst werden Hypothesen aufgestellt, die im Rahmen des Experiments überprüft werden sollen. Im Anschluss wird der Aufbau, die Durchführung und das gewählte Design beschrieben.

6.1 Forschungsfragen

Ein Fokus dieser Thesis gilt dem in Kapitel 1 erläuterten Einsatzbereich von VR in der Industrie. Daher stellt die Effizienz der Eingabemethoden einen wesentlichen Faktor dar. Daneben soll der Endnutzer jedoch auch während der Interaktion einen gewissen Grad an Spaß empfinden, weshalb es zu untersuchen gilt, welche Interaktionsmethode von den Benutzern favorisiert wird. Eine weitere Forschungsfrage gilt dem Einfluss unterschiedlicher Typen haptischen Feedbacks. Daneben soll auch untersucht werden, ob die Eingabemethoden und deren Charakteristika Einfluss auf die Immersion des VR-Erlebnisses haben. Im Rahmen des Experiments sollen folgende Hypothesen untersucht werden:

- **H2.1:** Die Interaktion bei **Proxy** wird auf Grund der Vertrautheit der einseitigen natürlichen Haptik und der äquivalenten analogen Eingabemethode im Alltag als sehr natürlich wahrgenommen.
- **H2.2:** Die Interaktion bei **Head-Gaze** wird als unnatürlich wahrgenommen.
- **H2.3:** Die Immersion ist bei den Eingabemethoden **In Air**, **In Air on Controller**, **Proxy** und **On Hand** auf Grund der visuellen Wahrnehmung der eigenen Arme stärker als bei **Controller** und **Head-Gaze** [68].

- **H2.4:** Die Rückmeldung bei **Proxy** ist auf Grund der natürlichen Haptik zufriedenstellender als bei **In Air**.
- **H2.5:** Die Rückmeldung bei **On Hand** ist auf Grund der zweiseitigen Haptik zufriedenstellender als bei **Proxy**.
- **H2.6:** Die Eingabemethoden, deren Interaktion beide Hände benötigen, sind anstrengender als die übrigen.
- **H2.7:** Alle Eingabemethoden erreichen einen guten System Usability Scale (SUS)-Score von mindestens 71,4 Punkten [69].
- **H2.8:** Bei **Controller** verwenden die Benutzer primär eine der beiden Interaktionsmöglichkeiten.

6.2 Aufbau

Abbildung 6.1 zeigt ein Bild des Aufbaus. Das Experiment wurde auf einer dafür abgegrenzten Fläche in einem Freiraum durchgeführt. Für die Verwendung der Eingabemethode **Proxy** stand ein Pult bereit, auf dem das Proxy-Objekt befestigt war und das bei Gebrauch in den Interaktionsbereich des Teilnehmers geschoben wurde. Die beiden *Lighthouses* waren an einer Säule und an einem Stativ befestigt und auf den Bewegungsbereichs gerichtet. An einem nebenstehenden PC wurden die Teilnehmer und deren Sichtfelder während des Experiments beobachtet (siehe Abbildung 6.2). Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Hardware ist in Kapitel 5 zu finden.

6.3 Ablauf

Nach der Begrüßung des Teilnehmers wurde er über den Aufbau und den Verlauf des Experiments aufgeklärt. Mögliche Fragen des Teilnehmers wurden direkt vom Experimentator beantwortet. Die Kommunikation verlief ausschließlich in der Muttersprache des Teilnehmers. Falls der Teilnehmer noch keine Erfahrung mit der *HTC Vive* und den involvierten Controllern hatte, wurde ihm ein Controller in die Hand gegeben und gezeigt, wie dieser zu halten ist. Anschließend wurde der Teilnehmer in die Mitte des Interaktionsbereichs geführt und ihm dort die notwendige Hardware angezogen. Dazu gehörte das *HTC Vive* HMD, ein Kopfhörer und die für **On Hand** benötigte Smartwatch. Nach einer gegebenenfalls notwendigen Anpassung des Linsenabstands des HMD an seinen Augenabstand, wurde er darum gebeten, einen natürlichen Stand einzunehmen und seinen Blick geradeaus zu richten, bevor die VR-Anwendung gestartet wurde. Dies war notwendig, da beim Start der Anwendung die Höhe der Augen des Teilnehmers bestimmt wurde, die im Verlauf des Experiments verwendet wurde, um die Interface-Elemente auszurichten. Dies stellte vergleichbare Bedingungen für alle Teilnehmer sicher.



Abbildung 6.1: Bild des Aufbaus des Experiments während ein Teilnehmer mit **In Air** interagiert.



Abbildung 6.2: Bild einer Teilnehmerin während der Eingabe mit **On Hand**. Im Hintergrund ist zu sehen, wie sie während des Experiments beaufsichtigt wurde.

Nach dem Start der Anwendung befand der Teilnehmer sich im Zentrum einer virtuellen Produktionshalle. Ein Überblick über die Szene ist in Abbildung 6.3 zu sehen. Er wurde darauf hingewiesen, dass er sich zunächst in der Halle umschauchen und sich innerhalb seines Interaktionsbereichs bewegen dürfte. Hierfür wurde er instruiert, sich den Grenzen des Bereichs anzunähern, sodass die virtuellen Begrenzungsränder des Bereichs erscheinen. Ihm wurde zugesichert, dass er sich innerhalb diesen Bereichs bewegen könne, ohne dass er gegen reale Gegenstände laufen und sich dadurch verletzen könnte. Anschließend wurde sein Augenmerk auf die Produktionsstraße gelenkt. Diese bestand aus 6 Stationen, die durch Markierungen auf dem Boden gekennzeichnet waren. Ihm wurde erklärt, dass er an allen 6 Stationen mit unterschiedlichen Eingabemethoden numerische Eingaben zu tätigen habe. Er solle somit im Experiment die Rolle eines Maschinenbedieners einnehmen und alle 6 Produktionsstationen durch die Eingaben konfigurieren. Über alle Stationen hinweg werde er ein Werkstück bis zur Fertigstellung begleiten. Die einzugebende Zahlen würden auf der Segmentanzeige an der jeweiligen Station vor ihm angezeigt werden (siehe Abbildung 6.4), und seine Aufgabe sei es, die gleichen Werte möglichst akkurat aber auch so schnell wie möglich einzugeben und anschließend zu bestätigen. Nachdem er alle Eingaben an einer Station getätigt hätte, würde sich die Farbe der Stationsleuchte von rot auf grün ändern und es würde ein von der Station abhängiger Produktionsschritt erfolgen. Nach dem Abschluss der Konfigurierung einer Station solle er nicht versuchen, zur nächsten Station zu laufen, sondern werde vom Experimentator zum richtigen Zeitpunkt dorthin portiert. Nach jeder Station würde es jedoch vorher noch seine Aufgabe sein, Fragen zu der letzten Eingabemethode zu beantworten, wozu er jedoch nach Abschluss der ersten Station weitere Instruktionen bekäme. Zuletzt wurde er darauf hingewiesen, dass es an jeder Station zu Beginn eine Testphase gebe, in der ihm die Bedienung erklärt werde und er Zeit habe, sich mit der Eingabemethode vertraut zu machen. Sobald der Teilnehmer bereit wäre, würde der Experimentator die Phase der Eingabeaufgaben starten.

Nachdem der Teilnehmer bestätigt hatte, den Ablauf des Experiments verstanden zu haben, wurde er darauf hingewiesen, dass er zwischen den Stationen optional eine Pause nehmen könne, falls ihn das Experiment zu sehr anstrengen. Anschließend wurde er zur ersten Station portiert. Abhängig von der an einer Station zu verwendenden Eingabemethode, hatte der Experimentator die Aufgabe, dem Teilnehmer die dafür notwendige Hardware zu geben oder zu konfigurieren, beziehungsweise vorherige abzunehmen. Dies galt für den Controller der *HTC Vive*, den Proxy-Objekt und den Starten der App auf der Smartwatch.

Wie bereits angesprochen, sollte der Teilnehmer nach jeder Station Fragen beantworten, die dazu dienen, die in Abschnitt 6.1 beschriebenen Forschungsfragen zu klären. Bei allen Fragen war eine Bewertung auf einer Likert-Skala abzugeben. Die Fragen wurden in VR auf einem Canvas dargestellt und der skalare Wert mit Hilfe der aktuellen Eingabemethode eingegeben (siehe Abbildung 6.5). Der Teilnehmer wurde darauf hingewiesen, dass sich die Fragen ausschließlich auf die aktuelle Eingabemethode, beziehungsweise auf den vergangenen

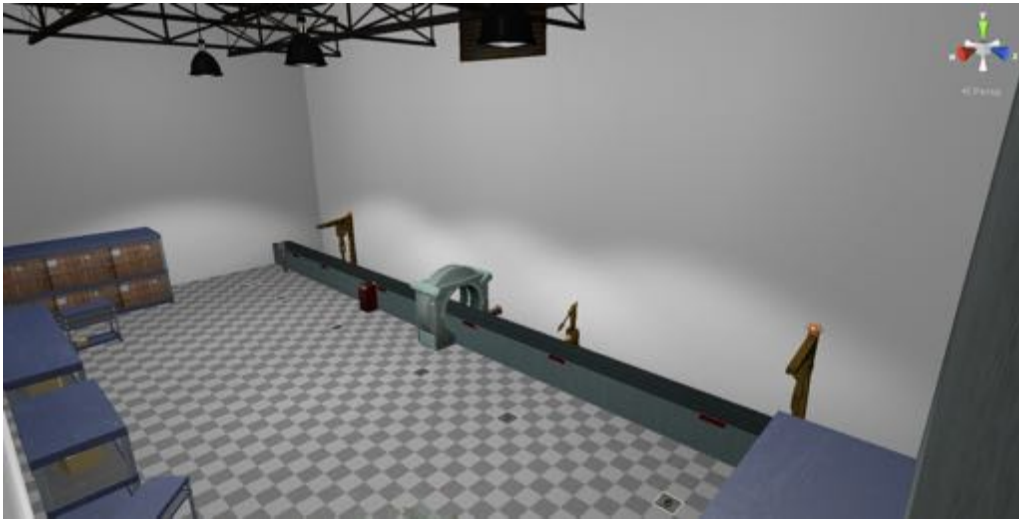


Abbildung 6.3: Selbst konstruierte *Unity3D*-Szene, die als industrielle Umgebung für die Hauptstudie diente.

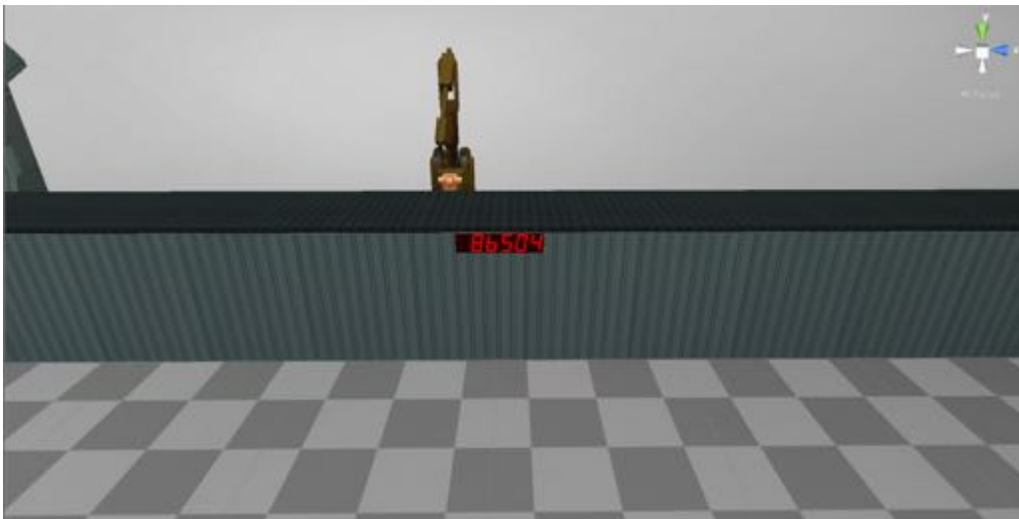


Abbildung 6.4: Segmentanzeige an der fünften Station der Szene.

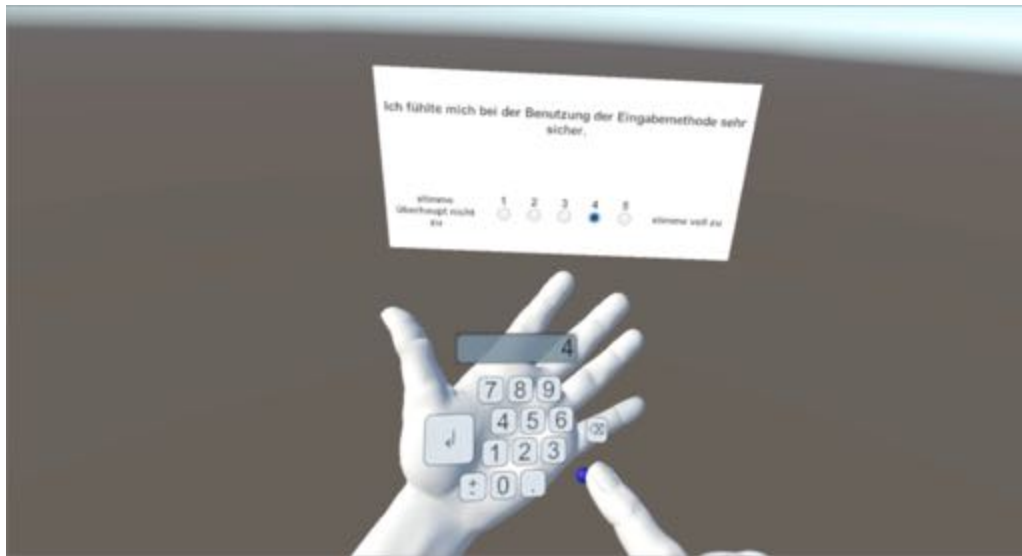


Abbildung 6.5: Teilnehmer beim Beantworten einer Bewertungsfrage auf Likert-Skala mit der Eingabemethode **On Hand**.

Eingabezeitraum an der aktuellen Station beziehen. Da der Teilnehmer rückwirkend das Immersionsgefühl beantworten sollte, wurde er zum Beantworten aller Fragen aus der industriellen Halle in eine neutrale Umgebung portiert. Die gestellten Fragen sind in einem Fragekatalog in Anhang A zusammengefasst. Nach deren Beantwortung wurde der Teilnehmer zurück in die Produktionshalle zur nächsten Station portiert.

Nachdem die Aufgaben und Fragen an allen 6 Stationen erfolgreich bearbeitet wurden, nahm der Experimentator dem Teilnehmer den Kopfhörer und anschließend das *HTC Vive* HMD ab. Im Anschluss wurde ihm ein abschließender Fragebogen gegeben. Hierin enthalten waren Fragen zur Ermittlung des Hintergrunds des Teilnehmers und zu seiner persönlichen Rangliste der Eingabemethoden. Nach dem erfolgreichen Ausfüllen wurde der Teilnehmer endgültig aus dem Experiment entlassen.

6.4 Design

Das Design des Experiments war ein *Within-Subject Design*. Die unabhängige Variable war die Eingabemethode:

- **In Air**
- **In Air on Controller**
- **Proxy**
- **On Hand**

- **Controller**
- **Head-Gaze**

Die abhängigen Variablen waren:

- gemessene Eingabezeit und Interaktionszeit
- gemessene Erfolgsrate
- gemessene Anzahl an Korrekturen
- SUS-Score (für **H2.7**)
- persönliche Rangordnung
- Bewertung des Spaßes
- Bewertung der Anstrengung (für **H2.6**)
- Bewertung der Zufriedenheit der Gesamtrückmeldung (für **H2.4** und **H2.5**)
- Bewertung der Immersion (für **H2.3**)
- Bewertung der Natürlichkeit (für **H2.1** und **H2.2**)

Darüber hinaus wurde als zusätzliche Messung zur Überprüfung von **H2.8** aufgezeichnet, wie oft bei **Controller** durch den Trigger-Button und wie oft durch das Touchpad die Tasten des Interfaces ausgelöst wurden.

An jeder Station waren 12 unterschiedliche Eingabeaufgaben zu tätigen. Dabei war die Anordnung der Aufgaben sowohl zwischen als auch innerhalb der Stationen fixiert, sodass alle Teilnehmer an jeder Station mit dem gleichen Aufgabensatz, der die Aufgaben in gleicher Reihenfolge beinhaltete, konfrontiert wurden. In allen Durchgängen wurden die Stationen in der gleichen Reihenfolge (1 bis 6) abgearbeitet. Die Reihenfolge der Eingabemethoden wurde mittels *Latin Square*-Design ermittelt, sodass schlussendlich jeder Aufgabensatz über die Teilnehmer hinweg in ausgeglichener Weise mit allen Eingabemethoden absolviert wurde. Eine Übersicht der Eingabeaufgaben ist in Tabelle 6.1 zu finden.

Unter den 12 Zahlen pro Station waren 4 positive Ganzzahlen, 4 negative Ganzzahlen und 4 Fließkommazahlen. Die Länge der Zahlen wurde so bestimmt, dass im optimalen Fall – ohne falsches Betätigen einer Taste – pro Eingabeaufgabe inklusive dem Bestätigen 6 Tasten auszulösen waren. Das bedeutet, dass die positiven Ganzzahlen aus 5 Ziffernstellen, die negativen Ganzzahlen und positiven Fließkommazahlen aus 4 Ziffernstellen bestanden. Alle Eingabeaufgaben wurden mit einem nichtdeterministischen Zufallsgenerator¹⁵ erzeugt. Die Position des Gleitpunkts wurde ebenfalls randomisiert festgelegt und variierte zwischen der

¹⁵<https://www.random.org>

Station 1	Station 2	Station 3	Station 4	Station 5	Station 6
367.2	68.18	29511	-8289	86504	413.8
55504	-7954	28.18	52520	49.92	58809
-1938	-6418	48.31	-6546	-2543	-6798
16717	448.6	-5502	98313	36656	23.16
59634	39787	80655	4.449	12.79	-2575
-4655	-5371	72270	-7821	4.275	16.02
-5292	77751	76.43	71172	-1784	48354
5.418	25776	-7584	17303	36292	37301
18.98	-8256	-9633	-1293	-6199	-1357
57173	52265	-9380	731.4	-7199	-9079
367.2	50.27	788.9	3.467	793.2	8.517
-4998	404.1	24868	32.89	82544	16090

Tabelle 6.1: Eingabeaufgaben der Hauptstudie bestehend aus 12 unterschiedlichen Aufgaben pro Station, davon jeweils vier 5-stellige Ganzzahlen, vier 4-stellige negativen Ganzzahlen und vier 4-stellige Fließkommazahlen. Die Aufgaben wurden in der Reihenfolge von oben nach unten gestellt.

zweiten und vierten Stelle. Damit der Teilnehmer sich nicht auf die bestimmte Kategorie der Zahl, zum Beispiel negative Ganzzahl, einstellen kann, wurden darüber hinaus auch die Zahlen aus den jeweiligen Kategorien innerhalb eines Aufgabensatzes zufällig verteilt.

Die Teilnahme an dem Experiment wurde auf Rechtshänder mit Normalsichtigkeit, die entweder von Natur aus besteht oder durch Sehhilfe dahingehend korrigiert wurde, limitiert.

Kapitel 7

Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Kapitel 6 beschriebenen Hauptstudie vorgestellt. Neben den Statistiken werden auch die Ergebnisse statistischer Signifikanztests berichtet. Im ersten Abschnitt sind die deskriptiven Statistiken über die Teilnehmer und deren Hintergrund dargestellt. Anschließend werden objektive Messdaten in Bezug auf die Leistung und Effizienz vorgestellt, gefolgt von den subjektiven Teilnehmerbewertungen bezogen auf die Usability und andere Charakteristika der Interaktion. Gegen Ende des Kapitels werden außerdem Beobachtungen und subjektive Rückmeldungen berichtet.

7.1 Teilnehmer

An der Studie nahmen insgesamt 24 Personen freiwillig teil, wobei ein Teilnehmer auf Grund technischer Probleme aus der Wertung genommen wurde. Die folgenden Ergebnisse beruhen also auf den übrigen 23 Teilnehmern. Unter diesen waren 5 Frauen und 18 Männer mit einem durchschnittlichen Alter von 28 Jahren. Alle Teilnehmer gaben an, entweder nicht unter Sehschwäche zu leiden oder diese durch Brille oder Kontaktlinsen auf Normalsichtigkeit korrigiert zu haben. Im letzteren Fall wurde die Studie ausschließlich mit der Sehhilfe durchgeführt. Alle Teilnehmer waren Rechtshänder, der Fall einer gleichmäßig ausgeprägten Händigkeit kam nicht vor. Keiner der Teilnehmer beanspruchte eine optionale Pause zwischen den Produktionsstationen.

Die Teilnehmer schätzten auf einer Skala von 1 = „keine Erfahrung“ bis 5 = „viel Erfahrung“ ein, wie viel Erfahrung sie bereits mit VR-Technologien gemacht hatten. Das Ergebnis ($M = 2,57$, $SD = 1,2$) zeigt, dass die Teilnehmer durchschnittliche und ausgeglichene Vorkenntnisse mitbrachten. 4 der 23 Teilnehmer gaben



Abbildung 7.1: Häufigkeit der Eingabe numerischer Werte im Alltag oder Beruf in den Kategorien „oft“, „gelegentlich“, „selten“ und „nie“.

an, noch nie eine VR-Technologie verwendet zu haben, und nur 1 Teilnehmer brachte „viel Erfahrung“ mit.

Abbildung 7.1 demonstriert die Verteilung, wie oft die Teilnehmer Zahlen im Alltag oder Beruf eingeben. Das Ergebnis zeigt, dass alle Teilnehmer Zahlen eingeben (0 % „nie“), wovon die Mehrheit (56,52 %) „oft“ numerische Eingaben tätigt. 84,62 % derjenigen, die „oft“ Zahlen eingeben, nutzen hierfür am häufigsten den Ziffernblock einer analogen Tastatur und alle, die dies „gelegentlich“ tun, verwenden am häufigsten die Ziffernreihe einer analogen Tastatur.

7.2 Leistung und Effizienz

Im Folgenden werden Statistiken vorgestellt, die Aussagen über die Leistung und Effizienz der jeweiligen Eingabemethode erlauben. Hierfür wurden die Zeitdauer, die notwendig war, um die Eingaben zu tätigen, eine Erfolgsrate und die Anzahl, wie oft die Korrekturtaste verwendet wurde, analysiert. Die zugrundeliegenden Daten wurden im Zeitraum der Eingabeaufgaben aufgezeichnet, die Testphase wurde somit nicht beachtet.

7.2.1 Eingabezeit

Unter der Eingabezeit wird die Zeitspanne zwischen dem Erscheinen der einzugebenden Zahl auf dem Stationsdisplay bis zum Bestätigen der Eingabe verstanden.

Eingabemethode	Min	Max	M	SD
In Air	4,3	9,17	5,86	1,14
In Air on Controller	4,84	8,83	6,62	1,12
Proxy	4,32	10,5	7,2	1,7
On Hand	5,85	30,02	13,46	6,55
Controller	3,55	7,89	5,73	1,21
Head-Gaze	4,23	7,73	6,07	0,94

Tabelle 7.1: Deskriptive Statistiken über die durchschnittliche Eingabezeit pro Eingabeaufgabe in Sekunden.

Alle Eingabeaufgaben beinhalten – inklusive der Bestätigung – im optimalen Fall sechs Tastenanschläge (ohne Korrigieren einer falschen Ziffer, Dezimalpunkts oder Vorzeichens).

In Tabelle 7.1 sind die deskriptiven Statistiken der Eingabemethoden zusammengefasst. Die schnellste Eingabezeit von 3,55 sec wurde mit dem **Controller** erzielt, die längste von 30,02 sec mit **On Hand**. Diese Ergebnisse spiegeln sich auch in den Durchschnittszeiten wider. Der schnellste Durchschnitt ($M = 5,73$, $SD = 1,21$) ist bei **Controller**, der längste ($M = 13,46$, $SD = 6,55$) bei **On Hand** festzustellen. Hier sticht **On Hand** aus den übrigen Eingabemethoden mit einer deutlich längeren Eingabezeit heraus. Auffällig ist auch die große Spannweite von 24,17 sec bei **On Hand**. Abbildung 7.2 zeigt die Häufigkeitsverteilung der durchschnittlichen Eingabezeit bei **On Hand**. Hier ist zu erkennen, dass die durchschnittliche Eingabezeit von drei Teilnehmern sich deutlich von den anderen Zeiten absetzt und im Vergleich zum Gesamtdurchschnitt ($M = 13,46$, $SD = 6,55$) doppelt so lang ist. Zwischen den übrigen Eingabemethoden bestehen nur marginale Unterschiede, hierbei ist die größte Differenz in den Durchschnittszeiten von 1,47 sec zwischen **Controller** und **Proxy** festzustellen. In Abbildung 7.3 sind die Unterschiede in den Durchschnittszeiten der Eingabemethoden mit 95 % Konfidenzintervallen in einem Säulendiagramm dargestellt.

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 59,845$, $p < 0,001$, $N = 23$) zeigt, dass es einen signifikanten Unterschied in den Durchschnittszeiten zwischen den Eingabemethoden gibt. Die Post-hoc-Analyse (Dunn-Bonferroni-Tests) ergab, dass sich **On Hand** signifikant von den übrigen Eingabemethoden und **Proxy** von **Controller** unterscheiden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.2 dargestellt. Somit ist **On Hand** signifikant die langsamste Eingabemethode und **Controller** signifikant schneller als **Proxy**. Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen keine Signifikanz auf.

Abbildung 7.4 zeigt den Verlauf der durchschnittlichen Eingabezeit pro Eingabeaufgabe über alle 12 Eingabeaufgaben hinweg. Hier ist zu erkennen, dass für die ersten drei Eingaben mehr Zeit benötigt wurde als für die restlichen neun. Somit ist trotz vorheriger Testphase ein Lerneffekt über den Zeitraum der Eingabeaufgaben zu erkennen.



Abbildung 7.2: Histogramm über die durchschnittliche Eingabezeit bei der Eingabemethode **On Hand**.

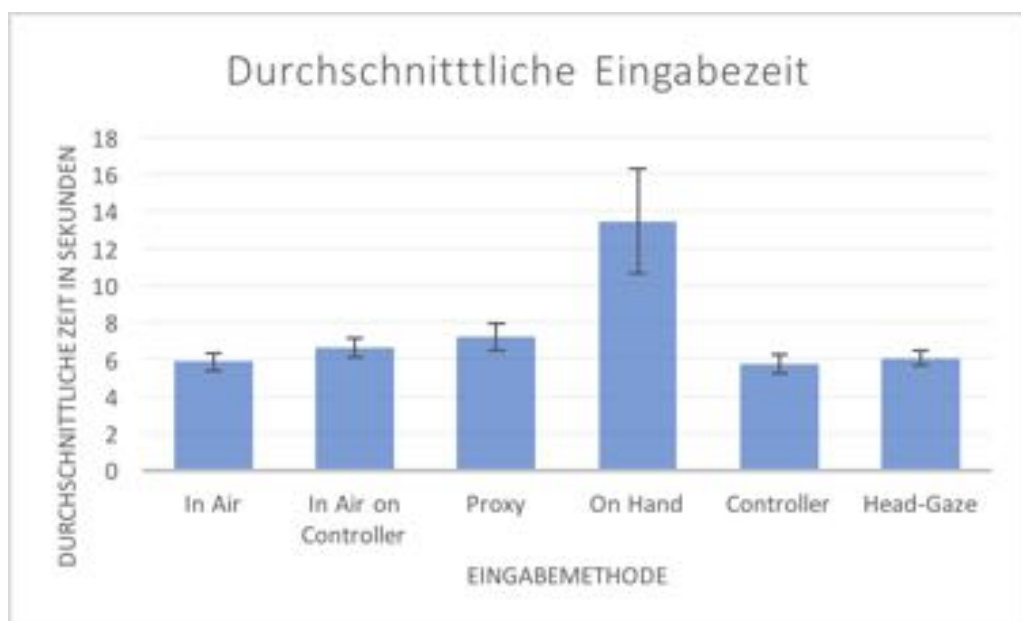


Abbildung 7.3: Durchschnittliche Eingabezeit pro Eingabeaufgabe mit 95 % Konfidenzintervallen.

Zwischen den Eingabemethoden		z	$p_{\text{koriigiert}}$
On Hand	In Air	6,068	< 0,001
	In Air on Controller	4,335	< 0,001
	Proxy	3,468	= 0,008
	Controller	6,699	< 0,001
	Head-Gaze	5,674	< 0,001
Proxy	Controller	-3,231	= 0,018

Tabelle 7.2: Signifikant ausgefallene Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für die durchschnittliche Eingabezeit pro Eingabeaufgabe. Für alle Tests gilt $N = 23$, $\alpha = 0,05$.

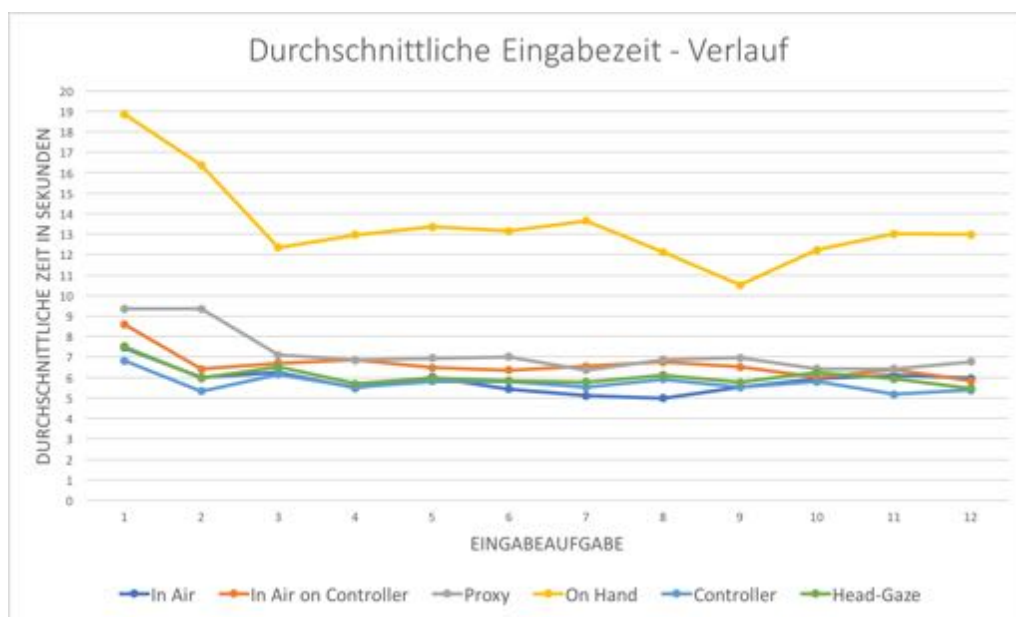


Abbildung 7.4: Verlauf der durchschnittlichen Eingabezeit pro Eingabeaufgabe über alle 12 Eingabeaufgaben hinweg.

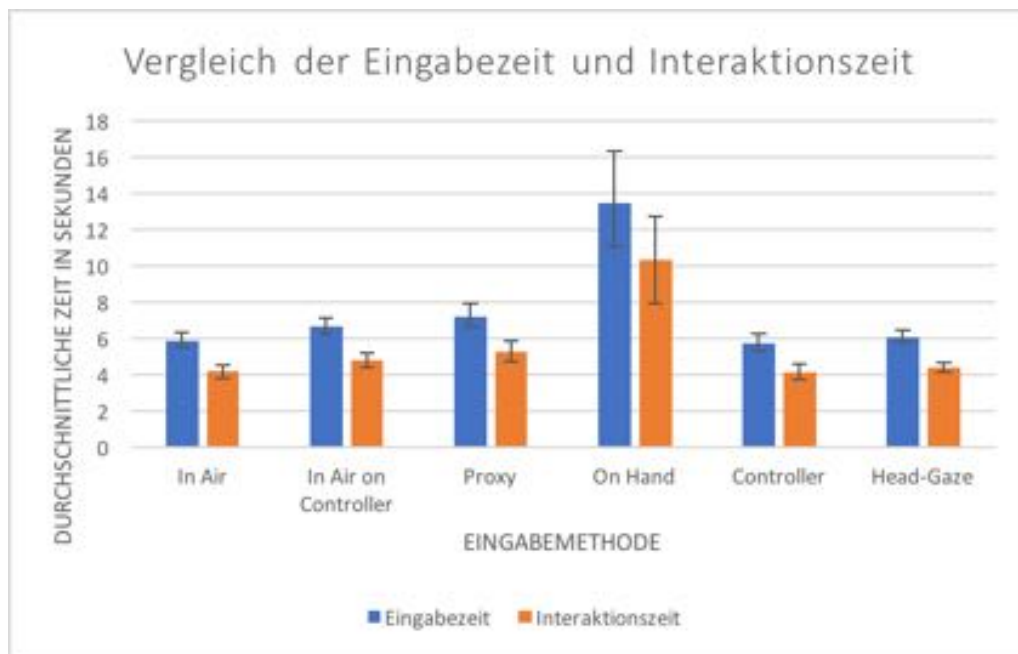


Abbildung 7.5: Vergleich der durchschnittlichen Eingabezeit und der durchschnittlichen Interaktionszeit pro Eingabeaufgabe mit 95 % Konfidenzintervallen.

7.2.2 Interaktionszeit

Zusätzlich zur Eingabezeit, welche auch die Reaktionszeit und die Merkzeit nach dem Erscheinen der Zahl beinhaltet, wurde ebenfalls die Zeitspanne zwischen dem Auslösen der ersten Taste und dem Auslösen der Bestätigungstaste gemessen. Diese Zeitspanne wird im Folgenden als Interaktionszeit bezeichnet.

Der direkte Vergleich der Ergebnisse der Interaktionszeit mit denen der Eingabezeit (siehe Abbildung 7.5) zeigt, dass zwischen den Eingabemethoden in beiden Zeitspannen ähnliche Unterschiede bestehen. Auch die Signifikanztests der Interaktionszeiten ergeben die gleichen Signifikanzen, die bereits bei der Eingabezeit (siehe Tabelle 7.2) beobachtet wurden. Die Differenzen zwischen der Eingabezeit und der Interaktionszeit (siehe Tabelle 7.3) sind für alle Eingabemethoden, bis auf **On Hand**, in etwa gleich ausgefallen. Hier ist allerdings zu beachten, dass in der gemessenen Interaktionszeit nicht die Interaktionszeit zum Auslösen der ersten Taste berücksichtigt ist.

7.2.3 Erfolgsrate

Bei der Bewertung der Korrektheit einer Eingabe wurde eine binäre Entscheidung festgelegt. Eine Eingabe gilt somit als korrekt, wenn die tatsächlich eingegebene Zahl exakt mit der einzugebenden Zahl übereinstimmt, andernfalls als falsch.

Eingabemethode	Min	Max	M	SD	Diff zur Eingabezeit
In Air	2,93	6,63	4,18	0,85	1,67
In Air on Controller	3,48	7,22	4,78	0,88	1,84
Proxy	3,27	8,19	5,27	1,27	1,92
On Hand	4,76	23,4	8,52	5,52	3,16
Controller	2,44	6,39	3,97	0,99	1,59
Head-Gaze	3,21	5,713	4,38	0,65	1,69

Tabelle 7.3: Deskriptive Statistiken über die durchschnittliche Interaktionszeit pro Eingabeaufgabe und der Differenz zu der Eingabezeit in Sekunden.

Eingabemethode	#Fehler (insgesamt)	Erfolgsrate		
		Min	M	SD
In Air	9	83,33 %	96,74 %	5,47 %
In Air on Controller	2	91,67 %	99,28 %	2,4 %
Proxy	6	91,67 %	97,83 %	3,74 %
On Hand	2	91,67 %	99,28 %	2,4 %
Controller	3	91,67 %	98,91 %	2,87 %
Head-Gaze	4	83,33 %	98,55 %	4,09 %

Tabelle 7.4: Deskriptive Statistiken über die Summe der Fehler aller Teilnehmer und die Erfolgsrate.

Die Erfolgsrate ergibt sich aus dem Anteil der korrekten Eingaben von allen 12 zu tätigen Eingaben.

Die meisten Fehler waren bei **In Air** zu beobachten (9 insgesamt), die wenigsten bei **In Air on Controller** und **On Hand** (jeweils 2 insgesamt). Die geringste Erfolgsrate aller Eingabemethoden von 83,33 % wurde bei **In Air** und **Head-Gaze** erreicht, dies entspricht 2 falschen Eingaben bei den 12 einzugebenden Zahlen. Die Durchschnittserfolgsrate von **In Air** (M = 96,74 %, SD = 5,47 %) ist ebenfalls die schlechteste, die Raten von **In Air on Controller** (M = 99,28 %, SD = 2,4 %) und **On Hand** (M = 99,28 %, SD = 2,4 %) sind die besten. Mit einer Differenz von 2,54 % zwischen der besten und niedrigsten Durchschnittserfolgsrate unterscheiden sich die Eingabemethoden allerdings nur geringfügig. Die Ergebnisse aller Eingabemethoden sind in Tabelle 7.4 zusammengefasst.

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 8,368$, $p = 0,134$, $N = 23$) zeigt, dass es keinen signifikanten Unterschied in der Erfolgsrate zwischen den Eingabemethoden gibt.

7.2.4 Korrekturen

Um zu erkennen, wie oft versehentlich falsche Buttons ausgelöst wurden, wurde auch die Betätigung der Korrekturtaste hinsichtlich der Häufigkeit ausgewertet.

Eingabemethode	Max pro Eingabe	M (Summe)	SD (Summe)
In Air	2	1,17	2,125
In Air on Controller	5	1,52	2,333
Proxy	5	1,35	1,849
On Hand	4	4,43	5,106
Controller	3	0,83	1,114
Head-Gaze	2	0,61	0,941

Tabelle 7.5: Deskriptive Statistiken über die höchste Anzahl an Korrekturen bei einer einzelnen Eingabeaufgabe und der Summe von allen 12 Eingaben.

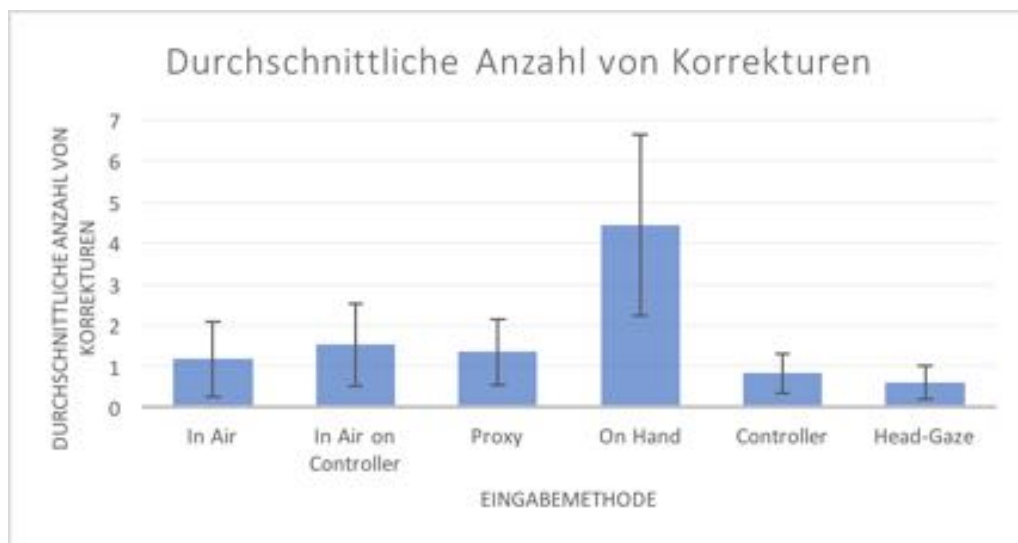


Abbildung 7.6: Durchschnittliche Anzahl von Korrekturen über alle 12 Eingaben mit 95 % Konfidenzintervallen.

Bei **In Air on Controller** und **Proxy** wurde bei einer von allen getätigten Eingaben mit 5 Korrekturen die höchste Anzahl festgestellt, bei **In Air** und **Head-Gaze** mit 2 Korrekturen die niedrigste. Die durchschnittliche Summe über alle 12 Eingaben zeigt, dass bei **Head-Gaze** ($M = 0,61$, $SD = 0,941$) die wenigsten Korrekturen gemacht wurden. Ebenfalls einen Durchschnittswert kleiner als 1 erreichte **Controller** mit ($M = 0,83$, $SD = 1,114$). **On Hand** sticht mit dem größten Wert ($M = 4,43$, $SD = 5,106$) aus den Eingabemethoden heraus. Generell ist festzustellen, dass bis auf **On Hand** wenig Korrekturen notwendig waren. Die deskriptiven Statistiken aller Eingabemethoden sind in Tabelle 7.5 zusammengefasst. In Abbildung 7.6 ist die Anzahl der durchschnittlichen Korrekturen pro Eingabemethode über alle 12 Eingaben dargestellt.

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 20,272$, $p = 0,001$, $N = 23$) zeigt, dass es einen signifikanten Unterschied in der Summe der Anzahl von Korrekturen zwischen den Eingabemethoden gibt. Die Post-hoc-Analyse (Dunn-Bonferroni-

Zwischen den Eingabemethoden		z	p _{korrigiert}
On Hand	In Air	3,113	= 0,028
	Controller	3,074	= 0,032
	Head-Gaze	3,468	= 0,008

Tabelle 7.6: Signifikant ausgefallene Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für die durchschnittliche Summe von Korrekturen. Für alle Tests gilt $N = 23$, $\alpha = 0,05$.

Tests) ergab, dass bei **On Hand** signifikant mehr Korrekturen getätigt wurden als bei den Eingabemethoden **In Air**, **Controller** und **Head-Gaze**. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.6 dargestellt. Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen keine Signifikanz auf.

7.3 Teilnehmerbewertungen

Im Folgenden werden die Ergebnisse der subjektiven Teilnehmerbewertungen betrachtet. Die Ergebnisse basieren auf den Fragen betreffend der Usability und anderer Charakteristika der Interaktion. Diese wurden während des Experiments von den Teilnehmern auf der jeweiligen Skala beantwortet. Weiterhin wurden die persönlichen Rangordnungen, welche die Teilnehmer nach dem Experiment aufgestellt hatten, ausgewertet.

7.3.1 Persönliche Rangordnung

Die Teilnehmer sollten nach dem Experiment den möglichen Rängen 1 bis 6 jeweils eine Eingabemethode zuweisen. Dabei repräsentiert der 1. Rang die Eingabemethode, die dem Teilnehmer am besten gefiel, und der 6. Rang die Eingabemethode, die dem Teilnehmer am wenigsten zusagte.

Abbildung 7.7 zeigt die Verteilung der Eingabemethoden aller Teilnehmer auf die jeweiligen persönlichen Ränge. Auffällig ist, dass die Aufteilungen relativ zerstreut sind und die Teilnehmer somit individuell unterschiedliche Präferenzen zeigten. Auf den 1. Rang wurde am häufigsten **Controller** platziert, somit sehen 8 der 23 Teilnehmer diese Eingabemethode als ihren persönlichen Favoriten. Auf dem 2. Rang landete mit 9 Vorkommen die Eingabemethode **Proxy** am häufigsten. Am schlechtesten schnitt **On Hand** mit den häufigsten Zuweisungen auf den 6. Rang und der zweithäufigsten Nennung auf dem 5. Rang ab.

Zur Auswertung der Rangordnung wurden Punkte für die jeweiligen Ränge vergeben. Hierbei wurde eine lineare Gewichtung der Ränge gewählt. Das Vorkommen einer Eingabemethode auf dem 1. Rang erbrachte dieser 5 Punkte, auf dem 2. Rang 4 Punkte, auf dem 3. Rang 3 Punkte, auf dem 4. Rang 2 Punkte, auf dem 5. Rang 1 Punkt und bei Vorkommen auf dem 6. Rang wurde kein Punkt

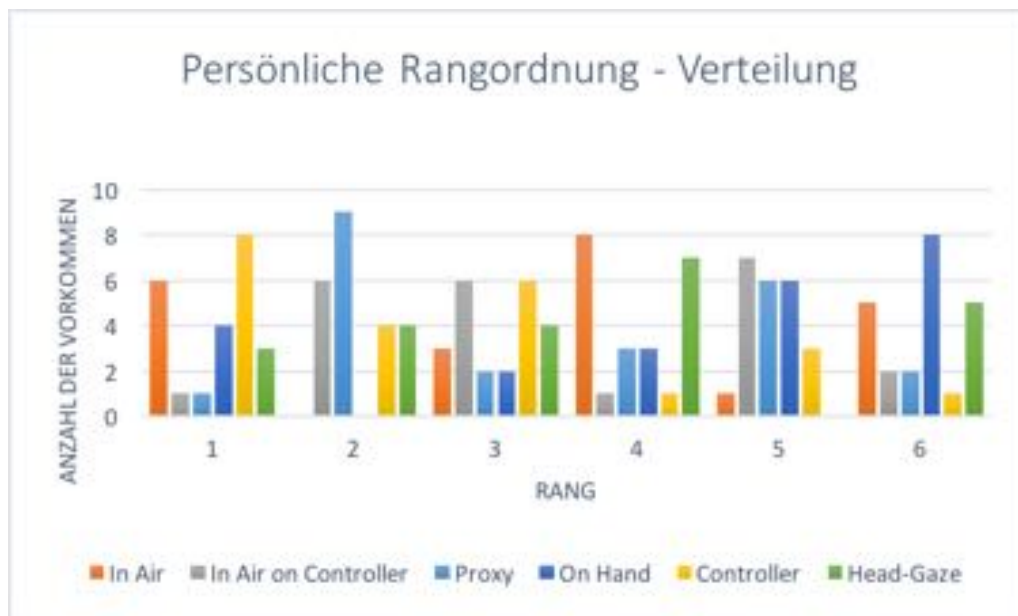


Abbildung 7.7: Verteilung der Eingabemethoden auf die jeweiligen persönlichen Ränge (1-6).

vergeben. Durch Summieren aller Punkte einer Eingabemethode wurde eine Gesamtpunktzahl gebildet. Somit ergibt sich bei 23 Teilnehmern die maximale Anzahl von 115 Punkten, die von einer Eingabemethode erreicht werden konnte, falls diese von allen auf den 1. Rang platziert worden wäre.

Die Ergebnisse aller Eingabemethoden sind in einem Säulendiagramm in Abbildung 7.8 gegenübergestellt. Die höchste Punktzahl erreichte **Controller** mit 79 Punkten, die niedrigste **On Hand** mit 38 Gesamtpunkten. Zwischen den übrigen Eingabemethoden ist mit einer Differenz von bis zu 3 Punkten kein wesentlicher Unterschied zu erkennen.

7.3.2 SUS-Score

Für die Untersuchung der Eingabemethoden auf die Usability, wurde mit dem System Usability Scale (SUS) [70] auf ein standardisiertes Verfahren zurückgegriffen. Da alle Teilnehmer Deutschmuttersprachler waren, wurde eine ins Deutsche übersetzte Version des Fragekatalogs [71] verwendet. Durch die Auswertung der Antworten ergibt sich eine Punktzahl, der sogenannte SUS-Score.

In Tabelle 7.7 sind die deskriptiven Ergebnisse der Eingabemethoden zusammengefasst. Bis auf **On Hand** und **In Air on Controller** erreichten alle Eingabemethoden mindestens von einem Teilnehmer die maximale Punktzahl (100 Punkte). **On Hand** erreichte im Durchschnitt ($M = 53,8$, $SD = 18,2$) den geringsten Score, **In Air** den höchsten ($M = 85$, $SD = 13,44$). Auffällig ist an dieser Stelle wieder, dass **On Hand** die größte Spannweite aller Eingabemethoden aufweist, die mit dem

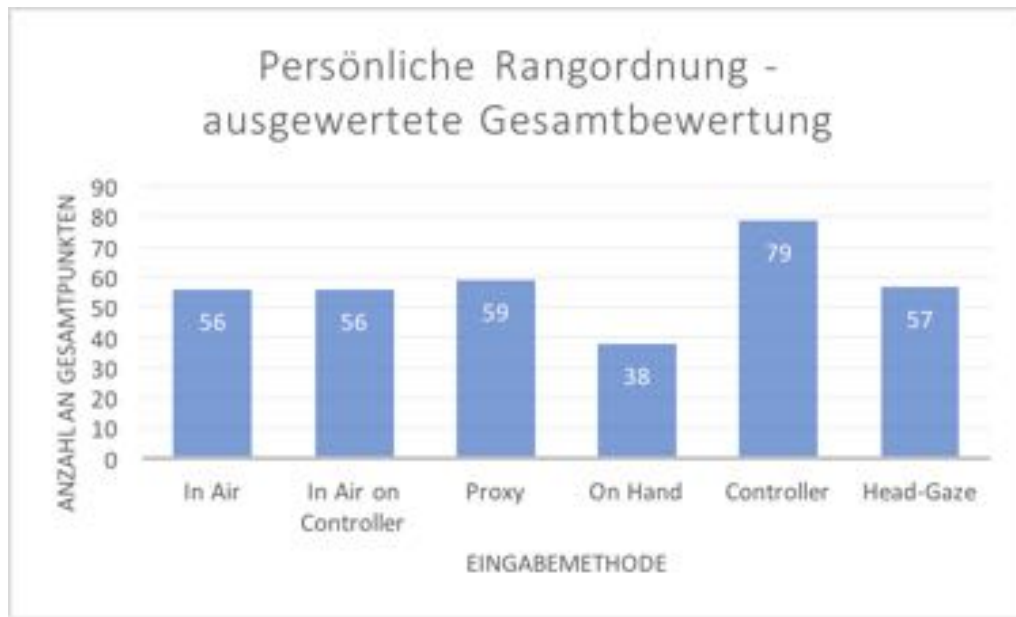


Abbildung 7.8: Ausgewertete Gesamtbewertung der Eingabemethoden aus der persönlichen Rangordnung. Die Bewertung ergibt sich aus einer linearen Gewichtung der Ränge. Die maximale Gesamtpunktzahl beträgt 115 Punkte.

Eingabemethode	Min	Max	M	SD
In Air	55	100	85	13,44
In Air on Controller	52,5	97,5	76,74	13,43
Proxy	35	100	74,57	18,4
On Hand	15	85	53,8	18,2
Controller	57,5	100	82,83	11,61
Head-Gaze	45	100	77,28	17,05

Tabelle 7.7: Deskriptive Statistiken über den SUS-Score.

Wert 70 über dem möglichen Wertebereich des Scores (0 bis 100) sehr erheblich ist. In Abbildung 7.9 sind die durchschnittlichen SUS-Scores der Eingabemethoden mit 95 % Konfidenzintervallen in einem Säulendiagramm dargestellt. Hier lässt sich gut erkennen, dass sich **On Hand** als einzige Eingabemethoden deutlich von den anderen absetzt.

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 36,097$, $p < 0,001$, $N = 23$) zeigt, dass es einen signifikanten Unterschied im durchschnittlichen SUS-Score zwischen den Eingabemethoden gibt. Die Post-hoc-Analyse (Dunn-Bonferroni-Tests) ergab, dass sich **On Hand** signifikant von allen übrigen Eingabemethoden unterscheidet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.8 dargestellt. Somit erreichte **On Hand** signifikant den niedrigsten SUS-Score. Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen keine Signifikanz auf.

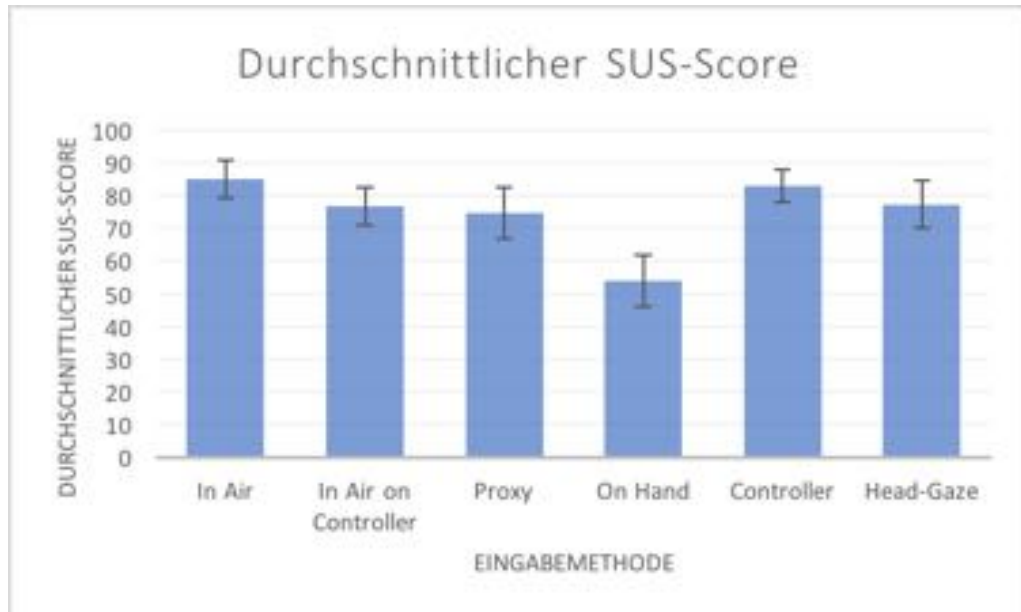


Abbildung 7.9: Durchschnittlicher SUS-Score mit 95 % Konfidenzintervallen.

Zwischen den Eingabemethoden		z	$p_{korrigiert}$
On Hand	In Air	-5,162	< 0,001
	In Air on Controller	-3,231	= 0,018
	Proxy	-3,113	= 0,028
	Controller	-5,005	< 0,001
	Head-Gaze	-4,059	= 0,001

Tabelle 7.8: Signifikant ausgefallene Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für den durchschnittlichen SUS-Score. Für alle Tests gilt $N = 23$, $\alpha = 0,05$.

Da einige Teilnehmer Probleme bei der Eingabe mit **On Hand** hatten, und sich dies womöglich auch auf die Bewertung auswirkte, wurden zusätzlich die Ergebnisse derjenigen, bei denen bei **On Hand** keine deutlichen Probleme beobachtet wurden, gesondert analysiert. Der durchschnittliche SUS-Score ($M = 59,72$, $SD = 13,26$, $N = 9$) zeigt ein besseres Ergebnis als bei den anderen Teilnehmern, bei denen Probleme beobachtet wurden ($M = 50$, $SD = 20,31$, $N = 14$).

7.3.3 Andere Charakteristika

Neben den Fragen zum SUS wurden selbst konzipierte Fragen zur Ermittlung des Späßes, der Anstrengung, der Zufriedenheit mit der Rückmeldung, der Immersion und der Natürlichkeit der Interaktion gestellt. Hier gaben die Teilnehmer auf einer Likert-Skala von 1-7 ihre Bewertung der jeweiligen Charakteristik ab.

Spaß

Die Teilnehmer bewerteten auf einer Skala von 1 = „stimme überhaupt nicht zu“ bis 7 = „stimme voll zu“, ob sie viel Spaß bei der Eingabe hatten.

In Abbildung 7.10 ist zu erkennen, dass es keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Eingabemethoden gibt. Während der Eingabe mit **Controller** empfanden die Teilnehmer am meisten Spaß ($M = 5,57$, $SD = 1,38$), mit **On Hand** am wenigsten ($M = 4,3$, $SD = 1,89$). Die Durchschnittswerte aller Eingabemethoden sind größer als 4 und liegen damit in der oberen Hälfte der Skala.

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 17,638$, $p = 0,003$, $N = 23$) zeigt, dass es einen signifikanten Unterschied hinsichtlich des empfundenen Späßes zwischen den Eingabemethoden gibt. Die Post-hoc-Analyse (Dunn-Bonferroni-Tests) ergab, dass sich **On Hand** mit dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ signifikant von **Controller** unterscheidet ($z = -1,652$, $p_{korrigiert} = 0,041$, $N = 23$). Somit bereitete die Eingabe mit **Controller** den Teilnehmern signifikant mehr Spaß als mit **On Hand**. Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen keine Signifikanz auf.

Anstrengung

Die Teilnehmer bewerteten auf einer Skala von 1 = „überhaupt nicht anstrengend“ bis 7 = „sehr anstrengend“, wie anstrengend sie die Bedienung empfanden.

In Abbildung 7.11 sind die durchschnittlichen Bewertungen der Anstrengung aller Eingabemethoden in einem Säulendiagramm dargestellt. Die Bedienung wurde bei **On Hand** ($M = 5,13$, $SD = 1,58$) von allen Eingabemethoden als am anstrengendsten empfunden, bei **Controller** ($M = 2,22$, $SD = 1,242$) am wenigsten anstrengend. Neben **Controller** erreichte als einzige andere Eingabemethode **In Air** ebenfalls einen Wert unter 3 ($M = 2,83$, $SD = 1,37$). Zwischen den übrigen Eingabemethoden bestehen nur marginale Unterschiede, hierbei ist die größte Differenz in der Durchschnittsbewertung von 0,35 zwischen **In Air** und **Controller**.

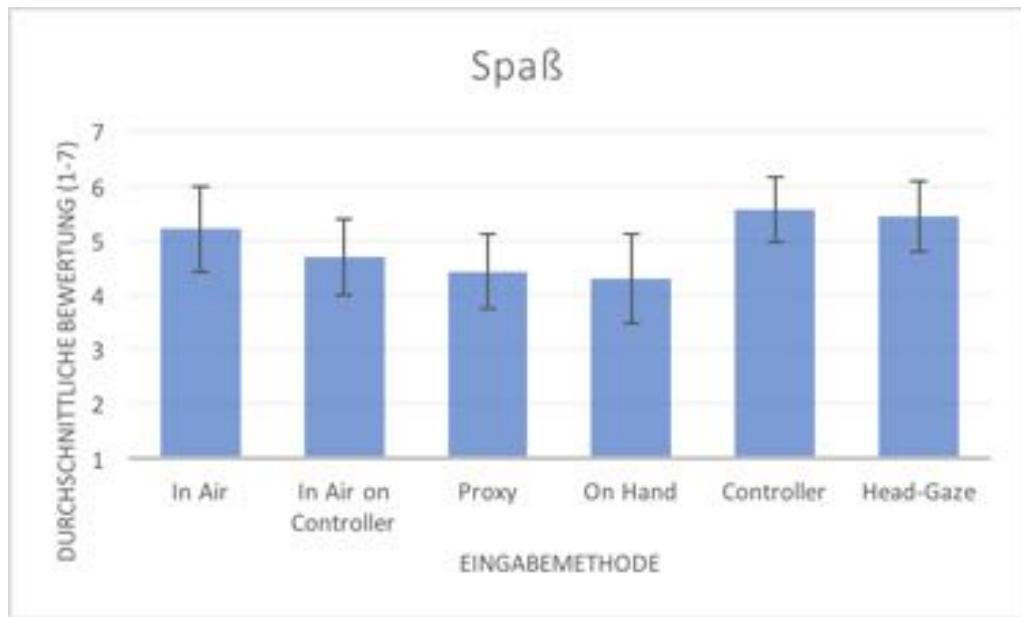


Abbildung 7.10: Durchschnittliche Bewertung des Spaßes auf einer Likert-Skala (1-7) mit 95 % Konfidenzintervallen.

Zwischen den Eingabemethoden		z	p _{korrigiert}
On Hand	In Air	3,822	= 0,002
	Proxy	3,349	= 0,012
	Controller	5,477	< 0,001
Controller	Head-Gaze	3,074	= 0,032

Tabelle 7.9: Signifikant ausgefallene Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für die durchschnittliche Bewertung der Anstrengung der Bedienung. Für alle Tests gilt $N = 23$, $\alpha = 0,05$.

und **Proxy** festzustellen. Zu erkennen ist, dass **In Air on Controller** und **On Hand**, die beide eine Interaktion mit zwei Händen benötigen, als anstrengendste Eingabemethoden bewertet wurden.

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 36,699$, $p < 0,001$, $N = 23$) zeigt, dass es zwischen den Eingabemethoden einen signifikanten Unterschied hinsichtlich der Anstrengung bei der Bedienung gibt. Die Post-hoc-Analyse (Dunn-Bonferroni-Tests) ergab, dass die Bedienung bei **On Hand** als signifikant anstrengender empfunden wurde als bei **In Air**, **Proxy** und **Controller**. Außerdem besteht ein signifikanter Unterschied zwischen **Controller** und **Head-Gaze**. Somit ist die Eingabe mit **Controller** signifikant weniger anstrengend als **Head-Gaze**. Die Ergebnisse sind in Tabelle 7.9 dargestellt. Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen keine Signifikanz auf.

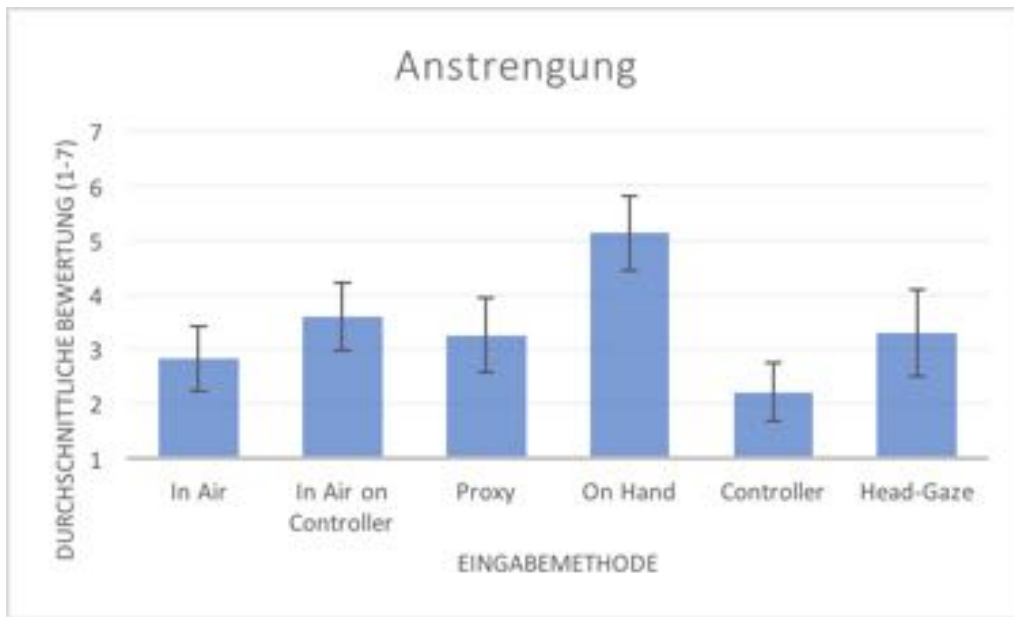


Abbildung 7.11: Durchschnittliche Bewertung der Anstrengung der Bedienung auf einer Likert-Skala (1-7) mit 95 % Konfidenzintervallen.

Rückmeldung

Die Teilnehmer bewerteten auf einer Skala von 1 = „überhaupt nicht zufriedenstellend“ bis 7 = „sehr zufriedenstellend“, wie zufriedenstellend sie die Gesamtrückmeldung beim Auslösen einer Taste empfanden. Alle Teilnehmer wurden darauf hingewiesen, dass mit Gesamtrückmeldung alle visuellen, auditiven und haptischen Faktoren gemeint sind, die ihnen halfen, das Auslösen einer Taste zu bemerken.

Abbildung 7.12 zeigt die durchschnittliche Bewertung in einem Säulendiagramm. Dort ist zu erkennen, dass es zwischen den Eingabemethoden keine wesentlichen Unterschiede gibt. **Head-Gaze** erreichte im Durchschnitt die beste Zufriedenheit ($M = 5,83$, $SD = 1,19$), **On Hand** die schlechteste ($M = 4,83$, $SD = 1,75$), wobei die Differenz zwischen den beiden Eingabemethoden mit dem Wert 1 sehr gering ist. Die Durchschnittsbewertungen aller Eingabemethoden sind größer als 4 und befinden sich damit in der oberen Hälfte der Skala. Somit lässt sich generalisiert sagen, dass alle Eingabemethoden zufriedenstellende Rückmeldung beim Auslösen einer Taste bereitstellten.

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 8,886$, $p = 0,114$, $N = 23$) zeigt, dass es zwischen den Eingabemethoden keinen signifikanten Unterschied bezüglich der Zufriedenheit mit der Gesamtrückmeldung beim Auslösen einer Taste gibt.

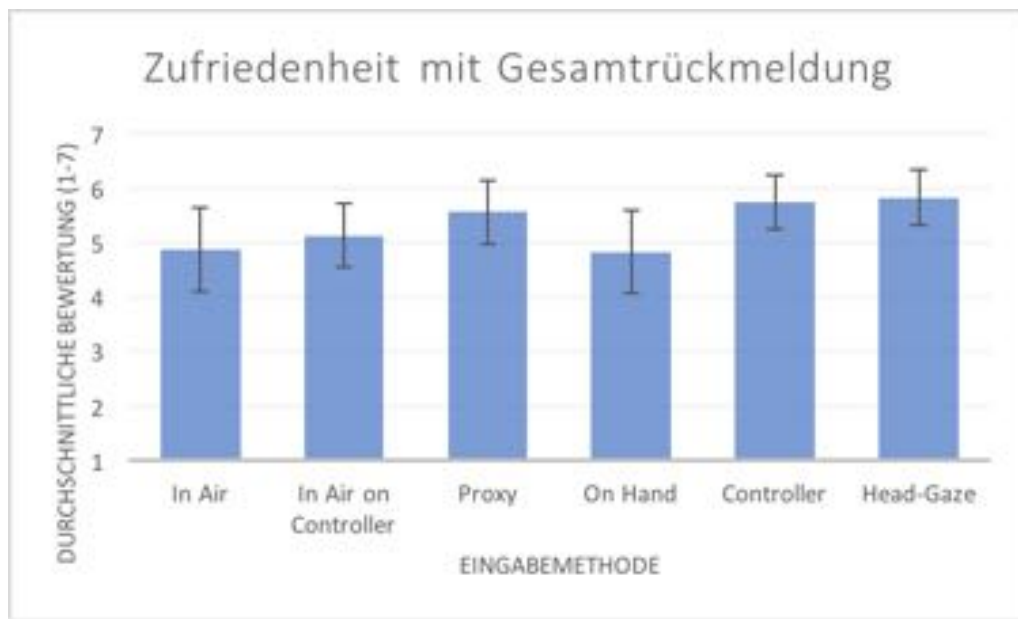


Abbildung 7.12: Durchschnittliche Bewertung der Zufriedenheit mit der Gesamtrückmeldung beim Auslösen einer Taste auf einer Likert-Skala (1-7) mit 95 % Konfidenzintervallen.

Immersion

Die Teilnehmer bewerteten auf einer Skala von 1 = „sehr schwach“ bis 7 = „sehr stark“, wie stark ihr Immersionsgefühl während der Eingabe war. Hiermit war das Gefühl gemeint, tatsächlich in einer Produktionshalle Zahlen eingegeben zu haben.

In Abbildung 7.13 sind die Durchschnittsbewertungen des Immersionsgefühls aller Eingabemethoden in einem Säulendiagramm gegenübergestellt. Bei **Head-Gaze** ($M = 3,74$, $SD = 1,573$) empfanden die Teilnehmer das Gefühl am geringsten, bei **Proxy** ($M = 5,30$, $SD = 1,222$) am stärksten. Einen ebenfalls hohen Durchschnittswert erreichte **In Air** ($M = 4,96$, $SD = 1,551$). Zwischen den übrigen Eingabemethoden **In Air on Controller**, **On Hand** und **Controller** ist kein wesentlicher Unterschied wahrzunehmen.

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 22,920$, $p < 0,001$, $N = 23$) zeigt, dass es zwischen den Eingabemethoden einen signifikanten Unterschied hinsichtlich des Immersionsgefühls gibt. Die Post-hoc-Analyse (Dunn-Bonferroni-Tests) ergab, dass sich **Head-Gaze** mit dem Signifikanzniveau $\alpha = 0,05$ signifikant von **In Air** ($z = 3,152$, $p_{korrigiert} = 0,024$, $N = 23$) und **Proxy** ($z = 3,980$, $p_{korrigiert} = 0,001$, $N = 23$) unterscheidet. Somit ist die Immersion bei **Head-Gaze** signifikant geringer als bei **In Air** und **Proxy**. Alle übrigen paarweisen Vergleiche weisen keine Signifikanz auf.

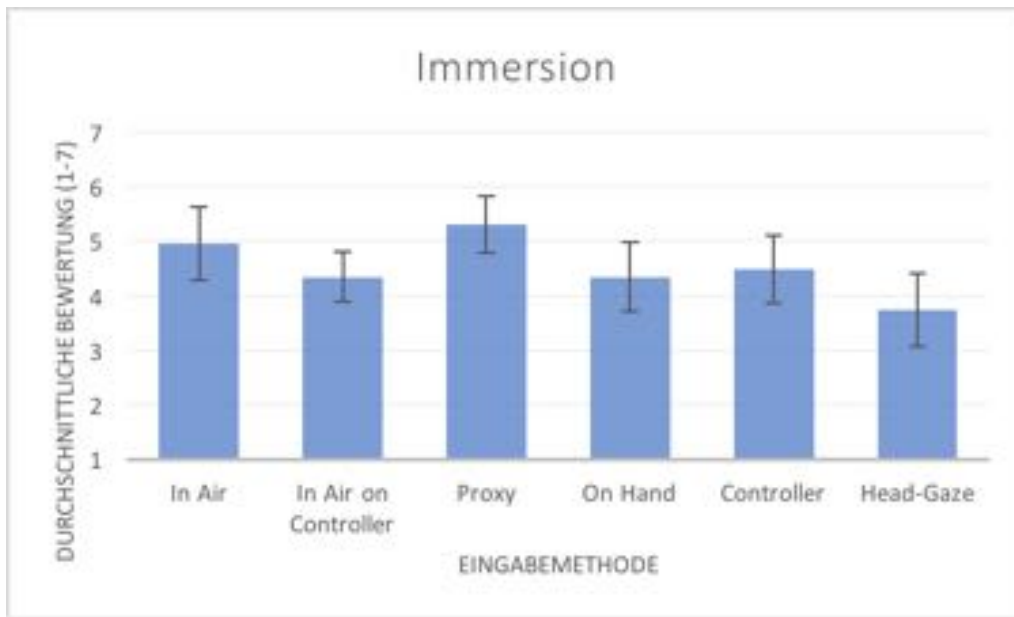


Abbildung 7.13: Durchschnittliche Bewertung des Immersionsgefühls während der Eingabe auf einer Likert-Skala (1-7) mit 95 % Konfidenzintervallen.

Natürlichkeit

Die Teilnehmer bewerteten auf einer Skala von 1 = „sehr unnatürlich“ bis 7 = „sehr natürlich“, wie natürlich sie die Bedienung empfanden.

Die Interaktion bei **In Air** wurde durchschnittlich ($M = 5,22$, $SD = 1,38$) als natürlichste Interaktion empfunden, die Bedienung von **Head-Gaze** ($M = 3,83$, $SD = 1,95$) als unnatürlichste. Einen ebenfalls hohen Durchschnittswert erreichte **Proxy** ($M = 5,09$, $SD = 1,54$). Zwischen den übrigen Eingabemethoden ist kein wesentlicher Unterschied wahrzunehmen. Das Säulendiagramm in Abbildung 7.14 zeigt eine ähnliche Verteilung wie bei den Bewertungsergebnissen der Immersion in Abbildung 7.13. Die Natürlichkeit scheint also womöglich einen Einfluss auf die Immersion zu haben.

Das Ergebnis des Friedman Tests ($\chi^2(5) = 15,838$, $p = 0,007$, $N = 23$) zeigt, dass es zwischen den Eingabemethoden einen signifikanten Unterschied in der Natürlichkeit der Interaktion gibt. Die Post-hoc-Analyse (Dunn-Bonferroni-Tests) ergab jedoch, dass kein signifikanter Unterschied vorhanden ist. Die Ergebnisse sind für die Fälle, die ohne Bonferroni-Korrektur des Signifikanzwertes signifikant ausgefallen sind, in Tabelle 7.10 zusammengefasst.

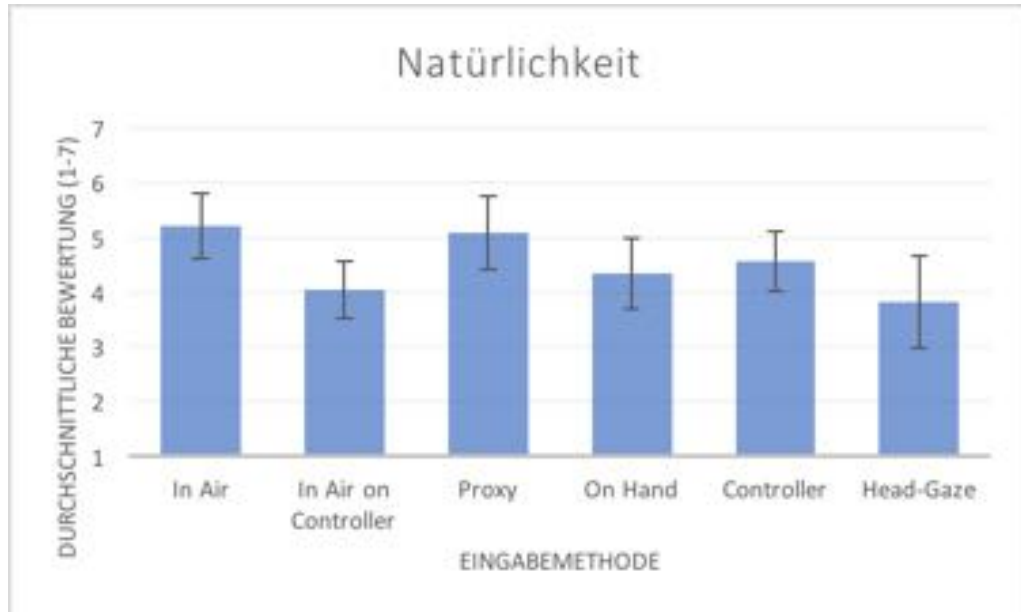


Abbildung 7.14: Durchschnittliche Bewertung der Natürlichkeit der Bedienung auf einer Likert-Skala (1-7) mit 95 % Konfidenzintervallen.

Zwischen den Eingabemethoden		z	p	p _{korrigiert}
Head-Gaze	In Air	2,916	= 0,004	= 0,053
	Proxy	2,601	= 0,009	= 0,140
In Air on Controller	In Air	2,601	= 0,009	= 0,140
	Proxy	-2,286	= 0,022	= 0,334

Tabelle 7.10: Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für die durchschnittliche Bewertung der Natürlichkeit der Bedienung für die Fälle, in denen eine Signifikanz bei Nichtanpassung des Signifikanzwertes aufgetreten ist. Für alle Tests gilt $N = 23$, $\alpha = 0,05$.

7.4 Auffälligkeiten und Beobachtungen

Im Folgenden werden Auffälligkeiten berichtet, die während der Studie entweder beobachtet wurden oder sich aus der Auswertung zusätzlicher Messwerte ergeben.

Vorzeicheneingabe

Die Funktionalität des Vorzeichens war bei allen Interfaces so umgesetzt, dass man an beliebiger Stelle das Vorzeichen umschalten konnte. Man musste somit bei der Eingabe einer negativen Zahl nicht zwingend den Button des Vorzeichens zuerst betätigen. Dennoch wurde dieses Vorgehen bei fast allen Teilnehmern beobachtet. Nur 2 der 23 Teilnehmer wechselten durchgängig das Vorzeichen erst, nachdem sie bereits alle Ziffern eingegeben hatten.

Probleme bei der handflächenbasierten Eingabemethode

Bei 14 der 23 Teilnehmer wurden Schwierigkeiten bei der Eingabe mit **On Hand** beobachtet, welche auf das **Diskrepanzproblem** zurückzuführen sind. Bei 3 Teilnehmern war dieses Problem so stark, dass sie immens bei der Eingabe behindert wurden. Daraus resultierende Folgen sind beispielsweise in der längeren Eingabezeit in Abbildung 7.2 zu erkennen.

Controllereingabe

Bei **Controller** gab es (wie in Kapitel 4 beschrieben) zwei Möglichkeiten zu interagieren. Die Teilnehmer konnten diese beiden Optionen frei kombinieren und mussten sich nicht zwingend für eine entscheiden. Dennoch verwendeten 13 der 23 Teilnehmer (56,52 %) nach der Testphase ausschließlich eine der beiden Interaktionsmöglichkeiten. Dabei entschieden sich 11 Teilnehmer (47,83 %) ausschließlich für die Interaktion über *Pointing* und 2 Teilnehmer (8,7 %) für die Eingabe über das Touchpad. 2 weitere Teilnehmer verwendeten über den Verlauf der Eingabeaufgaben bei über 95 % der ausgelösten Tasten eine der beiden Interaktionsformen. In beiden Fällen war dies die Eingabe über *Pointing*. Nur 1 Teilnehmer verwendete beide Eingabeoptionen in einer ausgeglichenen Form, in diesem Fall zu 48,65 % *Pointing* und 51,35 % das Touchpad. Abbildung 7.15 zeigt eine Gegenüberstellung der Anteile beider Interaktionsmöglichkeiten beim Auslösen einer Taste in einem Tortendiagramm.

Eine weitere Auffälligkeit betrifft 11 Teilnehmer, welche beim *Pointing* mit dem Controller bemerkbar nah an das Interface herangingen.



Abbildung 7.15: Anteil der verwendeten Interaktionsmöglichkeit beim Auslösen einer Taste bei der kombinierten **Controller**-Eingabemethode.

7.5 Subjektive Rückmeldungen

Generell äußerten viele Teilnehmer, dass es eine interessante Studie gewesen sei und es ihnen Spaß gemacht habe, daran teilzunehmen. Diejenigen, die bisher keine VR-Erfahrung gesammelt hatten, waren von den ersten Impressionen begeistert. Besonders beeindruckend fanden Teilnehmer die Repräsentation der eigenen Hände in der virtuellen Umgebung. Hiermit konnten auch Personen, die bereits über VR-Erfahrung verfügten, überrascht werden. Auch wenn einige bemerkten, dass die Nachahmung der Bewegungen und der Handposen nicht vollkommen akkurat sei, waren sie verwundert, wie gut dies bereits ohne merkbare Verzögerung funktioniert.

Die Teilnehmer äußerten unterschiedliche Meinungen hinsichtlich haptischer Rückmeldung bei der Interaktion. Dabei war eine Person der Meinung, dass Haptik für sie nicht so wichtig sei und sie die visuelle und auditive Rückmeldung „mehr als ausreichend“ fände. Eine andere Meinung war allerdings, dass die zweiseitige Haptik bei **On Hand** besonders gut sei, und man sich instinktiv die Positionen merke, die man berührt, und mit etwas Erfahrung möglicherweise ohne große Aufmerksamkeit das Interface bedienen könne. Ein weiterer Proband erklärte, dass es im Falle natürlicher Haptik bei **On Hand** und **Proxy** zu sogenannten *False positives* kommen könne. Dies bedeutet, dass das Berühren der Hand oder des Proxy-Objekts und die dabei empfundenen Haptik nicht zwangsweise das erfolgreiche Auslösen einer Taste bedeute. Somit bekäme man eine „fehlerhafte“ Rückmeldung, auch wenn man beispielsweise versehentlich einen Zwischenraum berührt, wodurch keine der umliegenden Tasten ausge-

löst wird. Aus diesem Grund sprach sich der Teilnehmer für aktive Haptik aus, die dem Nutzer tatsächlich nur dann Rückmeldung gibt, wenn es im Kontext sinnvoll erscheint.

Bei der Eingabe mit **On Hand** sah ein Teilnehmer eine Analogie zu der Bedienung des Smartphones im Alltag. Dieses würde man ebenfalls in der nichtdominanten Hand halten und mit einem Finger der dominanten Hand bedienen. Die generelle Meinung bezüglich der Eingabemethode ist trichotomisch. Es gab eine Partei, die von der Eingabeform begeistert war, auch wenn die Interaktion nicht vollkommen reibungslos funktionierte. Eine andere Gruppe war der Meinung, dass das Konzept und die Idee hinter der Eingabemethode sehr interessant sei und sie sich vorstellen könnten, diese zu ihren Favoriten zu zählen, falls die Umsetzung verbessert und die aufgetretenen Probleme behoben wurden. Andere äußerten, dass auch wenn die aufgetretenen Probleme behoben wären, die Eingabemethoden nicht zu ihren Favoriten zählte, da sie das Halten der nichtdominanten Hand und Verwenden beider Hände zur Interaktion zu anstrengend finden. Die drei Meinungsgruppen waren in etwa gleich groß.

1 Teilnehmer, der **Controller** auf den 1. Rang seiner persönlichen Rangliste platzierte, erwähnte, dass er ein klassischer „Gamer“ sei und deshalb die Eingabemethode als sehr gut und das Halten des Controllers als sehr vertraut empfand.

Kapitel 8

Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse und Beobachtungen des Experiments aus dem vorherigen Kapitel diskutiert. Außerdem werden sie zu den in Kapitel 6 aufgestellten Hypothesen in Bezug gesetzt. Zum Ende des Kapitels werden resultierende Schlussfolgerungen erörtert.

8.1 Ergebnisse und Beobachtungen

Der erste Teil beschäftigt sich mit den Messdaten hinsichtlich der Leistung und Effizienz der Eingabemethoden, gefolgt von den abgegebenen Bewertungen betreffend der Charakteristika der Interaktion. Anschließend werden die Auffälligkeiten bei der Eingabemethode **Controller** besprochen. Die Diskussion des SUS-Scores und der persönlichen Rangordnung folgt zum Ende des Abschnitts.

8.1.1 Leistung und Effizienz

Hinsichtlich des abgezielten Einsatzbereichs der Methoden zur Eingabe diskreter numerischer Werte im industriellen Kontext, spielen die Leistung und Effizienz eine wesentliche Rolle. Dahingehend werden im Folgenden die Ergebnisse zu den Eingabezeiten, Erfolgsraten und den bei der Eingabe benötigten Korrekturen diskutiert.

Eingabezeit und Interaktionszeit

Die Ergebnisse der Interaktionszeit erbringen die gleichen Erkenntnisse wie die der Eingabezeit. Weiterhin zeigt die Differenz beider Zeiten, dass zwischen den Eingabemethoden grundlegend kein Unterschied in der Reaktionszeit (zwischen

dem Erscheinen der Zahl und der Eingabe) bestand. Die höhere Differenz zwischen der Eingabezeit und der Interaktionszeit bei **On Hand** lässt sich damit begründen, dass in der gemessenen Interaktionszeit nicht die Zeit, die zum Auslösen der ersten Taste benötigt wurde, enthalten war. Diese ist bei **On Hand** basierend auf den durchschnittlich deutlich längeren Eingabezeiten ebenfalls als länger anzunehmen. Daher werden im Folgenden hauptsächlich die Ergebnisse der Eingabezeit diskutiert.

On Hand sticht aus den Durchschnittswerten der Eingabezeit als langsamste Eingabemethode heraus (siehe Abbildung 7.3). Ausschlaggebend für den höheren Durchschnittswert war die Genauigkeit und Robustheit der Umsetzung, im Konkreten das in Kapitel 5 geschilderte **Diskrepanzproblem**. Dieses führte bei einigen Teilnehmern trotz des verwirklichten Lösungsansatzes zu teilweise starken Schwierigkeiten. Den Grad der bei der Eingabe aufgetretenen Probleme ist dem Histogramm über die Eingabezeit bei **On Hand** (siehe Abbildung 7.2) zu entnehmen. Dort ist ebenfalls zu erkennen, dass es Teilnehmer gab, bei denen deutlich weniger Schwierigkeiten auftraten. Der Wert der schnellsten Eingabezeit bei **On Hand**, der sich nicht deutlich von den schnellsten Eingabezeiten der anderen Eingabemethoden absetzt (siehe Tabelle 7.1), zeigt jedoch, dass mit der Eingabemethode **On Hand** grundsätzlich auch schnelle Eingaben getätigt werden konnten.

Zwischen den Durchschnittszeiten der übrigen Eingabemethoden bestehen nur marginale Unterschiede. Somit lässt sich folgern, dass mit der aktuellen Umsetzung dieser Eingabemethoden in gleicher Weise schnelle Eingaben getätigt werden konnten. Die längste Durchschnittszeit (ausgenommen **On Hand**) war bei **Proxy** zu beobachten, welche jedoch auf Grund des trotzdem niedrigen Wertes für eine Eingabe, die das Auslösen von 6 Tasten involvierte, für eine effiziente Eingabe spricht. Neben der Signifikanz zwischen **On Hand** und den übrigen Eingabemethoden besteht die einzige weitere Signifikanz zwischen **Proxy** und **Controller**, wobei **Controller** insgesamt von allen Eingabemethoden sowohl in der Durchschnittszeit als auch in der schnellsten Eingabezeit am besten abschnitt.

Alle Teilnehmer konnten sich in einer Testphase mit der jeweiligen Eingabemethode vertraut machen. Der gegebene Zeitrahmen von 2 Minuten wurde jedoch überwiegend unterschritten. Weiterhin zeigt der Verlauf der Eingabezeiten in der anschließenden Aufgabenphase (siehe Abbildung 7.4), dass die Teilnehmer die durchschnittlichen Eingabezeiten bereits nach 3 getätigten Eingaben erreicht hatten. Somit lässt sich feststellen, dass alle Eingabemethoden schnell erlernt wurden.

Erfolgsrate

Die Ergebnisse der Erfolgsraten zeigen, dass mit allen Eingabemethoden überwiegend korrekte Eingaben getätigt wurden. Dabei besteht die Erfolgsrate bei allen Eingabemethoden im Durchschnitt aus über 95 %. Bei der Analyse der

fehlerhaften Eingaben stellte sich heraus, dass diese aus kleineren Zahlendrehern bestanden, die möglicherweise aus einer zu kurzen Betrachtung der angezeigten Zahl resultierten. Womöglich wären somit noch weniger Fehler aufgetreten, wenn die Teilnehmer sich über den einzugebenden Wert bewusst gewesen wären.

Die wenigsten Fehler wurden neben der Eingabemethode **In Air on Controller** bei **On Hand** gemacht. Dies zeigt, dass obwohl viele Teilnehmer Schwierigkeiten bei **On Hand** hatten und für die zugehörigen Eingaben mehr Zeit benötigten, dies keinen negativen Einfluss auf die Korrektheit hatte.

Zwar wurden bei **In Air** die meisten Fehler gemacht und sowohl im Durchschnitt als auch in der minimalen Erfolgsrate die schlechtesten Ergebnisse erreicht, jedoch setzte sich die Eingabemethode darin nicht deutlich von den übrigen ab. Somit lässt sich auch keine Aussage treffen, ob in diesem Fall die fehlende Haptik eine negative Auswirkung auf die getätigten Fehleingaben hatte.

Korrekturen

Bei einigen Eingabemethoden wurden bei mindestens einer Eingabe mehr als 2 und bis zu 5 Korrekturen ausgeübt. Dieser zunächst als hoch wahrgenommene Wert lässt sich jedoch auf Grund der gemachten Beobachtungen relativieren. In den meisten Fällen kam eine höhere Anzahl an Korrekturen dadurch zustande, dass erst spät bemerkt wurde, dass eine Ziffer am Anfang der Zahl fehlerhaft war. Somit musste mehrfach die Korrekturtaste ausgelöst werden, um wieder zu der Stelle der fehlerhaften Ziffer zu gelangen.

Der hohe Durchschnittswert der Anzahl benötigter Korrekturen bei **On Hand**, und dessen signifikanter Unterschied zu einigen anderen Eingabemethoden, spiegeln erneut die beobachteten Schwierigkeiten bei dieser Eingabemethode wider, welche sich bereits in der Eingabezeit zeigten. Die Ergebnisse der anderen Eingabemethoden lassen erkennen, dass durchschnittlich sehr wenige Korrekturen notwendig waren und somit auch wenig Tasten versehentlich ausgelöst wurden. Auch bei der Eingabemethode **In Air** ist ein sehr geringer Wert festzustellen, der noch unterhalb der Werte anderer Eingabemethoden liegt. Somit lässt sich die Vermutung aus der Diskussion der Erfolgsrate bei **In Air**, dass die fehlende haptische Rückmeldung womöglich negative Auswirkungen auf die Korrektheit habe, nicht bestätigen. Im Falle einer auffällig hohen Anzahl an fehlerhaften Eingaben hätte sich daher auch eine höhere Anzahl bemerkter fehlerhafter Ziffern zeigen müssen, welche sich aus der Anzahl an Korrekturen ableiten ließe.

Implizierte Leistung und Effizienz

Zusammenfassend lässt sich berichten, dass mit allen Eingabemethoden im Durchschnitt korrekte und effiziente Eingaben getätigt wurden. Im Falle von **On Hand** war jedoch durchschnittlich die Effizienz nicht erfüllt, da einige Teilnehmer teilweise eine deutlich längere Eingabezeit und eine hohe Anzahl an Korrekturen

benötigten, welche sich merklich auf die Durchschnittswerte auswirkten. Dennoch gab es Teilnehmer, bei denen das **Diskrepanzproblem** nicht ausgeprägt ausfiel und die mit der Eingabemethode auch effiziente Eingaben erledigten.

8.1.2 Charakteristika der Interaktion

Die Hauptstudie war eine explorative Studie, die neben der Untersuchung der Effizienz der Eingabemethoden auch dazu diente, Charakteristika der Interaktion zu erforschen. Daher werden nachfolgend die Bewertungsergebnisse betreffend Spaß, Anstrengung, Zufriedenheit mit der Gesamtrückmeldung, Immersionsgefühl und Natürlichkeit der Interaktion diskutiert sowie deren Bezug zu den aufgestellten Hypothesen hergestellt.

Spaß

In Bezug auf den Spaß bei der Interaktion setzte sich keine der Eingabemethoden wesentlich von den anderen ab. Ferner erreichten alle Eingabemethoden einen Durchschnittswert, der sich in der oberen Hälfte der Skala befindet. Somit lässt sich zusammenfassend berichten, dass die Verwendung aller Eingabemethoden grundlegend Spaß bereitete. Die Bewertung des Spaßes bei der Eingabemethode **On Hand** fiel am niedrigsten aus. Deren Differenz zu der Bewertung der Eingabemethode **Controller**, mit welcher der meiste Spaß empfunden wurde, ist zwar signifikant allerdings nicht besonders hoch. Obwohl viele Teilnehmer Schwierigkeiten bei der Bedienung der Eingabemethode **On Hand** hatten, zeigt dieses Ergebnis, dass die Verwendung ihnen trotzdem Spaß bereitete.

Anstrengung

In den Bewertungsergebnissen der Anstrengung stellte sich **On Hand** deutlich als anstrengendste Methode heraus. **Controller** hingegen wurde als müheloseste Methode empfunden. Obwohl zwischen den Durchschnittswerten dieser Eingabemethoden ein deutlicher Unterschied besteht, spiegelt sich dieser nicht in den Ergebnissen in Bezug auf den Spaß bei der Interaktion wider. Somit lässt sich sagen, dass die Anstrengung aller Eingabemethoden, auch mit einer relativ hohen Bewertung bei **On Hand**, nicht wesentlich den Spaß beeinflusste und sich somit in einem akzeptablen Rahmen abspielte.

Nach **On Hand** war **In Air on Controller** die anstrengendste Eingabemethode, auch wenn der Unterschied zwischen **In Air on Controller** und den übrigen Eingabemethoden nicht groß ausfiel. Da bei diesen beiden Eingabemethoden beide Hände in die Interaktion involviert waren, lässt sich darauf schließen, dass eine Interaktion mit beiden Händen im Gegensatz zur einhändigen Interaktion als anstrengender empfunden wird. Auch wenn nicht alle Unterschiede signifikant ausfielen, lässt sich somit Hypothese **H2.6** zumindest für die Verwendung der Eingabemethoden im Rahmen des Experiments bestätigen.

Die höchste Durchschnittsbewertung der Anstrengung von **On Hand** und die hohe Differenz zu **In Air on Controller** könnte höchstwahrscheinlich etwas mit den aufgetretenen Schwierigkeiten bei der Verwendung von **On Hand** zu tun haben. Einige Teilnehmer hatten beim Auslösen der Tasten Probleme und benötigten hierfür mehrere Anlaufversuche, was sich bereits in der längeren Eingabezeit zeigte. Somit liegt die Vermutung nahe, dass bei einer Umsetzung ohne technische Limitationen die Bewertungen der Eingabemethode womöglich besser ausgefallen wäre.

Rückmeldung

Auf eine gewisse Weise überraschend sind die Ergebnisse in Bezug auf die Zufriedenheit mit der Gesamtrückmeldung, da zwischen allen Eingabemethoden keine wesentlichen Unterschiede bestanden. Obwohl verwandte Arbeiten die Erkenntnis liefern, dass haptische Rückmeldung das Erlebnis grundlegend verbessert, setzte sich **In Air**, welche über keine haptische Rückmeldung verfügte, nicht deutlich von den anderen Eingabemethoden ab. Die Durchschnittsbewertung der Eingabemethode **On Hand**, welche doppelseitiges haptischen Feedback besaß, fiel sogar am niedrigsten aus, auch wenn die Bewertung nicht aus denen der anderen Eingabemethoden heraussticht. Dieses Ergebnis widerlegt somit Hypothese **H2.5**, die besagt, dass die Rückmeldung bei **On Hand** auf Grund der zweiseitigen Haptik zufriedenstellender ist als die einseitige Haptik bei **Proxy**. Im Vergleich zu **In Air** fiel die Zufriedenheit mit der Gesamtrückmeldung bei **Proxy** zwar höher aus, allerdings ist der Unterschied nicht signifikant, sodass **H2.4** nicht für die Allgemeinheit bestätigt werden kann.

Der Kommentar eines Teilnehmer gibt zu bedenken, ob haptische Rückmeldung, sogar wenn sie wie bei **On Hand** doppelseitig ausfällt, unter Umständen das Nutzererlebnis nicht so stark bereichert wie aktives haptisches Feedback. Und zwar kann der Benutzer in unserem Anwendungsfall auch passive Haptik erfahren, obwohl keine Taste ausgelöst wurde, wohingegen aktive Haptik nur dann ausgelöst wird, wenn der Benutzer tatsächlich eine Taste auslöst.

Natürlichkeit

Die beiden Eingabemethoden **In Air** und **Proxy** erzielten bei der Bewertung der Natürlichkeit mit einem Durchschnittswert, der sich im oberen Drittel der Skala befindet, die besten Ergebnisse. Somit lässt sich Hypothese **H2.1** bestätigen, die besagt, dass die Interaktion bei **Proxy** als sehr natürlich wahrgenommen wird. Eine gegenteilige Beobachtung zeigte sich bei **Head-Gaze**, die von allen Eingabemethoden am schlechtesten bewertet wurde. Der Durchschnittswert von **Head-Gaze** befindet sich darüber hinaus als einziger von allen Eingabemethode in der unteren Hälfte der Skala. Somit lässt sich auch Hypothese **H2.2** bestätigen, die besagt, dass die Interaktion bei **Head-Gaze** als unnatürlich wahrgenommen wird.

Immersion

Die durchschnittlichen Bewertungsergebnisse in Bezug auf das Immersionsgefühl stimmen fast mit denen der Natürlichkeit der Interaktion überein. Dies legt die Vermutung nahe, dass die Natürlichkeit der Interaktion einen Einfluss auf die Immersion haben könnte.

Hypothese **H2.3**, die besagt, dass die Immersion bei den Eingabemethoden, in denen virtuelle Repräsentationen der Hände involviert waren, höher sei als bei denen ohne Handrepräsentation, konnte nicht bestätigt werden. Zwar erreichte **Head-Gaze** die niedrigste Durchschnittsbewertung, deren Unterschiede zu **In Air** und **Proxy** darüber hinaus signifikant ausfielen, jedoch ist die recht hohe Durchschnittsbewertung von **Controller** nicht niedriger als die von **In Air on Controller** und **On Hand**.

8.1.3 Controllereingabe

Aus der Aufzeichnung der Anzahl an Tasten, die durch den Controllerbutton, und derer, die mit Hilfe des Touchpads ausgelöst wurden, ergibt sich unter anderem, dass die Teilnehmer bei der Eingabemethode Controller eine der beiden Interaktionsmöglichkeiten präferierten und diese auch meist ausschließlich verwendeten. Damit wird Hypothese **H2.8** bestätigt. Des Weiteren zeigen die Ergebnisse, dass die Interaktion über die Zeigegeste und das Auslösen einer Taste des Interfaces über den Controllerbutton am häufigsten verwendet wurde. Viele Teilnehmer gingen dabei bemerkbar nah an das Interface heran, um die Tasten möglichst akkurat treffen zu können. In der Beobachtung stellte sich heraus, dass auf diese Weise die Tasten deutlich schneller ausgelöst werden konnten als über das Touchpad.

Subjektive Rückmeldungen der Teilnehmer ergeben, dass die Interaktion der Zeigegeste mit dem Strahl auf Grund der Analogie zur Verwendung eines Laserpointers als sehr natürlich empfunden wurde. Neben der schnelleren Interaktion präferierten die Teilnehmer auch deshalb diese der beiden Interaktionsmöglichkeiten. Möglicherweise erklärt diese Begründung auch das nicht erwartete hohe Bewertungsergebnis der Eingabemethode **Controller** hinsichtlich der Natürlichkeit der Interaktion.

8.1.4 Gesamtbewertungen

Im Folgenden werden die Gesamtbewertungen der Usability aus dem SUS und die aus der persönlichen Rangordnung diskutiert.

SUS-Score

Bis auf **On Hand** erreichten alle Eingabemethoden einen durchschnittlichen SUS-Score von über 75. Der Unterschied des niedrigen Ergebnisses von **On Hand** fiel zu den Ergebnissen der übrigen Eingabemethoden signifikant aus. Dementsprechend lässt sich **H2.7** nicht vollständig bestätigen, da der durchschnittliche SUS-Score von **On Hand** (53,8 Punkte) nicht über der von Bangor et al. [69] aufgestellten Marke „gut“ von mindestens 71,4 Punkten liegt.

Die große Spannweite in den Ergebnissen von **On Hand** spiegelt erneut die Beobachtung wider, dass einige Teilnehmer auf Grund des **Diskrepanzproblems** mit Schwierigkeiten konfrontiert wurden, wohingegen andere Teilnehmer weniger Probleme hatten und die Fragen des SUS besser bewerteten.

Persönliche Rangordnung

Neben den verschiedenen Interaktionseigenschaften und der Usability sollte ermittelt werden, welchen subjektiven Gesamteindruck die Teilnehmer von den Eingabemethoden erhielten. Daher stellten die Teilnehmer eine persönliche Rangliste auf, aus welcher im Nachhinein für jede Eingabemethode ein Gesamtwert berechnet wurde.

Aus den Gesamtwerten lässt sich ableiten, dass es unter den Eingabemethoden einen deutlichen Gewinner und einen deutlichen Verlierer gibt. **Controller** erreichte mit Abstand die höchste Gesamtpunktzahl und **On Hand** die niedrigste. Eine interessante Auffälligkeit besteht darin, dass **In Air** zwar den höchsten SUS-Score erreichte, welcher sich in etwa mit dem von **Controller** deckte, jedoch **Controller** in der Gesamtbewertung aus der persönlichen Rangordnung deutlich besser abschnitt als **In Air**. Im Weiteren wurde dem 1. Platz am häufigsten die Eingabemethode **Controller** zugewiesen, sodass sich abschließend schlussfolgern lässt, dass **Controller** insgesamt die präferierte Eingabemethode war. Die subjektiven Rückmeldungen der Teilnehmer ergeben, dass es den Teilnehmer „Gamer“ gab, der vorher bereits sehr vertraut mit der Interaktion mit einem Controller war und dessen Vorerfahrung womöglich seine Bewertungen beeinflusst haben könnte.

Obwohl **On Hand** in der Gesamtbewertung deutlich am schlechtesten abschnitt, wurde die Eingabemethode dennoch von 4 Teilnehmern auf dem 1. Platz platziert. Damit ist **On Hand** (nach **Controller** und **In Air**) dort die am dritt häufigst vorkommende Eingabemethode. Dennoch wurde sie auch von 8 Teilnehmern dem letzten Platz zugewiesen. Diese Beobachtung deckt sich ebenfalls mit den subjektiven Rückmeldungen der Teilnehmer. Demnach gab es drei verschiedene Meinungsgruppen, von denen eine Gruppe bereits von der aktuellen Umsetzung der Eingabemethode **On Hand** begeistert war und diese zu ihren Favoriten zählte. Es gab jedoch auch Teilnehmer, die sich sicher waren, dass die Eingabemethode – auch wenn die Umsetzung verbessert werden würde – nicht ihr Favorit wäre, da die Interaktion mit beiden Händen zu anstrengend wäre. Die Teilnehmer

der dritten Meinungsgruppe äußerten immerhin, dass bei einer verbesserten Umsetzung **On Hand** möglicherweise zu ihren Favoriten zählen könnte.

8.2 Schlussfolgerungen

Zum Abschluss des Kapitels sind nachfolgend die wesentlichen Schlussfolgerungen aus den diskutierten Ergebnissen und Beobachtungen aufgeführt. Daraus resultierende Empfehlungen für zukünftige Arbeiten werden im nachfolgenden Kapitel 9 besprochen.

Problematik einer explorativen Studie

Da es sich bei der Hauptstudie um eine explorative Studie handelte, die mehrere unterschiedliche Fragestellungen aufgriff, war es nur schwer zu erreichen, spezifische Faktoren isoliert zu untersuchen. Wie bereits der Gegenüberstellung der Eingabemethoden in Kapitel 4 (siehe Tabelle 4.1) zu entnehmen war, unterschieden sich die Eingabemethoden allerdings untereinander in mehreren Gesichtspunkten. Demnach ist es möglich, dass bestimmte unerwartete Ergebnisse aus einer Verzerrung (*Bias*) auf Grund des Studiendesigns resultierten und zugehörige Hypothesen deshalb nicht bestätigt werden konnten (siehe Tabelle 8.1). Des Weiteren könnte die hohe Anzahl an Fragen, die von den Teilnehmern für jede Eingabemethode zu beantworten waren, dazu geführt haben, dass deren Aufmerksamkeit nachließ und Fragen teilweise nicht sorgfältig und durchdacht genug bearbeitet wurden. Teilweise spiegelt sich in den Antworten auch die Sympathie zu einer Eingabemethoden wider, indem von bestimmten Teilnehmern zu der jeweiligen Eingabemethode alle Fragen positiv bewertet wurden, obwohl bei gewissen Gesichtspunkten eine andere Bewertung erwartet worden wäre. Die Studie sollte zunächst dazu dienen, sich einen Überblick über das Themengebiet der Eingabe diskreter numerischer Werte in VR zu verschaffen, und eine Grundlage für weitergehende Studien legen.

Einfluss von haptischen Feedback bei Diskrepanz

Neben der bereits besprochenen Problematik des explorativen Studiendesigns und der damit verbundenen Schwierigkeit, einzelne Faktoren isoliert zu untersuchen, legen die Ergebnisse hinsichtlich der Zufriedenheit der Gesamtrückmeldung bei der Eingabemethode **On Hand** eine weitere Vermutung nahe. Demnach könnte eine Ursache der schlechteren Bewertung der Gesamtrückmeldung in der Diskrepanz zwischen real und virtuell liegen. Bisherige Arbeiten und Untersuchungen in diesem Gebiet zeigten, dass der Einsatz von haptischem Feedback grundsätzlich das Benutzererlebnis bereichert. In dem Fall einer zu hohen Diskrepanz könnte die Integration von Haptik jedoch die Wahrnehmung und das Benutzererlebnis im Vergleich zum Einsatz keiner Haptik womöglich verschlechtern.

	Hypothese	Bestätigt
H2.1	Die Interaktion bei Proxy wird auf Grund der Vertrautheit der einseitigen natürlichen Haptik und der äquivalenten analogen Eingabemethode im Alltag als sehr natürlich wahrgenommen.	ja
H2.2	Die Interaktion bei Head-Gaze wird als unnatürlich wahrgenommen.	ja
H2.3	Die Immersion ist bei den Eingabemethoden In Air , In Air on Controller , Proxy und On Hand auf Grund der visuellen Wahrnehmung der eigenen Arme stärker als bei Controller und Head-Gaze [68].	partial
H2.4	Die Rückmeldung bei Proxy ist auf Grund der natürlichen Haptik zufriedenstellender als bei In Air .	(ja)
H2.5	Die Rückmeldung bei On Hand ist auf Grund der zweiseitigen Haptik zufriedenstellender als bei Proxy .	nein
H2.6	Die Eingabemethoden, deren Interaktion beide Hände benötigen, sind anstrengender als die übrigen.	(ja)
H2.7	Alle Eingabemethoden erreichen einen guten SUS-Score von mindestens 71,4 Punkten [69].	partial
H2.8	Bei Controller verwenden die Benutzer primär eine der beiden Interaktionsmöglichkeiten.	ja

Tabelle 8.1: Übersicht über die Hypothesen der Hauptstudie und deren Bestätigungen aus den Ergebnissen des Experiments. Eingeklammerte Bestätigungen sind darauf zurückzuführen, dass die zugehörigen Ergebnisse nicht signifikant ausfielen. Bei einer partialen Bestätigung konnte die Hypothese nicht für alle involvierten Eingabemethoden bestätigt werden.

Kriterium	In Air	In Air on Controller	Proxy	On Hand	Controller	Head-Gaze
Eingabezeit (sec)	5,86	6,62	7,2	13,46	5,73	6,07
Erfolgsrate (%)	96,74	99,28	97,83	99,28	98,91	98,55
#Korrekturen	1,17	1,52	1,35	4,43	0,83	0,61
Präferenz-Score (0-115)	56	56	59	38	79	57
SUS-Score (0-100)	85	76,74	74,57	53,8	82,83	77,28
Spaß (1-7)	5,22	4,7	4,43	4,3	5,57	5,43
Anstrengung (1-7)	2,83	3,61	3,26	5,13	2,22	3,3
Rückmeldung (1-7)	4,87	5,13	5,57	4,83	5,74	5,83
Immersion (1-7)	4,96	4,35	5,3	4,35	4,48	3,74
Natürlichkeit (1-7)	5,22	4,04	5,09	4,35	4,57	3,83

Tabelle 8.2: Übersicht der Ergebnisse der Hauptstudie. Bis auf den Präferenz-Score sind die Durchschnittswerte angegeben. Auf die Angabe der Standardabweichung wurde aus Übersichtsgründen verzichtet.

Weiterentwicklung der Eingabemethode „On Hand“

Neben den beobachteten Schwierigkeiten einiger Teilnehmer bei der Verwendung der Eingabemethode **On Hand**, zeigen die Ergebnisse jedoch auch, dass mit der aktuellen Umsetzung auch effizient Eingaben getätigt werden konnten und die Eingabemethode sogar von manchen Teilnehmern favorisiert wurde. Darüber hinaus lässt sich auch aus den subjektiven Rückmeldungen der Teilnehmer, die die derzeitige Umsetzung noch negativ bewerteten, darauf schließen, dass es erstrebenswert ist, die Entwicklung und die Verbesserung der Eingabemethode weiter zu verfolgen und weitere Untersuchungen anzustellen.

Aktuelle Eingabeempfehlung für mobiles Industrieszenario

Ausgehend von der Motivation des Einsatzes von VR in der Industrie und der sich daraus ergebenden Ziele dieser Thesis (siehe Kapitel 1), lässt sich auf Grundlage der aktuellen Technologie und mit dem aktuellen Stand der Umsetzung der vorgestellten Eingabemethoden eine Empfehlung für das Einsetzen der Eingabemethode **In Air** aussprechen. Diese Eingabemethode erfüllt die aufgestellten Kriterien für den mobilen Einsatz innerhalb diesen Kontextes, und die aktuelle Umsetzung ist hinzu stabil genug, um produktiv eingesetzt zu werden. Ferner ist Tabelle 8.2 zu entnehmen, dass **In Air** hinsichtlich mehrerer untersuchter Kriterien sehr gut abschnitt.

Kapitel 9

Zusammenfassung und Ausblick

In diesem letzten Kapitel wird die Thesis zusammengefasst und Empfehlungen für zukünftige Arbeiten ausgesprochen.

9.1 Zusammenfassung

Zunächst wird der Bezug zu den in Abschnitt 1.2 aufgestellten Zielen hergestellt und beschrieben, wie diese im Rahmen dieser Arbeit realisiert wurden. Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen der Hauptstudie werden anschließend separat zusammengefasst.

9.1.1 Ziele

Exploration von Eingabemethoden für diskrete numerische Werte

Auf Grund der (vor allem im industriellen Kontext) hohen Relevanz der Eingabe numerischer Werte in VR, wurden hierfür unterschiedliche Eingabemethoden exploriert. Hierbei wurden sechs Eingabemethoden für diskrete numerische Werte implementiert, die unter anderem unterschiedliche Arten haptischer Rückmeldung verwenden: keine Haptik, aktive Haptik (Vibration), einseitige passive Haptik und zweiseitige passive Haptik. Außerdem wurden Eingabemethoden betrachtet, bei denen das Interface fest im Raum fixiert ist, und Lösungen, bei denen sich das Eingabefeld dynamisch bewegen lässt. Des Weiteren wurden mit der Controller-basierten Methode (**Controller**) und der Eingabe über die Blickrichtung (**Head-Gaze**) bereits etablierte Eingabeverfahren berücksichtigt. Bei den anderen Eingabemethoden interagiert der Benutzer über seine Hände (die in VR repräsentiert werden) direkt mit dem Eingabefeld.

Konzeption einer Eingabemethode für den industriellen Einsatz

Mit **On Hand** wurde eine handbasierte Eingabemethode entwickelt, deren Interaktion keine zusätzliche Hardware voraussetzt, welche den Benutzer in der Freiheit seiner Hände oder seiner Bewegung einschränken könnte. Zudem verfügt diese Eingabemethode über doppelseitige haptische Rückmeldung vom berührenden Zeigefinger und der berührten Stelle auf der Handfläche. In der Konzeptionsphase der Eingabemethode wurde das Design des Interfaces auf der Handfläche bestimmt und in einer zugehörigen Studie relevante Fragestellungen in Bezug auf das Layout und die Handausrichtung untersucht. Dabei stellte sich heraus, dass die diagonale Handausrichtung als am wenigsten anstrengend empfunden und die Anordnung der Tasten in einem Ziffernblock mit aufsteigender Nummerierung bevorzugt wird.

Experimentelle Untersuchung der Eingabemethoden

Die im Rahmen dieser Arbeit implementierten Eingabemethoden wurden in einer experimentellen Studie anhand eines industriellen Anwendungsfalls untersucht und miteinander verglichen. Hierfür wurde der Einfluss unterschiedlicher Arten haptischer Rückmeldung auf das Benutzererlebnis und die Immersion, der Spaß, die Anstrengung und die Natürlichkeit der Interaktion, die Usability, die Leistung und Effizienz sowie die Präferenzen der Benutzer untersucht. Die Ergebnisse der Studie werden im nächsten Abschnitt zusammengefasst.

9.1.2 Ergebnisse

Die auf die Leistung und Effizienz bezogenen Messdaten ergaben, dass mit allen Eingabemethoden korrekte und effiziente Eingaben getätigt wurden. Bei der Eingabemethode **On Hand** benötigten einige Teilnehmer jedoch auf Grund des **Diskrepanzproblems** für die Eingaben mehr Zeit, was sich in einer deutlich längeren Durchschnittszeit im Vergleich zu den anderen Eingabemethoden zeigte. Dennoch gaben die Teilnehmer an, bei der Eingabe Spaß zu haben. Die aufgetretenen Schwierigkeiten bei der Verwendung von **On Hand** führten allerdings dazu, dass für das Auslösen der Tasten teilweise mehrere Versuche benötigt wurden, was sich in einer deutlich höheren Anstrengung widerspiegelte. Diese setzte sich auch deutlich von der Anstrengung der Eingabemethode **In Air on Controller** ab, in deren Interaktion ebenfalls beide Hände involviert waren. Bei der Bewertung der Gesamtrückmeldung beim Auslösen einer Taste schnitt die doppelseitige passive Haptik bei **On Hand** schlechter ab als die nicht vorhandene Haptik bei **In Air**. Diese Auffälligkeit scheint jedoch im Zusammenhang mit dem **Diskrepanzproblem** zu stehen. Die Bewertungsergebnisse aller Eingabemethoden betreffend der Immersion waren fast identisch mit denen der Natürlichkeit. Hier erzielte die Eingabemethode **Head-Gaze** die schlechtesten Ergebnisse. Die Ergebnisse des SUS-Scores ergaben, dass **Controller** und **In Air** die beste Usability aufwiesen. Aus der persönlichen Rangordnung der Teilnehmer zeigte sich jedoch, dass die

Präferenz der Teilnehmer bei der Eingabemethode **Controller** lag, die auch im Vergleich zu **In Air** deutlich favorisiert wurde.

9.1.3 Schlussfolgerungen

Teilweise überraschende, beziehungsweise widersprüchliche Ergebnisse sind vermutlich auf das explorative Studiendesign zurückzuführen, durch welches spezifische Faktoren, beispielsweise die unterschiedlichen Typen der Haptik, nicht vollständig isoliert untersucht werden konnten. Die Bewertungsergebnisse der Zufriedenheit mit der Gesamtrückmeldung bei der Eingabemethode **On Hand** lassen darauf schließen, dass im Falle einer hohen Diskrepanz zwischen real und virtuell die Integration von Haptik im Vergleich zu keiner Haptik das Benutzererlebnis womöglich verschlechtert. Obwohl bei einigen Teilnehmern Probleme bei der Eingabe mit **On Hand** auftraten, ergaben die Ergebnisse und subjektiven Rückmeldungen jedoch, dass es erstrebenswert ist, die Entwicklung dieser Eingabemethode weiter zu verfolgen. Für den Einsatz einer Eingabemethode in industriellen VR-Anwendungen lässt sich derzeit eine Empfehlung für **In Air** aussprechen, welche die aufgestellten Anforderungen erfüllt und zudem in der Hauptstudie sehr gute Ergebnisse erzielte.

9.2 Empfehlungen für zukünftige Arbeiten

Zukünftige Arbeiten könnten sich mit der Weiterentwicklung der handflächenbasierten Eingabemethode (**On Hand**) befassen. Die Ergebnisse und Beobachtungen der Hauptstudie zeigen, dass bei dem verwendeten Trackingverfahren über die *Leap Motion* Probleme bestehen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht zufriedenstellend gelöst werden konnten. Dementsprechend sinnvoll wäre es auch, alternative Lösungsansätze, beispielsweise über eine am Handgelenk befestigte Tiefenkamera [72] oder Datenhandschuhe [73], zu verfolgen.

Diese Arbeit fokussierte sich zunächst auf die Eingabe diskreter numerischer Werte in VR. Eine wesentliche Thematik stellt allerdings auch die Eingabe kontinuierlicher numerischer Werte dar. Zukünftige Arbeiten könnten sich dieser Aufgabe widmen und mögliche Eingabemethoden explorieren. Hinsichtlich dieses Anwendungsfalls könnte auch das Interface der handflächenbasierten Eingabemethode (**On Hand**) angepasst, beziehungsweise notwendige Veränderungen an dieser Eingabemethode vorgenommen werden.

VR adressiert Anwendungsgebiete, insbesondere im Bereich Simulation und Training, die auf diese Weise von keiner vergleichbaren Technologie abgedeckt werden. Neben VR hat auch die verwandte Augmented Reality-Technologie sehr viel Potenzial im industriellen Kontext. Hier ist die Eingabe numerischer Werte ebenfalls ein wesentlicher Anwendungsfall. Zudem werden an die Interaktion vergleichbare Anforderungen gestellt, sodass die Entwicklung einer handflächenbasierten Eingabemethode für AR gleichermaßen empfehlenswert ist.

Anhang A

Fragenkatalog der Hauptstudie

Die folgenden Fragen wurden den Teilnehmern zu jeder Eingabemethode gestellt. Dabei gehören die ersten 10 Fragen zu der ins Deutsche übersetzten Version des SUS [71], wobei das Auftreten des Wortes „System“ mit „Eingabemethode“ ersetzt wurde. Die übrigen Fragen (11-15) wurden eigens aufgestellt, um den Spaß, die Anstrengung, die Zufriedenheit mit der Rückmeldung, die Immersion und die Natürlichkeit der Interaktion zu ermitteln.

1. Ich denke, dass ich die Eingabemethode gerne häufig benutzen würde.

stimme	1	2	3	4	5	
überhaupt nicht	☐	☐	☐	☐	☐	stimme voll zu
zu						

2. Ich fand die Eingabemethode unnötig komplex.

stimme	1	2	3	4	5	
überhaupt nicht	☐	☐	☐	☐	☐	stimme voll zu
zu						

3. Ich fand die Eingabemethode einfach zu benutzen.

stimme	1	2	3	4	5	
überhaupt nicht	☐	☐	☐	☐	☐	stimme voll zu
zu						

4. Ich glaube, ich würde die Hilfe einer technisch versierten Person benötigen, um die Eingabemethode benutzen zu können.

stimme	1	2	3	4	5	
überhaupt nicht	☐	☐	☐	☐	☐	stimme voll zu
zu						

5. Ich fand, die verschiedenen Funktionen in dieser Eingabemethode waren gut integriert.

stimme	1	2	3	4	5	
überhaupt nicht	☐	☐	☐	☐	☐	stimme voll zu
zu						

6. Ich denke, die Eingabemethode enthielt zu viele Inkonsistenzen.

stimme	1	2	3	4	5	
überhaupt nicht	☐	☐	☐	☐	☐	stimme voll zu
zu						

7. Ich kann mir vorstellen, dass die meisten Menschen den Umgang mit dieser Eingabemethode sehr schnell lernen.

stimme	1	2	3	4	5	
überhaupt nicht	☐	☐	☐	☐	☐	stimme voll zu
zu						

8. Ich fand die Eingabemethode sehr umständlich zu nutzen.

stimme	1	2	3	4	5	
überhaupt nicht	☐	☐	☐	☐	☐	stimme voll zu
zu						

9. Ich fühlte mich bei der Benutzung der Eingabemethode sehr sicher.

stimme	1	2	3	4	5	
überhaupt nicht	☐	☐	☐	☐	☐	stimme voll zu
zu						

10. Ich musste eine Menge lernen, bevor ich anfangen konnte die Eingabemethode zu verwenden.

stimme	1	2	3	4	5	
überhaupt nicht	☐	☐	☐	☐	☐	stimme voll zu
zu						

11. Ich empfand die Bedienung als ...

überhaupt nicht anstrengend 1 2 3 4 5 6 7 sehr anstrengend

12. Wie zufriedenstellend fandest du die Gesamtrückmeldung beim Auslösen einer Taste?

überhaupt nicht zufriedenstellend 1 2 3 4 5 6 7 sehr zufriedenstellend

13. Ich empfand die Bedienung als ...

[illegible]

14. Ich hatte viel Spaß bei der Eingabe.

stimme	1	2	3	4	5	6	7	
überhaupt nicht	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐	stimme voll zu
zu								

15. Wie stark war dein Immersionsgefühl (das heißt das Gefühl, tatsächlich Zahlen in einer Produktionshalle eingegeben zu haben)?

[illegible]

Abbildungsverzeichnis

1.1	Illustration eines Benutzers, der in <i>Virtual Reality</i> durch Handgesten die Form eines virtuellen Würfels manipuliert. Hierbei sieht er virtuelle Repräsentationen seiner eigenen Hände [5].	2
1.2	Vision der VR-Technologie aus dem Science-Fiction Film <i>Johnny Mnemonic</i> (1995) (Quelle: youtube.com, Abrufdatum: 27. März 2017).	3
1.3	Bild des ersten <i>Oculus Rift Development Kits</i> (Quelle: wikipedia.org, Abrufdatum: 27. März 2017).	4
1.4	Bild eines Benutzers der <i>Oculus VR</i> während der Interaktion mit den zugehörigen <i>Oculus Touch</i> -Controllern (Quelle: fortune.com, Abrufdatum: 27. März 2017).	5
1.5	Bild eines Benutzers eines stabförmigen <i>Proxy</i> -Objekts, welches in der virtuellen Welt durch einen gehaltenen hölzernen Ast repräsentiert wird [25].	7
1.6	Beispiel einer industriellen virtuellen Umgebung. Das Bild stammt aus einer Arbeit [31] aus dem Jahr 2007, weshalb der niedrige Detailgrad und die Auflösung nicht dem fortgeschrittenen Stand aktueller Anwendungen entspricht.	8
2.1	Gegenüberstellung des Reality-Virtuality Kontinuum und des Extent of World Knowledge Kontinuum [37].	12
2.2	Definition von Mixed Reality im Kontext des Reality-Virtuality Kontinuum [37].	12
2.3	Bilder des haptischen Systems von Scheggi et al. [39], das dem Benutzer taktile Rückmeldung beim Berühren eines virtuellen Objekts liefert.	14
2.4	Bilder des <i>Passive Haptic Kitchen</i> von Insko [20].	15
2.5	Bild der <i>Haptic Hand</i> von Kohli et al. [40].	16
2.6	Hybrides haptisches VR-System von Borst und Volz [24].	17
2.7	Bilder des <i>OmniTouch</i> -Systems [45].	18
2.8	Bilder des <i>SkinInput</i> -Systems [48].	19
2.9	Illustration der Übertragung der Bedienung eines realen Interfaces auf die eines korrespondierenden <i>Imaginary Interfaces</i> [52].	20
2.10	Ergebnisse der Studie von Dezfuli et al. [54], ein <i>Imaginary Interface</i> auf der Handfläche für die Bedienung eines Fernsehers.	21

2.11	Bild des <i>Hovercast VR-Interfaces</i> [56].	22
2.12	Bild des am Arm befestigten VR-Interfaces der <i>Leap Motion</i> -Anwendung <i>Planetarium</i> [58] (Quelle: blog.leapmotion.com , Abrufdatum: 27. März 2017).	22
2.13	Zwei verschiedene Darstellungen bei der selektiven Auswahl einzelner Ziffern aus der Arbeit von Mine [59].	23
2.14	Eingabemethode für numerische Werte in VR von Rorke und Bangay [60] mit beweglichem Eingabefeld.	24
2.15	Eingabemethode von Chen et al. [61] zur Eingabe numerischer Werte bei der Konstruktion zusammengesetzter virtueller Objekte in VR.	25
2.16	Von Lepouras [62] entwickelte, gestenbasierte Eingabemethoden für numerische Werte in VR.	26
3.1	Illustration des Konzepts des Handflächenbasierten Interfaces. . .	30
3.2	In der Vorstudie betrachtete Handausrichtungen.	31
3.3	Zwei gängige Nummerierungen von Zifferntasten.	32
3.4	Prototypen zur Bestimmung der Handausrichtung.	33
3.5	Prototypen zur Bestimmung der Tastenanordnung und Ziffernnummerierung.	35
3.6	Bild aus Teilnehmersicht im Experiment der Vorstudie während der Eingabe einer negativen Ganzzahl mit dem Handschuhprototypen P1.1	37
3.7	Durchschnittliche Bewertung der Anstrengung der Handschuhprototypen zur Bestimmung der Handausrichtung auf einer Likert-Skala (1-5) mit 95 % Konfidenzintervallen.	38
3.8	Durchschnittliche Gesamtbewertung der Handschuhprototypen zur Bestimmung der Handausrichtung auf einer Likert-Skala (1-5) mit 95 % Konfidenzintervallen.	39
3.9	Durchschnittliche Bewertung der Anstrengung der Handschuhprototypen zur Bestimmung der Tastenanordnung und -nummerierung auf einer Likert-Skala (1-5) mit 95 % Konfidenzintervallen.	40
3.10	Durchschnittliche Gesamtbewertung der Handschuhprototypen zur Bestimmung der Tastenanordnung und -nummerierung auf einer Likert-Skala (1-5) mit 95 % Konfidenzintervallen.	42
3.11	Handschuhprototyp mit dem finalen Layout des handflächenbasierten Interfaces.	43
4.1	Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit In Air	46
4.2	Zustände einer Eingabetaste.	46

4.3	Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit In Air on Controller	47
4.4	Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit Proxy	48
4.5	Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit On Hand	48
4.6	Ansicht des Controllers (1 – Button, 2 – klickbares Touchpad). . .	49
4.7	VR-Keyboard von <i>SteamVR</i> [66].	50
4.8	Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit Controller durch <i>Pointing</i>	50
4.9	Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit Controller mit dem Touchpad. . .	51
4.10	Gegenüberstellung der virtuellen Ansicht (links) und der realen (rechts) bei der Eingabe mit Head-Gaze	52
5.1	Bild der an der <i>HTC Vive</i> befestigten <i>Leap Motion</i> -Kamera.	54
5.2	Ansicht auf die beiden <i>Box Colliders</i> einer Taste.	55
5.3	Verlauf der Beschleunigungsdaten der Smartwatch am linken Arm beim Tippen mit dem rechten Zeigefinger auf der linken Hand. . .	60
5.4	Ausrichtung der Achsen des Beschleunigungsmessers am Arm des Benutzers.	60
5.5	Charakteristiken in dem Verlauf der z-Beschleunigung.	62
5.6	Bild des <i>Proxy</i> -Objekts (1 – <i>HTC Vive</i> Controller, 2 – Tablet, 3 – Staffelei, 4 – Halterung für Tablet, 5 – Abdeckung für Staffelei) . .	63
5.7	Architekturübersicht der involvierten Hardware- und Softwarebestandteile.	64
6.1	Bild des Aufbaus des Experiments während ein Teilnehmer mit In Air interagiert.	67
6.2	Bild einer Teilnehmerin während der Eingabe mit On Hand . Im Hintergrund ist zu sehen, wie sie während des Experiments beaufsichtigt wurde.	67
6.3	Selbst konstruierte <i>Unity3D</i> -Szene, die als industrielle Umgebung für die Hauptstudie diente.	69
6.4	Segmentanzeige an der fünften Station der Szene.	69
6.5	Teilnehmer beim Beantworten einer Bewertungsfrage auf Likert-Skala mit der Eingabemethode On Hand	70
7.1	Häufigkeit der Eingabe numerischer Werte im Alltag oder Beruf in den Kategorien „oft“, „gelegentlich“, „selten“ und „nie“. . . .	74

7.2	Histogramm über die durchschnittliche Eingabezeit bei der Eingabemethode On Hand	76
7.3	Durchschnittliche Eingabezeit pro Eingabeaufgabe mit 95 % Konfidenzintervallen.	76
7.4	Verlauf der durchschnittlichen Eingabezeit pro Eingabeaufgabe über alle 12 Eingabeaufgaben hinweg.	77
7.5	Vergleich der durchschnittlichen Eingabezeit und der durchschnittlichen Interaktionszeit pro Eingabeaufgabe mit 95 % Konfidenzintervallen.	78
7.6	Durchschnittliche Anzahl von Korrekturen über alle 12 Eingaben mit 95 % Konfidenzintervallen.	80
7.7	Verteilung der Eingabemethoden auf die jeweiligen persönlichen Ränge (1-6).	82
7.8	Ausgewertete Gesamtbewertung der Eingabemethoden aus der persönlichen Rangordnung. Die Bewertung ergibt sich aus einer linearen Gewichtung der Ränge. Die maximale Gesamtpunktzahl beträgt 115 Punkte.	83
7.9	Durchschnittlicher SUS-Score mit 95 % Konfidenzintervallen. . .	84
7.10	Durchschnittliche Bewertung des Spaßes auf einer Likert-Skala (1-7) mit 95 % Konfidenzintervallen.	86
7.11	Durchschnittliche Bewertung der Anstrengung der Bedienung auf einer Likert-Skala (1-7) mit 95 % Konfidenzintervallen.	87
7.12	Durchschnittliche Bewertung der Zufriedenheit mit der Gesamtrückmeldung beim Auslösen einer Taste auf einer Likert-Skala (1-7) mit 95 % Konfidenzintervallen.	88
7.13	Durchschnittliche Bewertung des Immersionsgefühls während der Eingabe auf einer Likert-Skala (1-7) mit 95 % Konfidenzintervallen.	89
7.14	Durchschnittliche Bewertung der Natürlichkeit der Bedienung auf einer Likert-Skala (1-7) mit 95 % Konfidenzintervallen.	90
7.15	Anteil der verwendeten Interaktionsmöglichkeit beim Auslösen einer Taste bei der kombinierten Controller -Eingabemethode. . .	92

Tabellenverzeichnis

3.1	Eingabeaufgaben der Vorstudie bestehend aus 4 unterschiedlichen Aufgaben pro Aufgabensatz, davon jeweils eine 5-stellige Ganzzahl, eine 4-stellige Fließkommazahl, eine 4-stellige negative Ganzzahl und eine 3-stellige Ganzzahl, deren letzte Ziffer anschließend an die Eingabe zu korrigieren war.	36
3.2	Signifikant ausgefallene Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für die durchschnittliche Bewertung der Anstrengung der Prototypen zur Bestimmung der Handausrichtung. Für alle Tests gilt $N = 6$, $\alpha = 0,05$	39
3.3	Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für die durchschnittliche Bewertung der Anstrengung der Prototypen zur Bestimmung der Tastenanordnung und -nummerierung. Es sind die Fälle aufgeführt, in denen eine Signifikanz bei Nichtanpassung des Signifikanzwertes aufgetreten ist. Für alle Tests gilt $N = 6$, $\alpha = 0,05$	41
4.1	Gegenüberstellung aller sechs umgesetzten Eingabemethoden unter den Gesichtspunkten der Integration der Hände, der Einbeziehung des Controllers in die Interaktion, der Fixierung des Interfaces im Raum und der haptischen Rückmeldung.	52
6.1	Eingabeaufgaben der Hauptstudie bestehend aus 12 unterschiedlichen Aufgaben pro Station, davon jeweils vier 5-stellige Ganzzahlen, vier 4-stellige negativen Ganzzahlen und vier 4-stellige Fließkommazahlen. Die Aufgaben wurden in der Reihenfolge von oben nach unten gestellt.	72
7.1	Deskriptive Statistiken über die durchschnittliche Eingabezeit pro Eingabeaufgabe in Sekunden.	75
7.2	Signifikant ausgefallene Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für die durchschnittliche Eingabezeit pro Eingabeaufgabe. Für alle Tests gilt $N = 23$, $\alpha = 0,05$	77
7.3	Deskriptive Statistiken über die durchschnittliche Interaktionszeit pro Eingabeaufgabe und der Differenz zu der Eingabezeit in Sekunden.	79
7.4	Deskriptive Statistiken über die Summe der Fehler aller Teilnehmer und die Erfolgsrate.	79

7.5	Deskriptive Statistiken über die höchste Anzahl an Korrekturen bei einer einzelnen Eingabeaufgabe und der Summe von allen 12 Eingaben.	80
7.6	Signifikant ausgefallene Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für die durchschnittliche Summe von Korrekturen. Für alle Tests gilt $N = 23$, $\alpha = 0,05$	81
7.7	Deskriptive Statistiken über den SUS-Score.	83
7.8	Signifikant ausgefallene Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für den durchschnittlichen SUS-Score. Für alle Tests gilt $N = 23$, $\alpha = 0,05$	84
7.9	Signifikant ausgefallene Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für die durchschnittliche Bewertung der Anstrengung der Bedienung. Für alle Tests gilt $N = 23$, $\alpha = 0,05$	86
7.10	Ergebnisse der paarweisen Dunn-Bonferroni-Tests (2-seitig) für die durchschnittliche Bewertung der Natürlichkeit der Bedienung für die Fälle, in denen eine Signifikanz bei Nichtanpassung des Signifikanzwertes aufgetreten ist. Für alle Tests gilt $N = 23$, $\alpha = 0,05$	90
8.1	Übersicht über die Hypothesen der Hauptstudie und deren Bestätigungen aus den Ergebnissen des Experiments. Eingeklammerte Bestätigungen sind darauf zurückzuführen, dass die zugehörigen Ergebnisse nicht signifikant ausfielen. Bei einer partialen Bestätigung konnte die Hypothese nicht für alle involvierten Eingabemethoden bestätigt werden.	103
8.2	Übersicht der Ergebnisse der Hauptstudie. Bis auf den Präferenz-Score sind die Durchschnittswerte angegeben. Auf die Angabe der Standardabweichung wurde aus Übersichtsgründen verzichtet.	104

Algorithmenverzeichnis

- 1 Vorgehen zum Selektieren und Auslösen einer Eingabetaste bei den handbasierten Eingabemethoden. Die beiden *Box Colliders* sind so angeordnet, dass die *Up-Direction* der *Transform*-Komponenten parallel zu der Taste in Richtung Benutzer zeigt. 56
- 2 Algorithmus zum Erkennen des Tippens des Zeigefingers auf der Hand. 61

Abkürzungsverzeichnis

α

Signifikanzniveau

AR

Augmented Reality

AV

Augmented Virtuality

CSV

Comma Separated Values

Diff

Differenz

EWK

Extent of World Knowledge

GUI

Graphical User Interface

HMD

Head Mounted Display

M

Mittelwert

Max

Maximum

Min

Minimum

MR

Mixed Reality

N

Stichprobengröße

P

Signifikanzwert

P_{korrigiert}

Bonferroni-korrigierter Signifikanzwert

PC

Personal Computer

RGB

Red, Green, Blue

RV

Reality-Virtuality

SD

Standardabweichung (standard deviation)

SUS

System Usability Scale

VR

Virtual Reality

VRC

Virtual Remote Control

WIMP

Windows, Icons, Menus, Pointer

z

Standardteststatistik

Literaturverzeichnis

- [1] Springer Gabler Verlag: *Gabler Wirtschaftslexikon*, Stichwort: *Personal Computing*. <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/76244/personal-computing-v10.html>, 2017. – [Online; Abrufdatum 27. März 2017]
- [2] LEHMAN, John: Personal Computing vs. Personal Computers. In: *Proceedings of the Twenty-first Annual Conference on Computer Personnel Research*, 1985, S. 97–102
- [3] SRINIVASAN, Mandayam A. ; BASDOGAN, Cagatay: Haptics in virtual environments: taxonomy, research status, and challenges. In: *Computers & Graphics* 21 (1997), Nr. 4, S. 393–404
- [4] DORABJEE, Rohann ; BOWN, Oliver ; SARKAR, Somwrita ; TOMITSCH, Martin: Back to the Future: Identifying Interface Trends from the Past, Present and Future in Immersive Applications. In: *Proceedings of the Annual Meeting of the Australian Special Interest Group for Computer Human Interaction*, 2015 (OzCHI '15), S. 540–544
- [5] GERSHGORN, Dave: *Mobile Finger Gestures Will Supercharge Virtual Reality*. <http://www.popsci.com/leap-motion-wants-to-supercharge-mobile-virtual-reality>, Februar 2016. – [Online; Abrufdatum 27. März 2017]
- [6] *Brockhaus: Die Enzyklopädie*. 20. Auflage. Bibliographisches Institut der F.A. Brockhaus AG, 1998
- [7] ROBERTSON, George ; CZERWINSKI, Mary ; DANTZICH, Maarten van: Immersion in Desktop Virtual Reality. In: *Proceedings of the 10th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 1997, S. 11–19
- [8] Super Data Research: *Virtual Reality Industry Report 2016*. <https://www.superdataresearch.com/market-data/virtual-reality-industry-report>, Januar 2017. – [Online; Abrufdatum 27. März 2017]
- [9] WINGFIELD, Nick: *Sticker Shock, and Maybe Nausea, Hamper Sales of Virtual Reality Gear*. <https://www.nytimes.com/2017/01/08/business/sticker-shock-and-maybe-nausea-hamper-sales-of-virtual-reality-gear.html>, Januar 2017. – [Online; Abrufdatum 27. März 2017]

- [10] WEISER, Mark: The Computer for the 21st Century. In: *SIGMOBILE Mobile Computing and Communications Review* 3 (1999), Nr. 3, S. 3–11
- [11] VELICHKOVSKY, Boris ; SPRENGER, Andreas ; UNEMA, Pieter ; HOWARD, Steve (Hrsg.) ; HAMMOND, Judy (Hrsg.) ; LINDGAARD, Gitte (Hrsg.): *Towards gaze-mediated interaction: Collecting solutions of the "Midas touch problem"*. Springer US, 1997. – 509–516 S.
- [12] ZELEZNIK, Robert C. ; FORSBERG, Andrew S. ; SCHULZE, Jurgen P.: *Look-That-There: Exploiting Gaze in Virtual Reality Interactions*. 2005
- [13] CABRAL, Marcio C. ; MORIMOTO, Carlos H. ; ZUFFO, Marcelo K.: On the Usability of Gesture Interfaces in Virtual Reality Environments. In: *Proceedings of the 2005 Latin American Conference on Human-computer Interaction*, 2005 (CLIHIC '05), S. 100–108
- [14] KEHL, Roland ; VAN GOOL, Luc: Real-time Pointing Gesture Recognition for an Immersive Environment. In: *Proceedings of the Sixth IEEE International Conference on Automatic Face and Gesture Recognition*, 2004 (FGR' 04), S. 577–582
- [15] DJADO, Khalid ; CHAPDELAINE, Claude ; ST-CHARLES, Pierre-Luc ; DERENNE, Maxime: Gesture Interface for an Interactive Kiosk. In: *Proceedings of the 13th ACM SIGGRAPH International Conference on Virtual-Reality Continuum and Its Applications in Industry*, 2014 (VRCAI '14), S. 165–170
- [16] CHAPOULIE, Emmanuelle ; MARCHAL, Maud ; DIMARA, Evanthia ; ROUSOU, Maria ; LOMBARDO, Jean-Christophe ; DRETTAKIS, George: Evaluation of Direct Manipulation Using Finger Tracking for Complex Tasks in an Immersive Cube. In: *Virtual Reality* 18 (2014), Nr. 3, S. 203–217
- [17] BOWMAN, Doug ; MCMAHAN, Ryan P.: Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough? In: *Computer* 40 (2007), Nr. 7, S. 36–43
- [18] MARTIN, Néstor Andrés A. ; MITTELSTÄDT, Victor ; PRIEUR, Michael ; STARK, Rainer ; BÄR, Thomas: Passive Haptic Feedback for Manual Assembly Simulation. In: *Procedia CIRP* 7 (2013), S. 509 – 514
- [19] SIMEONE, Adalberto L. ; VELLOSO, Eduardo ; GELLERSEN, Hans: Substitutional Reality: Using the Physical Environment to Design Virtual Reality Experiences. In: *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2015, S. 3307–3316
- [20] INSKO, Brent E.: *Passive Haptics Significantly Enhances Virtual Environments*, Diss., 2001
- [21] MACLEAN, Karon E.: Designing with Haptic Feedback. In: *Symposium on Haptic Feedback in the Proceedings of IEEE Robotics and Automation* 1 (2000), S. 783–788

- [22] ZIAT, Mounia ; ROLISON, Taylor ; SHIRTZ, Andrew ; WILBERN, Daniel ; BALCER, Carrie A.: Enhancing Virtual Immersion Through Tactile Feedback. In: *Proceedings of the Adjunct Publication of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2014, S. 65–66
- [23] JIANG, Li ; CUTKOSKY, Mark R. ; GIROTRA, Rohit ; ULLRICH, Chris: Reducing Error Rates with Low-Cost Haptic Feedback in Virtual Reality-Based Training Applications. In: *Eurohaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems* (2005), S. 420–425
- [24] BORST, Christoph W. ; VOLZ, Richard A.: Preliminary Report on a Haptic Feedback Technique for Basic Interactions with a Virtual Control Panel. In: *EuroHaptics 2003 conference*, 2003, S. 1–13
- [25] ZENNER, André: *Investigating Weight Distribution in Virtual Reality Proxy Interaction*, Universität des Saarlandes, Masterarbeit, 2016
- [26] CHORAFAS, Dimitris N. ; STEINMANN, Heinrich: *Virtual Reality: Practical Applications in Business and Industry*. Prentice-Hall, Inc., 1995
- [27] PFROMMER, Julius ; SCHLEIPEN, Miriam ; USLÄNDER, Thomas ; EPPLE, Ulrich ; HEIDEL, Roland ; URBAS, Leon ; SAUER, Olaf ; BEYERER, Jürgen: Begrifflichkeiten um Industrie 4.0 – Ordnung im Sprachwirrwarr. In: 13. Fachtagung EKA 2014 – Entwurf komplexer Automatisierungssysteme Institut für Automation und Kommunikation e.V. (ifak), 2014
- [28] SCHAAR, Dirk: *Virtual Reality – Zentraler Bestandteil der Industrie 4.0*. <https://www.summer-of-engineering.de/virtual-reality-zentraler-bestandteil-der-industrie-4-0>, Juli 2016. – [Online; Abrufdatum 27. März 2017]
- [29] JÖNSSON, A. ; BATHELT, J. ; BROMAN, G.: Interacting with Real Time Simulations: Virtual Reality in Industry Applications. In: *Proceedings of the Workshop on Virtual Environments 2003*, 2003 (EGVE '03), S. 305–306
- [30] GENTY, A.: Virtual Reality for the Construction Industry, The CALLISTO-SARI Project, Benefits for BOUYGUES CONSTRUCTION. In: *Proceedings of the 2015 Virtual Reality International Conference*, 2015 (VRIC '15), S. 1–7
- [31] CECIL, Joe ; KANCHANAPIBOON, Atipol: Virtual engineering approaches in product and process design. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 31 (2007), Nr. 9, S. 846–856
- [32] PSOTKA, Joseph: Immersive training systems: Virtual reality and education and training. In: *Instructional Science* 23 (1995), Nr. 5, S. 405–431
- [33] ROSE, F. D. ; ATTREE, Elizabeth A. ; BROOKS, B. M. ; PARSLow, D. M. ; PENN, P. R. ; AMBIHAIPAHAN, Nagaratnam: Training in virtual environments: transfer to real world tasks and equivalence to real task training. In: *Ergonomics* 43 (2000), Nr. 4, S. 494–511

- [34] LI, Sophia ; HUANG, Yazhou ; TRI, Vinh-Sang ; ELVEK, Johan ; WAN, Samuel ; KJALLSTROM, Jan ; ANDERSSON, Nils ; JOHANSSON, Mats ; LEJERSKAR, Dan: Interactive Theater-sized Dome Design for Edutainment and Immersive Training. In: *Proceedings of the 2014 Virtual Reality International Conference*, 2014 (VRIC '14), S. 1–5
- [35] WYK, Etienne van ; VILLIERS, Ruth de: Virtual Reality Training Applications for the Mining Industry. In: *Proceedings of the 6th International Conference on Computer Graphics, Virtual Reality, Visualisation and Interaction in Africa*, 2009 (AFRIGRAPH '09), S. 53–63
- [36] BOWMAN, Doug A. ; KRUIJFF, Ernst ; LAVIOLA, Joseph J. ; POUPYREV, Ivan: *3D User Interfaces: Theory and Practice*. Addison Wesley Longman Publishing Co., Inc., 2004
- [37] MILGRAM, Paul ; COLQUHOUN JR., Herman: A Taxonomy of Real and Virtual World Display Integration. In: *International Symposium on Mixed Reality* (1999), S. 5–30
- [38] HOFFMAN, H. G.: Physically Touching Virtual Objects Using Tactile Augmentation Enhances the Realism of Virtual Environments. In: *Proceedings of the Virtual Reality Annual International Symposium*, IEEE Computer Society, 1998 (VRAIS '98), 59–63
- [39] SCHEGGI, Stefano ; MELI, Leonardo ; PACCHIEROTTI, Claudio ; PRATTICCHIZZO, Domenico: Touch the Virtual Reality: Using the Leap Motion Controller for Hand Tracking and Wearable Tactile Devices for Immersive Haptic Rendering. In: *ACM SIGGRAPH 2015 Posters*, 2015 (SIGGRAPH '15), S. 1
- [40] KOHLI, Luv ; WHITTON, Mary: The Haptic Hand: Providing User Interface Feedback with the Non-dominant Hand in Virtual Environments. In: *Proceedings of Graphics Interface 2005*, 2005, S. 1–8
- [41] HARRISON, Chris ; RAMAMURTHY, Shilpa ; HUDSON, Scott E.: On-body Interaction: Armed and Dangerous. In: *Proceedings of the Sixth International Conference on Tangible, Embedded and Embodied Interaction*, 2012 (TEI '12), S. 69–76
- [42] SURHONE, L.M. ; TIMPLEDON, M.T. ; MARSEKEN, S.F.: *WIMP Computing*. VDM Publishing, 2010 <https://books.google.de/books?id=m8SqCQAACAAJ>. – ISBN 9786130897581
- [43] SAPONAS, T. S.: Enabling Always-available Input: Through On-body Interfaces. In: *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2009 (CHI EA '09), S. 3117–3120

- [44] HARRISON, Chris ; FASTE, Haakon: Implications of Location and Touch for On-body Projected Interfaces. In: *Proceedings of the 2014 Conference on Designing Interactive Systems*, 2014 (DIS '14), S. 543–552
- [45] HARRISON, Chris ; BENKO, Hrvoje ; WILSON, Andrew D.: OmniTouch: Wearable Multitouch Interaction Everywhere. In: *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2011, S. 441–450
- [46] MISTRY, Pranav ; MAES, Pattie ; CHANG, Liyan: WUW - Wear Ur World: A Wearable Gestural Interface. In: *CHI '09 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2009 (CHI EA '09), S. 4111–4116
- [47] WILSON, Andrew D. ; BENKO, Hrvoje: 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*, 2010 (UIST '10), S. 273–282
- [48] HARRISON, Chris ; TAN, Desney ; MORRIS, Dan: Skinput: Appropriating the Body As an Input Surface. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2010 (CHI '10), S. 453–462
- [49] CHO, Changseok ; YANG, Huichul ; KIM, Gerard J. ; HAN, Sung H.: Body-Based Interfaces. In: *Multimodal Interfaces, IEEE International Conference on* (2002), S. 466
- [50] GUSTAFSON, Sean: Imaginary Interfaces: Touchscreen-like Interaction Without the Screen. In: *CHI '12 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, 2012 (CHI EA '12), S. 927–930
- [51] GUSTAFSON, Sean ; BIERWIRTH, Daniel ; BAUDISCH, Patrick: Imaginary Interfaces: Spatial Interaction with Empty Hands and Without Visual Feedback. In: *Proceedings of the 23Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2010 (UIST '10), S. 3–12
- [52] GUSTAFSON, Sean ; HOLZ, Christian ; BAUDISCH, Patrick: Imaginary Phone: Learning Imaginary Interfaces by Transferring Spatial Memory from a Familiar Device. In: *Proceedings of the 24th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*, 2011 (UIST '11), S. 283–292
- [53] GUSTAFSON, Sean G. ; RABE, Bernhard ; BAUDISCH, Patrick M.: Understanding Palm-based Imaginary Interfaces: The Role of Visual and Tactile Cues when Browsing. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, 2013 (CHI '13), S. 889–898
- [54] DEZFULI, Niloofar ; KHALILBEIGI, Mohammadreza ; HUBER, Jochen ; MÜLLER, Florian ; MÜHLHÄUSER, Max: PalmRC: Imaginary Palm-based Remote Control for Eyes-free Television Interaction. In: *Proceedings of the 10th European Conference on Interactive Tv and Video*, 2012, S. 27–34

- [55] ZACH, Kinstner: *Control the world – from the palm of your hand*. <https://community.leapmotion.com/t/hovercast-vr-menu-a-hand-based-menu-for-leap-vr/2402>, Januar 2015. – [Online; Abrufdatum 27. März 2017]
- [56] ZACH, Kinstner: *Hovercast VR Menu: Power at Your Fingertips*. <http://blog.leapmotion.com/hovercast-vr-menu-power-fingertips>, Februar 2015. – [Online; Abrufdatum 27. März 2017]
- [57] ZACH, Kinstner: *Hovercast VR Interface: A customizable menu interface for virtual reality applications*. <https://gallery.leapmotion.com/hovercast-vr-interface>, Dezember 2016. – [Online; Abrufdatum 27. März 2017]
- [58] PLEMMONS, Daniel: *Introducing Planetarium: The Design and Science Behind Our VR Widgets Showcase*. <http://blog.leapmotion.com/introducing-planetarium-design-science-behind-vr-widgets-showcase>, Februar 2015. – [Online; Abrufdatum 27. März 2017]
- [59] MINE, Mark R.: *Exploiting Proprioception in Virtual-Environment Interaction* / University of North Carolina. 1997. – Forschungsbericht
- [60] RORKE, Mike ; BANGAY, Shaun: *The Virtual Remote Control - An Extensible, Virtual Reality, User Interface Device*. In: *Proceedings of the South African M. & PhD. conference*, 1999, S. 39–43
- [61] CHEN, Jian ; BOWMAN, Doug A. ; WINGRAVE, Chadwick A. ; LUCAS, John F.: *Designing Explicit Numeric Input Interfaces for Immersive Virtual Environments* / Virginia Polytechnic Institute & State University. 2004. – Forschungsbericht
- [62] LEPOURAS, Georgios: *Numerical Input Techniques for Immersive Virtual Environments*. In: *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Virtual Environments, Human-Computer Interfaces and Measurement Systems*, 2009, S. 240–245
- [63] GEARY, David C. ; WILEY, Judith G.: *Cognitive addition: Strategy choice and speed-of-processing differences in gifted, normal, and mathematically disabled children*. In: *Developmental Psychology* 27 (1991), S. 249–269
- [64] SHERRINGTON, Charles S.: *ON THE PROPRIO-CEPTIVE SYSTEM, ESPECIALLY IN ITS REFLEX ASPECT*. In: *Brain* 29 (1907), Nr. 4, S. 467
- [65] TULLIS, Thomas ; ALBERT, William: *Measuring the User Experience: Collecting, Analyzing, and Presenting Usability Metrics*. 2. Ausgabe. San Francisco, CA, USA : Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2013. – ISBN 9780123735584
- [66] KUCHERA, Ben: *The HTC Vive Review*. <http://www.polygon.com/2016/4/5/11336864/the-htc-vive-review/>, April 2016. – [Online; Abrufdatum 27. März 2017]

- [67] HTC Corporation: *Empfohlene PC-Mindestanforderungen HTC Vive*. <https://www.vive.com/de/ready/>, 2016. – [Online; Abrufdatum 27. März 2017]
- [68] TECCHIA, Franco ; AVVEDUTO, Giovanni ; BRONDI, Raffaello ; CARROZZINO, Marcello ; BERGAMASCO, Massimo ; ALEM, Leila: I'M in VR!: Using Your Own Hands in a Fully Immersive MR System. In: *Proceedings of the 20th ACM Symposium on Virtual Reality Software and Technology*, 2014 (VRST '14), S. 73–76
- [69] BANGOR, Aaron ; KORTUM, Philip ; MILLER, James: Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale. In: *J. Usability Studies* 4 (2009), Nr. 3, S. 114–123
- [70] BROOKE, John: SUS: A quick and dirty usability scale. In: JORDAN, P. W. (Hrsg.) ; WEERDMEESTER, B. (Hrsg.) ; THOMAS, A. (Hrsg.) ; MCLELLAND, I. L. (Hrsg.): *Usability evaluation in industry*. London : Taylor and Francis, 1996
- [71] RUMMEL, Bernard: *System Usability Scale – jetzt auch auf Deutsch*. <https://experience.sap.com/skillup/system-usability-scale-jetzt-auch-auf-deutsch/>, Januar 2015. – [Online; Abrufdatum 27. März 2017]
- [72] SRIDHAR, Srinath ; MARKUSSEN, Anders ; OULASVIRTA, Antti ; THEOBALT, Christian ; BORING, Sebastian: WatchSense: On- and Above-Skin Input Sensing through a Wearable Depth Sensor. In: *Proceedings of ACM CHI*, 2017
- [73] MILLER, Sam ; SMITH, Andy ; BAHRAM, Sina ; ST. AMANT, Robert: A Glove for Tapping and Discrete 1D/2D Input. In: *Proceedings of the 2012 ACM International Conference on Intelligent User Interfaces*, 2012 (IUI '12), S. 101–104