



Greifen mit Handtracking in VR im Zusammenhang mit Interaktion und Kollision

Bachelorarbeit

Autor*in: Bjarne Zimmer

Betreuer*in: Markus Tatzgern

Repository: <https://gitlab.mediacube.at/fhs44428/mmt-bachelorarbeit>

Salzburg, Österreich, 30.04.2023

Kurzfassung

In der virtuellen Realität (VR) ist das Greifen von zentraler Relevanz, um eine realistische und immersivere Erfahrung zu schaffen, da es sich um eine natürliche und gewohnte Form der Interaktion handelt. Es gibt jedoch zahlreiche Herausforderungen, die es zu überwinden gilt, um ein befriedigendes Greiferlebnis zu ermöglichen. Dazu gehören die Art und Weise, mit der die Nutzer*In ihre Eingaben vornimmt, die entsprechende visuelle Darstellung sowie die Reaktion der VR-Anwendung.

Zu Beginn dieser Arbeit werden verschiedene Technologien des realistischen Greifens in VR diskutiert, einschließlich der Verwendung von Controllern, Handschuhen und Handtracking. Dabei werden unterschiedliche Ansätze aus Literatur und Anwendung näher betrachtet und ihre Vor- und Nachteile in den Bereichen Immersion, Presence und Kontrolle über die Manipulation von Objekten dargestellt.

Im Mittelpunkt dieser Arbeit steht die Frage nach einer realistischen Griffvariante ohne Nutzung spezifischer Hardware oder von Controllern. Das Greifen und Manipulieren von Objekten wurde in einer Nutzerstudie von Proband*Innen mittels vier verschiedener Greifsysteme an vier verschiedenen Gegenständen getestet. Die vier Methoden wurden unterschieden durch High- und Low-Intearctivity, bei der die Low-Variante basierend auf einem Unreal Engine Plugin und die High-Variante ein für diese Studie erdachtes System war, und High- und Low-Collision, welche sich durch die Genauigkeit der Kollision passend zur Form des gegriffenen Gegenstandes unterschieden. Die Tester*Innen verglichen die vier Systeme in den Bereichen Realismus, Presence, Frustration und Reaktion.

Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die höhere Form der Interaktion und eine genauere Kollision passend zum Objekt für stärkeren Realismus und eine höhere Presence sorgen. Zudem konnten sich die Tester*Innen durchweg vorstellen die HIHC-Variante in zukünftigen VR-Anwendungen zu nutzen.

Schlüsselwörter: Virtual Reality, Handtracking, Greifen, Interaktion

Abstract

In virtual reality (VR), gripping plays a central role in creating a more realistic and immersive experience, as it is a natural and familiar form of interaction. However, there are numerous challenges to overcome in order to enable a satisfying gripping experience, including the way users input their movements, the corresponding visual representation, and the response of the VR application.

At the beginning of this paper, various technologies for realistic gripping in VR are discussed, including the use of controllers, gloves, and hand tracking. Different approaches from the literature and applications are examined, and their advantages and disadvantages in the areas of immersion, presence, and control over object manipulation are presented.

The focus of this work is on the question of a realistic gripping variation without using specific hardware or controllers. Gripping and manipulating objects were tested in a user study by subjects using four different grip systems on four different objects. The four methods were distinguished by high and low interactivity, with the low variant based on an Unreal Engine plugin and the high variant a system designed specifically for this study, and high and low collision, which differed in the accuracy of the collision matching the shape of the grasped object. Testers compared the four systems in the areas of realism, presence, frustration, and reaction.

The results of the study showed that higher levels of interaction and more accurate collision matching the object led to stronger realism and higher presence. In addition, the testers consistently expressed their willingness to use the HIHC variant in future VR applications.

Keywords: Virtual reality, Handtracking, Grabbing, Interaction

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung	8
2 Related Work	9
2.1 Realismus und Immersion in VR	9
2.1.1 Handtracking in VR	12
2.1.2 Greifen in VR	14
3 System: Überblick und Ziele	16
3.1 Anwendung auf Basis eines Unreal Engine Plugins	17
3.2 Low-Interactivity-System	18
3.3 High-Interactivity-System	19
3.3.1 Konzept	20
3.3.2 Probleme	21
3.4 Erste Umsetzung	21
4 Testiterationen	22
4.1 Proof of Concept test	23
4.1.1 Erwartungen	23
4.1.2 Erkenntnisse	23
4.1.3 Evaluierung und Verbesserungen	24
4.2 Pilot Test	25
4.2.1 Erwartungen	26
4.2.2 Erkenntnisse	27
4.2.3 Evaluierung und Verbesserungen	27
4.3 Nutzerstudie	29
4.3.1 Erkenntnisse	31
5 Diskussion	34
6 Ausblick	36
Appendices	39
A git-Repository	39

B	Sudienmaterial	39
B.1	Studienanweisungen	39
B.2	Fragebogen	40
B.3	Einwilligungserklärung	41
B.4	Einwilligungserklärung	42
B.5	Einwilligungserklärung	43
C	Archived Websites	44

Abbildungsverzeichnis

1	Hoch und Niedrig aufgelöste Szenen in einer VR Umgebung (Newman u. a. 2022, 6)	11
2	Visualisierung der Finger Kollisionen (Oprea u. a. 2019, 4)	15
3	Die für den Test genutzten Objekte	17
4	Ein Beispiel für vorgegebene Handposen nach dem Greifen des Handtracking Plugins	18
5	Schwellenwert Einstellung vom Handtracking Plugin	19
6	Hinzufügen der Kollisionen zu den Fingerknochen	21
7	Das Tassen Modell für den Proof of Concept Test	22
8	Rotationsspeicherung eines Knochens nach dem Kollidieren mit einem greifbaren Gegenstand	24
9	Beispiel für einen Griff der Hantel nach der letzten Verbesserungsiteration mit der HIHC-Variante	25
10	Eine Seite des Aufbaus des Pilot Tests	25
11	Teleportation mittels des Zeigefingers	26
12	Beispielgriff für die Tasse nach den letzten Verbesserungen mit der HIHC-Variante	28
13	Rotationsberechnung und dementsprechende Visualisierung	28
14	Remap Funktionen für richtiges Verhalten der Fingerrotationen	29
15	Welche Variante überzeugte mit Realismus (1. Platz vier Punkte - 4. Platz einen Punkt)	31
16	Welche Variante führte zur höchsten presence?	31
17	Welche Variante führte zur meisten Frustration?	32
18	Welche Variante führte zu einer trägen Reaktion?	32
19	Welche Variante ist für Spiele am besten geeignet?	32
20	Ein Griff der Pfanne mit der LIHC-Variante nach dem Nachberechnen der Fingerpositionen nach dem Schließen der realen Hand zu einer Faust.	33
21	Ein Beispielgriff der Pfanne mit der HIHC-Variante	33

Abkürzungsverzeichnis

AP automatische Pose

CHT constrained hand technique

DHT disappearing hand technique

HC High Collision

HI High Interactivity

LC Low Collision

LI Low Interactivity

PHT penetrative hand technique

SP Simple Pose

VR Virtual Reality

1 Einleitung

Virtual Reality (VR) hat in den letzten Jahren eine immense Popularität erlangt und bietet eine einzigartige Möglichkeit, in eine virtuelle Welt einzutauchen, sie zu erleben und aktiv mit ihr zu interagieren. Eine äußerst immersive und interaktive Technologie in VR ist das Handtracking, das es den Benutzern ermöglicht, virtuelle Objekte zu greifen und zu manipulieren. Voigt-Antons u. a. (2020, 1) nennen die akkurate Darstellung von Handbewegungen einen essenziellen Teil der Nutzererfahrung in einer VR Anwendung. Durch neue und verbesserte Hardware wird das Tracken der Hände immer reibungsloser, realistischer und dadurch nutzbarer für Entwickler*innen. Das Nutzen der eigenen Hände ist für Menschen ein essentieller Teil von Bewegungsabläufen. Diese nicht einsetzen zu können ist ungewohnt und unbeholfen (Buckingham 2021, 2). Handtracking bietet daher eine gewohnte Form der Interaktion beziehungsweise der visuellen Darstellung von realen Bewegungen. Trotz der Weiterentwicklungen bleibt akkurate Handtracking in der VR Technologie eine Herausforderung. Hände sind anatomisch komplex und können sich zudem gleichzeitig bewegen und rotieren. Zusätzlich können die Hände durch andere Körperteile vor den Sensoren verdeckt werden, sodass sie nicht mehr getracked werden können (Jörg u. a. 2020, 6). Die Reaktionen der Anwendungen auf diese Interaktion mit der virtuellen Umgebung zeigt allerdings, dass sich die weitere Erforschung des Handtrackings lohnt (Buckingham 2021, 1).

Das Greifen ist eine grundlegende Form der Interaktion mit Objekten und spielt eine wichtige Rolle in vielen Anwendungen, wie z.B. Simulationen, Trainingsanwendungen und Virtual-Reality-Spielen(Liu u. a. 2019, 1). Die Erforschung von verschiedenen Möglichkeiten des Greifens in VR ist daher ein relevantes Thema, das die Entwicklung von effektiveren und realistischeren VR-Interaktionen vorantreiben kann. Aufgrund ihrer zunehmenden Beliebtheit haben sich VR-Anwendungen in den letzten Jahren in verschiedenen Lebensbereichen etabliert. Beispiele hierfür sind Ausbildung und Trainingssimulationen, welche seit 1966 bekannt sind (Kavanagh u. a. 2017, 1). Ebenso bekannt ist VR im Gesundheitswesen seit Beginn der 90er Jahre(Mazurek u. a. 2019, 2). Die Unterhaltungsindustrie hat starken Einfluss auf die Ausrichtung von VR-Anwendungen seit 1997 (Zyda 2005, 1). In all diesen Anwendungsbereichen können Handtracking und Greifen in der VR einen erheblichen Mehrwert bieten, indem sie eine immersive und realistische Erfahrung schaffen und gleichzeitig das Training oder die Durchführung von komplexen Aufgaben mittels effektiverer Interaktion erleichtern (Buckingham 2021, 2).

In dieser Bachelorarbeit wird das Greifen in VR mittels Handtracking untersucht. Es werden vier verschiedene Methoden des Greifens getestet und verglichen, um herauszufinden, welche Methode am effektivsten und effizientesten ist und welches Verfahren ein besseres und realistischeres Greifgefühl vermittelt. Zudem werden Proband*innen gefragt welche Variante sie in zukünftigen Anwendungen bevorzugen würden. Zunächst wird die Technologie des Handtrackings in VR erklärt und die verschiedenen Ansätze und Möglichkeiten des Greifens aufgezeigt. Anschließend werden die vier verschiedenen Methoden des Greifens vorgestellt und erläutert, wie sie funktionieren und welche Vor- und Nachteile sie haben. Eine Methode beinhaltet z.B. das Greifen basierend auf einem Unreal Engine Plugin mit vorgegebenen Griffposen, während eine andere Methode auf das natürliche Greifen mittels dynamischer Kollisionsberechnung und Position und Rotation der Hand setzt. Im nächsten Abschnitt wird die Methodik

der Studie beschrieben. Es werden die Teilnehmer und die verwendete Ausrüstung vorgestellt. Es wird auch erklärt, wie die Daten erhoben und ausgewertet wurden und welche statistischen Methoden verwendet wurden, um die Ergebnisse der Studie zu analysieren. Daraufhin wird das für die Studie geschriebene Programm erklärt und die einzelnen Verbesserungsiterationen beschrieben, die nötig waren, um einen fairen Vergleich zwischen den nutzbaren Methoden zu erhalten. Die Ergebnisse der Studie werden im darauffolgenden Abschnitt präsentiert und diskutiert. Eine der wichtigsten Erkenntnisse der Studie könnte möglicherweise sein, dass die natürliche Methode des Greifens mittels dynamischen Kollisionen, Positionen und Rotationen der Hand und der Finger einen höheren Grad an Presence und Realismus bietet als die Methode der vorgegebenen Griffposen. Die Studie könnte auch zeigen, dass die Wahl der Methode des Greifens von individuellen Faktoren, wie der persönlichen Präferenz oder der Erfahrung mit VR, abhängt. Abschließend werden die Schlussfolgerungen der Studie gezogen und die bedeutendsten Ergebnisse zusammengefasst. Es wird auch darauf hingewiesen, wie diese Ergebnisse eingesetzt werden können und welche künftigen Forschungsfragen sich aus ihnen ergeben. Insgesamt hat diese Bachelorarbeit das Ziel dazu beizutragen, das Verständnis für die Möglichkeiten und Grenzen des Greifens in VR mittels Handtracking zu erweitern. Die Ergebnisse dieser Studie können auch dazu beitragen, die Entwicklung von effizienten und realistischen VR-Programmen voranzutreiben und zu realisieren.

2 Related Work

Viele wissenschaftliche Studien zum Thema Handtracking und Greifen in der VR zeigen, dass das Verfolgen von Handbewegungen und das Greifen von virtuellen Objekten wichtige Aspekte von VR-Anwendungen sind, die mit verschiedenen Herausforderungen und Problemen verbunden sind. Es gibt viele Techniken und Methoden zur Erkennung von Handgesten und zum Greifen virtueller Objekte, die erforscht und verglichen worden sind, um die Benutzerfreundlichkeit von VR-Anwendungen zu verbessern. Laut Rogers (2021, 48) ist das Manipulieren virtueller Objekte, z.B. das Aufheben, Drücken oder Ziehen, eine der häufigsten Aufgaben in VR-Anwendungen. Deshalb ist Handtracking ein entscheidendes Thema, um möglichst realistische Interaktionen in der virtuellen Umgebung zu ermöglichen. Angesichts des wachsenden Interesses an modernen VR-Anwendungen und der damit verbundenen Forschung wird in den folgenden Abschnitten der aktuelle Stand der Forschung zum Thema Realismus, Handtracking und Greifen in der virtuellen Realität näher erläutert (Rogers 2021, 46f). Die Ergebnisse dieser Forschung können dazu beitragen, die Effektivität und Leistung von Handtracking-Systemen zu verbessern und eine realistische Interaktion mit der virtuellen Umgebung zu ermöglichen.

2.1 Realismus und Immersion in VR

VR ist eine Technologie, die es ermöglicht, eine virtuelle Umgebung zu erleben und in sie einzutauchen. Die Entwicklung von Handtracking-Systemen hat die Interaktion mit der virtuellen Welt verbessert, indem sie es den Benutzern ermöglicht, die Bewegungen ihrer Hände und Finger in Echtzeit zu verfolgen. Die Kombination von Handtracking und VR-Technologie

bietet ein hohes Maß an Realismus und Immersion, was eine natürlichere und intuitivere Interaktion mit der virtuellen Umgebung ermöglicht. Realismus ist ein wichtiger Faktor in der VR-Technologie, da er die Fähigkeit einer virtuellen Umgebung verbessert, eine natürliche Erfahrung zu bieten. Shafer, Carbonara und Korpi (2019, 1) beschreiben Realismus als die virtuelle Übersetzung von für die Nutzer*innen bereits bekannten Objekten. Neben dem Aussehen kann auch die Wahrnehmung ob es sich real anfühlt und anhört entscheidend für den Realismus sein. Ein weiterer wichtiger Teil des Realismus ist die Interaktion mit der Umgebung und die Möglichkeit, Gegenstände und Objekte in der Umgebung zu greifen und zu manipulieren. Handtracking ermöglicht es den Benutzern, diese Interaktionen auf eine natürliche und intuitive Weise durchzuführen, was zu einem höheren Maß an Realismus führt. Anhand der ersten Studie in der Arbeit von Newman u. a. (2022, 4f), in der das Erleben des Sitzens an einem See in VR, real und vor einem Bildschirm untersucht wird, wird visueller Realismus deutlich. Die Proband*innen gaben an, dass die virtuellen Erfahrungen an Duft und einer leichten natürlichen Brise fehlten, dennoch aber die VR Erfahrung deutlich mehr Presence aufwies als das reine Sitzen vor einem Bildschirm. In VR fühlt man sich dabei, vor einem Bildschirm nicht mehr als ein*e Zuschauer*in. Slater u. a. (2020, 4) geben in ihrer Arbeit allerdings zu bedenken, dass zu viel Realismus eine Überschneidung der Wirklichkeitsvorstellung zur Folge hat. So verschwimmt der Unterschied zwischen Realität und Illusion. Nutzer*innen reagieren realistisch auf Events in der VR. So setzen sie sich beispielsweise auf einen Stuhl in der visuellen Umgebung, welche in Wirklichkeit nicht existiert. Dies kann Schäden zur Folge haben. Superrealismus, eine bis zur Gänze ausgereifte Form des virtuellen Realismus, kann dementsprechend negative ethische Probleme aufweisen. Umgebungen mit starker Ortsillusion und Plausibilität können folgende negative Konsequenzen haben:

1. Unsicherheit von wahren und virtuellen Erfahrungen: Durch das Verbringen längerer Zeit in der VR kann der, durch das Headset ausgelöste, Unterschied verschwimmen und es kommt zur Vermischung von Events, die in der Realität und in der VR stattfinden
2. Falsche Zuschreibung von bestimmten Personengruppen: Negative Interaktionen mit einer bestimmten Art von Personen kann dazu führen, dass diese auch in Realität negativ betrachtet werden. So können Absichten und Hintergründe verallgemeinert und missverstanden werden.
3. Gefährliche Annahmen, die zu physischen Schäden führen können: Nutzer*innen führen physische Handlungen durch, die in die virtuelle Erfahrung eingebettet sind. Beispielsweise wird in VR beobachtet wie Menschen in einen Pool vor einem springen. Sobald ein*e Spieler*in dies ebenfalls versucht, landet sie auf hartem Boden.
4. Schwieriger Übergang zurück in die Realität: Intensive und Emotionale Erlebnisse in der virtuellen Realität können kognitive, emotionale oder Verhaltensstörung nach sich ziehen. Menschen sind nicht gut darin, Emotionen und Verhalten zu regulieren, weshalb häufige VR-Exposition in Superrealistischen Umgebungen beobachtet werden sollte.

Neben diesen persönlichen Problemen führt Superrealismus zum Verletzen der Privatssphäre. Die benötigten exakten Daten der Bewegung, Präferenzen und Position führen zu weiteren

ethischen Fragen verbunden mit Datenteilung und möglicher krimineller Nutzung privater Daten. Grundsätzlich führt Realismus zu höherer Effektivität von Spielen, Training, Lehre oder körperlicher und geistiger Rehabilitation. Sie fühlen sich natürlich an und funktionieren akkurater. Slater u. a. (2020, 11) empfiehlt für die Erstellung jeder VR-Applikation die Regel im Kopf zu behalten, ob man selbst diese Erfahrung machen wollen würde, ohne vorheriges Wissen oder Erklärung. (Slater u. a. 2020, 4ff,11)



Abbildung 1: Hoch und Niedrig aufgelöste Szenen in einer VR Umgebung (Newman u. a. 2022, 6)

dass das Level der Immersion neben anderen Faktoren abhängig von der visuellen Ausgabe in Relation zur realen Welt ist. Je ähnlicher sie sind desto höher der Grad der visuellen Immersion. Um diese zu steigern können mehrere Komponenten beachtet werden. Einige davon sind realistisches Licht, die Bildwiederholungsrate, die Aktualisierungsrate, die Stereoscopy (verschiedene Bilder, um Tiefe zu erzeugen), das Field of view (Größe des visuellen Sichtfeldes) und das Field of regard (Die Gesamtgröße in Grad, die ein*e Nutzer*in sehen kann). In dieser Arbeit nimmt Bowman und McMahan (2007, 3) die Interaktion noch aus der Immersion heraus, mittlerweile ist die wahrgenommene Interaktivität als Grad der Beherrschung eines VR Programms durch den*die Benutzer*in ein weiterer Faktor. Die Mechaniken und Stereogramschnittstellen haben dementsprechend einen großen Einfluss darauf, wie beispielsweise ein*e Spieler*in ein Spiel wahrnimmt (Shafer, Carbonara und Korpi 2019, 2). Daher kann Handtracking dazu beitragen, die Immersion in der virtuellen Umgebung zu verbessern, da es den Benutzern eine intuitive Möglichkeit bietet, mit der Umgebung zu interagieren. Die Immersion in VR wird auch nach Newman u. a. (2022, 2) durch mehrere Faktoren beeinflusst, darunter die visuelle Qualität, das Audioerlebnis, die Benutzerfreundlichkeit und die Interaktionsmöglichkeiten. Das Streben nach visuellem Realismus ist aussichtsreich, weil es zu einem stärkeren Gefühl der Immersion beiträgt. Je abstrakter die Umgebung ist, desto stärker fällt sie dem*der Nutzer*in

Ein weiterer wichtiger Faktor in der VR-Technologie ist die Immersion, die die Fähigkeit einer virtuellen Umgebung verbessert, eine Erfahrung zu bieten, in der sich die Nutzer*innen präsent fühlen. Presence ist in VR ein Ausdruck mit dem sich Spieler*innen als ein Teil der virtuellen Welt fühlen. Mit besserer und realistischerer Immersion steigt die Presence, welche nach Shafer, Carbonara und Korpi (2019, 1) die primäre Position in dem Bewusstsein eines*einerr Nutzer*in werden muss. Die Computergenerierte Umgebung übernimmt die reale Lokalität und wird zur erlebten Erfahrung. Bowman und McMahan (2007, 3) besagen in ihrer Arbeit über wie viel Immersion genug ist,

auf. Die Immersion hingegen zu stärken und den Unterschied zu Bekanntem zu minimieren führt nach Newman u. a. (2022, 2) zu einer lebendigen Welt auf die stärker reagiert wird. Dies wird deutlich in der zweiten Studie, welche Newman u. a. (2022, 6–10) durchgeführt hat. Sie ergab, dass höher aufgelöste und realistischere Szenen mehr positive Affekte, sowie mehr Gelassenheit hervorriefen, was zu einem höheren Maß an Presence geführt hat. In Anbetracht dieser Ergebnisse hat ein höherer Grad an visuellem Realismus eine positive Auswirkung auf die Wahrnehmung und die affektive Reaktion. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mehrere Faktoren eine wichtige Rolle bei der Verbesserung von Realismus und Immersion in VR spielt, darunter visuelle Darstellung und Interaktion. Durch die Möglichkeit, natürliche und intuitive Manipulationen der virtuellen Umgebung durchzuführen, wird die Immersion in der virtuellen Umgebung verbessert und eine realistischere Erfahrung geboten. Einige Literaturarbeiten, welche im folgenden besprochen werden, setzen sich näher mit Handtracking in VR auseinander. Im speziellen mit dem Greifen in VR, welches als eine kritische Interaktionsmöglichkeit gilt und damit möglichst realistisch umzusetzen versucht wird (Liu u. a. 2019, 1). Der Bezug auf diese Arbeiten und das Einbeziehen der Ergebnisse wird relevant für die Studie dieser Bachelorarbeit.

2.1.1 Handtracking in VR

Die eigenen Hände in einer virtuellen Realität zu nutzen, wird in den letzten Jahren zu einem immer größeren Thema. Doch trotz des Fortschritts in letzter Zeit bleibt das akkurate Tracking der Hände eine Herausforderung. Im speziellen ohne teures Equipment und in real time. Hände haben eine hohe Anzahl an degrees of freedom (Position und Rotation). Zudem sind sie relativ klein im Vergleich zum Körper und haben eine komplexe Anatomie. Zusätzlich können Teile der Hand von anderen Teilen der Hand verdeckt werden. Diese Gründe machen Handtracking zu einer schwierigen Aufgabe. (Jörg u. a. 2020, 6f)

Dass sich das Stellen dieser Aufgabe lohnt besagt die Arbeit von Buckingham (2021, 1), in welcher ein Programm in der virtuellen Realität stark von der Implementierung von Handtracking profitiert. In der realen Welt nutzen Menschen die Hände fast jede Minute. Sobald sie diese nicht oder nur beschränkt einsetzen können fühlen sich die Hände für die Nutzer*innen frustrierend unbeholfen an. In VR bietet das Handtracking drei potentielle Vorteile. Durch das Tracken durch Sensoren und Visualisieren der Hände in einer virtuellen Umgebung kommt es zu keiner Entkörperung, wodurch die sogenannte Presence steigt, welche zur Folge hat, dass ein*e Spieler*in deutlich mehr gefesselt ist. Der zweite Punkt, der für Handtracking in VR spricht ist die natürliche Interaktion, die durch die Hände ermöglicht wird. Dies steigert nicht nur die Immersion, sondern auch die Genauigkeit der Bewegungen des*der Nutzer*in. Zuletzt schafft Handtracking die Möglichkeit mittels Gesten zu kommunizieren. Nach Buckingham (2021, 2) ist nicht nur für den Zuhörer, sondern auch den Sprecher die Hände zu nutzen ein essentieller Faktor für eine kommunikative Erfahrung (Buckingham 2021, 1f). Voigt-Antons u. a. (2020, 1) unterstützen die These, dass ein essenzieller Teil der Nutzer*in Erfahrung die akkurate Repräsentation der Hände in einer virtuellen Umgebung. Dies wurde in Arbeiten im Bereich der Spieleindustrie ergründet, in denen der Fokus auf dem Erreichen von präzisem Handtracking durch verschiedene Sensoren lag. Dass nicht jedes VR-Headset in der Lage ist

bessere Ergebnisse zu liefern mit Handtracking als mit Controllern zeigt die Studie von Masurovsky u. a. (2020, 13). In dieser testen Proband*innen einen Prototypen systematisch mit einem extra für diesen Test angepasstes Handtracking System, einer vorhandenen Leap-Motion API und Controllern. Die Proband*innen gaben an, dass sie mit den Controllern am wenigsten Fehler, die beste Genauigkeit und Geschwindigkeit empfanden. Zudem waren die Controller am einfachsten zu nutzen für die Werte Präzision, Öffnen, Schließen, Komfort, und allgemeine Befriedigung. Dies stand im Widerspruch zu den Erwartungen der Ersteller*innen der Studie. Sie erwarteten durch die Möglichkeit der natürlichen Interaktionsgesten, dass die Proband*innen die Handtracking Systeme höher in Natürlichkeit und Intuitivität wären. Sie schlossen daraus, dass die technologischen Limitationen kein natürliches Übertragen der Handbewegung zulässt und damit der Realismus verloren geht. Selbst kleine Unterschiede zwischen der beabsichtigten Handbewegung des Benutzers und dem tatsächlichen Verhalten der virtuellen Hand können dementsprechend das Gefühl der Handlungsfähigkeit verringern. Sie sei zwar eine realisierbare Alternative für Aufgaben, die Greifen und Platzieren beinhalten, aber in ihrer Studie wurde keine größere Natürlichkeit festgestellt. (Masurovsky u. a. 2020, 13f)

Eine großes Problem von Haptik in der virtuellen Realität ist zudem das sogenannte haptische Uncanney Valley Problem. Nicht jede Erweiterung für mehr oder realistischere Interaktion gleicht einer Verbesserung. Erfahrungen in VR steigen über visuelle Darstellungen hinaus. Weitere Sinne werden in der Ausgabe angesprochen und können nach Berger u. a. (2018, 2) durch unterschiedliche Rückmeldungen die haptischen Darstellungen untergraben. Wenn das menschliche Gehirn unbewusst widersprüchliche Eindrücke in eine einheitliche Wahrnehmung zusammenzufügen versucht, kann das Ergebnis eine reduzierte Immersion zur Folge haben. Berger u. a. (2018, 13) fassen ihre Erkenntnisse und Empfehlungen zur Vermeidung des uncanney Valley folgendermaßen zusammen:

1. Die Ausgabe muss der Art der haptischen Stimulation entsprechen, damit es kein Ablehnung der Qualität zu Folge hat.
2. Die Übereinstimmung mit anderen Reizen, muss Vorrang vor Präzision haben.
3. Jedes Auslösen einer Aktion durch Haptik muss eine kausale Erklärung bieten, damit eine haptische Ablehnung vermieden wird.
4. Jede Verbesserung von Haptik muss einen Grund haben. Kausalität bestimmt die Interpretation, weil das Gehirn auf Anfrage starke sensorische Unterdrückung von Sinnen durchführen kann.

Die Befolgung dieser Ratschläge vermindert die Effekte eines haptischen Uncanney Valley und führt zu einer natürlicheren Erfahrung in der Interaktion und Manipulation von virtuellen Objekten.

Eine weitere Herausforderung von Handtracking in VR umfasst Erkennungsfehler, welche entstehen können, wenn die Hände eines*einer Nutzer*in verdeckt sind und so vom Kamerasensor nicht mehr erfasst werden können. Die sogenannte virtuelle Hand Illusion ist das Gefühl, dass

die virtuelle Hand ein Teil des eigenen Körpers wird. Dieses Bewusstsein entsteht durch die Synchronisation von visuellen und propriozeptiven Informationen zusammen mit motorischer Aktivität. Durch fehlende Erfassung und visueller Darstellung in der virtuellen Realität sinkt dieses Bewusstsein und das Empfinden der Besitzübernahme der virtuellen Hände wird verringert. Typischerweise passiert dies mit kamerabasiertem Handtracking öfter als mit controllerbasiertem. Dies hängt zudem vom Head-Mounted-Headset ab, welches genutzt wird. So ist das Field of view der Kameras einer Oculus Quest größer als das einer Leap Motion und hat dementsprechend seltener Erkennungsfehler (Masurovsky u. a. 2020, 1f). Ohne zusätzliche haptische Feedbacksysteme bekommt die*der Nutzer*in zudem keine Rückmeldung von Berührungen mit virtuellen Objekten. Durch den fehlenden Output benötigen manche Spieler*innen einige Zeit sich anzupassen (Jörg u. a. 2020, 21).

Um dem entgegenzuwirken, werden haptische Interaktionsmöglichkeiten stetig verbessert, so dass sie sich natürlicher und intuitiver anfühlen, damit Nutzer*innen sie schneller begreifen.

2.1.2 Greifen in VR

Das Greifen in VR ist eine der wichtigsten Interaktionsmöglichkeiten, welche Handtracking bieten kann. Sie ist ein effektives Mittel, um Nutzer*innen in verschiedenen Umgebungen und Ereignissen trainieren und testen zu können (Liu u. a. 2019, 1). Doch trotz des Aufkommens von günstigen VR-Headsets wie der Oculus Quest oder der HTC Vive und der Erweiterung der Anwendung von VR Programmen in beispielsweise der Unterhaltungsindustrie wie bei Spielen, Visualisierungen, Trainingssimulationen oder in Fernbedienungen von Robotern wird das Verbessern der Interaktion vernachlässigt, welche fundamental ist für eine immersive Nutzer*innen Erfahrung. Stattdessen liegt der Fokus auf realistischerem visuellem Feedback, durch Verbesserung der Bildwiederholungsrae oder dem Field of view. Dabei ist die freie Manipulation von virtuellen Umgebungen entsprechend der realen Welt entscheidend für eine hohe Presence. Derzeitigen VR Lösungen und Spiele fehlt diese realistische Interaktion, was daran liegt, dass diese effizient und in real time implementiert werden müssen. Zudem müssen Griffpositionen sowie die Grifferkennung rechtzeitig erkannt und berechnet werden (Oprea u. a. 2019, 1). Controller bieten hierbei den Vorteil, dass er über Knöpfe verfügt, die eine zuverlässige Erkennung der Absicht der*des Nutzer*in absehen lässt. Bei Handtracking jedoch, müssen die Griffe aus der Bewegung der*des Benutzer*in abgeleitet werden. Je nach verwendetem Algorithmus und Leistung kann dies zu langsam oder nicht erfolgreich sein. Damit Hände beziehungsweise Finger in virtuellen Umgebungen verwendet werden können, müssen ihre Bewegungen in real time verfolgt werden können. (Jörg u. a. 2020, 7)

Unterschiedliche Studien und Literaturarbeiten verwenden verschiedene Ansätze, um dies zu erreichen und Nutzer*innen eine realistische Erfahrung zu bieten. In der Studie von Liu u. a. (2019) werden beispielsweise drei verschiedene Handschuh Systeme getestet, um eine möglichst immersive Erfahrung mit der bestmöglichen Fidelity zu gewährleisten. Dabei werden ein Leap Motion Sensor, ein Oculus Touch Controller und ein eigens für die Arbeit entwickelter Handschuh gegeneinander getestet. Sie werden auf zuverlässige Handposenübertragung, einen natürlichen Griff in realtime und feines haptisches Feedback überprüft. Der Ansatz des neu designten Handschuhs arbeitet über die Sensoren eines Vive Trackers und liefert haptisches Feedback

durch 6 Vibrationsmotoren in den Fingern. Das Ergebnis der Arbeit zeigt die Effektivität dieses Handschuhs, welcher das Greifen auf Käfigen basiert integriert und somit einen stabilen und zuverlässigen Griff zulässt. Die Erfolgsrate ist signifikant höher als beim häufig benutzen Leap-Motion Sensor. (Liu u. a. 2019, 1, 6)

In der Studie von Oprea u. a. (2019, 1f) wird ein System in der Unreal Engine implementiert, welches real time Interaktionen und Objekt Manipulation unterstützt. Der Unterschied zu anderen Ansätzen liegt darin, dass das Greifen von Objekten nicht nur mit vordefinierten Posen, sondern dynamisch und unabhängig der Geometrie möglich ist. Die bisherigen Realisierungen von Greifen in VR arbeiten mit großen Datenbanken, welche die vordefinierten Handhaltungen gespeichert hat und bei Interaktion mit einem Objekt die auf Kriterien der Nutzer*innen basierenden Pose nutzt. Das Griffsystem von Oprea u. a. (2019, 2) erfolgt durch automatisches Anpassen an die Form des Gegenstandes ohne eine vorbestimmte Greifanimation oder Pose. Die Essenz dieses Systems ist das Schließen der Hand durch Knopfdruck auf, im Gegensatz zur Studie der vorliegenden Arbeit, welche auf reinem Handtracking basiert, dem Controller. Die Finger rotieren sich solange nach innen, bis sie eine Kollision erkennen. Die Erkennung findet über zwei Kollisionsobjekte in den oberen zwei Gliedern der Finger statt.

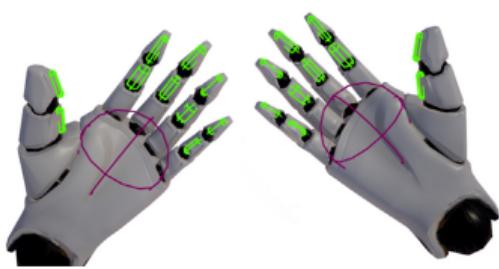


Abbildung 2: Visualisierung der Finger Kollisionen (Oprea u. a. 2019, 4)

Diese sind Zylinderartig und sind an die Fingergröße angepasst. Die Rotation in der das Schließen stattfindet wird über das Drehen der Hand-held Controller gesteuert. Sobald mehrere Finger mit dem Objekt kollidieren gilt es als Gegriffen und kann aufgehoben werden. Objekte mit komplizierter Geometrie waren für Proband*innen schwierig zu greifen und erst nach einer Eingewöhnungszeit möglich. Das System selbst wurde nach der Auswertung als benutzerfreundlich mit steiler Lernkurve bezeichnet. (Oprea u. a. 2019, 2ff, 8)

Die Studien zu diesem Thema zeigen, dass Greifen in Handtrackingsystemen, die kamera-, sensor-, oder handschuhbasiert arbeiten priorisiert werden, wenn diese realistische Griffvisualisierungen, in Relation zur Geometrie der Gegenstände, benutzen anstatt Hand - Objekt Durchdringungen oder Transparenzeffekten. Genannt werden diese beiden Methoden penetrative hand technique (PHT) und constrained hand technique (CHT). PHT Systeme erlauben exaktes Folgen und Übertragen der realen Hand in VR. Dies ermöglicht akkurate Grifferkennung und dementsprechend natürliches visuelles und physisches Feedback. Die Hand selbst taucht allerdings in die Objekte ein und wird entweder vom Gegenstand verdeckt oder das Objekt wird transparent, sodass die Hand weiterhin sichtbar ist. Das Nutzen von CHT Techniken führt zu Unterschieden zwischen der angezeigten und der getrackten Hand, weil die Hand sich der Umgebung anpasst und statt in ein Objekt einzutauchen an der Oberfläche bleibt. Dies führt zwar zu schwierigeren Griffmechaniken, bietet allerdings ein realistisches visuelles Resultat, welches konsistent mit der Erfahrung der Nutzer*innen mit der realen Welt ist. PHT Methoden sind meist performan-

ter und einfacher in der Verwendung. CHT hingegen können schnell missverstanden werden in der Gebrauchsweise, werden dennoch von Nutzer*innen präferiert. Eine dritte Variante ist die disappearing hand technique (DHT). Dabei verschwinden die Hände vollkommen, nachdem sie ein Objekte gegriffen haben. Dies führt allerdings zu einem geringen Gefühl von Zugehörigkeit und wird daher nicht bevorzugt. (Ganias u. a. 2023, 1ff)

In der Studie von Ganias u. a. (2023, 3) werden drei Visualisierungsmethoden der Hand nach dem Greifen miteinander verglichen. Alle drei basieren auf Controllerknopfdruck, ähnlich der Methode von Oprea u. a. (2019, 1f). Daraufhin schließt sich die Hand und wird je nach Methode dargestellt. Die erste Art ist die automatische Pose, welche die Hand möglichst realistisch um das Objekt positioniert. Dabei wird sowohl die Geometrie des Objekts beachtet, als auch die Physik der Hand. Abhängig von der Startrotation und Position der Hand resultiert die finale Pose auf eine dynamische Weise. Die zweite Methode, Simple Pose- (SP) verzichtet auf Positions berechnungen. Stattdessen endet jeder Griff eines Objektes darin, dass die Hand an der Stelle, an der der Controllerbutton gedrückt worden ist, sich zu einer kompletten Faust schließt. Daraufhin ist die*der Nutzer*in in der Lage das Objekt zu bewegen. Die letzte Art basiert auf der disappearing hand technique. Die Hand verschwindet sobald der Knopf gedrückt worden ist und ein Objekt gegriffen wurde. Keine der Methoden stach in Performance heraus. Dafür war die Positionierung von Gegenständen mit der automatischen Berechnung wesentlich einfacher als mit der Simple pose, aufgrund des besseren Feedbacks durch die Finger. Ebenso wurde von den Proband*innen angegeben, dass die AP-Methode bessere Übertragung, sowie größere Zugehörigkeit des Objektes zur*zum Nutzer*in hatte. Während das Genießen der Nutzung bei AP und SP gleich groß war, setzten sich beide gegenüber der DHT Variante durch. In Realismus und Kontrolle stach die automatische Posenberechnung deutlich heraus. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass verschiedene Griffvisualisierungen keinen Effekt auf die Performance von Objektmanipulationen haben. Dafür gibt es signifikante Unterschiede im Auffassen von Kontrolle und Zugehörigkeit. Ebenso bestehen Präferenzen der Nutzer*innen zwischen den Methoden. AP war die Visualisierung, welche die größte Kontrolle bot und für die Proband*innen favorisiert wurde aufgrund der Ähnlichkeit zu einem natürlichen Griff in der realen Welt. (Ganias u. a. 2023, 3,8f)

Für verschiedene Entwicklungsumgebungen wurden in der Vergangenheit Plugins und Tools für das Visualisieren und Nutzen von Händen in VR hervorgebracht. Eines davon ist für die Unreal Engine und ermöglicht das Greifen ohne Controller mittels reinem Handtracking in einer virtuellen Welt. Dieses Plugin wird in einem späteren Kapitel näher beschrieben.

3 System: Überblick und Ziele

Das Ziel dieser Studie ist es, verschiedene Greifmechaniken und Kollisionsberechnungsstufen zu vergleichen und zu testen. Hierbei werden vier verschiedene Objekte verwendet, die jeweils auf vier unterschiedliche Arten in den Test integriert wurden. Diese vier Integrationstypen werden in der Arbeit HIHC (High-Interactivity, High-Collision), HILC (High-Interactivity, Low-Collision), LIHC (Low-Interactivity, High-Collision) und LILC (Low-Interactivity, Low-Collision) benannt. Die Abkürzungen werden in den folgenden Abschnitten näher erklärt. Die

zu greifenden Objekte besitzen verschiedenes Aussehen und erlauben unterschiedliche Arten des Greifens. Die Proband*innen testen die Möglichkeiten anhand einer Hantel, einer Tasse mit Griff, einem Oculus 2 Headset und einer Pfanne.

Um diese Tests durchzuführen, werden Proband*innen gebeten die verschiedenen Greifmechaniken und Kollisionsberechnungsstufen zu testen und zu beurteilen. Die Tasks bestehen dabei aus dem Greifen, dem Bewegen, dem Rotieren und dem Loslassen der beschriebenen Objekten. Sowohl die Testerstellung, als auch die Tests selbst werden mit der Oculus Quest 2 und der integrierten Handtracking-Version 2.0 durchgeführt.

Zusätzlich zu diesen Tests werden den Teilnehmer*innen auch Fragen zu verschiedenen Aspekten der Erfahrung gestellt. Diese Faktoren sind die Presence, der Realismus, das Trägheitsgefühl der Reaktion durch die Objekte und Frustration. Eine weitere Fragestellung zielt darauf ab, herauszufinden, welche Greifmöglichkeit am besten für ein Spiel geeignet wäre.

Diese Studie wird dazu beitragen, unser Verständnis von Greifmechaniken und Kollisionsberechnungsstufen in der Multimedia-Industrie zu vertiefen und kann zukünftigen Entwicklungen in diesem Bereich als Richtlinie dienen.

3.1 Anwendung auf Basis eines Unreal Engine Plugins

Die Studie wird mittels einer Anwendung in der Unreal Engine durchgeführt. Diese wird auf der Basis des Handtracking Plugins von Just2Devs¹ implementiert. Das Plugin für die Unreal Engine ermöglicht Entwickler*innen Handtracking in ihre VR-Anwendungen zu integrieren. Es wurde entwickelt, um den Entwicklungsprozess zu vereinfachen und die Zeit, die benötigt wird, um Handtracking-Funktionen zu implementieren, zu reduzieren.

Das Plugin unterstützt eine Vielzahl von Handtracking-Hardware, darunter die Oculus Quest 1 und 2. Es bietet eine Vielzahl von Funktionen, die es den Entwicklern ermöglichen, die Handbewegungen der Benutzer*innen in Echtzeit zu verfolgen und zu verarbeiten. Die Funktionen reichen von einer schnellen Integration von Handmodellen und Texturen über Gestenerkennung bis hin zur Bewegung über Laserpointer mittels Schließen des Zeigefingers und Daumens. Das Keyfeature dieses Plugins ist allerdings das ausgefeilte Greifsystem, welches in dieser Studie genutzt werden wird. Dabei wird unterschieden zwischen performantem und inperformantem

¹ <https://www.unrealengine.com/marketplace/en-US/product/hand-tracking-plugin?sessionInvalidated=true>

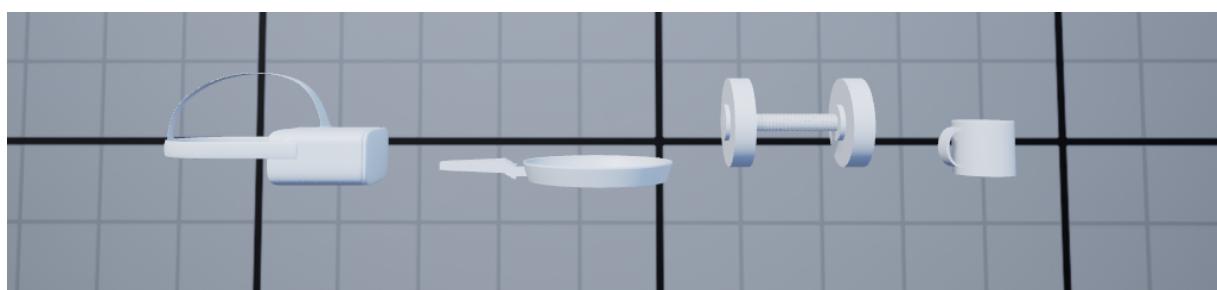


Abbildung 3: Die für den Test genutzten Objekte

Greifen. Dies ist abhängig von den Einstellungen, die die Entwickler*innen treffen. Die In-performante Methode nutzt dynamisches Berechnen der Hand sowie der Fingerpositionen und Rotationen nach dem Greifen. Die Performante gibt dies von vornherein vor und die Hände snappen nach dem Greifen in ihre Posen.

Beide Systeme basieren auf der in einem früheren Abschnitt beschriebenen penetrative hand technique. Ein Objekte wird als gegriffen erkannt, wenn die Hand innerhalb dieses Objektes geschlossen wird. Daraufhin passt sich das Aussehen der Hand an die vorgegebene Einstellung an. Das Plugin bietet zudem auch eine Möglichkeit, das Kneifen von Fingern zu erkennen und daraus folgend Slider zu bewegen. Handbewegungen im Allgemeinen werden reibungslos und schnell visualisiert und verwertet.

Das Plugin bietet eine intuitive Benutzeroberfläche, die es den Entwickler*innen ermöglicht, Handtracking in ihre Anwendungen schnell und einfach zu integrieren. Es enthält zudem für einen raschen Einstieg eine Vielzahl von Beispielen und Tutorials, die es den Entwickler*innen erleichtert, Handtracking-Funktionen zu implementieren.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass das Handtracking Plugin von Just2Devs eine nützliche Ergänzung für Entwickler*innen ist, die Handtracking-Funktionen in ihre VR-Anwendungen integrieren möchten. Das Plugin bietet eine einfache Möglichkeit, Handbewegungen zu verfolgen, zu visualisieren und zu verarbeiten, um eine realistische und immersive VR-Erfahrung zu bieten.

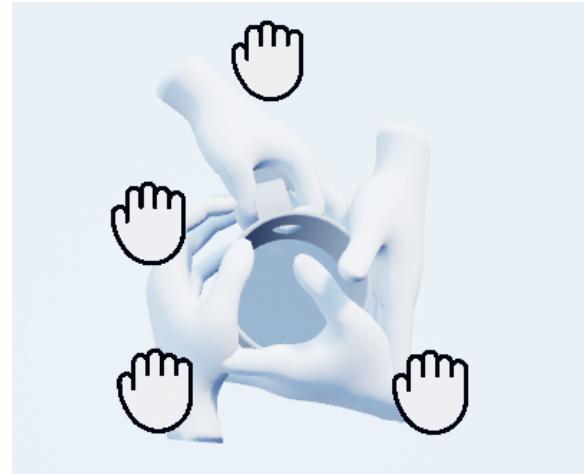


Abbildung 4: Ein Beispiel für vorgegebene Handposen nach dem Greifen des Handtracking Plugins

3.2 Low-Interactivity-System

Die Low-interactivity-Varianten des Tests basieren auf dem im vorherigen Abschnitt erklärten Unreal Engine Handtracking Plugin. Das Greifen der LI-Objekte funktioniert rein über das von der Unreal Engine bereitgestellte Überlappungs System. Es werden keine Physics Simulationen durchgeführt. Das Greifen reagiert auf das Schließen einer Hand während sie mit einem Objekt, welches die vom Plugin bereitgestellten Components besitzt, überlappt. Dies ähnelt dem im related work beschriebenen penetrative hand technique System, bei dem die Hand das Objekt durchdringt und Greifen kann, aber keine realistische Visualisierung vorhanden ist (Ganias u. a. 2023, 3). Die Hand wird als geschlossen erkannt, sobald die Finger einen gewissen Schwellenwert zueinander überschreiten, also sobald die Reichweite zwischen ihnen gering genug ist,

um als geschlossen zu gelten. Am zuverlässigsten verhält sich das System wenn die Hand zu einer kompletten Faust geschlossen wird. Ebenso wird das Öffnen auf die gleiche Weise erkannt. In der LILC-Variante werden die Posen der Hand, welche sie nach dem Greifen einnimmt von vornherein bestimmt, wodurch sowohl der Gegenstand als auch die Hand an der bestimmten vorgegebenen Position einrastet. Die Nutzer*innen haben keinen Einfluss darauf wie sich die Hand nach dem Greifen verhält, außer möglichst in der Nähe der vorgegebenen Posen die Hand zu schließen.

Diese Variante ist sehr performant, weil den Objekten keine komplexe Kollision gegeben werden muss und die Hand völlig unabhängig von den Gegenständen arbeiten kann. Für sie muss nur anhand des Schwellenwertes das Öffnen und Schließen erkannt werden.

Die LIHC-Variante hingegen berechnet die Position und Rotation der Finger, nachdem die Hand geschlossen worden ist. So wird die gegebene Form des Gegenstandes genommen –anhand ihrer eingestellten Kollision- und für die Finger möglichst genau anhand der Position, an der die Hand geschlossen worden ist, ihre neue Transformation nachberechnet und diese angezeigt. Um eine möglichst realistische Anzeige zu erhalten, muss die Kollision dem eigentlichen Gegenstand stark ähneln bzw. diese eins zu eins abbilden. So erhalten die Finger die Form passend zum Objekt abhängig von der Position der Hand zum Gegenstand. Das Nachberechnen ist leistungsintensiv und kann zu kurzen Verzögerungen führen. Diese Griff Art sieht aber wesentlich realistischer aus als die LILC Art und führt zu keinem Einrasten.

Beide Varianten besitzen den Vorteil, dass sie auch bei schlechten Fingertrackverhältnissen durch schlechtes Licht oder Hardware zuverlässig das Greifen und Loslassen erkennen. Durch das Schließen zu einer Faust unabhängig der Form der zu greifenden Objekte wird erwartet, dass die Tester*innen diese Varianten als unintuitiv empfinden werden.

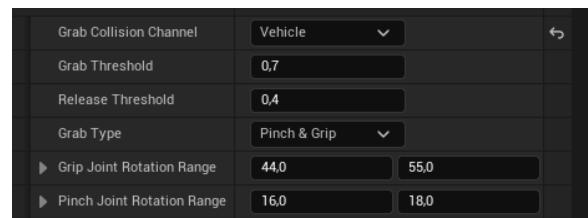


Abbildung 5: Schwellenwert Einstellung vom Handtracking Plugin

3.3 High-Interactivity-System

Das High-interactivity-System ist für diese Arbeit konzipiert und erarbeitet worden. Es richtet sich nach dem von Ganias u. a. (2023, 3) genannten CHT Prinzip, welches Fingerkollisionen berechnet und die Finger somit immer an der Oberfläche von Objekten verbleiben. Das HI-System basiert auf dem Handtracking Plugin, erweitert dieses aber, um ein realistischeres Greifen zu ermöglichen. Zudem soll es simpel und modular in der Anwendung, flexibel mit jedem Objekt nutzbar, robust gegen Trackingfehler und visuell nachvollziehbar sein.

1. Simpel und Modular: Das System soll für Nutzer*innen verständlich in der Anwendung

und dabei einfach zu erweitern sein.

2. Flexibel: Nach Vollendung des Systems soll die High-Interactivity Variante mit jedem Gegenstand unabhängig von Form und Geometrie nutzbar sein.
3. Robust: Die Spieler*innen Erfahrung darf nicht durch Trackingfehler beeinträchtigt werden, welche zu unvorhergesehenen Problem führen bei beispielsweise dem Öffnen oder Schließen der Hand.
4. Visuell Nachvollziehbar: Für Nutzer*innen muss der Input dem Output gleichen, sodass keine Irritationen entstehen und die Interaktion erwartbar und verständlich bleibt.

Im Laufe der Testiterationen ist das System mehrmals evaluiert und überarbeitet worden. Im folgenden Abschnitt werden die Überlegungen, das Konzept, die erwarteten Probleme und die erste Umsetzung beschrieben werden. Dabei soll vor allem die Abhebung von der Low-Interactivity-Variante klargestellt werden.

3.3.1 Konzept

Die Grundlage für die High-interactivity-Varianten ist das oben beschriebenen Handtrackingplugin. Genutzt werden allerdings nur die sichtbaren und getrackten Hände, welche in der Welt angezeigt werden und die realen Hände in VR abbilden. Abgesehen davon unterscheidet sich das System gänzlich von der Low-Interactivity-Variante. Die HI-Grifftechnik arbeitet mit Physics und realistischen Kollisionen. Die einzelnen Finger erhalten Kollisionen und gleiten somit anders als in der LI-Variante nicht mehr durch die Objekte durch, um sie zu greifen sondern können diese wegschieben bzw. greifen wenn dies gewünscht ist. Die Idee zu erkennen ob ein Gegenstand gegriffen und somit aufgehoben wird stammt aus der Arbeit von Oprea u. a. (2019, 1f), welche im Abschnitt related work näher dargestellt worden ist. In dieser wird beschrieben, dass Gegenstände aufgehoben werden, sobald mindestens der Daumen und, je nach Objekte einstellbar, weitere Finger mit dem Objekt kollidieren.

Der Unterschied zu den Arbeiten von Oprea u. a. (2019) und Ganias u. a. (2023) liegt darin, dass in ihren Studie Controller genutzt worden sind und somit kein Handtracking zur Geltung gekommen ist. In ihren Studie wurden auf Knopfdruck die Hände geschlossen und sobald Finger kollidierten verblieben diese in der Position und die Gegenstände wurden als gegriffen gekennzeichnet. Die Idee an sich wurde für diese Arbeit aufgegriffen. Objekte werden als gegriffen deklariert und damit an die Hand angehängt wenn der Daumen und weitere Finger kollidieren. Die Finger und Hände selbst erhalten für jeden Knochen Kollisionsobjekte in Form von Zylindern, die an die Form der Knochen angepasst wurden. Diese ermöglichen der Unreal Engine Kollisionen zu berechnen und anhand dieser die Intention der*des Spieler*in zu erkennen.

Des Weiteren soll die Kollision der Finger der getrackten Hand zurückgeben, dass ein Finger, der ein Objekt berührt hat, nicht weiter geschlossen werden kann. Dies soll trotz schließen der Hand in der realen Welt nicht von der virtuellen Hand übernommen werden, sondern soll stattdessen die Form beibehalten, bis sich der Finger wieder vom berührten Objekt löst. Zusätzlich soll dies ermöglichen, dass der Gegenstand als nicht mehr aufgehoben gekennzeichnet wird,

sobald weniger Finger als nötig das Objekt berühren bzw. mit diesem kollidieren. Insgesamt ist das Ziel für diese Griffvariante das kollidieren sowie das aufheben von Objekten mit jeglicher Kollision und Form zu ermöglichen. Daher bietet sich dieses System dafür an die Gegenstände sowohl mit guter Kollision -ähnlich der eigenen Form-, als auch mit schlechter Kollision -statt der eigenen Form beispielsweise einen Zylinder, der das Objekt umschließt- zu testen. So kann auch die HI-Grifftechnik mit LC und HC von den Proband*innen getestet werden.

3.3.2 Probleme

Trotz des relativ einfachen Ansatzes, fielen schon in der Konzeptionsphase Probleme auf, welche vor dem Programmieren gelöst werden mussten. Zum einen das nicht immer zuverlässige Trackingsystem durch die Oculus Quest 2, zum anderen das Berechnen der Hand, ab welchem Punkt sie geschlossen genug ist um ein Objekt zu greifen oder um es wegzuschieben bzw. um es wieder loszulassen.

Vor allem Zweiteres führte immer wieder zu Problemen in der Umsetzung. Die Idee in der Konzeptionsphase war sich die Position der Kollision von Fingern mit greifbaren Objekten relativ zum Handursprung zu merken und die Rotation zu stoppen. Die Rotation sollte in jedem Frame neu berechnet werden, um zu sehen, ob der Finger sich wieder relativ nach außen rotiert. Sobald dies geschehe, dürfte die Rotation wieder angezeigt werden. Die Rotation hatte allerdings nichts mit dem Lösen vom Objekt zu tun. Dies sollte für jeden Knochen und jeden Finger einzeln passieren. Schon in dieser Phase wurde klar, dass sich das Speichern der Position relativ zur Hand nicht akkurat verhalten würde, da sobald sich die Hand rotiert diese Position nicht gleich bleibt. Der zweite Ansatz war sich die Position der Finger relativ zur Position vom Objekt zu merken, und sobald der Finger sich nach außen bewege und einen gewissen Schwellenwert überschreite, loslassen sollte.

Zusätzlich kam stetig das Problem mit nicht zuverlässigem Handtracking auf, vor allem wenn sich zwei Hände überschneiden sollten. Um dieses Problem erst einmal vorzubeugen wurde für den Proof of Concept Test erst einmal nur eine Hand in den Test integriert um das System an sich zu testen beziehungsweise zu verstehen wie es sich verhalten würde.

3.4 Erste Umsetzung

Für die erste Umsetzung stand die HIHC-Variante im Vordergrund, welche als Proof of Concept für das System dienen sollte. Dafür wurde zunächst auf der Basis des Handtracking Plug-

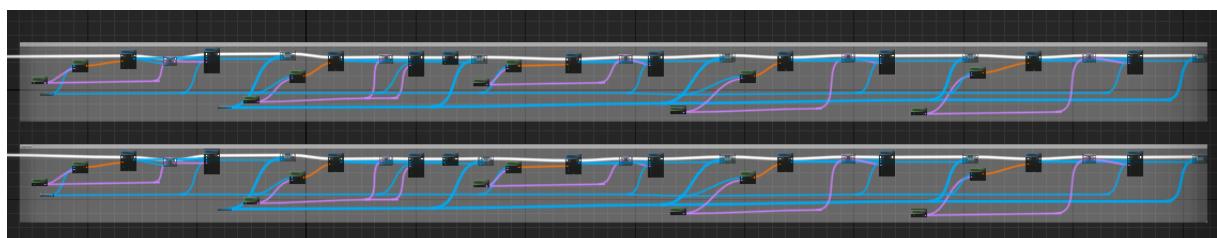


Abbildung 6: Hinzufügen der Kollisionen zu den Fingerknochen

ins eine Hand Kollision generiert. Jeder Knochen bekam eigene Objekte (S. Abb. 6). Diese wurden angeheftet und in die Form der Knochen gebracht, sodass diese eigene Kollisionen berechnen konnten. Nachdem es möglich war mit dieser Hand Objekte in der Szene zu verschieben wurde das Greifen implementiert. Das erste Problem trat hierbei auf, weil die Objekte sobald sie kollidiert haben sofort weggeschoben wurden, weshalb mit diesem System nie ein Objekt genommen werden konnte. Deshalb wurden zusätzlich zu den Kollisionsobjekten Überlappungsobjekte an die Knochen angeheftet, welche ein wenig größer waren als die Kollisionsobjekte. Damit konnte nun die Berührung von Fingern mit Gegenständen erkannt werden, bevor diese weggeschoben wurden. Auf diese Weise konnte nun das Greifen integriert werden.

Der Gegenstand merkt sich die Fingerposition sobald dieser ihn berührt hat. Falls er mehrere Berührungspunkte hat und einer davon der Daumen ist wird das Objekt an die Hand gebunden und gilt als aufgehoben. Der Gegenstand verhält sich nun wie ein Teil der Hand und fällt beim Hochheben nicht herunter, da die Physik deaktiviert wird. Ein Finger löst sich sobald er eine gewisse Reichweite vom Berührungsplatz entfernt getracked wird. Sobald mehr Finger als nötig zum Aufheben des Objektes als gelöst erkannt werden, entbindet sich der Gegenstand von der Hand und fällt hinunter beziehungsweise wird die Physics für dieses Objekte wieder aktiviert. Nachdem dies funktioniert hat ist der Proof of Concept Test aufgesetzt worden. Die Möglichkeit des Greifens wurde für die anderen Hand implementiert. Daraufhin wurde von den späteren vier Objekten die Tasse (S. Abb. 7) modelliert und eingefügt. Anhand dieser Tasse ist erstmals das System von Proband*innen getestet worden. Für diesen Test war noch kein Stopp der Innenrotation für Finger nach der Berührung implementiert. Ebenso konnte nur HICI getestet werden, weil die anderen drei Testvarianten noch nicht integriert waren. Ziel für diesen Test waren Verbesserungsvorschläge einzuholen, um den Realismus beim Berühren und Erkennen des Aufhebens erhöhen zu können.



Abbildung 7: Das Tassen Modell für den Proof of Concept Test

4 Testiterationen

Der folgende Abschnitt beschreibt die verschiedenen Testiterationen der Studie, angefangen über den Proof of Concept Test, über den Pilot Test bis hin zur Nutzerstudie, welche den Abschluss bildet. Jede Iteration wird von Proband*innen getestet. Die dadurch erhaltenen Informationen über die System werden evaluiert und eingearbeitet. Zudem enthält dieser Teil der Arbeit die einzelnen Erwartungen und Ergebnisse jeder Iteration und die darauf folgenden Maßnahmen zur Verbesserung der High-Interactivity-Variante, welche vor allem darauf abzielen den

Realismus, die Zuverlässigkeit und die Presence zu steigern.

4.1 Proof of Concept test

Der Erste Test beinhaltet die im Abschnitt erste Umsetzung beschriebenen Mechaniken. Die Proband*innen sollten vor allem Fehler und Probleme herausfinden und die ihrer Meinung Verbesserungsmöglichkeiten benennen, um die Zuverlässigkeit zu erhöhen. Zudem sollte dieser Test herausfinden, ob die Nutzer*innen die HIHC als eine nützliche und in Zukunft sinnvolle Variante erachten, die sich lohnt weiter zu erarbeiten und verbessern. Die Aufgabe bestand ausschließlich darin, die in Abb. 7 sichtbare Tasse aufzuheben, sie zu bewegen, zu drehen und wieder abzustellen. Sobald die Anwendung gestartet worden ist, stand die Tasse auf einem Tisch direkt vor der Testperson, sodass sie direkt mit ihr interagieren konnte. Den Tester*innen wurde gesagt, dass sie ihre Hände möglichst bewegen sollen, wie sie es in der Realität gewohnt sind. Nach dem Test wurden sie gefragt welche Fehler und unerwarteten Reaktionen seitens der Anwendung ihnen aufgefallen sind. Insgesamt testeten sechs Proband*innen den Proof of Concept Test. 3 Frauen und 3 Männer. Sie waren im Alter zwischen 18 und 56.

4.1.1 Erwartungen

Die Erwartungen bezüglich des Tests waren aufgrund des noch mäßig funktionierenden Systems nicht sehr hoch. Es wurde erwartet, dass die Proband*innen möglicherweise Schwierigkeiten haben würden, mit dem System umzugehen. Die Proband*innen mussten auch über VR-Kenntnisse verfügen, um an dem Test teilnehmen zu können, da anderenfalls kein Vergleich gezogen werden konnte. Da der Test auf das reine Greifen eines einzelnen Objektes ausgelegt war, wurde zudem kein repräsentatives Ergebnis erwartet. Dennoch wurde eines erhofft, welches genutzt werden könnte um die Erfahrungen der Nutzer*innen in zukünftigen Tests zu verbessern.

4.1.2 Erkenntnisse

Obwohl die Erwartungen gering für diesen Test waren, sind die Erkenntnisse für den zukünftigen Verlauf der Studie entscheidend gewesen. Vor allem beim Greifen an sich sind einige Ergebnisse entstanden, welche dieses entscheidend verbessern sollten. Das fehlende Feedback für die Innenrotation der Finger nach dem Berühren mit dem Objekt zeichnete sich als besonders unrealistisch beziehungsweise Presenceverringernd ab. Zudem fiel auf, dass der Gegenstand entweder sich schwer von der Hand löste, sofort herunterfiel, sobald schnelle Bewegungen getätigten wurden, oder die Finger als nicht berührt wahrgenommen wurden und das Objekt sich nicht an die Hand gebunden hat. Grundsätzlich fehlte sowohl das visuelle Feedback, als auch das korrekte Verhalten des Objektes mit der Hand. Dennoch empfanden die Proband*innen das System als sehr ansprechend und ermutigten das System fortzuführen und zu verbessern. Vor allem das individuelle und völlig freie Anfassen des Objekts ohne einen Handschuh oder Controller war für viele eine neue Erfahrung und damit überraschend. Die Verbesserungsvorschläge waren vor

allem die Position der Finger bei der Berührung besser zu tracken und den Schwellenwert für das Loslassen zu erhöhen.

4.1.3 Evaluierung und Verbesserungen

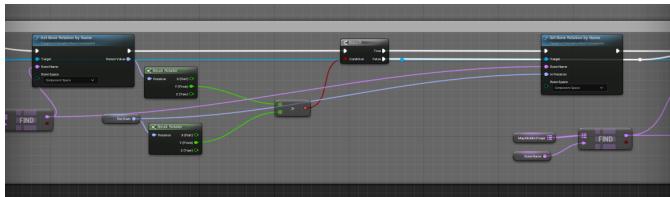


Abbildung 8: Rotationsspeicherung eines Knochens nach dem Kollidieren mit einem greifbaren Gegenstand

greifbaren Gegenstand berührt. Dies ist erreicht worden durch das Berechnen der einzelnen Fingerknochen relativ zur Hand. Sobald ein Kollisionsobjekt einer Fingerspitze einen Gegenstand berührt, wird die Rotation im Objekt abgespeichert und setzt diese Rotation in jedem Frame, solange sich der Finger nicht nach außen rotiert. Das greifbare Objekt speichert sich weiterhin alle Fingerpositionen bei der Berührung ab und wird an die Hand gebunden so bald genug Finger ihn berührt haben beziehungsweise wird losgelassen so bald genug Finger den Schwellenwert überschreiten und somit nicht mehr als berührt gelten. Dieser wird besser an das jeweilige Objekt angepasst. Um den Proband*innen für den nächsten Test einen Vergleich herstellen zu lassen wurden zudem sowohl die weiteren Gegenstände, als auch die weiteren Testvarianten integriert. So hatten die Tester*innen die vier, in einem vorherigen Abschnitt genauer definierten, Gegenstände in jeweils vier unterschiedlichen Varianten, die jeweils eine Griffvariante beinhaltet haben. Der Schwellenwert wurde für die High-Interactivity-Variante für HC und LC einzeln angepasst, sodass die Hand korrekt geschlossen und geöffnet werden kann.

Nachdem das Konzept von den Proband*innen als nutzbar und verbeserungswürdig empfunden worden ist sind einige Dinge für den Pilot Test verändert worden. Dabei stand zunächst das visuelle Feedback im Vordergrund. Deshalb sind zunächst die Finger angepasst worden, sodass diese keine Innenrotation der realen Hand mehr übernehmen und somit das visuelle Feedback an der Stelle verbleibt, sobald ein Finger einen

4.2 Pilot Test

Der Pilot Test ist die letzte Iteration vor der finalen User Studie, welche durchgeführt worden ist nachdem die Verbesserungsvorschläge aus dem Proof of Concept Test eingearbeitet worden sind. Das Ziel dieses Tests war es den Proband*innen eine verbesserte High-Interactivity Methode zu geben, welche gegen die Low-Interactivity Variante getestet werden konnte. Dabei lag der Fokus darauf zu hinterfragen, ob die Grifftechnik, welche extra für diese Studie kreiert wurde, zu diesem Zeitpunkt schon weit genug ausgereift war, um mit dem Plugin in den Bereichen Zuverlässigkeit und Presence mithalten zu können. Die Zuverlässigkeit wurde dabei gemessen durch die Fehlerrate mit der ein Objekt nicht genommen beziehungsweise heruntergefallen ist, ohne dass die*der Spieler*in die Hand geöffnet beziehungsweise geschlossen hat. Die Presence wurde durch die Antworten der Proband*innen bewertet. Die Aufgabe in diesem Test bestand darin die vier Objekte (s. Abb. 3) in ihren vier Varianten (s. Abb. 10) aufzuheben, zu rotieren, zu bewegen und abzusetzen beziehungsweise loszulassen. Diese vier Gegenstände wurden aufgrund ihrer unterschiedlichen Form und dementsprechend verschiedenen realistischen Handposen gewählt (S. Abb. 9 für ein Beispiel). Um ein repräsentatives Ergebnis zu erhalten mussten die Proband*innen jedes Objekt aus verschiedenen Richtungen greifen, sodass alle Vor- und Nachteile, sowie alle Fehlerquellen jeder Griffvariante erkannt und in die Antworten einfließen konnte. Damit die Tester*innen diese Aufgabe erfüllen konnten mussten die Objekte nach dem Manipulieren in ihre Ausgangslage zurückversetzt werden können. Dafür wurde ein Button in der Mitte des Raumes platziert, welche gedrückt werden konnte, um alle Gegenstände in ihren ursprünglichen Zustand zu versetzen, um sie erneut auf eine andere Weise greifen beziehungsweise testen zu können. Nachdem alle Gegenstände ausprobiert worden sind, wurden die Tester*innen zu ihrem Feedback zur aktuellen Situation der Systeme befragt. Die Proband*innen wurde die Frage gestellt, ob sie in dem verbesserten HI-System das Potential

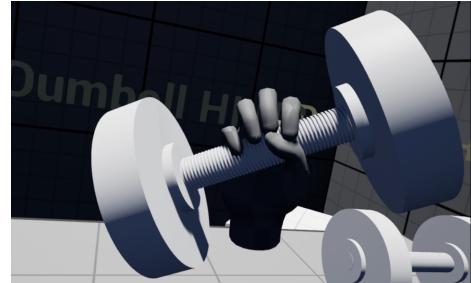


Abbildung 9: Beispiel für einen Griff der Hantel nach der letzten Verbesserungsiteration mit der HIHC-Variante

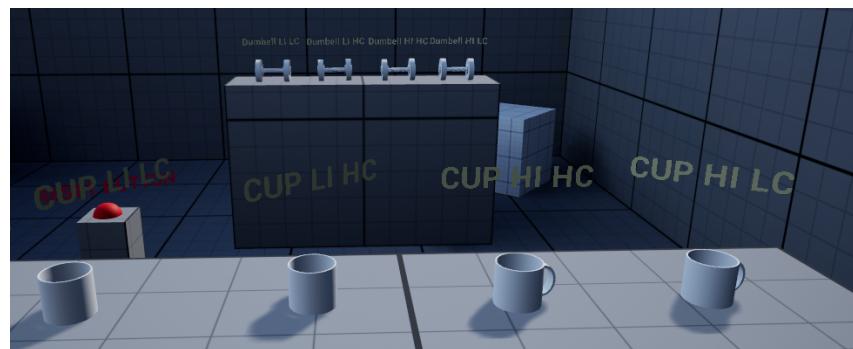


Abbildung 10: Eine Seite des Aufbaus des Pilot Tests

sehen, dass es besser nutzbar beziehungsweise eine realistischere Interaktionsmöglichkeit wäre als die LI-Variante.

Das Ziel war herauszufinden, ob sich der Pilot Test schon als User Studie eignen würde, oder ob es weitere Verbesserungsiterationen benötigen würde, um der*dem Nutzer*in eine Effektive Griffmethode zu garantieren, anhand derer der Test die am meisten wirklichkeitsnahe Griffvariante mit Handtracking aufzeigt. Aufgrund dessen, dass der einzige Zweck dieses Tests war, ob sich das System schon für die Nutzerstudie eignen würde, wurden hierfür nur zwei Tester und eine Testerin aus den Studiengängen Multimediaart und Multimedia Technology im Alter von 22 bis 26 herangezogen. Diese Tester*innen wurden zudem nach ihrer Erfahrung im Umgang mit VR ausgewählt, sodass sie zusätzlich nach spezifischen Verbesserungsvorschlägen gefragt werden konnten, die das HI-System für eine virtuelle Umgebung verwertbar machen könnten. Damit die Tester*innen sich zwischen den verschiedenen Objekten hin und her bewegen konnten wurde das vom Plugin integrierte Laserpointermovement System implementiert. Bei diesem wird die Hand zunächst geschlossen und nach oben gedreht, sodass die Handfläche nach oben zeigt. Daraufhin werden der Zeigefinger und der Daumen ausgestreckt, bis ein sichtbarer weißer Kreis am Boden erscheint (S. Abb. 11). Die Richtung des Zeigefingers gibt an, wo sich der Kreis am Boden befindet. Den Zeigefinger daraufhin wieder zu schließen führt dazu sich an diese Stelle zu teleportieren.

4.2.1 Erwartungen

In diesem Test wurde untersucht, inwiefern die High-Interactivity-Varianten dazu in der Lage sind, eine realistische und effektive Griffinteraktion zu ermöglichen. Hierbei diente der Vergleich mit den Low-Interactivity-Varianten als Maßstab für die Leistungsfähigkeit der Interaktionsmöglichkeiten. Die Effektivität wurde mittels der Funktionalität der realistischen Greifbewegungen der Proband*innen gemessen. Die Funktionalität war dabei abhängig von der Fehlerrate bei der Kollisionserkennung und dem Aufnehmen beziehungsweise Loslassen eines Gegenstandes.

Es wurde davon ausgegangen, dass die Proband*innen in der Lage sein würden, klare Präferenzen hinsichtlich der verschiedenen Interaktionsvarianten zu äußern und Verbesserungsvorschläge für die HI-Variante zu machen. Die Vermutung, dass die Low-Interactivity-Grifftechniken aufgrund ihrer zuverlässigeren Handhabung und der vorhersehbaren Resultate bei Interaktion von den Tester*innen bevorzugt werden würden, wurde im Vorfeld geäußert. Es wurde jedoch auch erwartet, dass die Proband*innen die HI-Variante als realistischer und immersiver ansehen würden, falls ihre Schwächen behoben werden könnten. Diese Annahme basiert auf den

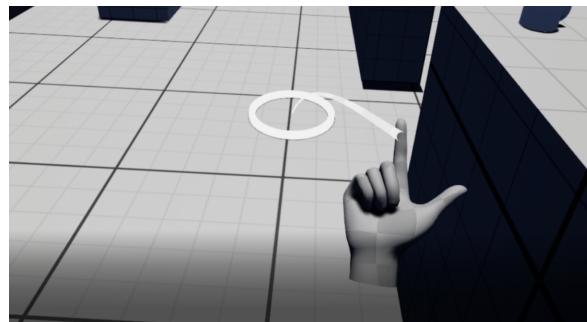


Abbildung 11: Teleportation mittels des Zeigefingers

Ergebnissen von Ganas u. a. (2023, 7f), welche die realistischere Visualisierung als deutlich ansprechender für Nutzer*innen ergaben. Das Game-Feedback für die einzelnen Tester*innen sollte hierbei den entscheidenden Faktor spielen.

4.2.2 Erkenntnisse

Der Pilotversuch zur Evaluation von Interaktivität und Kollisionen in VR-Umgebungen wurde von den Teilnehmerinnen und Teilnehmern unterschiedlich bewertet. Die High-Interactivity Variante wurde als realistischer und adäquater wahrgenommen, da sie sich stärker an der realen Welt orientiert und die Hände entsprechend reagieren. Das vollständige Schließen des Griffmechanismus der Low-Interactivity-Variante wurde von einigen Teilnehmerinnen und Teilnehmern zunächst als unerwartet empfunden, und nicht alle hatten ein Verständnis dafür, wie man diese Objekte greifen kann. Es wurde als unbefriedigend eingestuft. Trotzdem wurde es als Priorität betrachtet, da das Feedback nach dem Greifen dem erwarteten Verhalten entsprach. In der High-Interactivity-Variante war dies nicht immer der Fall. Die Tasse funktionierte laut den Testpersonen sehr gut und wurde sowohl in der High-Interactivity-High-Collision- als auch in der High-Interactivity-Low-Collision-Variante als präsenter und realistischer als die Low-Interactivity-Optionen bewertet. Die Hantel funktionierte mittelmäßig. Aufgrund der schwierigeren Kollisionen bei der Pfanne und dem Oculus-2-Headset sowie des damit einhergehenden unerwarteten Feedbacks, z.B. durch schnelle Bewegungen statt durch Öffnen der Finger, schnitten die Low-Interactivity-Optionen besser ab und erhielten ein besseres Feedback. Insgesamt wurde lieber mit den High-Interactivity-Objekten interagiert, da dies befriedigender wirkte. Das Feedback auf Nutzer*inneninput war bei den Low-Interactivity-Varianten besser, wodurch eine höhere Presence erreicht wurde. Die Testpersonen mochten jedoch die Low-Collision-Objekte weniger als die High-Collision-Objekte. Das Nachberechnen wurde als angenehmer und erwartungsgemäßer empfunden, da keine Einrast-Effekte auftreten und die Fingerrotation dem Aussehen der Hand beim Greifen des Objekts entspricht.

Die Verbesserungsvorschläge ähnelten denen des Proof-of-Concept-Tests. Die Kollision muss schneller reagieren, sobald ein Finger ein Objekt berührt. Zudem sollten die Finger sich nur nach außen öffnen lassen können, da es oft zu Snapping-Effekten kommt, wenn sie zu weit geschlossen werden. Das visuelle Feedback stimmt in diesen Fällen nicht mehr überein. Ein Vorschlag war, das Loslassen ebenfalls über die Fingerrotationen zu berechnen, anstatt wie bisher über die Entfernung der Finger zum ursprünglichen Berührungs punkt. Alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer waren sich einig, dass die Schwellenwerte bei Objekten mit schwierigen Kollisionen besser angepasst werden müssen, damit sie sich beim Loslassen ähnlich gut wie die Tasse verhalten.

4.2.3 Evaluierung und Verbesserungen

Der Pilot Test zeigte, dass das HI-System im Vergleich zum bisher verwendeten LI-System in Bezug auf Realismus, Presence und Feedback für die Spieler*innen potenziell überlegen ist. Allerdings wurden während des Tests einige Probleme festgestellt, die behoben werden müssen.

ten, um sowohl das visuelle als auch das physische Feedback zu verbessern.



Abbildung 12: Beispielgriff für die Tasse nach den letzten Verbesserungen mit der HIHC-Variante

Hand wieder nach außen bewegten und einen bewegten und einen die Berührung gelöst und der Finger galt nicht mehr als kollidiert mit dem Objekt. Dies ähnelt dem schon vorher implementierten System für das visuelle Feedback, welches auf der gleichen Berechnung der außen und innen Rotation basiert. Es wurde festgestellt, dass das Öffnen eines Fingers anhand des Mittleren Knochens adäquater und zuverlässiger funktionierte als anhand der Fingerspitzenrotation. Daher wurde das Erkennungssystem für das Schließen und Öffnen der Hand beziehungsweise der einzelnen Finger entsprechend angepasst.

Eine weitere Verbesserung bestand darin, dass nicht nur die Fingerspitzen als Berührungs punkte der greifbaren Objekte gespeichert wurden, sondern auch die Mittelknochen. Dadurch konnten auch Objekte, die von der Hand umschlossen wurden, korrekt interagieren. Ein Beispiel dafür ist die Hantel, bei der die Hand, wenn man den Griff umschlossen hat, nicht wie erwartet reagiert hat. Dieses Problem konnte durch die zusätzliche Speicherung der Mittelknochenkollisionsob-

Die Ergebnisse des Pilot Tests bestätigten das Interesse der Proband*innen an dem HI-System und ermutigten die Entwickler, das System weiter zu verbessern, bevor es in einer finalen Nutzerstudie mit anderen Varianten verglichen wird. Die Verbesserungen und Änderungen, die nach dem Pilot Test am HI-System vorgenommen wurden, waren umfangreich und basierten auf dem Feedback der Proband*innen.

Eine wichtige Veränderung bestand darin, dass nicht mehr die Position der einzelnen Fingerkollisionsobjekte nach Berührung mit den greifbaren HI-HC und HI-LC Objekten gespeichert wurde, sondern die Rotation der Fingerspitzen. Sobald sich diese relativ zur

gewissen Schwellenwert überschritten, wurde

die Berechnung der außen und innen Rotation basiert. Es wurde festgestellt, dass das Öffnen eines Fingers anhand des Mittleren Knochens adäquater und zuverlässiger funktionierte als anhand der Fingerspitzenrotation. Daher wurde das Erkennungssystem für das Schließen und Öffnen der Hand beziehungsweise der einzelnen Finger entsprechend angepasst.

Eine weitere Verbesserung bestand darin, dass nicht nur die Fingerspitzen als Berührungs punkte der greifbaren Objekte gespeichert wurden, sondern auch die Mittelknochen. Dadurch konnten auch Objekte, die von der Hand umschlossen wurden, korrekt interagieren. Ein Beispiel dafür ist die Hantel, bei der die Hand, wenn man den Griff umschlossen hat, nicht wie erwartet reagiert hat. Dieses Problem konnte durch die zusätzliche Speicherung der Mittelknochenkollisionsob-

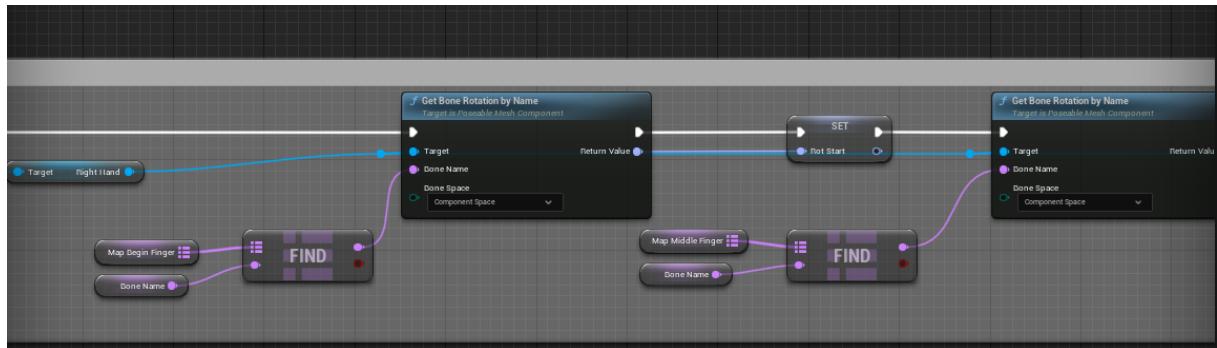


Abbildung 13: Rotationsberechnung und dementsprechende Visualisierung

jekte behoben werden.

Das letzte aufgetretene Problem war mit der relativen Berechnung der Fingerrotation zur Hand verbunden. Die Unreal Engine kombiniert mit der vom Plugin genutzten Hand hat die Fingerrotation nicht wie erwartet berechnet. Im HI-System wurde die Rotation berechnet, indem die Innenrotation anhand einer Achse berechnet wurde - für den Daumen die Z-Achse und für die restlichen Finger die X-Achse. Sobald diese Achse ein Objekt berührt hat, wurde der Rotationswert x gespeichert. Solange diese Rotation größer als der gespeicherte Wert x war, änderte sich die visuelle Fingerrotation nicht. Sobald jedoch die Rotation der genutzten Achse kleiner als der gespeicherte Wert wurde, löste sich der Finger vom Objekt und die Rotation wurde wieder angezeigt. Wenn der gespeicherte Wert x minus die Innenrotation einen bestimmten Schwellenwert überschritten hat, wusste das System, dass der Finger das Objekt losgelassen hat und berechnete, ob noch genügend Finger das Objekt berührten, um es als gegriffen zu betrachten. Wenn der gelöste Finger der Daumen war, wurde der gegriffene Gegenstand sofort als losgelassen gekennzeichnet. Das Problem entstand, als die Innenrotation an einem bestimmten Punkt nicht wie erwartet größer wurde, sondern von 180° auf -180° sprang. Deshalb hat der Finger als Rückmeldung erhalten, dass die Innenrotation kleiner als der gespeicherte Wert sei und somit gelöst wurde. Um dieses letzte Problem zu beheben, wurden verschiedene Remap-Funktionen geschrieben, die sicherstellen, dass die Innenrotationswerte für jeden Finger einzeln immer größer werden, je weiter sich die Finger schließen, und dass der Sprung auf eine Minuszahl nicht zulässig ist. Mit diesen finalen Verbesserungen verhält sich das System wie erwartet, und Interaktionen führen zu sowohl visuellen als auch physischen realistischen Ergebnissen.

Nach diesen Verbesserungen verhält sich das HI-System nun wie erwartet und Interaktionen führen zu sowohl visuellen als auch physischen realistischen Veränderungen. Es ist nun bereit für die finale Nutzerstudie.

4.3 Nutzerstudie

Für die Nutzerstudie war es von großer Bedeutung, nicht nur die jüngsten Verbesserungen zu berücksichtigen, sondern auch festzulegen, welche Fragen gestellt werden sollten und auf welche Weise die vier Varianten miteinander verglichen werden sollten. Ähnlich wie im Pilot-Test wurden alle vier Objekte mit den jeweils vier Varianten nebeneinander angeordnet, damit die Proband*innen die Möglichkeit hatten, jeden Gegenstand auf jede Weise zu testen. Die Bewegung in der VR-Umgebung blieb ebenfalls gleich. Das Ziel der Nutzerstudie war es, die vier Varianten anhand verschiedener Fragen miteinander zu vergleichen, um herauszufinden, welche

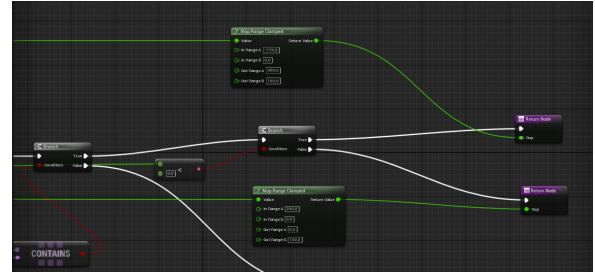


Abbildung 14: Remap Funktionen für richtiges Verhalten der Fingerrotationen

Variante je nach Anwendungsfall am besten geeignet ist. Die Vorlage für das System mit dem die Proband*innen befragt wurden, basiert auf dem Aufbau eines Interviews von Ben Lewis-Evans², der in seinem Blogeintrag einen groben Überblick über Nutzerforschungs-Methoden gibt. Zunächst testet jede*r Nutzer*in das System und wird anschließend in einem Gespräch zu spezifischen Fragen im Umgang mit den Varianten befragt.

Zu diesem Zweck wurden verschiedene Fragen anhand eines Fragebogens gestellt, die auf unterschiedliche Ergebnisse abzielten. Der Fragebogen wurde während des Interviews vom Fragestellenden ausgefüllt. Die erste Frage, die gestellt wurde, nachdem die Tester*innen alle Objekte mit allen Griffsystemen genutzt hatten, war, welche Variante sich am realistischsten und dementsprechend ähnlichsten zu Realität anfühlte. Diese Frage war eng mit der zweiten Frage verbunden, die nach der Presence fragte und diese untersuchte, bei welchem System der Input am ehesten dem Output entsprach, also das Greifen eines Objektes die gewünschte und erwartete visuelle Reaktion bot, um die Presence nicht zu unterbrechen. Außerdem wurde gefragt welche Interaktion sich am besten anfühlt und welche am intuitivsten.

Die weiteren Fragen betrafen das allgemeine Gefühl, zum Beispiel ob irgendwelche Reaktionen zwar korrekt, aber träge in die VR übertragen wurden und ob sich Varianten frustrierend anfühlten und somit negative Gefühle hervorriefen. Dies wurde anhand von sich wiederholenden Fehlern der Reaktion des Programms auf Nutzer*inneneingaben gemessen, sowie durch unerwartetes beziehungsweise falsches Verhalten bei gleicher Eingabe. Je häufiger ein gewünschter Effekt bei der Interaktion mit einem Gegenstand nicht eintrat, desto frustrierender war der Umgang mit diesem Objekt für die Testperson. Die letzte vorgegebene Frage war, welche Variante die Tester*innen sich am ehesten in einem Spiel vorstellen könnten, ohne den Spielfluss durch Unzuverlässigkeit zu unterbrechen.

Am Ende der Nutzerstudie wurde den Teilnehmerinnen die Möglichkeit geboten, ihre Einschätzungen und Anmerkungen zu den getesteten Systemen oder Tests im Allgemeinen zu äußern. Es wurden keine spezifischen Erwartungen an die Teilnehmerinnen gestellt, da das Ziel darin bestand, dass die Nutzerinnen unvoreingenommen durch die Studie navigieren und alle Systeme gleich gut funktionieren sollten. Somit wurden die Ergebnisse ausschließlich auf der Präferenz der Nutzerinnen basierend ausgewertet. Die Auswertung wurde mittels eines Punktesystems und einer subjektiven Rangfolge der Teilnehmerinnen durchgeführt. Die Punktzahl war abhängig von der Position, in welcher die Varianten in der Rangliste der Teilnehmerinnen aufgeführt wurden. Jede Antwort der Teilnehmer*innen wurde gleichwertig bewertet. Die Variante, die den ersten Platz in der Rangliste belegte, erhielt stets vier Punkte, während die viertplatzierte Variante nur noch einen Punkt erzielte (siehe Abbildungen 15-19). Die Punkte wurden summiert und daraus wurden die Ergebnisse der einzelnen Fragen abgeleitet. Die Varianten mit der höchsten Punktzahl wurden im Gesamtergebnis der Nutzerstudie als herausragend in den spezifischen Kategorien angesehen und für die Auswertung und Erkenntnisse genutzt.

Die Proband*innen für die Nutzerstudie waren wie auch schon zuvor im Pilot Test Student*innen aus den Studiengängen Multimediaart und Multimedia Technology. Sechs Tester und eine Testerin im Alter von 22 bis 26 führten die Studie durch und probierten jeden Gegenstand mit

2 <https://www.gamedeveloper.com/business/finding-out-what-they-think-a-rough-primer-to-user-research-part-2>

jeder Griffvariante. Darauf folgend wurden ihnen die genannten Fragen gestellt. Der nächste Abschnitt behandelt die Ergebnisse der Nutzerstudie.

4.3.1 Erkenntnisse

Die Teilnehmerinnen und Teilnehmer der Nutzerstudie beantworteten die Fragen zur Untersuchung der verschiedenen Varianten erstaunlich einheitlich. Nachdem alle Objekte mit den unterschiedlichen Varianten getestet worden waren und alle Teilnehmerinnen und Teilnehmer ihre Antworten abgegeben hatten, ergaben sich in der Auswertung folgende Reihenfolgen in Bezug auf die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Fragen:

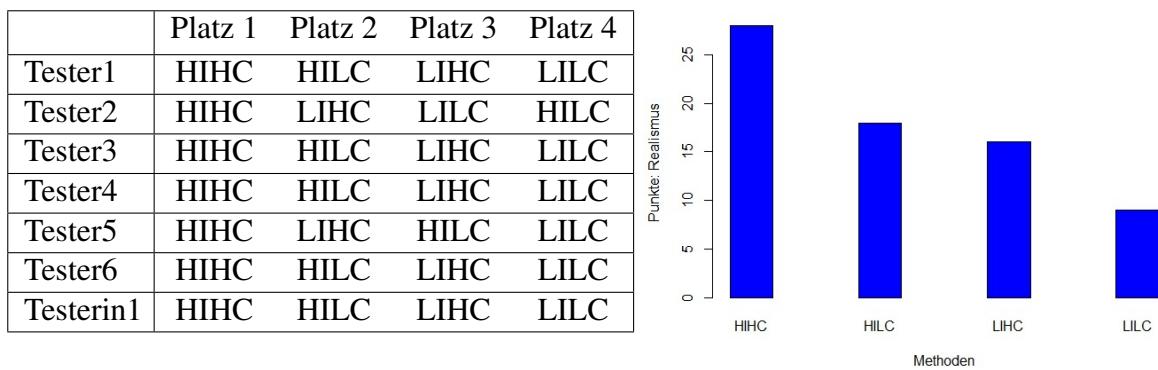


Abbildung 15: Welche Variante überzeugte mit Realismus (1. Platz vier Punkte - 4. Platz einen Punkt)

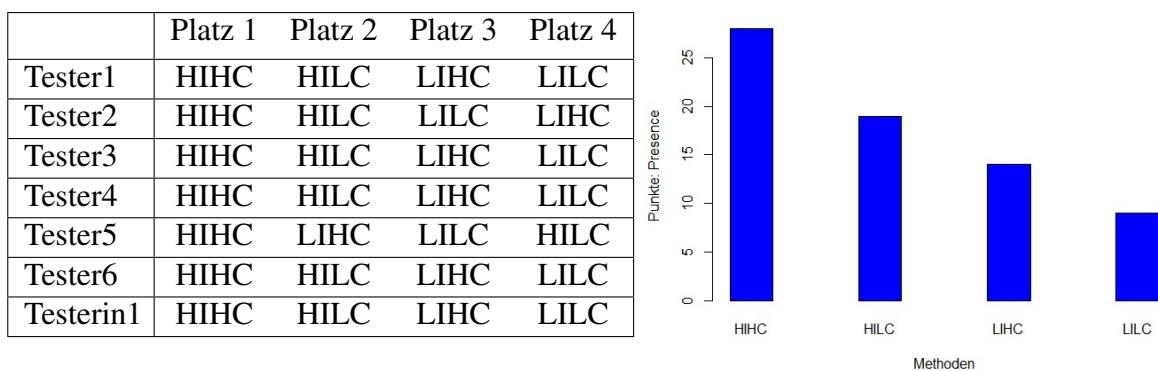


Abbildung 16: Welche Variante führte zur höchsten presence?

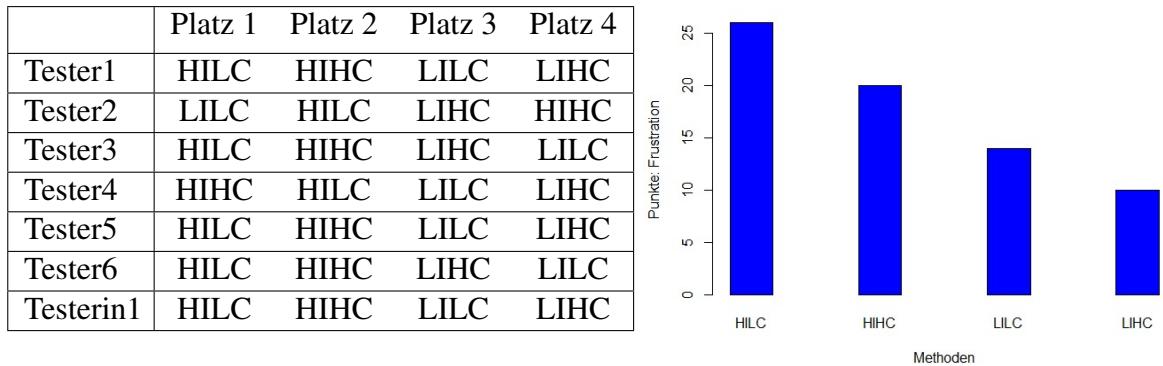


Abbildung 17: Welche Variante führte zur meisten Frustration?

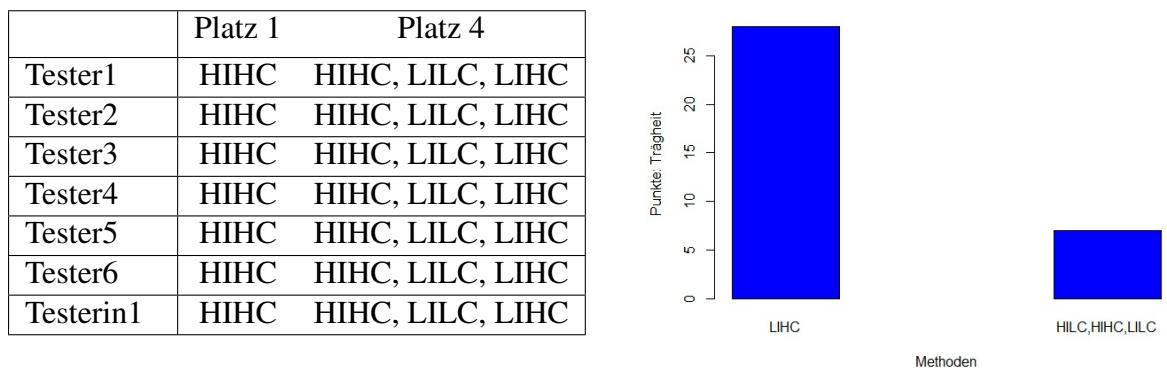


Abbildung 18: Welche Variante führte zu einer trägen Reaktion?

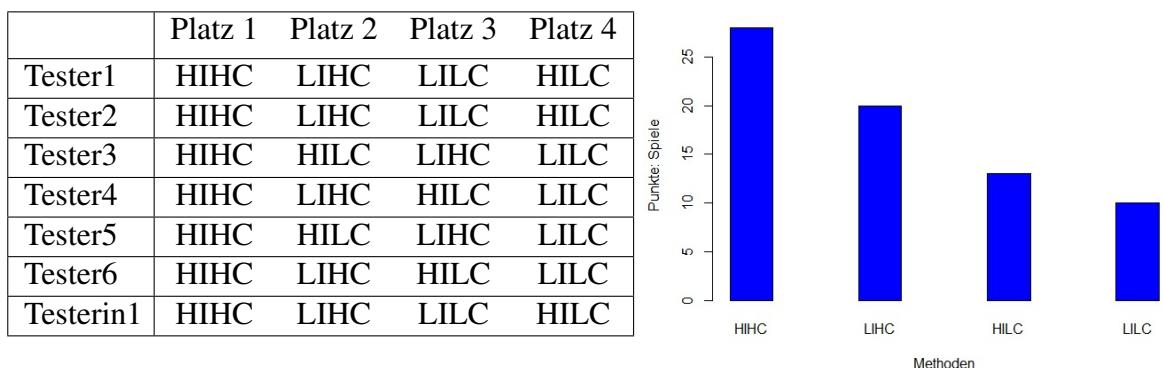


Abbildung 19: Welche Variante ist für Spiele am besten geeignet?

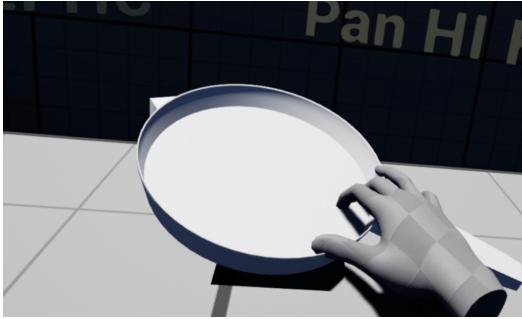


Abbildung 20: Ein Griff der Pfanne mit der LIHC-Variante nach dem Nachberechnen der Fingerpositionen nach dem Schließen der realen Hand zu einer Faust.

fehlende oder falsche Übertragung des Handtrackings kaum beeinträchtigt. Anhand der Frage zur Frustration lässt sich jedoch erkennen, dass die Probleme nicht vollständig behoben wurden. So führte es zu Problemen, wenn der Schwellenwert sich nicht weit genug von der Berührung unterscheiden konnte, wodurch sich die Hand nicht lösen ließ. Außerdem kam es zu Frustration durch Probleme beim Wechseln des Objekts von einer Hand zur anderen. Die LILC-Variante wurde im Vergleich zur LIHC-Variante als schlechter bewertet aufgrund des Einrastens, das bei der LIHC-Variante durch das Nachberechnen vermieden wurde. Letztere setzte sich klar gegenüber den anderen drei Varianten durch, da der Output erwartbar dem Input entsprach. Dafür war diese Variante die Einzige, welche Trägheit beim Greifen aufwies. Aufgrund der rechenintensiven Nachberechnung gingen Frames beim Laden verloren, wodurch das Bild in dieser Zeit stoppte. Die anderen Varianten liefen flüssig in Echtzeit.

Die Versuchspersonen äußerten unterschiedliche Auffassungen bezüglich der Frage nach der Tauglichkeit von haptischen Interaktionssystemen für Computerspiele. Allerdings ergab sich nach einer näheren Erläuterung des Ziels, die meiste Presence und bestmögliche Spielerfahrung zu erzielen, eine eindeutige Tendenz in den Antworten. Die Teilnehmer waren der Ansicht, dass das HIHC-System nach einer gewissen Eingewöhnungszeit die beste Option darstellt, da die Interaktion mit den Objekten am ehesten den Erwartungen entspricht, aufgrund der taktilen Eingabe, auch wenn die Ausgabe nicht immer vollständig zuverlässig ist.

Ergänzende Anmerkungen deuten darauf hin, dass das HI-System insgesamt besser abschneidet. Sowohl die LC- als auch die HC-Variante erzielen deutlich bessere Ergebnisse als die LI-Variante. Insbesondere die HC-Variante, die speziell auf

Zur Frage, ob es weitere Anmerkungen gibt, gab es zwei herausstechende Antworten. Erstens wurde das Einrasten der LILC-Variante stark kritisiert, während die Verbesserungen bei den HI-Varianten nach dem Pilot Test hervorgehoben und gelobt wurden. Insbesondere die Zuverlässigkeit im Greifen und Loslassen wurde positiv bewertet. Im Allgemeinen zeigen die Ergebnisse der Nutzerstudie, dass die High-Interactivity-Varianten die höchste Presence und den höchsten Realismus für die Teilnehmerinnen und Teilnehmer boten. Die Probleme, die bei dem Pilot Test aufgetreten waren, wurden dieses Mal weit weniger bemerkt, weshalb sich diese Variante mit realistischem visuellem Feedback gegen die Low-Interactivity-Varianten durchsetzen konnte. Die Presence wurde durch



Abbildung 21: Ein Beispielgriff der Pfanne mit der HIHC-Variante

das Objekt abgestimmt ist und es den Nutzer*innen ermöglicht, Gegenstände trotz komplexer Formen auf ähnliche Weise wie in der realen Welt zu greifen, erwies sich als die beste. In der abschließenden Studie wurden die HI-Varianten erstmals als nützlicher als die HC-Varianten eingestuft. Diese Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen von Gacias u. a. (2023, 9), bei der das AP-System, ebenfalls eine constrained hand technique (vergleichbar mit der HI-Technik), das beste wahrgenommene Gefühl sowie die größte Eigenverantwortung und Handlungsfähigkeit erreichte.

5 Diskussion

Die vorliegende Arbeit bietet einen Einblick in den Umgang mit verschiedenen Systemen zum Greifen und Manipulieren von Objekten in virtuellen Realitäten. Das Ziel der Studie bestand darin, durch den Vergleich von vier verschiedenen Griffmethoden herauszufinden, welche die für Nutzer*innen intuitivste, realistischste und die Variante, mit der höchsten Presence, ist. Zu diesem Zweck wurden Proband*innen in einer Nutzerstudie mit vier Gegenständen konfrontiert, die mit allen vier Methoden aufgehoben und bewegt werden konnten. Die Ergebnisse wurden im Nachhinein durch Befragungen der Proband*innen erfasst. Es ist jedoch zu beachten, dass die Befunde aufgrund der Limitationen der Studie mit Vorsicht zu betrachten sind. In diesem Kapitel wird eine Reflexion des Forschungsprozesses sowie die potenziellen Konsequenzen des Designs der Arbeit und die möglichen Interpretationen der Ergebnisse diskutiert.

Zusammenfassend ergab die Nutzerstudie, dass eine visuelle Darstellung, die dem Bekannten aus der realen Welt ähnelt (s. bspw. Abb. 9), zu einem höheren Realitätsgefühl führt. Im direkten Vergleich der vier Griffmethoden schnitten die High-Interactivity Systeme deutlich besser ab als die Low-Interactivity Systeme. In Bezug auf Presence, Nutzerfreundlichkeit und Realismus gaben alle Proband*innen an, dass das kollisionsabhängige System mit der Kollision ähnlich der Geometrie eines Objektes den höchsten Grad an Zufriedenheit gewährte. Durch das unausgereifte und neu für die Studie entwickelte System erhielten die High-Interactivity Methoden jedoch auch den höchsten Grad an Frustrationsgefühl im Vergleich. Dennoch präferierten die Tester*innen dieses System und gaben zusätzlich an, dass es ihnen am besten gefallen würde, es in einem zukünftigen Programm zu nutzen. Im Bereich der Performance schnitten alle Systeme, außer der Low-Interactivity High-Collision Methode, die aufgrund der Nachberechnung der Fingerpositionen manchmal Frames verlor, gleich gut ab. Dies bedeutet, dass die Anwendung alle anderen Varianten in real time berechnen und somit eine flüssige und in sich stimmige visuelle Darstellung ermöglicht.

Die Ergebnisse der Studie decken sich mit den Erwartungen an die Systeme. Gacias u. a. (2023, 2) beschreibt in seiner Arbeit ebenfalls, dass von Nutzer*innen trotz höherer Lernkurve constrain hand techniques bevorzugt werden. In dieser Arbeit können die High-Interactivity Methoden als ein CHT-System bezeichnet werden, während die Low-Interactivity Varianten einem penetrative hand technique System ähneln. CHT-Systeme bieten wesentlich mehr Realismus und erwartbare Ausgaben. Zudem fühlen sich gegriffene Objekte deutlich mehr zugehörig und kontrollierbar von der*dem Nutzer*in an. Das Nutzen der Idee von Oprea u. a. (2019, 2f), um

das Greifen für die Engine deutlich zu machen, dass bei mehreren Fingern, die mit einem Gegenstand kollidieren, mindestens immer der Daumen für ein erfolgreiches Anheben beteiligt sein muss, führte zu erstaunlich akkurate Ergebnissen, sowohl bei der Entwicklung als auch bei der Nutzerstudie. Die höhere Interaktivität von Systemen mit Handtracking können zu einer gesteigerten Frustration führen, da Nutzer*innen eine steilere Lernkurve zu bewältigen haben. Die Ergebnisse decken sich mit früheren Untersuchungen von Ganas u. a. (2023, 2). Die vorliegende Arbeit gliedert sich in den Kontext der Forschung zum Handtracking und zeigt, dass realistische Ansätze erfolgreich sein können, wenn die Nutzer*innen ein Gefühl von natürlicher Reaktion der visuellen Darstellung erhalten. Die Anpassung der Hand an die Form eines Gegenstands gemäß der Erwartungen aufgrund von Erfahrungen aus der Realität steigert den Realismus und die Presence. Obwohl das haptische Uncanny Valley, das bei Bewegungen auftritt, die nicht in die virtuelle Umgebung übertragen werden können, in der Arbeit von Berger u. a. (2018, 13) beschrieben wird, konnte dies in der vorliegenden Studie nicht festgestellt werden. Es wurde jedoch festgestellt, dass das Schließen der virtuellen Hand trotz der weiter zugehenden Hand in der Realität nicht erlaubt war. Die vorliegende Studie zeigt, dass die eingesetzte VR-Hardware eine ausreichende Leistung für ein immersives Gefühl durch Handtracking bietet. Allerdings vergleicht die Studie nicht die Leistung oder Kontrolle über Bewegungen oder Handlungen mit einem Controllersystem. Somit bleibt die Frage offen, ob dieser neue Ansatz sich gegenüber etablierten Umsetzungen durchsetzen könnte. Dennoch trägt die vorliegende Arbeit zur Klärung der Frage bei, ob ein Handtrackingsystem entwickelt werden kann, das ein immersives und realistisches Greifen ermöglicht. Die Ergebnisse zeigen, dass dies definitiv möglich ist.

Ergebnisse des High-Interactivity Systems

Die vorliegende Bachelorarbeit hatte zudem das Ziel, verschiedene Hand-Tracking-Techniken in der VR zu untersuchen und ein neu implementiertes High-Interactivity-System als Testumgebung zu nutzen. Dieses System ermöglichte eine vollständig freie Interaktion mit Objekten durch Physik und Kollision in Verbindung mit freiem Handtracking ohne Controller. Zunächst war unklar, ob das HI-System überhaupt funktionieren würde. Erst nach dem Proof-of-Concept-Test wurde entschieden, daran weiterzuarbeiten. Die Ergebnisse des Proof-of-Concept-Tests und des Pilot-Tests zeigten jedoch, dass dieses System nicht nur gut ankam, sondern auch das Potenzial hat, besser als das verwendete Hand-Tracking-Plugin zu werden. Das System stieß zu Beginn auf zahlreiche Probleme, die es zu beheben galt. Nach mehreren Verbesserungsiterationen und häufigem Feedback konnte das System jedoch auf ein Niveau gebracht werden, das von den Testpersonen als präsenter und realistischer empfunden wurde. Es wurde sogar als nutzbarer in Spielen und anderen VR-Anwendungen angesehen als das ursprüngliche Plugin, welches als Basis für das System diente. Das High-Interactivity-System verdeutlicht, dass es möglich ist, reines Handtracking mit realistischem Feedback in ein Unreal-Engine-Projekt zu integrieren und Objekte interagierbar zu machen, ohne dass spezielle Hardware benötigt wird. Dies stellt eine vielversprechende Innovation dar, die es ermöglicht, eine realistische und immersive Interaktion mit Objekten in der virtuellen Welt zu erreichen.

Die Ergebnisse der Nutzerstudie legen nahe, dass es Interesse an solch einem System gibt und die Weiterentwicklung sinnvoll erscheint. Insgesamt zeigt das High-Interactivity-System das

Potenzial für die weitere Entwicklung von VR-Anwendungen, die auf natürlicher Handbewegung und Interaktion basieren. Die erfolgreiche Integration des Systems in das vorliegende Projekt unterstreicht die Relevanz und Bedeutung dieses Ansatzes für die zukünftige Gestaltung von VR-Anwendungen. Der Ausblick dieser Studie beinhaltet mögliche zukünftige praktische Anwendungen und gibt konkrete Ideen für weitere Forschung.

6 Ausblick

Virtual Reality ist ein aufstrebender Markt, der sich rasant entwickelt. Immer neue Anwendungsbereiche und Arten von Anwendungen entstehen, die kontinuierlich weiterentwickelt werden. Eine besonders vielversprechende Entwicklung in den letzten Jahren ist die Möglichkeit, die eigenen Hände ohne spezielle Zusatzhardware in VR nutzen zu können. Diese Art der Interaktion und Visualisierung kommt der realen Bewegung am nächsten und erzeugt ein besonders präsenztes Erlebnis.

In der vorliegenden Arbeit wurde mittels einer Nutzerstudie eine vielversprechende Methode gefunden, die sich die Proband*innen in zukünftigen Anwendungen vorstellen können. Die Ergebnisse zeigen, welcher Realismus durch Handtracking geschaffen werden kann. So können virtuelle Objekte mit der eigenen Hand gegriffen und manipuliert werden, was vor einigen Jahren noch undenkbar war. Diese Methoden sind vielversprechend und können in Zukunft in verschiedenen Anwendungen und Spielen zuverlässig genutzt und integriert werden.

Eine mögliche Weiterentwicklung dieser Studie wäre der Vergleich zwischen einer High-Interactivity Methode und einem Controller-System. Denn diese Studie unterstützt, ähnlich einer Arbeit von Masurovsky u. a. (2020, 14f), nicht die Hypothese, dass reines Handtracking eine natürlichere Interaktion ermöglicht als traditionelle Controller, da dieser Aspekt in der Studie nicht hinterfragt wurde. Dieser Gesichtspunkt sollte in künftigen Studien weiter erforscht werden.

Obwohl traditionelle Controller vorerst ein besseres Interaktionsgefühl bieten, kann sich dies in Zukunft ändern. Eine Analogie hierzu ist die langjährige Überlegenheit von Maus und Tastatur gegenüber Touch-Systemen. Erst mit der Entwicklung von intelligenten Algorithmen und einfach bedienbaren Touchscreens hat sich dies geändert (Masurovsky u. a. 2020, 14f). Ähnlich könnte es auch bei Handtracking sein: Mit weiteren Entwicklungen, der Integration in verschiedene Anwendungen und einer größeren Akzeptanz der Bevölkerung könnte Handtracking zu einer allgemeinen Verbesserung der Interaktion werden und irgendwann sogar Controller überflüssig machen. Handtracking könnte zudem bei iterativen Verbesserungen von Controllern auch die Benutzererfahrung verbessern. Revolution ist ein häufig benutzter Begriff, der zukünftig in der Frage nach der Standart-Interaktionsmethode, gerechtfertigt sein könnte. Die Unreal Engine 5 ermöglicht bereits heute realistische Visualisierungen in Echtzeit, die der realen Welt sehr ähnlich sind. In Verbindung mit VR und natürlicher Interaktivität könnte dies zu virtuellen Welten führen, in denen man vollkommen eintauchen kann. Diese Technologien entwickeln sich stetig weiter und werden zukünftig eine immer wichtigere Rolle in verschiedenen Branchen und Anwendungen spielen.

Literaturverzeichnis

- Berger, Christopher C., Mar Gonzalez-Franco, Eyal Ofek und Ken Hinckley. 2018. »The uncanny valley of haptics«. *Science robotics* 3 (17). <https://doi.org/10.1126/scirobotics.aar7010>.
- Bowman, Doug A., und Ryan P. McMahan. 2007. »Virtual Reality: How Much Immersion Is Enough?« *Computer* 40 (7): 36–43. ISSN: 0018-9162. <https://doi.org/10.1109/MC.2007.257>.
- Buckingham, Gavin. 2021. »Hand Tracking for Immersive Virtual Reality: Opportunities and Challenges«. *Frontiers in Virtual Reality* 2. <https://doi.org/10.3389/frvir.2021.728461>.
- Ganias, Giorgos, Christos Lougiakis, Akrivi Katifori, Maria Roussou, Yannis Ioannidis und Ioannis Panagiotis Ioannidis. 2023. »Comparing Different Grasping Visualizations for Object Manipulation in VR using Controllers«. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 29 (5): 2369–2378. ISSN: 1077-2626. <https://doi.org/10.1109/TVCG.2023.3247039>.
- Jörg, Sophie, Yuting Ye, Franziska Mueller, Michael Neff und Victor Zordan. 2020. »Virtual hands in VR«. In *SIGGRAPH Asia 2020 Courses*, 1–32. ACM Digital Library. New York, NY, United States: Association for Computing Machinery. ISBN: 9781450381123. <https://doi.org/10.1145/3415263.3419155>.
- Kavanagh, Sam, Andrew Luxton-Reilly, Burkhard Claus Wuensche und Beryl Plimmer. 2017. »A systematic review of Virtual Reality in education«.
- Liu, Hangxin, Zhenliang Zhang, Xu Xie, Yixin Zhu, Yue Liu, Yongtian Wang und Song-Chun Zhu. 2019. »High-Fidelity Grasping in Virtual Reality using a Glove-based System«. In *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 5180–5186. IEEE. ISBN: 978-1-5386-6027-0. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8794230>.
- Masurovsky, Alexander, Paul Chojecki, Detlef Runde, Mustafa Lafci, David Przewozny und Michael Gaebler. 2020. »Controller-Free Hand Tracking for Grab-and-Place Tasks in Immersive Virtual Reality: Design Elements and Their Empirical Study«. *Multimodal Technologies and Interaction* 4 (4): 91. <https://doi.org/10.3390/mti4040091>.
- Mazurek, Justyna, Paweł Kiper, Błażej Cieślik, Sebastian Rutkowski, Krzysztof Mehlich, Andrea Turolla und Joanna Szczepańska-Gieracha. 2019. »Virtual reality in medicine: a brief overview and future research directions«. *Human Movement* 20 (3): 16–22. ISSN: 1899-1955. <https://doi.org/10.5114/hm.2019.83529>. <http://dx.doi.org/10.5114/hm.2019.83529>.
- Newman, M., B. Gatersleben, K. J. Wyles und E. Ratcliffe. 2022. »The use of virtual reality in environment experiences and the importance of realism«. *Journal of Environmental Psychology* 79:101733. ISSN: 02724944. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2021.101733>.
- Oprea, Sergiu, Pablo Martinez-Gonzalez, Alberto Garcia-Garcia, John A. Castro-Vargas, Sergio Orts-Escalano und Jose Garcia-Rodriguez. 2019. »A visually realistic grasping system for object manipulation and interaction in virtual reality environments«. *Computers & Graphics* 83:77–86. ISSN: 00978493. <https://doi.org/10.1016/j.cag.2019.07.003>.