

UNIVERSITÄT BREMEN

FACHBEREICH 3 - INFORMATIK UND MATHEMATIK

COMPUTER GRAPHICS AND VIRTUAL REALITY RESEARCH LAB



Universität
Bremen

Embodiment in virtuellen Umgebungen

Analyse des Einflusses von Avatarrepräsentation und Latenz

Niklas Bockelmann

Matrikelnummer: 4121534

Bachelor's Thesis

im Studiengang Informatik

1.Prüfer: Prof. Gabriel Zachmann

2.Prüfer: Dr. René Weller

Betreuer: Roland Fischer

Abgabetermin: 05.Mai 2024

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und nur die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe.

Bremen, 3. Mai 2024

Unterschrift: _____

Danksagungen

Ich möchte mich an dieser Stelle herzlichst bei meiner Mutter bedanken, die mich tatenkräftig während des Bachelorstudiums unterstützt hat. Zudem bedanke ich mich bei allen Probanden und besonders bei Haya, Tobias und Andre, die mich in die Techniken des Labors einwiesen, bei der Probandensuche halfen und es mir ermöglichten, immer weiter voranzuschreiten.

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit dem Einfluss von Latenz und Avatarrepräsentation auf die Fähigkeit, seinen Avatar als eigenen Körper zu akzeptieren. Eine Studie wurde konzipiert und durchgeführt, in der Probanden mehrere Aufgaben durchführten, während sie Szenarien von verschiedenen Latenzen und Avatardarstellungen ausgesetzt waren. Der erste Avatar bestand aus einem vorher generierten Mesh und der zweite Avatar wurde durch eine RGB-Tiefenkamera mit Partikeln dargestellt. Die Latenzen variierten zwischen 150 ms, 225 ms und 300 ms. Die Ergebnisse der Studie wurden abschließend evaluiert.

Genderhinweis

Aus Gründen der leichteren Lesbarkeit wird in der vorliegenden Bachelorarbeit die gewohnte männliche Sprachform bei personenbezogenen Substantiven und Pronomen verwendet. Dies impliziert jedoch keine Benachteiligung des weiblichen Geschlechts, sondern soll im Sinne der sprachlichen Vereinfachung als geschlechtsneutral zu verstehen sein.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Problemstellung	1
1.3	Zielsetzung	2
1.4	Struktur der Arbeit	2
2	Grundlagen und verwandte Arbeiten	3
2.1	Definitionen der relevanten Begriffe	3
2.2	Avatar Repräsentation	4
2.3	Point-Cloud	5
2.4	Latenz	8
2.4.1	Wahrnehmung von Latenz in der virtuellen Realität	9
2.4.2	Einfluss von Latenz auf Embodiment	9
2.4.3	Einfluss von Latenz auf Cyber-Sickness	9
2.4.4	Einfluss von Latenz auf Performance und Experience	10
2.5	Cyber-Sickness	11
3	Implementation	12
3.1	Erstellen des Mesh-Avatars	12
3.2	Animation des Mesh-Avatars	13
3.3	Berechnung der Offsets	15
3.4	Point-Cloud-Avatar	16
3.5	Hinzufügen der Latenz	16
3.6	Implementation der Aufgaben	17
3.6.1	Virtueller Raum	17
3.6.2	Aufgabe 1 - Kugelaufgabe	18
3.6.3	Aufgabe 2 - Seifenblasenaufgabe	20
3.6.4	Aufgabe 3 - Spiegelaufgabe	21
3.6.5	Virtueller Fragebogen	22
3.7	Logging	23
4	Experiment	24
4.1	Hypothesen	24
4.2	Probanden	25

4.3	Aufbau	26
4.3.1	Technische Details	26
4.3.2	Voreinstellung	26
4.3.3	Aufgaben	27
4.3.4	Vorstudie	29
4.3.5	Vorfragebogen	30
4.3.6	Fragebogen	31
4.4	Durchführung	33
5	Ergebnisse und Evaluation	36
5.1	Statistische Analyse	36
5.2	Body Ownership	37
5.3	Agency	39
5.4	Self-Location	41
5.5	Embodiment	43
5.6	Effizienz	46
5.7	Wahrnehmung von Latenz	49
5.8	Cybersickness	50
6	Diskussion	52
7	Ausblick und Fazit	54
7.1	Ausblick	54
7.2	Fazit	55
	Glossar	58
	Akronyme	58
	Literatur	59

1 Einleitung

1.1 Motivation

Virtuelle Realität betrifft immer häufiger unseren Alltag. Sei es durch den Zeitvertreib mit Videospielen, Simulationen von Szenarien oder Kommunikation mit Freunden oder Kollegen. Das Potenzial von virtueller Realität ist riesig, aber die Technik und die Methoden sind noch nicht ausgefeilt. Jedes Jahr werden neue Head-Mounted Display-Brillen mit neuen Features entwickelt, die das Erlebnis in virtueller Realität verbessern sollen. Eine essenzielle Komponente für die Immersion in virtueller Realitäten ist die Darstellung des Nutzers in der virtuellen Realität.

Diese Darstellung wird normalerweise durch einen Avatar umgesetzt. Die Immersion des Nutzers hängt sehr davon ab, ob er sich durch den Avatar in der virtuellen Realität repräsentiert fühlt und das Gefühl hat, er selbst sei dieser Avatar. Dieses Gefühl wird in der Forschung *Embodiment* genannt. Forschungen haben ergeben, dass das Embodiment deutlich besser ausfällt, wenn die Qualität der Darstellung des Avatars besser ist. In Laborexperimenten und bei der Produktion von Spielen und Filmen werden Avatare mit einem Motion-Capture System dargestellt. Diese Technik ist für die meisten Nutzer von virtuellen Systemen nicht zugänglich.

Eine neue Technik, an der geforscht wird, ist die Darstellung des Avatars als eine *Point-Cloud*. Diese Point-Cloud entsteht durch die Aufnahme einer oder mehrerer Tiefenkameras und projiziert den Nutzer mit seiner Erscheinung aus der echten Welt in die virtuelle Umgebung.

1.2 Problemstellung

Eine herkömmliche Avatardarstellung wird direkt in der Game Engine generiert und gerendert. Anschließend muss dieses Bild nur noch zur HMD des Nutzers übertragen werden.

Die Pipeline für die Darstellung der Point-Cloud ist deutlich länger. Zuerst muss das Tiefenbild mit der Tiefenkamera aufgenommen, komprimiert und anschließend von der Kamera zur Game Engine gesendet werden, bevor das Bild wieder dekomprimiert wird. Erst dann kann der Renderprozess beginnen. Dieser Vorgang kann je nach Hardware mehrere Zehntelsekunden dauern und verursacht eine Verzögerung zwischen der

Bewegung des Nutzers und der Bewegung des Avatars. Durch diese Verzögerung in der Avatardarstellung, auch Latenz genannt, wird das Embodiment negativ beeinflusst.

Bisherige Forschungsergebnisse legen nahe, dass das Aussehen des Avatars nicht die höchste Priorität für gutes Embodiment hat und ein gutes Embodiment auch mit schlechter Qualität des Aussehens erreichbar ist. Es ist daher ungewiss, ob eine Point-Cloud mit hoher Latenz den Nutzer besser verkörpern würde als eine unrealistischere Darstellung mit weniger Latenz (Fribourg et al. (2020)).

1.3 Zielsetzung

Es wurde bisher nicht ausreichend erforscht, ob ein Avatar, der durch einen längerandauernden Renderprozess eine bessere Qualität erreicht, schlussendlich auch ein besseres Embodiment hervorruft. Zudem gilt es herauszufinden, wie hoch die Latenzen für die Generierung der Point-Cloud sein dürfen, bis das Embodiment darunter leidet. Um diese Fragen zu beantworten, wurde diese Arbeit geschrieben.

1.4 Struktur der Arbeit

Beginnend mit Kapitel 2 werden die Begriffe definiert, die diese Arbeit prägen. Zusätzlich werden die Ergebnisse anderer Wissenschaftler in den Kontext dieser Arbeit einbezogen. In Kapitel 3 wird die Implementation der Avatare, verstellbaren Latenz und der Aufgaben beschrieben. Das Kapitel 4 befasst sich mit den Hypothesen der Studie und dem Aufbau und der Durchführung des Experiments. Die Ergebnisse der Studie werden in Kapitel 5 geschildert und evaluiert bevor sie in Kapitel 6 diskutiert werden. Abschließend wird in Kapitel 7 ein Fazit gezogen sowie ein Ausblick auf potenzielle zukünftige Forschung gegeben.

2 Grundlagen und verwandte Arbeiten

2.1 Definitionen der relevanten Begriffe

In virtuellen Welten ist es üblich, dass der Benutzer der HMD mit einem imaginären Körper dargestellt wird, der Avatar genannt wird. Der Entwickler kann sich zwischen vielen Möglichkeiten entscheiden, diesen Avatar herzustellen. Je nach Herstellungsverfahren variieren die Qualität und Eigenschaften des Avatars und wenn der Avatar in Echtzeit berechnet werden soll, wird die Motion-to-Photon Latenz erhöht. Stauffert et al. (2020) definieren die Motion-to-Photon Latenz als die Zeit zwischen der Bewegung eines verfolgten Objekts und seiner entsprechenden Bewegung auf einem grafischen Bildschirm durch computergenerierte gerenderte Bilder. Eine andere Bezeichnung für diese Zeit ist die Ende-zu-Ende Latenz.

Sowohl die Avatardarstellung als auch die Motion-to-Photon Latenz beeinflussen das Embodiment eines Nutzers gegenüber seinem Avatar. Nach Eubanks et al. (2020) ist Embodiment gegenüber einem virtuellen Körper das Gefühl, das entsteht, wenn die Eigenschaften dieses virtuellen Körpers so akzeptiert werden, als wären es die Eigenschaften des eigenen physischen Körpers. Kiltner et al. (2012) haben drei Faktoren für das Embodiment identifiziert: Body Ownership, Agency und Self-Location.

Nach der Definition von Tsakiris et al. (2006) ist Body Ownership das Gefühl, dass der eigene Körper die Quelle von Empfindungen ist. Im Kontext von virtuellen Umgebungen bezieht sich die Body Ownership nicht auf den eigenen, sondern auf den digitalen Körper. Dieses Phänomen wird von Lugrin et al. (2015) auch *Illusion of Virtual Body Ownership* genannt.

Agency definieren sie als die Absicht und die Ausführung von Handlungen, einschließlich des Gefühls der Kontrolle über die eigenen Körperbewegungen und durch diese auf die Ereignisse in der äußeren Umgebung.

Nach Arzy et al. (2006) bedeutet Self-Location, sich innerhalb der räumlichen Grenzen eines Körpers zu lokalisieren.

Ein derzeit vorhandenes Problem der VR-Technologie ist das Auftreten von Symptomen wie Kopfschmerzen, Schwindel oder Übelkeit bei den Nutzern. Das Phänomen dieser Symptome wird Cyber-Sickness genannt und kann bei hohen Motion-to-Photon Latenzen auftreten.

2.2 Avatar Repräsentation

Die Art der Repräsentation eines Nutzers durch einen Avatar in der virtuellen Umgebung hat entscheidende Auswirkungen auf die Erfahrung des Nutzers.

Yee & Bailenson (2007) kamen bei ihren Forschungen zu dem Ergebnis, dass sich das Verhalten einer Person in virtuellen Welten abhängig von den Eigenschaften ihres Avatars verändert. Dieses Phänomen haben sie als den *Proteus Effekt* bezeichnet. McManus et al. (2011) entdeckte, dass Benutzer Aufgaben genauer und schneller ausführen konnten, wenn sie einen Selbst-Avatar nutzten. Außerdem verbessert die Anwesenheit eines Selbst-Avatars die Body Ownership, Agency, und Präsenz im Vergleich zur Abwesenheit eines Selbst-Avatars. Zudem könnte nach Steed et al. (2016) ein Selbst-Avatar die mentale Belastung eines Nutzers verringern. Peck & Tutar (2020) haben die Auswirkung von Selbst-Avataren und genauer Repräsentation der Hände untersucht. Die Ergebnisse ihrer Studie zeigen, dass sich die Teilnehmer verkörpert fühlten, wenn ein Selbst-Avatar in der Szene präsent war. Eubanks et al. (2021) kamen zu dem Ergebnis, dass Avatare Body Ownership signifikant verbessern.

Der Grad des Realismus von einem Avatar könnte ein wichtiger Faktor für das Embodiment des Nutzers sein. Nach Maselli & Slater (2013) ist es bedeutend, dass die Kleidung und Haut des Avatars mit denen des Nutzers übereinstimmen. Latoschik et al. (2017) forschten an dem Einfluss von realistischen Avataren, die durch einen 3D Scan generiert wurden. Die gescannten Avatare schienen menschlicher zu sein und wiesen ein besseres Body Ownership im Vergleich zu den künstlichen Avataren auf.

Den Forschungen von Waltemate et al. (2018) zufolge, erhöhen personalisierte Avatare die Body Ownership, die Präsenz und die Dominanz im Vergleich zu ihren generischen Gegenständen, selbst wenn letztere mit demselben Fotogrammetrieverfahren erzeugt wurden und somit in Bezug auf Realitätsgrad und grafische Qualität als gleichwertig eingestuft werden könnten. Zusätzlich steigert der Grad der Immersion Body Ownership, Agency und das Gefühl der Präsenz. Eine weitere Methode, um einen qualitativ hochwertigen und personalisierten Avatar herzustellen, ist eine Point-Cloud.

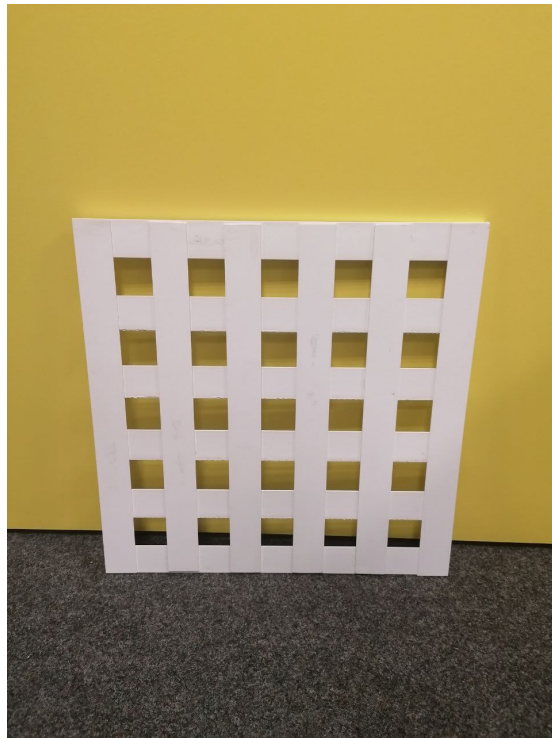


Abbildung 1: Das Gitter für die Registrierung

2.3 Point-Cloud

Eine Point-Cloud ist eine Menge an Punkten, die in einem Vektorraum eine unorganisierte räumliche Struktur aufweist. Wissenschaftler haben Methoden erforscht, um Tiefenkamerabilder mittels Point-Clouds in der virtuellen Realität zu visualisieren. Die Kamera kann auch einen Nutzer aufnehmen und ihn als sogenannten *Point-Cloud-Avatar* in der virtuellen Welt darstellen. Yu et al. (2021) zeigten, dass ihr Point-Cloud Avatar ihrem virtuellen Mesh-Avatar in Bezug auf wahrgenommene Kopräsenz, soziale Präsenz, Verhaltenseindruck und Menschlichkeit überlegen war. Der auf der Point-Cloud basierende Ansatz führte zudem zu höheren Bewertungen bei der Benutzerfreundlichkeit.

Registrierung der RGB-Tiefenkamera

Eine Lösung für die Registrierung der RGB-Tiefenkamera *Azure Kinect* entwickelten Mühlenbrock et al. (2022). Die Pixel, die von der Azure Kinect aufgenommen wurden, mussten von dem Koordinatensystem der Azure Kinect in das Koordinatensystem der Unreal Engine Anwendung transformiert werden. Für die Berechnung der Transforma-

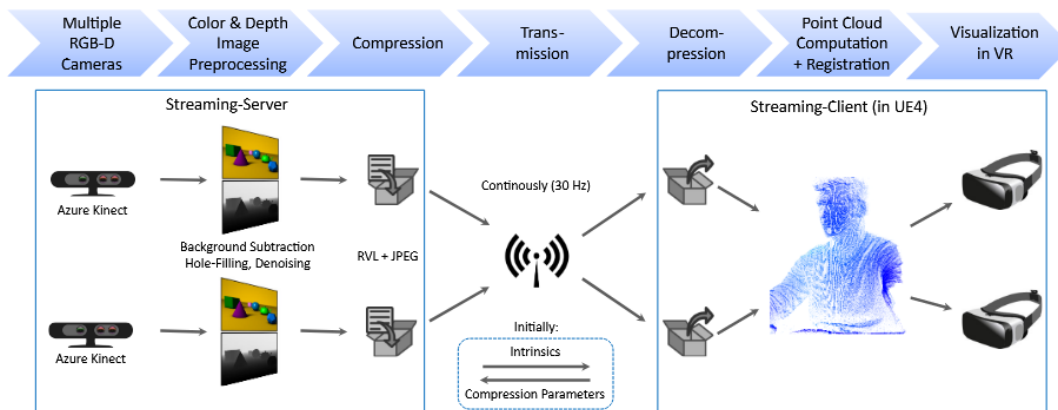


Abbildung 2: Die Point-Cloud streaming pipeline von Fischer et al. (2022)

tionsfunktion wurde ein 5x5 3D-Gitter als Referenzobjekt benutzt. Ein Algorithmus suchte nach dem Gitter in der Bildaufnahme. Hierfür wurde das Bild erst nach Gitterstrukturen und in diesen Gitterstrukturen nach Löchern durchsucht. Anschließend wurde die Achse des Gitters bestimmt. Während der Berechnung hielt der Benutzer zwei Motion Controller an je eine bestimmte Stelle am Gitter und bewegte das Gitter in verschiedene Posen, um möglichst viele unterschiedliche Daten aufzunehmen. Nachdem die Position und Rotation des Gitters ermittelt wurde, konnte anhand des festdefinierten Offsets der Controller die Position der Controller im Kamerakoordinatensystem ermittelt werden. Diese Positionen waren im Koordinatensystem der virtuellen Welt durch das Tracking des VR-Headsets bereits bekannt. Mithilfe der SVD-basierten Transformati-onsschätzung konnte dann die Transformation zwischen beiden Koordinatensystemen berechnet werden.

Streaming der Point-Cloud

Eine performante Streaming-Pipeline wurde von Fischer et al. (2022) entwickelt. Das Streaming der Point-Cloud von der Aufnahme bis zur Visualisierung in der virtuellen Welt erfolgte in mehreren Schritten. Der erste Schritt war die Vorbereitung der Farb- und Tiefenbilder durch Linsenkorrektion-, Zuschneide- und Filteralgorithmen. Danach wurden die Bilder komprimiert und zum Client gesendet, wo sie dekomprimiert wurden. Anschließend wurden die Point-Clouds registriert und gerendert. Die Motion-to-Photon Latenz für die Streaming-Pipeline lag bei 120-150ms.

Rendering der Point-Cloud

Neben der Entwicklung einer Pipeline kreierten Fischer et al. (2022) eine Methode, um die Point-Cloud in der virtuellen Welt zu rendern.

Eine dieser Methoden benutzte das Niagara Partikelsystem von Unreal Engine. Damit die Point-Cloud Positionen und Farben von der CPU zur GPU gesendet werden, wurden zwei dynamische Texturen benutzt. Durch Niagara Modulskripte wurden schließlich UV-Koordinaten berechnet. Punkte, die zu weit von der HMD entfernt waren und damit nicht mehr zum Nutzer gehörten und Punkte, die auf der Position der HMD lagen und damit die Sicht blockieren könnten, wurden entfernt.

2.4 Latenz

Forscher	Signifikante Latenz	Beschreibung
Card et al. (1991)	100 ms	100 ms ist die längste akzeptable Latenz, um die Illusion zu erzeugen, dass ein System sofort reagiert
Shneiderman & Plaisant (2004)	50-150 ms	50-150 ms ist die längste akzeptable Latenz für einfache, repetitive Aufgaben
Tolia et al. (2006)	150 ms	Unter 150 ms wird die Leistung des Nutzers nicht negativ beeinflusst und die Latenz wird nicht bemerkt
Seow (2008)	100-200 ms	100-200 ms ist die längste akzeptable Latenz, damit ein Nutzer die Latenz bei der Rückmeldung des Systems nicht bemerkt
Doherty & Sorenson (2015)	300 ms	Unter 300 ms hatten die Nutzer das Gefühl, dass sie die direkte Kontrolle hatten
Waltemate et al. (2016)	60 ms /300 ms	Effizienz und Embodiment verringern sich ab 60 ms und stürzen bei 300 ms ein
Albert et al. (2017)	50-70 ms	Latenz konnte erst ab einer Höhe von 50-70 ms bemerkt werden
Kasahara et al. (2017)	104 ms	Ab einer Ende-zu-Ende Latenz von 104 ms verlieren die Nutzer ihre Body Ownership
Caserman et al. (2019)	63 ms	Eine Ende-zu-Ende-Latenz über 63 ms ruft signifikante Cyber-Sickness Symptome hervor
Toothman & Neff (2019)	300 ms	Qualitativer Verlust in der Erfahrung bei ca. 300 ms

Tabelle 1: Die Tabelle fasst die gesammelten Ergebnisse von Attig et al. (2017) und nachfolgende Forschungen bezüglich des Einflusses von Latenz zusammen

2.4.1 Wahrnehmung von Latenz in der virtuellen Realität

Die Auswirkungen einer hohen Latenz auf den Nutzer können sich verringern, wenn die Latenz vom Nutzer nicht wahrgenommen wird. Stauffert et al. (2018) untersuchten die Auswirkungen von Latenzjitter auf Cyber-Sickness in virtueller Realität. In ihrer Studie bemerkte fast die Hälfte der Teilnehmer den Latenzjitter nicht und nur die, die ihn wahrnahmen, empfanden ihn als störend. Nach Waltemate et al. (2016) wird die Gleichzeitigkeitswahrnehmung durch Latenzen über 75 ms beeinträchtigt.

Die Höhe der Latenz ist nur ein Faktor, der die Wahrnehmung von Latenz beeinflusst. Die Aktivitäten des Nutzers in der virtuellen Welt können sich auf die Wahrnehmung der Latenz auswirken. Hoyet et al. (2019) entdeckten eine Relation zwischen der Bewegungsgeschwindigkeit eines Objekts, das mit der Hand verfolgt werden sollte, und der Wahrnehmung von Latenz.

2.4.2 Einfluss von Latenz auf Embodiment

Eine zu hohe zeitliche Diskrepanz zwischen der Bewegung des Nutzers und der darauffolgenden Bewegung des Avatars kann zur Folge haben, dass der Nutzer seinen virtuellen Körper nicht mehr als seinen eigenen Körper sieht.

Kasahara et al. (2017) und Caserman et al. (2019) beobachteten, dass die Teilnehmer bei einer Ende-zu-Ende-Latenz von 101-104 ms ihre Body Ownership verlieren. Bei den Teilnehmern der Studie von Waltemate et al. (2016) fing die Agency und Body Ownership erst bei einer Latenz von mehr als 125 ms an sich zu verschlechtern und ab 300 ms verschlechterte es sich deutlich, aber die Agency und Body Ownership ging selbst bei der höchsten getesteten Latenz von 350 ms nicht verloren. In ihrer Studie führten die Teilnehmer jedoch motorische Aufgaben in einer Cave-Umgebung durch und verwendeten keine HMD. Ein weiterer Effekt von Latenzen ab 90 ms ist die Abschwächung des subjektiven Gefühls der Anwesenheit (Held & Durlach (1993), Meehan et al. (2003)).

2.4.3 Einfluss von Latenz auf Cyber-Sickness

Di Luca (2010) fanden heraus, dass eine Ende-zu-Ende-Verzögerung die Art und Weise, wie man multisensorische Informationen kombiniert, verändern kann. Wenn die sensorischen Informationen zwischen Auge und Gleichgewichtssinn nicht übereinstimmen,

könnte der Nutzer von Cyber-Sickness betroffen werden (Kawamura & Kijima (2016), Stauffert et al. (2018), Shafer et al. (2019)). Diese Theorie wird *sensory conflict theory* genannt.

Die Ergebnisse von Caserman et al. (2019) zeigen, dass Ende-zu-Ende Latenzen über 63ms deutliche Cyber-Sickness Symptome verursachen. Dizio & Lackner (2000) legen nahe, dass Verzögerungen von mehr als 40 ms bereits Cyber-Sickness und Haltungsinstabilität hervorrufen. Waltemate et al. (2016) kamen zu anderen Ergebnissen. Die Nutzer ihrer Studie zeigten selbst bei einer Ende-zu-Ende-Latenz von über 350 ms keine Symptome von Cyber-Sickness.

2.4.4 Einfluss von Latenz auf Performance und Experience

Wenn sich ein Nutzer der Latenz bewusst wird, können Benutzerfahrung (Zhou et al. (2016) und Benutzerzufriedenheit (Fischer et al. (2005)) darunter leiden. Auch wenn der Nutzer die Latenz nicht wahrgenommen hat, beeinflusst sie seine Leistung (Martens et al. (2018)). Zu dem gleichen Ergebnis kamen Hoyet et al. (2019). In ihrer Studie verringerte eine Latenz von 80ms die Präzision des Nutzers, obwohl die Latenz nicht wahrgenommen wurde. Nach der Studie von Caserman et al. (2019) zufolge, nimmt die Leistung der Nutzer mit zunehmender Verzögerung ab und bei einer Ende-zu-Ende-Latenz über 69 ms brauchen die Nutzer deutlich länger, um die Aufgabe zu erledigen.

Hohe Latenzen erschweren besonders Greifaufgaben und Objektverfolgungsaufgaben, bei denen Präzision essenziell ist, und verschlechtern die Benutzererfahrung (Ellis et al. (1999); Teather et al. (2009); Ware & Balakrishnan (1994); Watson et al. (1998); Toothman & Neff (2019))). Der Schwellwert für Latenz, ab dem die Beeinträchtigung der Benutzererfahrung eintritt, liegt höher als der Schwellwert, ab dem die Leistung beeinflusst wird. Morice et al. (2008) stellten fest, dass sich die Leistung ab 110 ms verschlechterte, das subjektive Erlebnis jedoch nicht mit zunehmender Latenz abnimmt. Nach Toothman & Neff (2019) tritt erst bei einer Latenz von 300 ms ein qualitativer Abfall des Erlebnisses ein.

2.5 Cyber-Sickness

Der Unterschied zwischen Cyber-Sickness und Motion Sickness liegt darin, dass der Nutzer stationär ist, aber aufgrund der Bewegungen in der virtuellen Welt ein Gefühl der Selbstbewegung spürt. Nach LaViola (2000) kann visuelle Stimulation ohne vestibuläre Stimulation ausreichen, um Cyber-Sickness auszulösen.

Es gibt eine Reihe von Symptomen, die bei Cyber-Sickness auftreten können, darunter:

- Überanstrengung der Augen
- Kopfschmerzen
- Blässe
- Schwitzen
- Völlegefühl im Magen
- Verwirrung
- Schwindel
- Übelkeit
- Erbrechen

Es gibt viele Faktoren, die Cyber-Sickness beeinflussen können. Nicht nur Latenz kann zu falschen sensorischen Informationen führen. Der Kopf und die Gliedmaßen der Nutzer werden in der realen Welt mit Hilfe von Positionstrackern verfolgt, um sie akkurat in der virtuellen Welt zu repräsentieren. Diese Informationen können ungenau sein und Symptome von Cyber-Sickness verursachen. Eine Theorie besagt, dass lange Zeiträume ohne Haltungskontrolle zu Motion-Sickness führen, die viele Symptome mit Cyber-Sickness teilt. Diese Theorie wird *postural instability theory* genannt (Warwick-Evans et al. (1998)). Wenn ein Nutzer eine HMD trägt, leidet seine Haltungskontrolle und diese Symptome könnten auftreten.

Individuelle Unterschiede, Aufgabenmerkmale und technische Systemmerkmale tragen ebenfalls zum Risiko des Auftretens von Cyber-Sickness-Symptomen bei (Bockelman & Lingum (2017)).

3 Implementation

3.1 Erstellen des Mesh-Avatars



Abbildung 3: Generierte Mesh-Avatare. Männlich (l.), Weiblich (r.)

Ein Nutzer kann auf viele verschiedene Arten in der virtuellen Welt repräsentiert werden. Für die Intention der Arbeit wurden zwei Avatardarstellungen ausgewählt, die sich in ihrer Qualität deutlich unterscheiden, ein Point-Cloud und ein Mesh-Avatar.

Der Prozess der Avatarerstellung dauert zu lange, um während der Studie jeden Probanden individuell anzupassen, weshalb für beide Geschlechter jeweils ein Mesh-Avatar erstellt wurde, deren Aussehen an ihr Geschlecht angepasst wurde. Die Erzeugung dieser Avatare erfolgte mittels Autodesk¹. Diese Methode fand bereits erfolgreiche Anwendung in der Studie von Waltemate et al. (2018). Hierbei generierte die Software eine Knochenstruktur für das Mesh. Den Armen und den Beinen wurden je zwei Knochen zugewiesen, die später animiert werden.

Die Größe des Avatar-Meshs musste für jeden Probanden unterschiedlich angepasst werden, weshalb ein Parameter in den Einstellungen der Software implementiert wurde, der den Avatar auf die angegebene Größe des Probanden der Studie skalierte.

¹<https://charactergenerator.autodesk.com>

Ein zweiter nahezu identischer Mesh wurde für jedes Geschlecht erstellt. Dieser hat kein Gesicht, aber der Rest des Kopfes und des Körpers ist vorhanden.

Wenn sich der Nutzer bei einer hohen Latenz rückwärts bewegt, bewegt sich der Avatar-Mesh erst einige Millisekunden später, sodass der Mesh-Avatar vom Nutzer gesehen werden kann. Sobald der Mesh-Avatar die Bewegung des Nutzers nachholt, zeigt die Kamera der virtuellen Umgebung für einen kurzen Moment einzelne Details des Gesichts wie die Augen und den Mund an. In der zweiten Aufgabe der Studie ändert der Nutzer häufiger seine Position, sodass während dieser Aufgabe der normale Avatar-Mesh mit dem Mesh ohne Gesicht ausgetauscht wird. Der Mesh wird wieder ausgetauscht, bevor die dritte Aufgabe startet.

An den Handgelenken der Meshes wurden Armbänder befestigt, um eine leichtere Animation zu ermöglichen. Die Armbänder werden im nächsten Kapitel genauer erläutert.

3.2 Animation des Mesh-Avatars

Eubanks et al. (2020) entdeckten drei essenzielle Faktoren für die Animation eines invers-kinematischen Avatars. Das Gefühl der Verkörperung und der räumlichen Präsenz steigt erheblich, wenn die Pose des Kopfes, der Hände sowie der Füße verfolgt wird.

Die Pose des Kopfes wird bereits durch die HMD verfolgt. Die Probanden der Studie halten während der Studie zudem in jeder Hand einen Motion Controller, dessen Pose ebenfalls verfolgt wird. Damit die Pose der Füße ebenfalls verfolgt werden kann, wird den Probanden mithilfe einer Schlaufe jeweils ein VIVE Tracker über beiden Fußgelenken angebracht. Das Unreal Engine Plugin *Live Link* bietet eine Schnittstelle an, mit der der Game Engine die Pose der VIVE Tracker zugesendet wird.

Für die Implementation der Bewegungen des Mesh-Avatars wurde ein *Animation Blueprint* auf der Basis des Mesh-Avatars erzeugt. Sowohl der männliche als auch der weibliche Avatar teilen sich das gleiche Skelett, sodass nur ein *Animation Blueprint* ausreicht, der von beiden Avataren genutzt werden kann. Im Blueprint wird im Eventgraphen jeden einzelnen Frame die aktuelle Pose der Tracker aufgerufen und gespeichert. Im Animationsgraphen können die einzelnen Knochen des Meshes transformiert werden, wodurch sich anschließend auch der Mesh an die neue Transformation der Knochen anpasst.

Eine Problematik bei der Animation ist das Einknicken der Arme und Beine. Wenn die Gliedmaßen eines Menschen nicht ausgestreckt sind, knicken sie in eine bestimmte Richtung ein, wodurch mehrere Knochen ihre Pose verändern. Die Probanden tragen während der Studie keinen Vive-Tracker an ihren Ellbogen oder Knien, sodass das Einknicken nur mit der Position der Hände und Füße berechnet werden kann.

Hierfür wurde im Animationsgraphen eine *Two Bone-IK Node* für jedes Gliedmaß hinzugefügt. Die *Two Bone-IK Node* erhält als Eingabe die Pose eines Gliedmaßes (In UE4 *Effector Location* genannt) und einen Vektor im Koordinatensystem, zu dessen Position das Gliedmaß einknicken soll (In UE4 *Joint Target Location* genannt). Zudem kann für jede *Two Bone-IK Node* eingestellt werden, welcher Knochen sich dadurch bewegen soll. Durch die Node wird der eingegebene Knochen zu der Pose der Tracker transformiert. Damit dieser Knochen sich nicht mit seinem Basis-Knochen überschneidet, wird die Pose beider Knochen mit der zusätzlichen Information, zu welchem Punkt die Knochen bestmöglich zeigen sollen, neu berechnet.

Die *Joint Target Location* ist normalerweise ein konstanter Vektor, der in Relation zu dem Avatar-Mesh steht. Um die Berechnung der *Joint Target Location* zu verbessern, wurde eine Funktion entwickelt, die die Position des Ellbogens berechnen sollte. An Motion Controller, HMD und Ellbogen des Entwicklers wurden Sensoren des *OptiTrack* Motion Capture Systems befestigt und die Position der Ellbogen wurde in Relation zur Position der Controller und der HMD gemessen. Aus den Daten wurde eine Funktion entwickelt, die als Eingabe die Position des Motion Controllers und der HMD erhält und die Position des Ellbogens ausgeben soll. Das Verhalten des Ellbogens in der virtuellen Realität bei der Benutzung einer *Joint Target Location*, die auf dem konstanten Vektor basiert, und einer *Joint Target Location*, die mit der entwickelten Funktion in Laufzeit berechnet wird, wurde verglichen. Der konstante Vektor simulierte das Verhalten des Ellbogens besser, weshalb die Funktion verworfen wurde. Das schlechtere Abschneiden der Funktion könnte an Messfehlern liegen. Während der Aufnahme der Daten kam es häufiger zu Verbindungsproblemen zwischen den Sensoren und den Kameras. Jeder nicht komplette Datensatz eines Frames wurde zwar gelöscht, aber es besteht trotzdem die Möglichkeit, dass das System falsche Daten aufnahm. Das Wiederholen der Berechnung der Funktion führte zu keiner Verbesserung.

Die Position des Avatars entspricht jeden Frame der Position der HMD. Allerdings entspricht die Rotation des Avatars nicht der Rotation der HMD, weil der Kopf unabhängig

vom Körper gedreht werden kann. Die Rotation des Avatars wird stattdessen durch den Mittelwert der Rotationen beider Füße bestimmt. Durch diese Herangehensweise kann die Rotation der HMD die Rotation des Kopfes bestimmen.

Der generierte Mesh von Autodesk führte zu Problemen, wenn die Handgelenke gedreht wurden, sodass jedes Handgelenk ein Armband bekam, das die Immersion des Benutzers schützte. Das Armband wurde in den Mesh integriert, sodass es sich mit dem Handgelenk bewegte und drehte.

3.3 Berechnung der Offsets

Die Skalierung des Meshes auf die Körpergröße des Nutzers reicht nicht aus, um eine positionstreuere Abbildung des Nutzers in der virtuellen Welt zu ermöglichen.

Der Sensor des Motion Controllers, der die Position der Hand des Avatar-Meshes bestimmt, befindet sich nicht in der unmittelbaren Nähe der Hand des Nutzers, sodass ein Offset zu den Daten der Motion Controller addiert wurde. Das Offset berechnet sich aus der positionellen Differenz eines Mittelfingerknochens und des Handgelenkknochens des Meshes. Diese Knochen teilen sich die relative Position mit dem Motion Controller, sodass die Offsetberechnung bei jeder Position des Motion Controllers korrekt abläuft.

Ein weiteres Problem ist die festgesetzte Armlänge des Avatar-Meshes. Die Armlänge steht in Relation mit der Größe des Meshes. Dies trifft zwar auch auf Menschen zu, aber die Armlänge kann bei jedem Individuum kürzer oder länger ausfallen. Den Koeffizienten dieser individuellen Relation bezeichnet man als *Affenindex*. Wenn dieser Faktor nicht bedacht wird, knickt der Arm des Meshes bereits ein, obwohl ein Nutzer mit einem kurzen Arm diesen ausgestreckt hält. Ein Nutzer mit einem langen Arm könnte seinen Arm einknicken, ohne dass der Mesh-Avatar ihn nachahmt. Die 2 Bone-IK Node ermöglicht zwar das Dehnen der Arme des Meshes, aber dieses Verhalten sieht unnatürlich aus, weshalb darauf verzichtet wurde. Stattdessen wurden den Positionsdaten der Motion Controller ein Offset hinzugefügt, das auf der Relation zwischen der berechneten Armlänge und der vom Nutzer angegebenen Körpergröße basiert. Für die Berechnung der Armlänge hält der Nutzer beide Controller nach links und rechts in einer *T-Pose*. Die Hälfte der Distanz zwischen den Controllern ergibt die Armlänge. Die Distanz zwischen der Körpermitte und den Schultern muss noch von der Armlänge subtrahiert werden.



Abbildung 4: Die Darstellung des Point-Cloud-Avatars aus dem Projekt von Fischer et al. (2022)

3.4 Point-Cloud-Avatar

Das Projekt basiert auf dem Projekt von Fischer et al. (2022) und die Pipeline von der Registrierung zum Streaming und schließlich zum Rendering der Point-Cloud wurde übernommen. Das Projekt von Mühlenbrock et al. (2022) zur Registrierung der Point-Cloud ist öffentlich verfügbar². Die Methoden zum Streaming und zum Rendering der Point-Cloud waren bereits im Projekt implementiert.

3.5 Hinzufügen der Latenz

In dem Computer, der für die Studie genutzt wurde, ist die Grafikkarte *GeForce RTX 4090* von NVIDIA und der Prozessor *Ryzen 9 3900X* mit 12 Kernen von AMD eingebaut mitsamt 32 GB Arbeitsspeicher. Um die Motion-to-Photon Latenz der Point-Cloud zu berechnen, wurde gleichzeitig der Bildschirm und ein Nutzer gefilmt, der eine Bewegung durchführte. Die Kamera hat eine Bildrate von 60 Bildern pro Sekunde. Die Bewegung der Point-Cloud wurde erst 9 Bilder nach der Bewegung des Nutzers angezeigt. Die zwischen der Bewegung des Nutzers und der Darstellung der Bewegung durch die Point-Cloud vergangene Zeit beträgt dadurch bei den genutzten Systemspezifikationen 150 ms. Diese Messmethode wurde auch von Liang et al. (1991) benutzt. Damit beide Avatardarstellungen verglichen werden können, muss der Mesh-Avatar mit der gleichen Verzögerung dargestellt werden.

Für die Implementierung der hinzugefügten Latenz wurde das Prinzip einer *Queue* benutzt. Die Daten der Sensoren (HMD, Motion Controller, VIVE Tracker) sind Vektoren

²https://gitlab.informatik.uni-bremen.de/cgvr_public/lattice_based_registration_ue4

und werden in jedem Frame in einem jeweiligen *TArray* gespeichert. TArrays sind dynamische Arrays, die in der Unreal Engine bei Blueprints benutzt werden. Die gewünschte Latenz wird dem System vorher mitgeteilt. Sobald die Laufzeit der virtuellen Welt die Latenzzeit überschreitet, wird das erste Element jedes TArrays zusätzlich gelesen und dem Animationsblueprint übergeben. Anschließend wird das Element gelöscht. Auf diese Weise wird der Avatar mit alten Daten dargestellt. Die Position des Avatars wird in C++ berechnet und mit der gleichen Technik verzögert.

Die Technik musste für das Hinzufügen der Latenz bei dem Point-Cloud-Avatar leicht abgeändert werden. Die Tiefenkamera übergibt keine Vektoren, sondern Bilder. Diese Bilder wurden in einem entsprechenden TArray gespeichert und weitergeleitet, sobald die Latenzzeit abgelaufen ist.

3.6 Implementation der Aufgaben

3.6.1 Virtueller Raum

Das Design des virtuellen Raums war aufgrund des vorherigen Projekts an einen Operationssaal angelehnt.

Der Raum wurde designtechnisch für die Studie angepasst, um einem Wohnzimmer zu ähneln, sodass der Nutzer sich komfortabler fühlen konnte. Dabei wurden auf Gegenstände und Details verzichtet, die den Nutzer ablenken könnten.

3.6.2 Aufgabe 1 - Kugelaufgabe

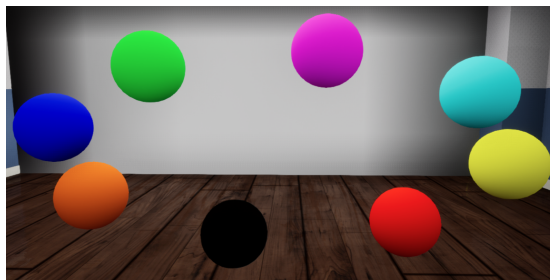


Abbildung 5: Die Kugeln von Aufgabe 1 in ihrer Ellipsenlaufbahn. Die transparente Kugel wird in diesem Beispiel nicht angezeigt.

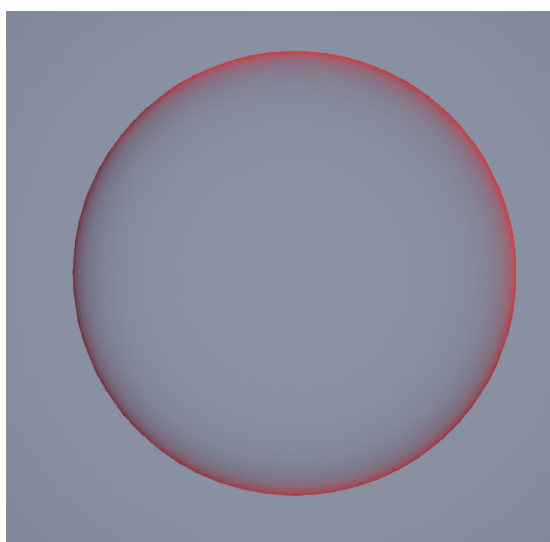


Abbildung 6: Die transparente Kugel in Aufgabe 1

Für die Aufgabe werden Kugeln benötigt, die sich in einer Ellipsenlaufbahn um eine fixe transparente Kugel bewegen. Zudem müssen die Kugeln greifbar sein und beim Loslassen zusammen mit der transparenten Kugel verschwinden, wenn ihre Farben identisch sind. Für die Funktionalität der Kugeln wurde die Klasse *SphereActor* geschrieben.

Diese Funktionen berechnen für jeden Frame die Y und Z Koordinate der Kugel auf der Ellipsenlaufbahn:

$$Y = Y_Initial + \cos\left(\frac{\pi}{4} \cdot SphereIndex + passedTime\right) \cdot 100 \quad (1)$$

$$Z = Z_Initial + \sin\left(\frac{\pi}{4} \cdot SphereIndex + passedTime\right) \cdot 40 + MeshOffset \quad (2)$$

Jeder Ball wird mit den gleichen Koordinaten initialisiert und speichert seine Y- und Z-Koordinaten in den Variablen *Y_Initial* und *Z_Initial* ab. Die X-Koordinate wird bei einer Ellipsenbahn nicht verändert. Jede Kugel hat einen eindeutigen Index von 0 bis 7 und die Variable *passedTime* speichert die seit der Initialisierung des Objekts der Klasse *SphereActor* vergangene Zeit in Sekunden.

Die Sinus- und Kosinusfunktionen berechnen periodisch einen Wert zwischen -1 und 1. Aufgrund der unterschiedlichen Indices der Kugeln unterscheiden sich die Werte für jede Kugel. Die Addition der Zeit als Parameter bewirkt, dass sich durch die Periodizität der verwendeten Funktion das Ergebnis für jeden Frame verändert. Bei der Berechnung der Y-Koordinate wird das Ergebnis der Kosinusfunktion mit 100 multipliziert und der initialen Y-Koordinate addiert, damit die Kugel sich um bis zu 100 Einheiten von ihrer initialen Y-Koordinate entfernt. Das Ergebnis der Sinusfunktion wird nur um 40 Einheiten multipliziert, um eine Ellipsen- statt eine Kreislaufbahn zu erzeugen. Der *MeshOffset* verringert Z für kleine Personen und erhöht Z für große Personen, sodass sie aufgrund ihrer Größe keine Probleme haben, jede Kugel berühren zu können.

Das Greifen und Loslassen der Kugel wurde in der Klasse *CustomPawn* in Kombination mit einem *Level-Blueprint* in der Unreal Engine implementiert. Der Blueprint übergibt der Klasse *CustomPawn* die aktuell zu greifende Farbe. Wurde diese Kugel wiederum losgelassen, löscht der Algorithmus die Kugeln dieser Farben und wählt eine neue Farbe aus.

Die Funktionalität der Greiffunktion wurde folgendermaßen umgesetzt:

Algorithm 1 Funktionalität der Greiffunktion

```

1: procedure BERÜHRE BALL(SphereActor)
2:   if SphereActor.Color == allowedSphere then
3:     touchedSphere ← SphereActor
4:   if !isTouchingSphere then
5:     touchedSphere ← null
6: procedure GREIFE BALL
7:   if touchedSphere != null then
8:     grabbedComp ← touchedSphere.RootComponent
9:     Befestige grabbedComp an Motion Controller
10: procedure LASSE BALL LOS
11:  if grabbedComp != null then
12:    bReleased ← true
13:    grabbedComp ← null
14:    Lösche gegriffene Kugel und ändere allowedSphere auf nächste Farbe

```

3.6.3 Aufgabe 2 - Seifenblasenaufgabe

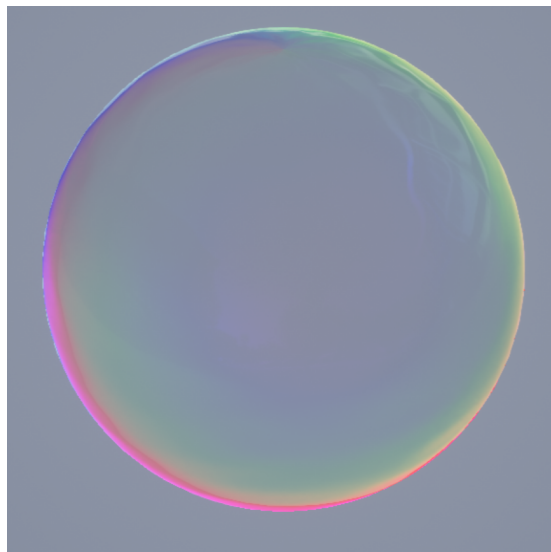


Abbildung 7: Die Seifenblase für Aufgabe 2

In der zweiten Aufgabe sollen Seifenblasen berührt werden. Um Seifenblasen bestmöglich zu simulieren, sollen sie sich in zufällige Richtungen bewegen, während sie konstant

hochsteigen. Hierfür wurde die Klasse *BubbleActor* geschrieben. Sobald eine Instanz der Klasse in der virtuellen Welt initialisiert wird, liest sie jeden Frame zufällige Zahlen aus einem *RandomStream* aus, die ihre Position anpassen. Die Seifenblasen können sich allerdings durch gesetzte Grenzen nicht zu weit von ihrer Startposition (außer der Höhe) entfernen.

Die zufälligen Zahlen werden durch einen identischen *Seed* bestimmt, sodass es keine Unterschiede zwischen den Probanden gibt. Um die Seifenblasen zu berühren, wurde die Methode *Berühre Ball* aus Aufgabe 1 erweitert. Wenn ein *BubbleActor* berührt wird, wird er unsichtbar und der Zähler für die Anzahl der getroffenen Seifenblasen erhöht sich. Die Textur der Seifenblase simuliert die Reflexion des Lichts, um einen realistischeren Effekt zu erzielen.

3.6.4 Aufgabe 3 - Spiegelaufgabe

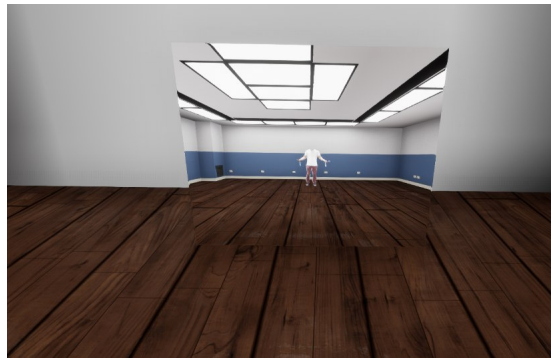


Abbildung 8: Der Spiegel aus Aufgabe 3 reflektiert den Point-Cloud-Avatar

Der Nutzer soll in der dritten Aufgabe sechs vorgegebene Bewegungen vor seinem Spiegelbild wiederholen.

Eine *StaticMeshComponent* in Form einer Wand repräsentiert den Spiegel. Zuerst nimmt eine *Scene Capture Component 2D* das Bild aus der Perspektive des Spiegels auf. Dann wird dieses Bild an ein *Render Target* gesendet, das eine Textur erzeugt. Aus der Textur wird ein Material hergestellt, das von der Spiegelwand benutzt wird.



Abbildung 9: Der Mannequin führt eine Bewegung aus, die der Nutzer anschließend nachahmen muss

Damit die vorgegebenen Bewegungen leichter zu verstehen sind und sichergestellt wird, dass jeder Nutzer die Bewegungen einheitlich ausführt, wurde ein animiertes Mannequin implementiert. Für jede Bewegung wurde eine *Animation Sequence* animiert, die von dem Mannequin abgespielt wird

3.6.5 Virtueller Fragebogen

Nach dem Bearbeiten der Aufgaben erscheint eine Textwand vor dem Nutzer. Der angezeigte Text erklärt den Ablauf eines virtuellen Fragebogens. Per Tastatur kann zwischen den Fragen gewechselt werden.

3.7 Logging

Während des Experiments wurden verschiedene Daten gesammelt.

Wenn eine Kugel in Aufgabe 1 losgelassen wurde, galt es die Distanz zur farblich identischen Kugel im dreidimensionalen Raum zu ermitteln. Des Weiteren wurde für jede Kugel die Zeit gemessen, die bis zum Loslassen vergangen war. Diese Daten wurden anschließend in einer CSV-Datei gespeichert.

In Aufgabe 2 wurde nach jedem Berühren der Seifenblasen ein Zähler erhöht, der dann ebenfalls in einer CSV-Datei gespeichert wurde.

Die Antworten für den virtuellen Fragebogen wurden manuell auf einem Blatt Papier notiert und später in eine CSV-Datei eingetragen.

4 Experiment

4.1 Hypothesen

Das Ziel der Studie war es, den Einfluss von Latenz und Avatardarstellung auf das Embodiment zu erforschen und vergleichen. Zusätzlich wurde die Effizienz der Probanden, ihre Latenzwahrnehmung und das Auftreten von Cyber-Sicknesssymptomen gemessen und evaluiert.

Hypothese 1 (H1): *Die Body Ownership verringert sich bei der qualitativen Abnahme der Avatarrepräsentation*

Hypothese 2 (H2): *Die Agency verringert sich bei erhöhter Latenz*

Hypothese 3 (H3): *Die Self-Location verringert sich bei erhöhter Latenz*

Embodiment ist die Zusammenfassung von Body Ownership, Agency und Self-Location. Deswegen werden diese drei Kategorien einzeln untersucht und die Hypothese H1 wird erweitert.

Hypothese 4 (H4): *Das Steigen der Latenz um 75 und 150 Millisekunden verringert das Embodiment stärker als die qualitative Abnahme der Avatarrepräsentation*

Nach Waltemate et al. (2016) sinkt das Embodiment ab einer Latenz von 125 ms. Bei dieser Studie wurde aber nicht Self-Location betrachtet. Auch Kasahara et al. (2017) und Caserman et al. (2019) bewiesen den Einfluss von Latenzen auf die Body Ownership.

Die Ergebnisse von Waltemate et al. (2018) beweisen, dass ein qualitativ hochwertiger Avatar die Body Ownership deutlich verbessert. Jeunet et al. (2018), Koilias et al. (2019) und Roth & Latoschik (2020) fanden heraus, dass erhöhte Latenzen das die Agency beeinträchtigen. Der Einfluss von der Qualität des Avatars oder der Latenz des Systems auf die Self-Location wurde noch nicht erforscht, daher wurde eine eigene These aufgestellt. Es wurde nachgewiesen, dass eine Erhöhung der Latenz die aktuelle Position des Avatars beeinflusst und somit die Self-Location verringern könnte.

Hypothese 5 (H5): *Das Steigen der Latenz um 75 und 150 Millisekunden hat eine größere Auswirkung auf die Effizienz als die qualitative Abnahme der Avatarrepräsentation*

Es wurde bereits hinlänglich belegt, dass Latenz die Leistung deutlich verschlechtert (Caserman et al. (2019), Ellis et al. (1997), Ragan et al. (2009), Morice et al. (2008), Hoyet et al. (2019), Waltemate et al. (2016)).

Hypothese 6 (H6): *Nutzer nehmen die Latenz bei beiden Darstellungen gleich wahr*

Bisher wurde noch nicht erforscht, wie sich die Avatarrepräsentation auf die Wahrnehmung von Latenz auswirkt.

Hypothese 7 (H7): *: Das Experiment ruft über die Dauer Cybersicknesssymptome hervor*

Die Probanden sind über 30 Minuten lang hohen Latenzen in einer virtuellen Realität ausgesetzt. Der aktuelle Stand der Forschung legt nahe, dass eine hohe Latenz (Caserman et al. (2019), Pausch et al. (1992), Stauffert et al. (2020)) und ein langer Aufenthalt in einer virtuellen Realität (Bockelman & Lingum (2017)) Cybersickness verursacht. .

4.2 Probanden

An der Studie nahmen 34 Personen teil. Es waren 29 Probanden männlich und 5 Probanden weiblich. Das Alter der Probanden variierte zwischen 21 und 45 Jahren. Der Altersdurchschnitt lag bei 27,3. Die Daten eines einzelnen männlichen Probanden wurden aufgrund fehlerhafter Einstellungen im Programm nicht berücksichtigt. Es wurden keine älteren Teilnehmer gesucht, da bisherige Forschungen zeigen (Golding (2006), Lamb & Kwok (2014), Brooks et al. (2010), Kawano et al. (2012)), dass ältere Menschen anfälliger für Motion Sickness sein könnten, die der Cyber-Sickness sehr ähnlich ist.

4.3 Aufbau

4.3.1 Technische Details

Für die Studie wurde die HTC VIVE Pro als HMD benutzt ³. Die HTC Vive hat eine Auflösung von 1440 x 1600 Pixel pro Auge (2880 x 1600 Pixel kombiniert), eine Aktualisierungsrate von 90 Hertz und ein Sichtfeld von 110 Grad. Für das Tracken der Sensoren wurden 4 Lighthouses im Raum verteilt. Das Tracking der Beine ermöglichen 2 HTC Vive Tracker (Version 3.0).

4.3.2 Voreinstellung

Vor jedem Durchlauf der Aufgaben wird eine Voreinstellung ausgewählt. Der Proband wird entweder durch einen Mesh- oder einen Point-Cloud-Avatar dargestellt und die Verzögerung zwischen den Bewegungen des Probanden und des Avatars wird auf 150 ms, 225 ms oder 300 ms festgelegt. Für jede Kombination an Einstellungen wird ein Durchlauf absolviert.

Die Mindestlatenz beträgt 150 ms, weil aufgrund der Bearbeitungsdauer der Point-Cloud-Pipeline dessen Avatar bereits mit einer Latenz von 150 ms dargestellt wird. Nach den Forschungen von Toothman & Neff (2019) und Waltemate et al. (2016) sinkt das Embodiment bei einer Latenz von 300 ms deutlich und nach Doherty & Sorenson (2015) verlieren die Benutzer ab 300 ms das Gefühl von Kontrolle. Als Zwischenschritt zwischen diesen beiden Latenzen wurde eine Latenz von 225 ms ausgewählt, damit Veränderungen im Embodiment präziser einer Latenz zugeordnet werden können.

Als Avatardarstellung wurde zum einen ein Mesh-Avatar ausgewählt, da dieser Avatar typischerweise in Anwendungen benutzt wird. Dieser Avatar wird mit einem Point-Cloud-Avatar verglichen, der auf einer Aufnahme des Probanden basiert und somit seine reale Hautfarbe und seine reale Kleidung anzeigt. Diese beiden Faktoren können die Body Ownership nach Maselli & Slater (2013) beeinflussen. Nach den Forschungen von Yu et al. (2021) ist ein Point-Cloud-Avatar einem normalen Mesh-Avatar in Körperpräsenz, sozialer Präsenz, Verhaltenseindruck und Menschlichkeit überlegen, weshalb er für diese Studie als qualitativ hochwertiger eingestuft wurde.

³<https://developer.vive.com/resources/hardware-guides/vive-pro-specs-user-guide/>

4.3.3 Aufgaben

Die Auswahl der Aufgaben ist besonders relevant, weil sie nach Toothman & Neff (2019) die Wahrnehmung von Latenz beeinflussen kann. Die Aufgaben wurden von Studien inspiriert, die ebenfalls die Effekte von Latenz und Avatardarstellungen erforschten.

4.3.3.1 Aufgabe 1 - Kugeln bewegen

Vor dem Probanden bewegen sich acht farblich unterschiedliche Kugeln (Abbildung 5) in einer Ellipsenlaufbahn um eine weitere stationäre Kugel. Diese einzelne Kugel teilt sich ihre Farbe mit einer der acht Kugeln um sie herum, zudem ist sie bis auf ihren Rand transparent. Das Ziel der Aufgabe ist es, die Kugel zu ergreifen, deren Farbe mit der transparenten Kugel übereinstimmt und diese schließlich in der transparenten Kugel loszulassen, sodass eine größtmögliche Überschneidung erfolgt. Anschließend verschwinden die beiden Kugeln derselben Farbe und an der Position der transparenten Kugel erscheint eine neue transparente Kugel. Diese Kugel teilt ihre Farbe mit einer der sieben verbliebenen Kugeln. Die Aufgabe ist erfolgreich beendet, sobald alle acht Kugeln verschwunden sind. Alle Kugeln befinden sich im Sichtfeld des Probanden und sind ohne das Bewegen der Beine zu erreichen wie es von Ware & Balakrishnan (1994) vorgeschlagen wird. Das Greifen und Loslassen der Kugeln erfolgt über die Schultertaste der Motion Controller.

Eine Greifaufgabe wurde ebenfalls von Toothman & Neff (2019) und Caserman et al. (2019) ausgewählt, um den Einfluss von Latenz zu erforschen. Bei Caserman et al. (2019) wurde die Anzahl der Fehler gemessen. Wenn sich für die Bearbeitung der Aufgabe Zeit gelassen wird, können allerdings Fehler reduziert werden. Es werden deswegen bei dieser Aufgabe die Bearbeitungszeit und die Genauigkeit beim Platzieren der Kugeln ausgewertet.

4.3.3.2 Aufgabe 2 - Seifenblasen platzen lassen

Vor dem Probanden steigen Seifenblasen (Abbildung 7) hervor. Wenn die Hand des Probanden eine Seifenblase berührt, verschwindet diese Seifenblase. Sobald eine Seifenblase eine vorbestimmte Höhe erreicht, verschwindet sie ebenfalls. Nach 40 Seifenblasen steigt keine neue Seifenblase hervor. Das Ziel der Aufgabe ist es, so viele Seifenblasen

wie möglich zu berühren, bevor sie aufgrund ihrer dann erreichten Höhe verschwinden. Für diese Aufgabe muss keine Taste des Motion-Controllers benutzt werden. Es genügt, wenn der Controller die Seifenblase berührt.

Diese Aufgabe wurde auch von Toothman & Neff (2019) in ihrer Studie durchgeführt. Nach Schoenenberg (2016) besteht die Möglichkeit, dass die Latenz keinen Einfluss auf den Probanden hat, wenn dieser nicht unter Druck steht. Deswegen gab es in Aufgabe 2 im Gegensatz zu Aufgabe 1 ein Zeitlimit, das erreicht wurde, sobald 40 Seifenblasen aufgestiegen sind. Zudem hatte der Proband nur wenig Zeit, um eine Seifenblase zu berühren, bevor sie aufgrund ihrer erreichten Höhe von selbst verschwand. Für die Auswertung dieser Aufgabe wurde die Anzahl der getroffenen Seifenblasen gemessen.

4.3.3.3 Aufgabe 3 - Bewegungen imitieren

Ein Mannequin (Abbildung 9) wiederholt 5 Sekunden lang eine Bewegung. Daraufhin verschwindet das Mannequin und ein virtueller Spiegel (Abbildung 8) erscheint vor dem Probanden. Der Proband soll nun 8 Sekunden lang die Bewegung imitieren, die das Mannequin vorher zeigte. Daraufhin erscheint das Mannequin wieder mit einer neuen Bewegung und der Spiegel verschwindet wieder. Die Aufgabe wurde abgeschlossen, nachdem der Proband die sechste Bewegung imitiert hat.

Die sechs Bewegungen sind folgende:

1. *Winke deinem Spiegelbild mit deiner rechten Hand zu*
2. *Winke deinem Spiegelbild mit deiner linken Hand zu*
3. *Hebe deine Knie auf Hüfthöhe*
4. *Strecke beide Arme nach vorne aus und kreise mit deinen Armen*
5. *Strecke deinen rechten Arm zur Seite aus und kreise mit ihm*
6. *Strecke deinen linken Arm zur Seite aus und kreise mit ihm*

Virtuelle Spiegel wurden für die Erforschung des Einflusses von Avatarrepräsentationen oder Latenz auf die Embodiment bereits von Waltemate et al. (2016), Waltemate et al. (2018) und Caserman et al. (2019) benutzt.

4.3.4 Vorstudie

Die Vorstudie wurde von 4 Probanden (3 männlich, 1 weiblich) durchgeführt. Die Kritikpunkte der Studie waren:

1. Die Studie dauert zu lange
2. Die Studie verursacht Kopfschmerzen
3. Die Kugeln in der ersten Aufgabe sind zu schwer zu erreichen
4. Die zweite Aufgabe ist anstrengend und überfordert den Nutzer
5. Das animierte Mannequin lenkt den Nutzer während der dritten Aufgabe vom Spiegelbild ab
6. Der Fragebogen ist verwirrend

Um die Dauer der Studie zu reduzieren, wurde die Anzahl an aufsteigenden Seifenblasen halbiert, der Zeitraum für jede Bewegung vor dem Spiegelbild verringert und der Fragebogen gegen einen kürzeren Fragebogen ausgetauscht.

Die verkürzte Bearbeitungszeit für die Studie resultierte auch in weniger Kopfschmerzen. Den Probanden zufolge verursachte das Absetzen der Brille zwischen jedem Anwendungsfall aufgrund des Helligkeitswechsels Kopfschmerzen. Das Absetzen sollte für eine bessere Erholungspause zwischen den Anwendungsfällen sorgen. Die Probanden wurden deswegen nicht mehr aufgefordert, die HMD für ihre Erholungspause abzusetzen, aber die Option wurde ihnen nicht verweigert. Während der finalen Studie hat kein einziger Proband seine HMD während des Experiments abgenommen.

Die Kugeln bewegten sich während der Vorstudie in einer Kreislaufbahn. Aufgrund der verschiedenen Körpergrößen der Probanden fiel es einigen Probanden leichter die Kugeln bei ihrem Höhepunkt zu erreichen, während es anderen Probanden leichter fiel, die Kugeln bei ihrem Tiefpunkt zu erreichen. Der Spawnpunkt der Kugeln wurde an die Größe der Nutzer angepasst und um das Greifen der Kugeln für die Nutzer zu vereinfachen, wurde die Laufbahn der Kugeln von einer Kreislaufbahn zu einer Ellipsenlaufbahn verändert, deren Hoch- und Tiefpunkt leichter für jeden Nutzer zu erreichen sind.

Die Halbierung der Seifenblasen in der zweiten Aufgabe hatte ebenfalls den Effekt, dass die Aufgabe nicht mehr zu anstrengend ist. Damit die Aufgabe den Nutzer nicht überforderte, wurde der zeitliche Abstand zwischen dem Auftauchen jeder Blase erhöht und die zufälligen Bewegungen der Seifenblasen nach vorn und hinten wurden reduziert, sodass der Nutzer sich seltener nach vorne und zurück bewegen musste und der Fall, dass eine Seifenblase sich hinter oder in dem Nutzer befand, seltener auftrat.

Das animierte Mannequin konnte während der Vorstudie über die ganze Länge der dritten Aufgabe gesehen werden. Dabei befand sich das Mannequin neben dem Spiegel statt davor. Dies sollte den Effekt haben, dass ein Nutzer sich eine Bewegung nochmal anschauen konnte, wenn er sie nicht verstanden hatte. Zudem wurde die geforderte Bewegung zusätzlich in einem Textfeld beschrieben. Diese Vorgehensweise überforderte unnötig den Nutzer. Das Textfeld wurde entfernt und das Mannequin ist nur noch für 5 Sekunden sichtbar. Während dieser Zeit kann der Nutzer den Spiegel nicht sehen. Anschließend wird das Mannequin ausgeblendet und der Nutzer sieht nur den Spiegel für 8 Sekunden bis die Bewegung wechselt. Während der Studie stellte sich heraus, dass kein Nutzer bei dem Imitieren der Bewegungen Hilfe benötigte.

Der Fragebogen in der Vorstudie wurde von Peck & Gonzalez-Franco (2021) validiert und beinhaltet 16 Fragen. Die Formulierungen der Fragen verwirrten die Nutzer. Dabei war es nicht relevant, ob sie die Fragen in ihrer englischen Originalverfassung oder in der für diese Studie übersetzten deutschen Eigenfassung gelesen haben. Der Fragebogen wurde mit einem Fragebogen ausgetauscht, der nur 10 Fragen beinhaltet. Weil somit seltener eine Frage für einen Nutzer erklärt werden musste, wurde die für die Studie benötigte Zeit auch deutlich kürzer.

4.3.5 Vorfragebogen

Im Vorfragebogen (Abbildung 20) wird nach dem Geschlecht, dem Alter, der Größe und dem Beruf bzw. dem Studiengang gefragt. Die bisherige Erfahrung in VR wird mit einer Multiple-Choice Frage beantwortet. Die Anfälligkeit für Cyber-Sickness kann mit einer 5-stufigen Likert-Skala beantwortet werden, sofern der Proband bereits Erfahrung in VR gesammelt hatte.

4.3.6 Fragebogen

Nach Aufgabe 3 wird vor dem Probanden in der virtuellen Realität mit einer Textwand erklärt, wie eine Likert-Skala funktioniert. Anschließend wird auf dieser Textwand die erste Aussage eines Fragebogens angezeigt. Der Proband bewertet das Zutreffen dieser Aussage mit einer Zahl von 1 bis 7. Dabei steht 1 für *Ich stimme absolut nicht zu* und 7 bedeutet *Ich stimme absolut zu*. Nachdem der Proband mündlich eine Antwort abgegeben hat, wird die nächste Aussage angezeigt. Nach der zehnten Aussage wird dem Proband für diesen Durchlauf gedankt.

Die zehn Fragen des Fragebogens lauten:

1. *Es fühlte sich an, als ob der virtueller Körper mein Körper war*
2. *Es fühlte sich an, als ob die virtuellen Körperteile meine Körperteile waren*
3. *Der virtuelle Körper fühlte sich wie ein menschlicher Körper an*
4. *Es fühlte sich an, als ob der virtuelle Körper zu mir gehörte*
5. *Die Bewegungen des virtuellen Körpers fühlten sich an, als ob sie meine Bewegungen waren*
6. *Es fühlte sich an, als ob ich die Bewegungen des virtuellen Körpers kontrollierte*
7. *Es fühlte sich an, als ob ich die Bewegungen des virtuellen Körpers verursachte*
8. *Die Bewegungen des virtuellen Körpers waren synchron zu meinen eigenen Bewegungen*
9. *Im Allgemeinen fühlte es sich an, als ob mein Körper dort positioniert war, wo ich den virtuellen Körper sah*
10. *Es fühlte sich an, als ob mein Körper tatsächlich in der virtuellen Umgebung war*

Die ersten acht Fragen basieren auf Virtual Embodiment Questionnaire von Roth & Latoschik (2020). Die Fragen 1 bis 4 beziehen sich auf die Body Ownership und die Fragen 5-8 beziehen sich auf die Agency. Die neunte und die zehnte Frage wurden dem *Preliminary embodiment short questionnaire* von Eubanks et al. (2021) entnommen und beziehen sich auf die Self-Location des Probanden.

Es konnte nicht der komplette Fragebogen von Roth und Latoschik übernommen werden, weil ihre restlichen Fragen sich nicht auf Self-Location, sondern auf *Change* beziehen. Eubanks et al. (2021) sind die fehlenden Fragen für Self-Location ebenfalls aufgefallen, weshalb sie in ihrem Fragebogen 3 Fragen zu Self-Location eingebaut haben. Von diesen Fragen wurden zwei für diese Studie übernommen.

Hohe Latenzen können Symptome von Cyber-Sickness hervorrufen. Deswegen ist es für diese Studie relevant, nach jedem Durchlauf nach dem Wohlbefinden des Probanden zu fragen. Der Proband soll diese Frage schnell beantworten können, ohne die HMD dafür absetzen zu müssen, weswegen ein längerer Fragebogen wie das Simulato-Sickness-Questionnaire von Robert S. Kennedy & Lilienthal (1993) nicht benutzt werden kann.

Für ein schnelleres Abfragen des Wohlbefindens wurde die *Fast Motion Sickness Scale* von Keshavarz & Hecht (2011) entwickelt. Die Stärke der Symptome wird periodisch mit einer Zahl zwischen 0 (keine Symptome) und 20 (stark auftretende Symptome) beantwortet. Die Probanden wurden während dieser Studie bereits mit einer 7-teiligen Likert-Skala vertraut gemacht, weswegen für die Frage nach dem Wohlbefinden dieselbe Likert-Skala benutzt wurde.

Die Frage nach dem Wohlbefinden lautete: *”Wie stark treten Symptome wie Übelkeit, Schwindelgefühl und Kopfschmerzen auf?”*

Dabei steht die 1 für *keine Symptome* und 7 für *sehr starke Symptome*.

4.4 Durchführung

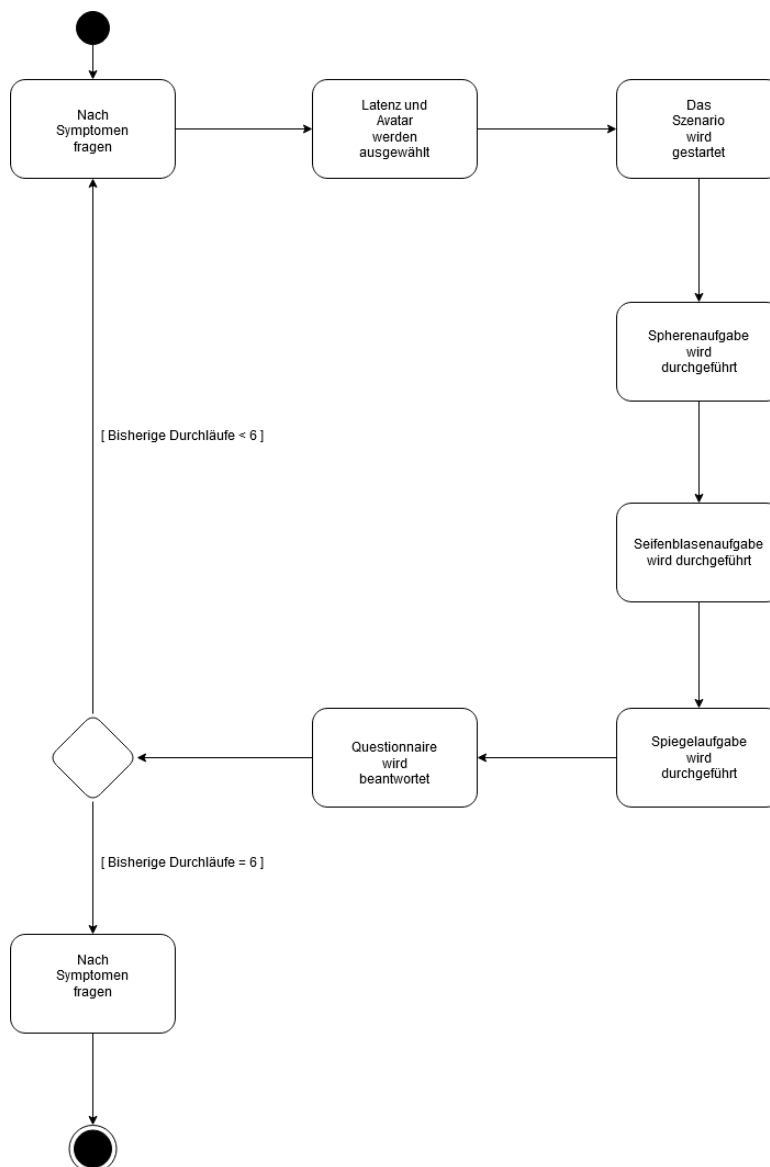


Abbildung 10: Der Ablauf des Experiments in Form eines Aktivitätsdiagramms

Bevor die Studie startet, wird eine zufällige Reihenfolge der Einstellungen generiert. Nach der Begrüßung wird der Proband gefragt, ob die Studie auf Englisch oder Deutsch durchgeführt werden soll. Dementsprechend bekommt der Proband 3 Dokumente in der gewünschten Sprache zugereicht. Das erste Dokument beschreibt die Studie, das zweite Dokument ist die Einverständniserklärung und das dritte Dokument ist der Vorfragebogen. Nachdem die Dokumente ausgefüllt worden sind, werden die VIVE-Tracker



Abbildung 11: Ein Nutzer, der eine Bewegung nachahmt. Beide Schlaufen sind an den Beinen befestigt.

mit Schlaufen (Abbildung 21) über den Fußgelenken befestigt. Anschließend wird die Steuerung der Motion Controller erklärt und die HMD wird aufgesetzt. Eine Markierung auf dem Boden hilft dem Probanden, sicher zu sein, sich in der richtigen Position im Raum zu befinden.

Bevor der erste Durchlauf startet, wird dem Probanden nach seinem Wohlbefinden gefragt und die erste Einstellung wird ausgewählt. Wenn bei dieser Einstellung der Mesh-Avatar ausgewählt wurde, muss der Proband seine Arme nach links und rechts ausstrecken und das Trackpad der Motion Controller für eine Sekunde gedrückt halten. Nach der Berechnung der Armlänge wird der Durchlauf gestartet. Wenn ein Point-Cloud-Avatar ausgewählt wurde, entfällt dieser Schritt.

Der Proband wird in das Level geladen und kann bestimmen, wann die erste Aufgabe starten soll. Nachdem die Eingewöhnungsphase beendet wurde, startet die erste Aufgabe. Der Proband bewegt jede Kugel zur transparenten Kugel in der Mitte, bis keine Kugeln mehr übrig bleiben. Sobald der Proband bereit ist, wird die nächste Aufgabe gestartet. Nachdem alle 40 Seifenblasen verschwunden sind, kann nach gegenseitigem Einverneh-

men die dritte Aufgabe gestartet werden. Das Mannequin zeigt dem Probanden für 5 Sekunden eine Bewegung und der Proband führt sie anschließend vor einem virtuellen Spiegel für 8 Sekunden aus.

Nachdem sechs Bewegungen nachgeahmt wurden, startet der VR-Fragebogen. Der Fragebogen ist in der vom Probanden gewünschten Sprache verfasst. Der Proband beantwortet das Zutreffen jeder Aussage auf einer 7-teiligen Likert-Skala. Anschließend wird der Proband wieder nach seinem Befinden gefragt; ein neuer Durchlauf wird mit neuen Einstellungen gestartet, sobald der Proband dazu bereit ist. Nach sechs Durchläufen ist jede Einstellung jeweils einmal ausgewählt und die Studie wird beendet. Anschließend kann der Proband noch ein Feedback schreiben und für seine Mühen darf er sich zwischen Kuchen, Schokolade und einer Clementine entscheiden. Die Studie dauert im Durchschnitt 35 Minuten.

5 Ergebnisse und Evaluation

Das Ziel der Studie war es herauszufinden, in welcher Form die verschiedenen Einstellungen das Embodiment beeinflussen. Für die Beantwortung dieser Forschungsfrage wurden die Antworten des virtuellen Fragebogens genutzt. Zusätzlich wurde die Effizienz bei der Bearbeitung der Aufgaben gemessen und verglichen.

Die Einstellungen jedes Durchlaufs unterscheiden sich in der Avatarrepräsentation und der Latenz. Die Studie wurde im within-subjects Design durchgeführt, sodass jeder Proband jede Kombination an Parametern ausprobierte. Aus 2 Avatarrepräsentationen und 3 verschiedenen Latenzen ergeben sich $2(\text{Avatarrepräsentation}) \times 3(\text{Latenz}) = 6$ Einstellungen. In diesem Kapitel werden die Einstellungen folgendermaßen abgekürzt: Der Buchstabe steht für den Avatar (M=Mesh-Avatar; P=Point-Cloud-Avatar) und die darauffolgende Zahl steht für die Latenz in Millisekunden(150, 225, 300).

5.1 Statistische Analyse

Der 10-teilige Fragebogen(F1 bis F10) war in drei Kategorien unterteilt: Body Ownership, Agency und Self-Location. Der Mittelwert der Fragen einer Kategorie ergibt den finalen Wert für die jeweilige Kategorie:

$$\text{Body Ownership} = \frac{F1 + F2 + F3 + F4}{4}$$

$$\text{Agency} = \frac{F5 + F6 + F7 + F8}{4}$$

$$\text{Self-Location} = \frac{F9 + F10}{2}$$

Der Mittelwert der drei Kategorien ist das Embodiment:

$$\text{Embodiment} = \frac{\text{Body Ownership} + \text{Agency} + \text{Self-Location}}{3}$$

Die gesammelten Daten jeder einzelnen Einstellung wurden mit dem Shapiro-Wilk Test auf Normalität geprüft (Tabelle 10 im Anhang). Keiner der Datensätze lag über

dem vorher ausgewählten kritischen Wert, weshalb nicht von einer Normalverteilung ausgegangen wurde. Die Daten stammen aus einer Likert-Skala, die eine Ordinalskala ist, weshalb für die Varianzanalyse ein Test genommen wurde, der die Ränge der Daten und nicht deren Werte vergleicht. Zudem muss der Test auf mehrere Gruppen angewendet werden können, weshalb der Kruskal-Wallis-Test ausgewählt wurde. Wenn die Nullhypothese des Kruskal-Wallis-Test abgelehnt wurde, bestand ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen. In diesem Fall wurde der bonferroni-korrigierte Conover-Iman-Test als post-hoc Test verwendet. Dieser Test vergleicht die Gruppen paarweise und benutzt dafür ebenfalls Rangsummen wie der Kruskal-Wallis-Test.

Zusätzlich wurden für jede Einstellung der Mittelwert und die Standardabweichung für die Kategorie ausgerechnet. Das Signifikanzniveau α wurde für die Tests auf 0,05 festgelegt. Für den Kruskal-Wallis-Test und den Shapiro-Wilk Test wurde in Python die Library *scipy* und für den Conover-Iman-Test die Library *scikit_posthocs* benutzt.

5.2 Body Ownership

Einstellung	Mittelwert	SD
M150	4.46	1.61
M225	4.18	1.68
M300	3.56	1.55
P150	5.51	1.37
P225	5.30	1.42
P300	5.27	1.27

Tabelle 2: Ergebnisse des VR-Fragebogens bezüglich Body Ownership

Der p -Wert des Kruskal-Wallis-Tests lag unter dem Signifikanzniveau ($H=140.60, p < .001$). Das Ergebnis des Conover-Iman Tests kann in der Abbildung 12 eingesehen werden.

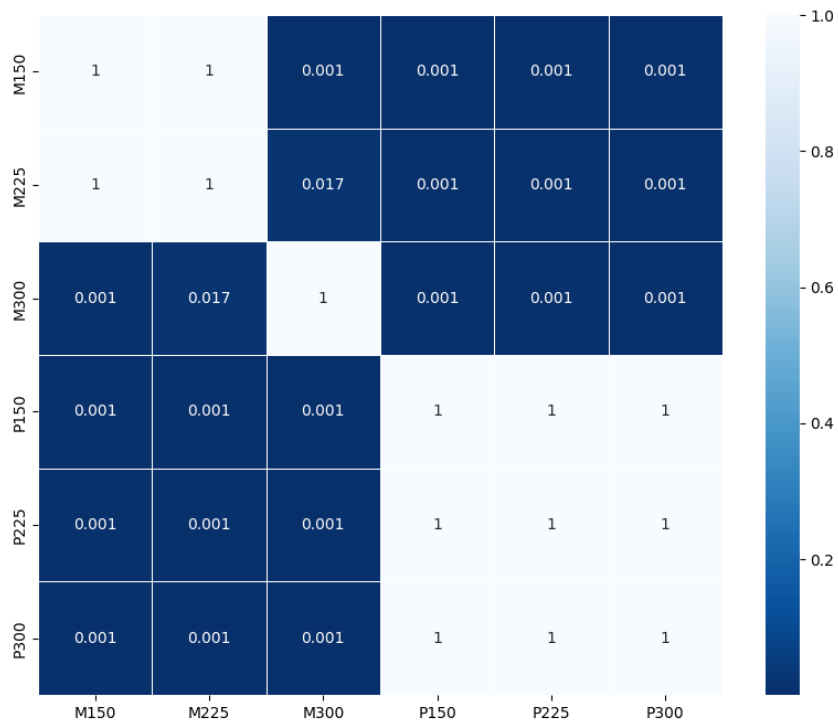


Abbildung 12: Ergebnisse des Conover-Iman Tests bezüglich Body Ownership. Signifikante Unterschiede ($p < 0.05$) zwischen den Einstellungen sind dunkelblau gekennzeichnet. Zahlen < 0.001 wurden auf 0.001 aufgerundet

Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen Einstellungen:

- M150(M=4.46,SD=1.61)-M225(M=4.18,SD=1.68)
- P150(M=5.51,SD=1.37)-P225(M=5.30,SD=1.42)
- P150(M=5.51,SD=1.37)-P300(M=5.27,SD=1.27)
- P225(M=5.30,SD=1.42)-P300(M=5.27,SD=1.27)

Eine Latenz bis 300 ms hat keinen signifikanten Einfluss auf die Body Ownership bei der Benutzung eines Point-Cloud-Avatars. Latenzen bis zu 225 ms haben keinen Einfluss auf den Nutzer bezüglich der Body Ownership, sofern ein Mesh-Avatar genutzt wird. Bei der Benutzung eines Mesh-Avatars ist die Body Ownership signifikant niedriger, sobald eine Latenz von 300ms erreicht wird.

Hypothese 1 (H1): *Die Body Ownership verringert sich bei der qualitativen Abnahme der Avatarpräsentation.*

Die Benutzung eines Mesh-Avatars führt zu signifikant niedrigerer Body Ownership im Vergleich zur Benutzung eines Point-Cloud-Avatars. Selbst bei einer Latenz von 300 ms hat ein Nutzer bei der Nutzung einer Point-Cloud eine höhere Body Ownership als ein Nutzer, der nur eine Latenz von 150 ms hat, aber dafür einen Mesh-Avatar nutzt. Aufgrund dieser Ergebnisse wurde H1 verifiziert.

5.3 Agency

Einstellung	Mittelwert	SD
M150	5.50	1.36
M225	4.78	1.87
M300	4.17	1.93
P150	6.14	1.08
P225	6.03	1.11
P300	5.31	1.52

Tabelle 3: Ergebnisse des VR-Fragebogens bezüglich Agency

Der p -Wert des Kruskal-Wallis-Tests lag unter dem Signifikanzniveau ($H=114.54$, $p < .001$). Das Ergebnis des Conover-Iman Tests kann in der Abbildung 13 eingesehen werden.

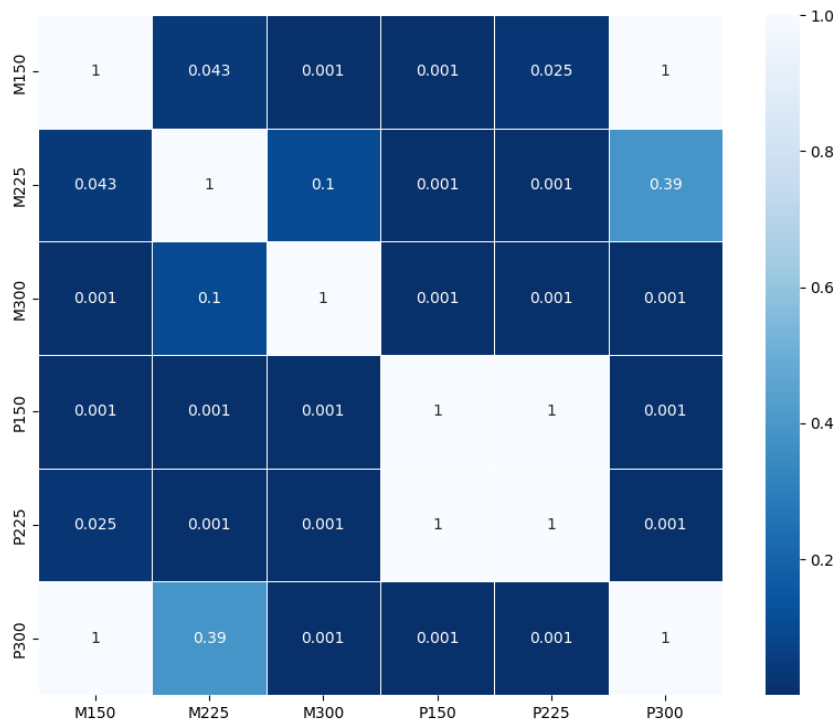


Abbildung 13: Ergebnisse des Conover-Iman Tests bezüglich Agency. Signifikante Unterschiede ($p < 0.05$) zwischen den Einstellungen sind dunkelblau gekennzeichnet. Zahlen < 0.001 wurden auf 0.001 aufgerundet

Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen Einstellungen:

- M150(M=5.50,SD=1.36)-P300(M=5.31,SD=1.52)
- M225(M=4.78,SD=1.87)-P300(M=5.31,SD=1.52)
- M225(M=4.78,SD=1.87)-M300(M=4.17,SD=1.93)
- P150(M=6.14,SD=1.08)-P225(M=6.03,SD=1.11)

Die Agency ist nicht signifikant unterschiedlich zwischen einem Point-Cloud-Avatar mit 300ms Latenz und einem Mesh-Avatar und 150 oder 225 ms Latenz. Das Erhöhen der Latenz bei dem Mesh-Avatar von 225 zu 300 Millisekunden führt zu keinem signifikanten Unterschied der Agency im Gegensatz zum Wechsel von 150 zu 225 Millisekunden.

Bei der Benutzung des Point-Cloud Avatars führt das Erhöhen der Latenz von 150 zu 225 Millisekunden wiederum zu keinem signifikanten Unterschied der Agency.

Hypothese 2 (H2): *Die Agency verringert sich bei erhöhter Latenz.*

Der Einfluss von Latenz unterscheidet sich je nach Avatarrepräsentation. Bei einem Mesh-Avatar ist die Erhöhung von Latenz auf 225 Millisekunden deutlich spürbar und ein signifikanter Unterschied (Mittelwert $\Delta = 0.72$) und auch die Erhöhung auf 300 Millisekunden führt zu niedrigerer Agency, wenn man die Mittelwerte vergleicht (Mittelwert $\Delta = 0.61$). Im Gegenzug zum Mesh-Avatar haben die Probanden bei der Benutzung des Point-Cloud-Avatars zwischen 150 und 225 Millisekunden Latenz keinen Unterschied in der Agency bemerkt. Die Differenz der Mittelwerte war zudem sehr niedrig (Mittelwert $\Delta = 0.11$). Der Unterschied der Agency zwischen 225 und 300 Millisekunden war wiederum signifikant (Mittelwert $\Delta = 0.72$).

Es könnte sein, dass ab einer Latenz von 225 Millisekunden die Agency eines Point-Cloud-Avatars ähnlich einbricht wie die Agency eines Mesh-Avatars bei 150 Millisekunden Latenz. Interessanterweise gab es keinen signifikanten Unterschied zwischen einem Point-Cloud-Avatar mit 300 ms Latenz und einem Mesh-Avatar mit 150 oder 225 ms Latenz in Bezug auf Agency. Die Avatarrepräsentation könnte einen großen Einfluss auf die Agency haben und sogar eine Erhöhung der Latenz ausgleichen.

Die Hypothese H2 wurde nur bedingt verifiziert. Für einen Mesh-Avatar trifft die Hypothese bereits ab 150 ms zu, aber für einen Point-Cloud-Avatar muss die Latenz erst mindestens 225 Millisekunden überschreiten.

5.4 Self-Location

Einstellung	Mittelwert	SD
M150	4.71	1.62
M225	4.37	1.63
M300	3.92	1.76
P150	5.83	1.18
P225	5.43	1.36
P300	5.04	1.63

Tabelle 4: Ergebnisse des VR-Fragebogens bezüglich Self-Location

Der p -Wert des Kruskal-Wallis-Tests lag unter dem Signifikanzniveau ($H=56.57$, $p < .001$). Das Ergebnis des Conover-Iman Tests kann in der Abbildung 14 eingesehen werden.

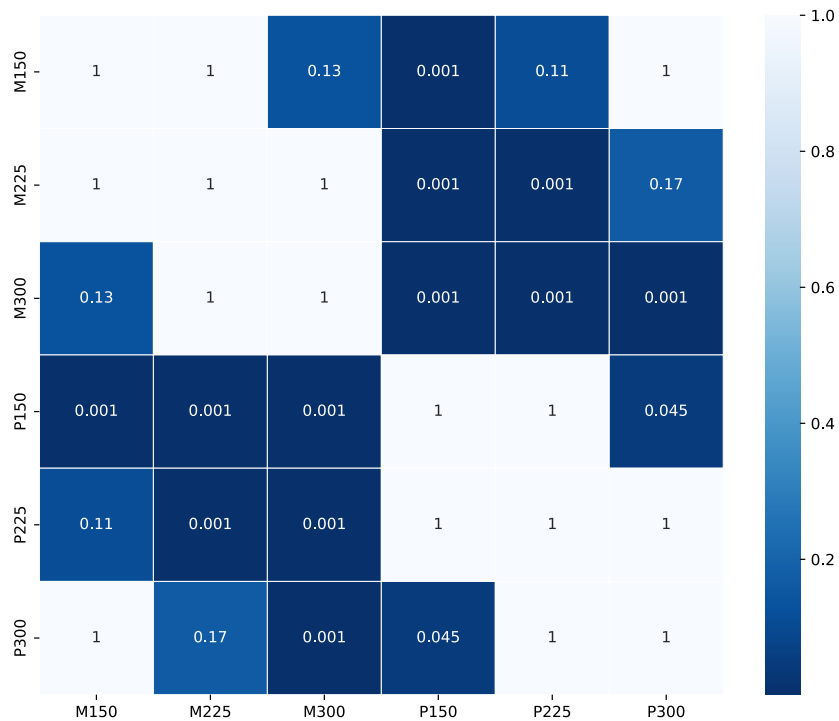


Abbildung 14: Ergebnisse des Conover-Iman Tests bezüglich Self-Location. Signifikante Unterschiede ($p < 0.05$) zwischen den Einstellungen sind dunkelblau gekennzeichnet. Zahlen < 0.001 wurden auf 0.001 aufgerundet

Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen Einstellungen:

- M150(M=4.71,SD=1.62)-M225(M=4.37,SD=1.63)
- M150(M=4.71,SD=1.62)-M300(M=3.92,SD=1.76)
- M225(M=4.37,SD=1.63)-M300(M=3.92,SD=1.76)
- P150(M=5.83,SD=1.18)-P225(M=5.43,SD=1.36)
- P225(M=5.43,SD=1.36)-P300(M=5.04,SD=1.63)
- M150(M=4.71,SD=1.62)-P225(M=5.43,SD=1.36)
- M150(M=4.71,SD=1.62)-P300(M=5.04,SD=1.63)
- M225(M=4.37,SD=1.63)-P300(M=5.04,SD=1.63)

Die Höhe der Latenz hatte bei der Benutzung eines Mesh-Avatars keinen signifikanten Einfluss auf die Self-Location eines Probanden. Bei der Benutzung eines Point-Cloud-Avatars wurde ein signifikanter Unterschied in der Self-Location zwischen den Latenzen 150 und 300 Millisekunden gemessen. Bei gleicher Latenz wurde bei dem Point-Cloud-Avatar eine signifikant bessere Self-Location als bei einem Mesh-Avatar gemessen.

Hypothese 3 (H3): *Die Self-Location verringert sich bei erhöhter Latenz.*

Die Hypothese H3 wurde falsifiziert, weil bei einem Mesh-Avatar keine signifikante Veränderung der Self-Location gemessen wurde. Die Latenz musste bei der Benutzung des Point-Cloud-Avatars um 150 Millisekunden erhöht werden, um einen signifikanten Unterschied der Self-Location eines Probanden messen zu können.

Interessanterweise verursachte die Veränderung des Avatars bei gleichgebliebender Latenz signifikante Unterschiede in den Messergebnissen der Self-Location.

5.5 Embodiment

Einstellung	Mittelwert	SD
M150	4.89	1.59
M225	4.44	1.74
M300	3.88	1.76
P150	5.83	1.24
P225	5.59	1.34
P300	5.21	1.48

Tabelle 5: Ergebnisse des VR-Fragebogens bezüglich Embodiment.

Der p -Wert des Kruskal-Wallis-Tests lag unter dem Signifikanzniveau ($H=348.76$, $p < .001$). Das Ergebnis des Conover-Iman Tests kann in der Abbildung 15 eingesehen werden.

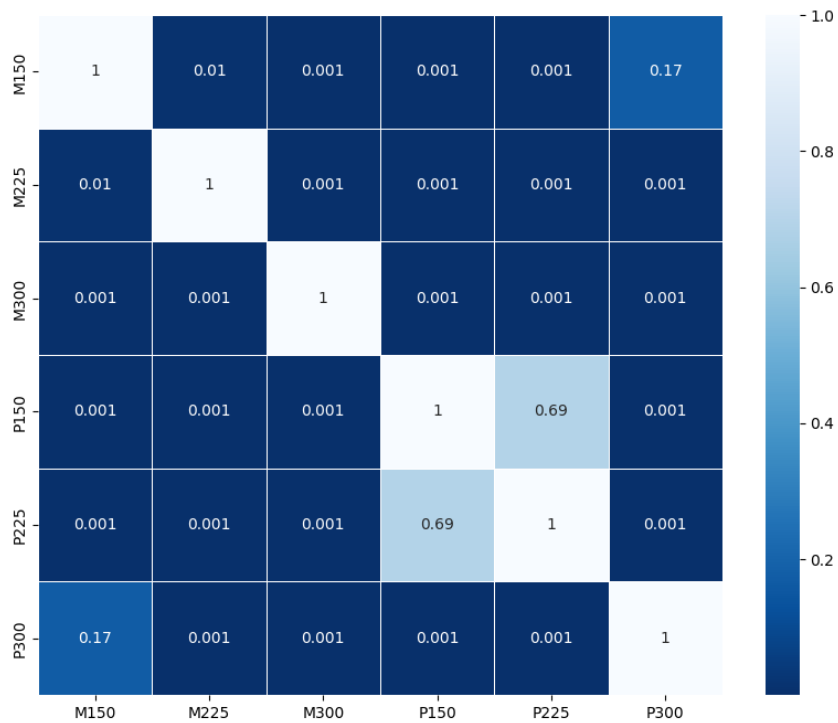


Abbildung 15: Ergebnisse des Conover-Iman Tests bezüglich Embodiment. Signifikante Unterschiede ($p < 0.05$) zwischen den Einstellungen sind dunkelblau gekennzeichnet. Zahlen < 0.001 wurden auf 0.001 aufgerundet

Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen den Einstellungen:

- M150(M=4.89,SD=1.59)-P300(M=5.21,SD=1.48)
- P150(M=5.83,SD=1.24)-P225(M=5.59,SD=1.34)

Das empfundene Embodiment eines Probanden mit einem Mesh-Avatar und 150 Millisekunden Latenz und einem Point-Cloud-Avatar und 300 Millisekunden Latenz unterschied sich nicht signifikant.

Bei der Benutzung eines Point-Cloud-Avatars resultiert eine Latenz von 150 ms und eine Latenz von 225 ms in keinem signifikant unterschiedlichem Embodiment.

Hypothese 4 (H4): *Das Steigen der Latenz um 75 und 150 Millisekunden verringert das Embodiment stärker als die qualitative Abnahme der Avatarrepräsentation*

Das Embodiment der Probanden bei der Nutzung eines Mesh-Avatars mit einer Latenz von 150 ms ($M=4.89, SD=1.59$) war signifikant schlechter als das Embodiment bei der Nutzung eines Point-Cloud-Avatars mit einer Latenz von 150ms ($M=5.83, SD=1.24$). Das Embodiment der Probanden bei der Nutzung eines Point-Cloud-Avatars mit einer Latenz von 225ms ($M=5.59, SD=1.34$) war allerdings nicht signifikant schlechter als bei der Nutzung eines Point-Cloud-Avatars mit einer Latenz von 150ms ($M=5.83, SD=1.24$).

Zwar gab es einen signifikanten Unterschied zwischen dem hervorgerufenen Embodiment eines Point-Cloud-Avatars mit 150ms Latenz ($M=5.83, SD=1.24$) und 300ms Latenz ($M=5.21, SD=1.48$), aber ein Mesh-Avatar mit 150ms Latenz resultierte in noch schlechterem Embodiment ($M=4.89, SD=1.59$) als ein Point-Cloud-Avatar mit 300ms Latenz. Das hervorgerufene Embodiment eines Point-Cloud-Avatars mit einer Latenz von 225ms ($M=5.59, SD=1.34$) unterscheidet sich zwar signifikant von einem Point-Cloud-Avatar mit 300ms Latenz ($M=5.21, SD=1.48$) und einem Mesh-Avatar mit 225ms Latenz ($M=4.44, SD=1.74$), aber der Unterschied zwischen den beiden letztgenannten Einstellungen ist deutlich ($\Delta = 0.77$).

Die Hypothese H4 wurde aufgrund dieser Ergebnisse falsifiziert und die Alternativhypothese wurde stattdessen verifiziert. Die qualitative Abnahme der Avatarrepräsentation verringert das Embodiment stärker als das Steigen der Latenz um 75 und 150 Millisekunden.

5.6 Effizienz

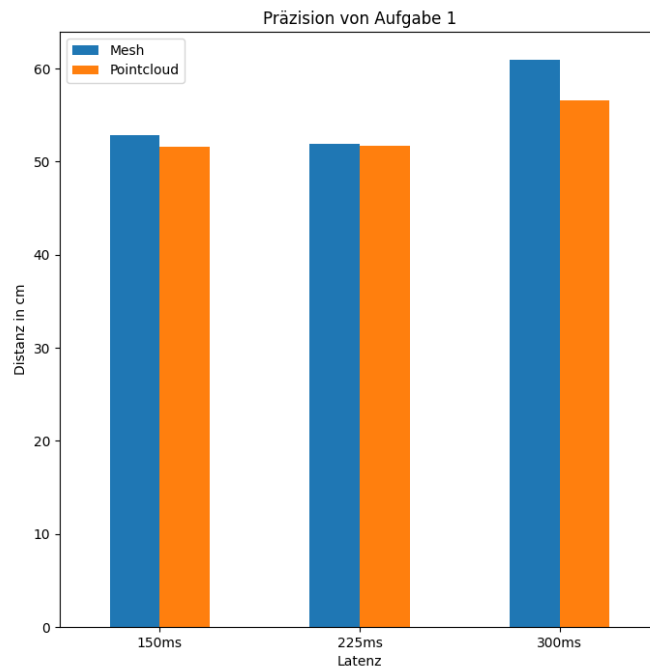


Abbildung 16: Die Summe der Abstände zwischen den losgelassenen und den transparenten Kugeln für jede Einstellung. Angegeben in cm. Die Avatardarstellungen werden farblich getrennt und nebeneinander verglichen.

Einstellung	Mittelwert	SD
M150	52.85	29.91
M225	51.93	39.00
M300	60.90	45.32
P150	51.62	36.05
P225	51.76	32.22
P300	56.64	47.49

Tabelle 6: Die Ergebnisse der Abstände zwischen den losgelassenen und den transparenten Kugeln für jede Einstellung.

Der p -Wert vom Kruskal-Wallis-Test lag über dem Signifikanzniveau ($H=4.46$, $p=0.48$). Es gab zwischen den Einstellungen keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Genauigkeit der zu platzierenden Kugeln.

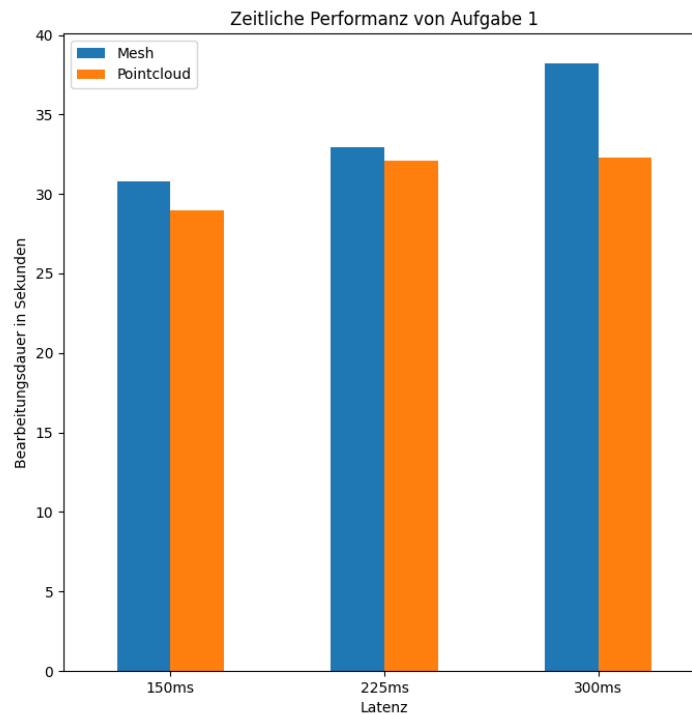


Abbildung 17: Die in Aufgabe 1 benötigte Zeit für jede Einstellung. Die Avatardarstellungen werden farblich getrennt und nebeneinander verglichen.

Einstellung	Mittelwert	SD
M150	30.79	10.52
M225	32.91	11.56
M300	38.19	14.63
P150	29.07	9.74
P225	32.14	10.83
P300	32.30	11.02

Tabelle 7: Die gespeicherte benötigte Zeit um Aufgabe 1 zu absolvieren

Der p -Wert des Kruskal-Wallis-Tests lag über dem Signifikanzniveau ($H=8.36$, $p=0.13$). Es gab zwischen den Einstellungen keine signifikanten Unterschiede bezüglich der Bearbeitungszeit von Aufgabe 1.

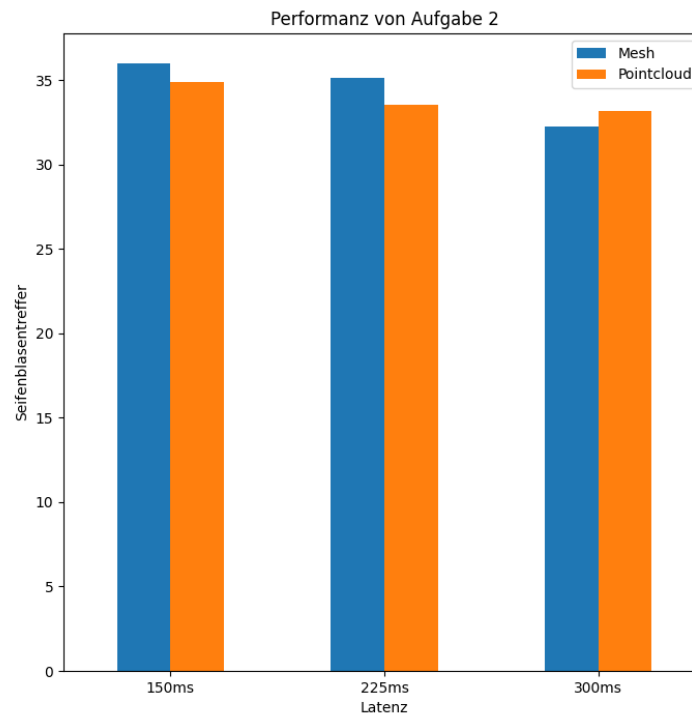


Abbildung 18: Die Anzahl an Seifenblasentreffern für jede Einstellung. Die Avatardarstellungen werden farblich getrennt und nebeneinander verglichen.

Einstellung	Mittelwert	SD
M150	36.06	4.25
M225	35.30	4.24
M300	32.30	6.82
P150	34.87	4.98
P225	33.72	5.13
P300	33.39	4.99

Tabelle 8: Die gespeicherte Anzahl an Seifenblasentreffern

Der p -Wert des Kruskal-Wallis-Tests lag unter dem Signifikanzniveau ($H=11.34$, $p=0.044$). Der darauf folgende Conover-Iman Test zeigte für keine Kombination an Einstellungen einen signifikanten Unterschied in der Anzahl der getroffenen Seifenblasen.

Hypothese 5 (H5): *Das Steigen der Latenz um 75 und 150 Millisekunden hat eine größere Auswirkung auf die Effizienz als die qualitative Abnahme der Avatarrepräsentation*

Sowohl die Höhe der Latenz als auch die ausgewählte Avatarrepräsentation hatten keinen signifikanten Einfluss auf die Effizienz der Probanden, weshalb die Hypothese H5 falsifiziert wurde. Die Ergebnisse des Mesh-Avatars bei einer Latenz von 300 ms sind deutlich schlechter als bei einer Latenz von 225 ms, aber dieser Unterschied ist nicht signifikant.

5.7 Wahrnehmung von Latenz

Um die Wahrnehmung von Latenz zu messen, wurde die Antwort der achten Frage des Fragebogens benutzt:

Die Bewegungen des virtuellen Körpers waren synchron zu meinen eigenen Bewegungen.

Einstellung	Mittelwert	SD
M150	4.84	1.54
M225	3.72	2.09
M300	3.27	1.85
P150	5.87	0.96
P225	5.42	1.41
P300	4.33	1.61

Tabelle 9: Die Ergebnisse des Fragebogens bezüglich der Synchronität.

Der p -Wert des Kruskal-Wallis-Tests lag unter dem Signifikanzniveau ($H=44.87, p < .001$)

Es gab keine signifikanten Unterschiede zwischen diesen Einstellungen:

- M150(M=4.84,SD=1.54)-M225(M=3.72,SD=2.09)
- M225(M=3.72,SD=2.09)-M300(M=3.27,SD=1.85)
- M150(M=4.84,SD=1.54)-P150(M=5.87,SD=0.96)
- M150(M=4.84,SD=1.54)-P225(M=5.42,SD=1.41)
- M150(M=4.84,SD=1.54)-P300(M=4.33,SD=1.61)
- M225(M=3.72,SD=2.09)-P300(M=4.33,SD=1.61)
- M300(M=3.27,SD=1.85)-P300(M=4.33,SD=1.61)
- P150(M=5.87,SD=0.96)-P225(M=5.42,SD=1.41)
- P225(M=5.42,SD=1.41)-P300(M=4.33,SD=1.61)

Hypothese 6 (H6): *Nutzer nehmen die Latenz bei beiden Darstellungen gleich wahr.*

Eine Erhöhung der Latenz von 75 ms führte bei keiner Einstellung zu einem signifikanten Unterschied. Bei einer Latenz von 150 ms oder 300 ms führt ein Wechsel der Avatardarstellung zu keinem signifikanten Unterschied, aber bei einer Latenz von 225 ms ist ein Avatarwechsel für einen signifikanten Unterschied ausreichend.

Dies könnte daran liegen, dass die Synchronität für den Mesh-Avatar zwischen 150 ms und 225 ms einstürzt (Mittelwert $\Delta = 1.12$), aber nicht für den Point-Cloud-Avatar (Mittelwert $\Delta = 0.45$). Für den Point-Cloud-Avatar stürzt die Synchronität erst zwischen 225 ms und 300 ms (Mittelwert $\Delta = 1.09$) ein. Die Probanden nahmen die Latenz bei beiden Darstellungen nur solange gleich wahr, solange die Synchronität entweder bei keinem oder bei beiden Avatardarstellungen eingebrochen ist. Der Latenzschwellwert des Einbrechens der Synchronität unterscheidet sich zwischen den Avatardarstellungen, weshalb die Hypothese H6 falsifiziert wurde.

5.8 Cybersickness

Vor Beginn der Studie wurde jeder Proband nach seinem Wohlempfinden gefragt. Der Mittelwert der Antworten lag bei 1,18. Nach jedem Durchlauf wurde jeder Proband erneut hierzu befragt. Hier sind die Ergebnisse nach jedem Durchlauf:

1. 1.18
2. 1.21
3. 1.36
4. 1.39
5. 1.51
6. 1.51

Der p -Wert des Kruskal-Wallis-Tests lag über dem Signifikanzniveau ($H=8.66$, $p=0.19$). Es gab zwischen den Abläufen keine signifikanten Unterschiede. Kein Teilnehmer musste aufgrund von Cyber-Sickness-Symptomen die Studie abbrechen.

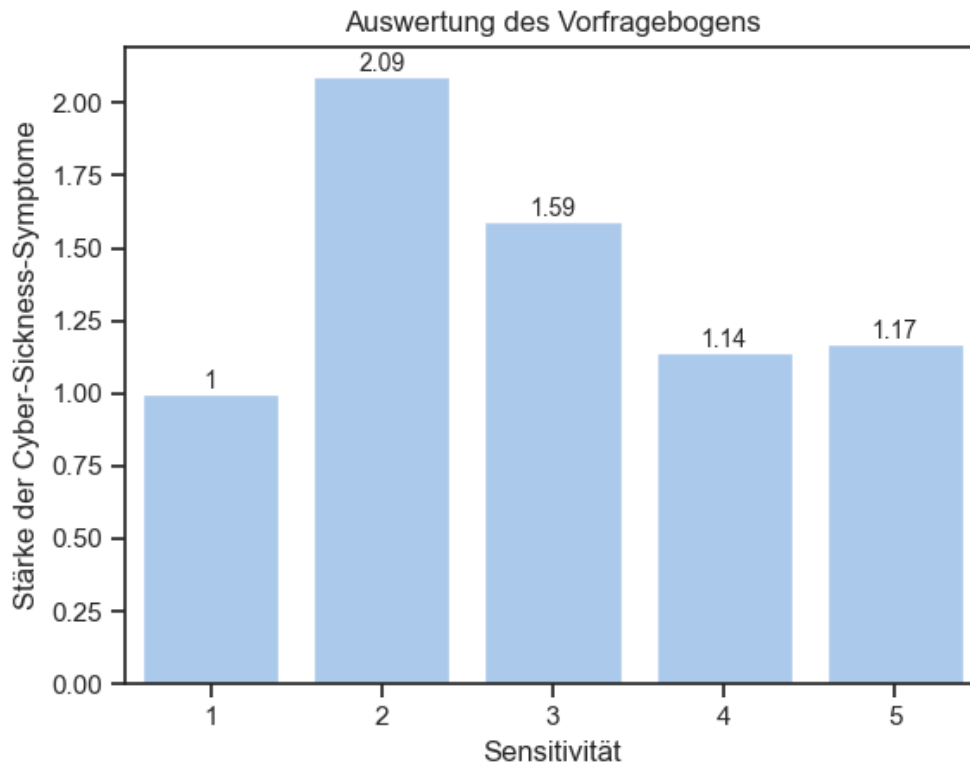


Abbildung 19: Das Histogramm vergleicht die vorher angegebene Sensitivität der Probanden mit der Stärke der erlebten Cyber-Sickness-Symptome. Die Skala der Sensitivität reicht von 1 (Sehr anfällig) bis 5 (nicht anfällig). Die Stärke der Symptome reicht von 1 (Keine Symptome) bis 7 (Starke Symptome). Probanden ohne VR-Vorerfahrung wurden nicht in der Statistik aufgeführt

Hypothese 7 (H7): : *Das Experiment ruft über die Dauer Cyber-Sickness-Symptome hervor*

Das Wohlbefinden der Probanden bezüglich Cyber-Sickness-Symptomen verschlechterte sich mit der Anzahl der absolvierten Abläufe ($\Delta = 0.33$), aber der Unterschied wurde nicht als signifikant eingestuft. Eine längere Benutzung von VR-Anwendungen ist nach Forschungen für den Nutzer erschöpfend und verursacht Symptome wie Kopfschmerzen oder Schwindel, weshalb ein leicht verschlechtertes Wohlempfinden zu erwarten war. Zudem hat sich nur das Wohlempfinden der Probanden verschlechtert, die anfällig für virtuelle Realitäten waren. Daher wurde die Hypothese H7 falsifiziert.

6 Diskussion

Es konnten nicht alle Hypothesen aus Kapitel 4.1 verifiziert werden. Entgegen der Erwartung war die Avatarrepräsentation ein wichtigerer Faktor für das Embodiment der Probanden als die Höhe der Latenz. Für eine genauere Analyse wurden die drei Faktoren untersucht, die Embodiment definieren.

Die Body Ownership der Probanden war wie erwartet stärker von der Avatardarstellung als von der Latenz beeinflusst. Die Auswahl der Avatarrepräsentation hatte einen größeren Einfluss auf die Agency der Probanden als zuvor angenommen. Erst bei höheren Latenzen führte die Benutzung eines Point-Cloud-Avatars zu einer Veränderung der Agency und bei identischer Latenz war die Agency bei der Verwendung des Point-Cloud-Avatars signifikant besser als bei der Verwendung des Mesh-Avatars. Selbst wenn bei der Verwendung des Point-Cloud-Avatars die Latenz im Vergleich zum Mesh-Avatar um 75 ms erhöht war, empfanden die Probanden eine bessere Agency. Dieser Unterschied der Agency war allerdings nicht signifikant.

Der Unterschied in der Agency könnte mit der höheren Body Ownership zusammenhängen. Der Proband fühlt sich mit seinem Avatar aufgrund der höheren Qualität stärker verbunden, sodass höhere Verzögerungen in den Bewegungen leichter akzeptiert werden.

Unerwarteterweise beeinflusste die Erhöhung der Latenz nicht die Self-Location der Probanden. Die Self-Location änderte sich allerdings bei dem Wechsel der Avatarrepräsentation signifikant, wenn die Latenz nicht verändert wurde. Die Aufgaben wurden so konzipiert, dass der Nutzer wenig laufen musste. Dies könnte dazu geführt haben, dass der Nutzer die Latenz nur bei der Bewegung der Arme bemerkt hat. Es könnte eine starke Relation zwischen den Aufgaben eines Nutzers und seiner Self-Location existieren.

Der Point-Cloud Avatar ähnelte dem Nutzer in seiner Haut und seiner Kleidung, weshalb der Nutzer möglicherweise eher das Gefühl hatte, dass sein Körper tatsächlich in der virtuellen Umgebung war. Eine realistische Haut und Kleidung könnten eine Voraussetzung für hohe Self-Location sein.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Auswahl der Avatardarstellung für das empfundene Embodiment und jedes seiner Faktoren relevant ist. Die Auswahl der Latenz beeinflusste zwar die Agency, aber nur geringfügig die Body Ownership oder die Self-Location des Probanden.

Weder die Avatardarstellung noch die Höhe der Latenz hatte einen relevanten Einfluss auf die Bearbeitung der Aufgaben. Es gilt zu erwähnen, dass die Leistung der Probanden sich trotzdem proportional zur Latenz verschlechterte. Dieses Ergebnis stimmt mit der bisherigen Forschung zu Latenz überein.

Die Probanden nahmen die Veränderung der Latenz je nach Avatarrepräsentation unterschiedlich wahr. Bei der Benutzung des Mesh-Avatars verschlechterte sich die wahrgenommene Synchronität zwischen den Bewegungen des Probanden und des Avatars bereits zwischen 150 und 225 ms deutlich. Bei der Verwendung eines Point-Cloud-Avatars lag der Schwellwert für dieses Phänomen zwischen 225 und 300 ms. Die Begründung für die niedrigere Wahrnehmung höherer Latenzen bei einem hochwertigen Avatar könnte wie bei der Agency ebenfalls auf die Verbundenheit zum Avatar zurückzuführen sein.

Das bessere Embodiment bei der Benutzung des Point-Cloud-Avatars spiegelte sich auch im Feedback wider. Mehrere Probanden präferierten den Point-Cloud-Avatar gegenüber dem Mesh-Avatar.

Das leicht verschlechterte Wohlbefinden der Nutzer lässt sich durch die längere Nutzung des virtuellen Systems und der Anfälligkeit gegenüber virtuellen Systemen begründen.

7 Ausblick und Fazit

7.1 Ausblick

Die Benutzung von qualitativ hochwertigen Avataren könnte Vorteile haben, die bisher noch nicht ausreichend bedacht wurden. Die Generierung von äußerst hochwertigen Avataren erfordert Berechnungszeit, sodass die Motion-to-Photon Zeit sich erhöht. Die Ergebnisse der Studie deuten an, dass die Verbesserung der Qualität des Avatars den Einfluss von hohen Latenzen verringern und damit die Nachteile einer höheren Berechnungszeit ausgleichen könnte. Wechselwirkungen zwischen Avatar und Latenz wurden bisher noch nicht hinreichend erforscht, weshalb die Schlussfolgerungen der Arbeit noch bestätigt werden müssen.

Die Mindestlatenz für die Studie musste aufgrund der Bearbeitungszeit der Point-Cloud-Generierung auf 150 ms gesetzt werden. Eine Verringerung der Bearbeitungszeit durch bessere Hardware oder neue Generierungstechniken könnte die Mindestlatenz senken, sodass ein weiteres Latenzintervall untersucht werden kann.

Die Ergebnisse der Studie beziehen sich nur auf eine limitierte Anzahl an ausgewählten Latenzen und Avatardarstellungen. Aufgrund der zeitlichen Beschränkung der Studie konnten nur drei verschiedene Latenzen als Referenzwert analysiert werden. Die Abstände zwischen den zu untersuchenden Latenzen könnten verringert werden, um genauere Schlussfolgerungen ziehen zu können.

Zudem können qualitativ bessere Avatardarstellungen als ein generierter Mesh-Avatar verwendet werden, um den Einfluss von Latenz zu vergleichen. Ein Beispiel wäre die *MetaHuman*-Technologie von Unreal Engine 5 oder Mesh-Avatare, die durch einen zuvor durchgeführten Scan den Probanden viel ähnlicher aussehen wie bei der Studie von Waltemate et al. (2018).

Eine ebenfalls oft benutzte Technologie ist ein Motion-Capture System. Ein Vergleich zwischen einem Motion-Capture gesteuerten Avatar und einem Point-Cloud-Avatar oder einem Mesh-Avatar in Bezug auf Embodiment könnte zu interessanten Ergebnissen führen.

Idealerweise sollte die Wahrnehmung der Latenz nicht durch eine Frage bewertet werden, die bereits einen Hinweis auf vorhandene Latenz gibt. Eine bessere Möglichkeit wäre es, wenn Probanden auflisten könnten, was ihnen während der Studie und besonders zwischen verschiedenen Durchläufen an Veränderungen auffiel.

Der Point-Cloud-Avatar hatte im Gegensatz zum Mesh-Avatar keinen Kopf, da der Proband sonst die VR-Brille sehen würde. Ein vorheriger Scan des Gesichts in Kombination mit Gesichts- und Mimikerkennung könnte einen Point-Cloud-Kopf generieren. Wenn der Detailgrad des Gesichts nicht hochwertig genug ist, kann das *Uncanny Valley* Phänomen auftreten und der Nutzer akzeptiert den Kopf nicht als seinen eigenen. Das Embodiment dieses kompletten Point-Cloud-Avatars gilt es noch zu erforschen.

Bisherige Forschungen deuten darauf hin, dass die Auswahl an Aufgaben die Wahrnehmung von Latenz beeinflusst, sodass eine Wiederholung der Studie mit anderen Aufgaben möglicherweise andere Ergebnisse produziert.

Die Self-Location wurde im Gegensatz zu den beiden anderen Faktoren nur mit 2 statt 4 Fragen abgedeckt. Der Einfluss einer Antwort war dadurch verdoppelt, weshalb es sich empfiehlt, die gleiche Anzahl an Fragen für jeden Faktor zu benutzen.

7.2 Fazit

Das Ziel der Arbeit war es, den Einfluss von Avatardarstellung und Latenz auf die Fähigkeit, seinen Avatar als eigenen Körper zu akzeptieren, zu vergleichen. Um diese beiden Faktoren analysieren zu können, wurde eine Studie konzipiert und durchgeführt. Die für die Studie implementierte Anwendung ermöglichte die Auswahl zwischen zwei Avataren, die sich in Entstehung und Qualität unterscheiden. Der Mesh-Avatar wurde nicht an das Aussehen des Nutzers angepasst und wurde über fünf Positionssensoren gesteuert. Der Point-Cloud-Avatar hingegen entsteht durch die Aufnahme einer RGB-Tiefenkamera und passt seine Position, Bewegung und Erscheinung an die Bildaufnahme des Nutzers an. Im Vergleich zum Mesh-Avatar ist der Point-Cloud-Avatar qualitativ hochwertiger. In der Anwendung konnten drei Verzögerungen zwischen der Bewegung des Probanden und der Bewegung des Avatars eingestellt werden. Die Verzögerung zwischen der Bewegung des Probanden und der Bewegung des Avatars betrug 150 ms, 225 ms oder 300 ms. Die Studie wurde im within-subject design durchgeführt, so dass alle Probanden für jede Kombination an Avatardarstellung und Latenz einen Durchlauf absolvierten. Die Aufgaben animierten den Probanden nach Objekten zu greifen und seine Arme und Beine zu bewegen. Die Ergebnisse der abgeschlossenen Aufgaben und des ausgefüllten Fragebogens wurden abschließend evaluiert.

Die Ergebnisse der Studie deuten an, dass die Avatardarstellung ein bedeutenderer Faktor für das Embodiment der Probanden sei als die Höhe der Latenz. Selbst bei Latenzen von 300 ms ruft ein Point-Cloud-Avatar ein stärkeres Embodiment hervor als ein Mesh-Avatar bei einer Latenz von 150 ms. Obwohl die Nutzer eine Latenz von 300 ms bei der Point-Cloud-Darstellung wahrnehmen, verlieren sie nicht ihr Embodiment gegenüber dem Avatar.

Sowohl die Body Ownership, als auch die Agency und die Self-Location werden im Fragebogen signifikant besser bewertet, wenn ein Point-Cloud-Avatar ausgewählt wurde. Die Erhöhung der Latenz führt nur beim Benutzen eines Mesh-Avatars zu signifikant schlechterer Body Ownership und Agency.

Die Effizienz der Nutzer wird sowohl von der Latenz als auch von den Avatardarstellungen nicht beeinflusst. Möglicherweise wurden die Aufgaben nicht schwierig genug gestaltet, um Fehler zu erzwingen.

Aufgrund der Evaluation der Ergebnisse empfiehlt es sich, qualitativ hochwertigere Avatare zu benutzen, selbst wenn der Nutzer dadurch erhöhten Latenzen ausgesetzt ist. Diese Empfehlung muss bisher auf die Benutzung eines Point-Cloud-Avatars beschränkt werden. Es wäre interessant zu sehen, ob ein Vergleich mit einem Avatar, der durch Motion-Capture gesteuert wird, zu gleichen Ergebnissen kommt. Außerdem wäre es für die Forschung wichtig, Avatardarstellungen bei einer Latenz unter 150 ms zu vergleichen.

Abbildungsverzeichnis

1	Das Gitter für die Registrierung	5
2	Die Point-Cloud streaming pipeline von Fischer et al. (2022)	6
3	Generierte Mesh-Avatare. Männlich (l.), Weiblich (r.)	12
4	Die Darstellung des Point-Cloud-Avatars aus dem Projekt von Fischer et al. (2022)	16
5	Die Kugeln von Aufgabe 1 in ihrer Ellipsenlaufbahn. Die transparente Kugel wird in diesem Beispiel nicht angezeigt.	18
6	Die transparente Kugel in Aufgabe 1	18
7	Die Seifenblase für Aufgabe 2	20
8	Der Spiegel aus Aufgabe 3 reflektiert den Point-Cloud-Avatar	21
9	Der Mannequin führt eine Bewegung aus, die der Nutzer anschließend nachahmen muss	22
10	Der Ablauf des Experiments in Form eines Aktivitätsdiagramms	33
11	Ein Nutzer, der eine Bewegung nachahmt. Beide Schlaufen sind an den Beinen befestigt.	34
12	Ergebnisse des Conover-Iman Tests bezüglich Body Ownership. Signifikante Unterschiede($p < 0.05$) zwischen den Einstellungen sind dunkelblau gekennzeichnet. Zahlen < 0.001 wurden auf 0.001 aufgerundet	38
13	Ergebnisse des Conover-Iman Tests bezüglich Agency. Signifikante Unterschiede($p < 0.05$) zwischen den Einstellungen sind dunkelblau gekennzeichnet. Zahlen < 0.001 wurden auf 0.001 aufgerundet	40
14	Ergebnisse des Conover-Iman Tests bezüglich Self-Location. Signifikante Unterschiede($p < 0.05$) zwischen den Einstellungen sind dunkelblau gekennzeichnet. Zahlen < 0.001 wurden auf 0.001 aufgerundet	42
15	Ergebnisse des Conover-Iman Tests bezüglich Embodiment. Signifikante Unterschiede($p < 0.05$) zwischen den Einstellungen sind dunkelblau gekennzeichnet. Zahlen < 0.001 wurden auf 0.001 aufgerundet	44
16	Die Summe der Abstände zwischen den losgelassenen und den transparenten Kugeln für jede Einstellung. Angegeben in cm. Die Avatardarstellungen werden farblich getrennt und nebeneinander verglichen.	46
17	Die in Aufgabe 1 benötigte Zeit für jede Einstellung. Die Avatardarstellungen werden farblich getrennt und nebeneinander verglichen.	47
18	Die Anzahl an Seifenblasentreffern für jede Einstellung. Die Avatardarstellungen werden farblich getrennt und nebeneinander verglichen.	48
19	Das Histogramm vergleicht die vorher angegebene Sensitivität der Probanden mit der Stärke der erlebten Cyber-Sickness-Symptome. Die Skala der Sensitivität reicht von 1 (Sehr anfällig) bis 5 (nicht anfällig). Die Stärke der Symptome reicht von 1 (Keine Symptome) bis 7 (Starke Symptome). Probanden ohne VR-Vorerfahrung wurden nicht in der Statistik aufgeführt	51
20	Der vom Probanden auszufüllende Vorfragebogen. Das Feedback wird nach der Studie ausgefüllt.	65
21	Ein Positionstracker an einer Schlaufe befestigt	67

Tabellenverzeichnis

1	Die Tabelle fasst die gesammelten Ergebnisse von Attig et al. (2017) und nachfolgende Forschungen bezüglich des Einflusses von Latenz zusammen	8
2	Ergebnisse des VR-Fragebogens bezüglich Body Ownership	37
3	Ergebnisse des VR-Fragebogens bezüglich Agency	39
4	Ergebnisse des VR-Fragebogens bezüglich Self-Location	41
5	Ergebnisse des VR-Fragebogens bezüglich Embodiment.	43
6	Die Ergebnisse der Abstände zwischen den losgelassenen und den transparenten Kugeln für jede Einstellung.	46
7	Die gespeicherte benötigte Zeit um Aufgabe 1 zu absolvieren	47
8	Die gespeicherte Anzahl an Seifenblasentreffern	48
9	Die Ergebnisse des Fragebogens bezüglich der Synchronität.	49
10	Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests. Die Zahlen in der Tabelle entsprechen der Teststatistik für die jeweilige Einstellung und den jeweiligen Datensatz. Der Datensatz der Body Ownership enthält die Antworten von Frage 1 bis 4, Agency von Frage 5 bis 8 und Self-Location die Fragen 9 und 10. Der kritische Wert wurde mit der Monte-Carlo Simulation ermittelt. Keine Teststatistik lag über einem kritischen Wert also war kein Datensatz normalverteilt	66

Glossar

- Animation Blueprint** Visuelles Skript für die Animation von Charakteren oder Objekten. 13
- Avatar** Personifizierte Repräsentation des Nutzers. 1
- Azure Kinect** RGB-Tiefenkamera für Body Tracking. 5
- Basis-Knochen** In der Knochen-Hierarchie übergeordneter Knochen. 14
- Cave** Raum zur Projektion einer dreidimensionalen Illusionswelt der virtuellen Realität. 9
- Fotogrammetrieverfahren** Technik zur Erstellung von präzisen 3D-Modellen . 4
- Game Engine** Framework für die Entwicklung von Computerspielen. 1
- Head-Mounted Display** Vor den Augen angebrachter Bildschirm, umgangssprachlich wird auch der Begriff "VR-Brille" benutzt. 1
- Latenzjitter** Unregelmäßiges Auftreten von Latenz. 9
- Lighthouse** Gerät, das Infrarot-Lichtblitze an die Sensoren des VIVE Systems aussendet. 26
- Motion Controller** Ein in diesem Fall kabelloser Controller, der als Eingabegerät für den Nutzer dient. 6
- Motion Sickness** Bewegungskrankheit oder Reisekrankheit. 11
- Motion-Capture System** Technik zur Erfassung von Bewegungen, die digital aufgezeichnet werden. 1
- Niagara Partikelsystem** Technik, die Partikeleffekte erstellt und kontrolliert. 7
- Pipeline** Bearbeitungsreihenfolge von Start bis Ziel. 6
- Pose** Kombination aus Position und Rotation. 13
- Positionstracker** Ein Sensor, dessen Position im reellen Koordinatensystem wird. 11
- UV-Koordinaten** Koordinaten für die Texturierung eines 3D-Modells. 7
- within-subjects Design** Ein Studiendesign, bei dem jede Person alle Kombinationen von Faktoren durchläuft. 36

Akronyme

- HMD** Head-Mounted Display. 1
- VR** Virtual Reality. 3

Literatur

- ALBERT, RACHEL; ANJUL PATNEY; DAVID LUEBKE; und JOOHWAN KIM. 2017. Latency requirements for foveated rendering in virtual reality. *ACM Trans. Appl. Percept.* 14. URL <https://doi.org/10.1145/3127589>.
- ARZY, SHAHAR; GREGOR THUT; CHRISTINE MOHR; CHRISTOPH MICHEL; und OLAF BLANKE. 2006. Neural basis of embodiment: Distinct contributions of temporoparietal junction and extrastriate body area. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience* 26.8074–81.
- ATTIG, CHRISTIANE; NADINE RAUH; THOMAS FRANKE; und JOSEF F. KREMS. 2017. System latency guidelines then and now – is zero latency really considered necessary? *Engineering psychology and cognitive ergonomics: Cognition and design*, hrsg. von Don Harris, 3–14. Cham: Springer International Publishing.
- BOCKELMAN, PATRICIA, und DEANNA LINGUM. 2017. Factors of cybersickness. *Hci international 2017 – posters' extended abstracts*, hrsg. von Constantine Stephanidis, 3–8. Cham: Springer International Publishing.
- BROOKS, JOHNELL O.; RICHARD R. GOODENOUGH; MATTHEW C. CRISLER; NATHAN D. KLEIN; REBECCA L. ALLEY; BEATRICE L. KOON; WILLIAM C. LOGAN; JENNIFER H. OGLE; RICHARD A. TYRRELL; und REBEKKAH F. WILLS. 2010. Simulator sickness during driving simulation studies. *Accident Analysis Prevention* 42.788–796, Assessing Safety with Driving Simulators. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000145750900092X>.
- CARD, STUART; GEORGE ROBERTSON; und JOCK MACKINLAY. 1991. The information visualizer, an information workspace. 181–186.
- CASERMAN, POLONA; MICHELLE MARTINUSSEN; und STEFAN GÖBEL. 2019. Effects of end-to-end latency on user experience and performance in immersive virtual reality applications. *Entertainment computing and serious games*, hrsg. von Erik van der Spek, Stefan Göbel, Ellen Yi-Luen Do, Esteban Clua, und Jannicke Baalsrud Hauge, 57–69. Cham: Springer International Publishing.
- DI LUCA, MASSIMILIANO. 2010. New method to measure end-to-end delay of virtual reality. *Presence: Teleoper. Virtual Environ.* 19.569–584. URL https://doi.org/10.1162/pres_a_00023.
- DIZIO, PAUL, und JAMES LACKNER. 2000. Motion sickness side effects and aftereffects of immersive virtual environments created with helmet-mounted visual displays. 4.
- DOHERTY, RINA, und PAUL SORENSON. 2015. Keeping users in the flow: Mapping system responsiveness with user experience. *Procedia Manufacturing* 3.4384–4391.
- ELLIS, STEPHEN; BERNARD ADELSTEIN; S. BAUMELER; G. JENSE; und RICHARD JACOBY. 1999. Sensor spatial distortion, visual latency, and update rate effects on 3d tracking in virtual environments. 218–221.

- ELLIS, STEPHEN; FRAÇOIS BRÉANT; B. MANGES; RICHARD JACOBY; und BERNARD ADELSTEIN. 1997. Factors influencing operator interaction with virtual objects viewed via head-mounted see-through displays: viewing conditions and rendering latency. *Aug. 0*, 138–145.
- EUBANKS, JAMES COLEMAN; ALEC G. MOORE; PAUL A. FISHWICK; und RYAN P. MCMAHAN. 2020. The effects of body tracking fidelity on embodiment of an inverse-kinematic avatar for male participants. *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*, 54–63.
- EUBANKS, JAMES COLEMAN; ALEC G. MOORE; PAUL A. FISHWICK; und RYAN P. MCMAHAN. 2021. A preliminary embodiment short questionnaire. *Frontiers in Virtual Reality 2*. URL <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frvir.2021.647896>.
- FISCHER, ARNOUT; FRANS BLOMMAERT; und CEES MIDDEN. 2005. Monitoring and evaluation of time delay. *Int. J. Hum. Comput. Interaction* 19.163–180.
- FISCHER, ROLAND; ANDRE MÜHLENBROCK; FARIN KULAPICHITR; VERENA NICOLE USLAR; DIRK WEYHE; und GABRIEL ZACHMANN. 2022. *Evaluation of point cloud streaming and rendering for vr-based telepresence in the or*, 89–110.
- FRIBOURG, REBECCA; FERRAN ARGELAGUET; ANATOLE LÉCUYER; und LUDOVIC HOYET. 2020. Avatar and sense of embodiment: Studying the relative preference between appearance, control and point of view. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 26.2062–2072.
- GOLDING, JOHN F. 2006. Motion sickness susceptibility. *Autonomic Neuroscience* 129.67–76, Nausea and Vomiting: An Interdisciplinary Approach. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1566070206002128>.
- HELD, RICHARD, und NATHANIEL DURLACH. 1993. *Telepresence, time delay and adaptation*, 232–246.
- HOYET, LUDOVIC; CLÉMENT SPIES; PIERRE PLANTARD; ANTHONY SOREL; RICHARD KULPA; und FRANCK MULTON. 2019. Influence of motion speed on the perception of latency in avatar control. *2019 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*, 286–2863.
- JEUNET, CAMILLE; LOUIS ALBERT; FERRAN ARGELAGUET; und ANATOLE LÉCUYER. 2018. “do you feel in control?”: Towards novel approaches to characterise, manipulate and measure the sense of agency in virtual environments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 24.1486–1495.
- KASAHARA, SHUNICHI; KEINA KONNO; RICHI OWAKI; TSUBASA NISHI; AKIKO TAKESHITA; TAKAYUKI ITO; SHOKO KASUGA; und JUNICHI USHIBA. 2017. Malleable embodiment: Changing sense of embodiment by spatial-temporal deformation of virtual human body. *Proceedings of the 2017 CHI conference on human factors in computing systems*, CHI '17, 6438–6448. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. URL <https://doi.org/10.1145/3025453.3025962>.
- KAWAMURA, SOMA, und RYUGO KIJIMA. 2016. Effect of hmd latency on human stability during quiescent standing on one foot. *2016 IEEE Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, 141–144.

- KAWANO, NAOKO; KUNIHIRO IWAMOTO; KAZUTOSHI EBE; BRANKO ALEKSIC; AKIKO NODA; HIROYUKI UMEGAKI; MASAFUMI KUZUYA; TETSUYA IIDAKA; und NORIO OZAKI. 2012. Slower adaptation to driving simulator and simulator sickness in older adults. *Aging clinical and experimental research* 24.285–9.
- KESHAVARZ, BEHRANG, und HEIKO HECHT. 2011. Validating an efficient method to quantify motion sickness. *Human factors* 53.415–26.
- KILTENI, KONSTANTINA; RAPHAELA GROTEN; und MEL SLATER. 2012. The sense of embodiment in virtual reality. *Presence Teleoperators amp Virtual Environments* 21.
- KOILIAS, ALEXANDROS; CHRISTOS MOUSAS; und CHRISTOS-NIKOLAOS ANAGNOSTOPOULOS. 2019. The effects of motion artifacts on self-avatar agency. *Informatics* 6.18.
- LAMB, STEVE, und KENNY KWOK. 2014. Mssq-short norms may underestimate highly susceptible individuals. *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 57.
- LATOSCHIK, MARC ERICH; DANIEL ROTH; DOMINIK GALL; JASCHA ACHENBACH; THOMAS WALTERMATE; und MARIO BOTSCH. 2017. The effect of avatar realism in immersive social virtual realities. *Proceedings of the 23rd acm symposium on virtual reality software and technology, VRST '17*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery.
- LAVIOLA, JR. 2000. A discussion of cybersickness in virtual environments. *ACM SIGCHI Bulletin* 32.47–56.
- LIANG, JIANDONG; CHRISTOPHER SHAW; und MARK GREEN. 1991. On temporal-spatial realism in the virtual reality environment. 19–25.
- LUGRIN, JEAN-LUC; JOHANNA LATT; und MARC ERICH LATOSCHIK. 2015. Avatar anthropomorphism and illusion of body ownership in vr. *2015 ieee virtual reality (vr)*, 229–230.
- MARTENS, JUDITH; THOMAS FRANKE; NADINE RAUH; und JOSEF KREMS. 2018. Effects of low-range latency on performance and perception in a virtual, unstable second-order control task. *Quality and User Experience* 3.
- MASELLI, ANTONELLA, und MEL SLATER. 2013. The building blocks of the full body ownership illusion. *Frontiers in human neuroscience* 7.83.
- MCMANUS, ERIN A.; BOBBY BODENHEIMER; STEPHAN STREUBER; STEPHAN DE LA ROSA; HEINRICH H. BÜLTHOFF; und BETTY J. MOHLER. 2011. The influence of avatar (self and character) animations on distance estimation, object interaction and locomotion in immersive virtual environments. *Proceedings of the acm siggraph symposium on applied perception in graphics and visualization, APGV '11*, 37–44. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. URL <https://doi.org/10.1145/2077451.2077458>.

- MEEHAN, M.; S. RAZZAQUE; M.C. WHITTON; und F.P. BROOKS. 2003. Effect of latency on presence in stressful virtual environments. *Ieee virtual reality, 2003. proceedings.*, 141–148.
- MORICE, ANTOINE H.P.; ISABELLE A. SIEGLER; und BENOÎT G. BARDY. 2008. Action-perception patterns in virtual ball bouncing: Combating system latency and tracking functional validity. *Journal of Neuroscience Methods* 169.255–266. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165027007005614>.
- MÜHLENBROCK, ANDRE; ROLAND FISCHER; CHRISTOPH SCHRÖDER-DERING; RENE WELLER; und GABRIEL ZACHMANN. 2022. Fast, accurate and robust registration of multiple depth sensors without need for rgb and ir images. *The Visual Computer* 38.
- PAUSCH, RANDY F.; THOMAS CREA; und MATTHEW CONWAY. 1992. A literature survey for virtual environments: Military flight simulator visual systems and simulator sickness. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments* 1.344–363. URL <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:44556977>.
- PECK, T. C., und A. TUTAR. 2020. The impact of a self-avatar, hand collocation, and hand proximity on embodiment and stroop interference. *IEEE Transactions on Visualization amp; Computer Graphics* 26.1964–1971.
- PECK, TABITHA C., und MAR GONZALEZ-FRANCO. 2021. Avatar embodiment. a standardized questionnaire. *Frontiers in Virtual Reality* 1. URL <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frvir.2020.575943>.
- RAGAN, ERIC; CURTIS WILKES; DOUG BOWMAN; und TOBIAS HÖLLERER. 2009. Simulation of augmented reality systems in purely virtual environments. *Virtual Reality Conference, IEEE* 0.287–288.
- ROBERT S. KENNEDY, KEVIN S. BERBAUM, NORMAN E. LANE, und MICHAEL G. LILIENTHAL. 1993. Simulator sickness questionnaire: An enhanced method for quantifying simulator sickness. *The International Journal of Aviation Psychology* 3.203–220. URL https://doi.org/10.1207/s15327108ijap0303_3.
- ROTH, DANIEL, und MARC ERICH LATOSCHIK. 2020. Construction of the virtual embodiment questionnaire (veq). *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 26.3546–3556.
- SCHOENENBERG, KATRIN. 2016. *The quality of mediated-conversations under transmission delay* Dissertation.
- SEOW, STEVEN C. 2008. *Designing and engineering time: The psychology of time perception in software*. Addison-Wesley Professional.
- SHAFER, DANIEL M.; COREY P. CARBONARA; und MICHAEL F. KORPI. 2019. Factors affecting enjoyment of virtual reality games: A comparison involving consumer-grade virtual reality technology. *Games for health journal* 8.15–23.

- SHNEIDERMAN, BEN, und CATHERINE PLAISANT. 2004. *Designing the user interface: strategies for effective human-computer interaction*.
- STAUFFERT, JAN-PHILIPP; FLORIAN NIEBLING; und MARC ERICH LATOSCHIK. 2018. Effects of latency jitter on simulator sickness in a search task. *2018 ieee conference on virtual reality and 3d user interfaces (vr)*, 121–127.
- STAUFFERT, JAN-PHILIPP; FLORIAN NIEBLING; und MARC ERICH LATOSCHIK. 2020. Latency and cybersickness: Impact, causes, and measures. a review. *Frontiers in Virtual Reality* 1. URL <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frvir.2020.582204>.
- STEED, ANTHONY; YE PAN; FIONA ZISCH; und WILLIAM STEPTOE. 2016. The impact of a self-avatar on cognitive load in immersive virtual reality. *2016 ieee virtual reality (vr)*, 67–76.
- TEATHER, ROBERT J.; ANDRIY PAVLOVYCH; WOLFGANG STUERZLINGER; und I. SCOTT MACKENZIE. 2009. Effects of tracking technology, latency, and spatial jitter on object movement. *2009 ieee symposium on 3d user interfaces*, 43–50.
- TOLIA, NIRAJ; DAVID ANDERSEN; und MAHADEV SATYANARAYANAN. 2006. Quantifying interactive user experience on thin clients. *Computer* 39.46 – 52.
- TOOTHMAN, N., und M. NEFF. 2019. The impact of avatar tracking errors on user experience in vr. *2019 ieee conference on virtual reality and 3d user interfaces (vr)*, 756–766. Los Alamitos, CA, USA: IEEE Computer Society. URL <https://doi.ieeecomputersociety.org/10.1109/VR.2019.8798108>.
- TSAKIRIS, MANOS; GITA PRABHU; und PATRICK HAGGARD. 2006. Having a body versus moving your body: How agency structures body-ownership. *Consciousness and cognition* 15.423–32.
- WALTEMATE, THOMAS; DOMINIK GALL; DANIEL ROTH; MARIO BOTSCH; und MARC ERICH LATOSCHIK. 2018. The impact of avatar personalization and immersion on virtual body ownership, presence, and emotional response. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 24.1643–1652.
- WALTEMATE, THOMAS; IRENE SENNA; FELIX HÜLSMANN; MARIEKE ROHDE; STEFAN KOPP; MARC ERNST; und MARIO BOTSCH. 2016. The impact of latency on perceptual judgments and motor performance in closed-loop interaction in virtual reality. *Proceedings of the 22nd acm conference on virtual reality software and technology, VRST '16*, 27–35. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery. URL <https://doi.org/10.1145/2993369.2993381>.
- WARE, COLIN, und RAVIN BALAKRISHNAN. 1994. Reaching for objects in vr displays: lag and frame rate. *ACM Trans. Comput.-Hum. Interact.* 1.331–356. URL <https://doi.org/10.1145/198425.198426>.
- WARWICK-EVANS, L.A.; N SYMONS; T FITCH; und L BURROWS. 1998. Evaluating sensory conflict and postural instability. theories of motion sickness. *Brain Research Bulletin* 47.465–469. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0361923098000902>.

- WATSON, B.; N. WALKER; W. RIBARSKY; und V. SPAULDING. 1998. Effects of variation in system responsiveness on user performance in virtual environments. *Human factors* 40.403–414.
- YEE, NICK, und JEREMY BAIENSON. 2007. The proteus effect: The effect of transformed self-representation on behavior. *Human Communication Research* 33.271 – 290.
- YU, KEVIN; GLEB GORBACHEV; ULRICH ECK; FRIEDER PANKRATZ; NASSIR NAVAB; und DANIEL ROTH. 2021. Avatars for teleconsultation: Effects of avatar embodiment techniques on user perception in 3d asymmetric telepresence. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* PP.1–1.
- ZHOU, R.; S. SHAO; W. LI; und L. ZHOU. 2016. How to define the user's tolerance of response time in using mobile applications. 281–285.

Anhang

Vor-Fragebogen	
ID: _____	
Geschlecht:	
<input type="checkbox"/> Männlich	
<input type="checkbox"/> Weiblich	
<input type="checkbox"/> Andere	
Alter: _____	
Größe: _____	
Beruf/Studiengang: _____	
Vorherige Erfahrung in VR:	
<input type="checkbox"/> Ich habe VR noch nie benutzt.	
<input type="checkbox"/> Ich habe es ein- oder zweimal ausprobiert.	
<input type="checkbox"/> Ich verwende ab und zu VR.	
<input type="checkbox"/> Ich verwende regelmäßig VR.	
Falls sie Erfahrung in VR haben,wie leicht wird Ihnen in VR übel?	
Sehr Leicht	Gar nicht
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
Feedback	

Abbildung 20: Der vom Probanden auszufüllende Vorfragebogen. Das Feedback wird nach der Studie ausgefüllt.

Einstellung	Body Ownership	Agency	Self-Location	Embodiment
M150	0.90	0.90	0.88	0.92
M225	0.93	0.89	0.94	0.92
M300	0.93	0.91	0.92	0.92
P150	0.85	0.73	0.83	0.81
P225	0.89	0.79	0.88	0.85
P300	0.90	0.88	0.88	0.90

Tabelle 10: Ergebnisse des Shapiro-Wilk-Tests. Die Zahlen in der Tabelle entsprechen der Teststatistik für die jeweilige Einstellung und den jeweiligen Datensatz. Der Datensatz der Body Ownership enthält die Antworten von Frage 1 bis 4, Agency von Frage 5 bis 8 und Self-Location die Fragen 9 und 10. Der kritische Wert wurde mit der Monte-Carlo Simulation ermittelt. Keine Teststatistik lag über einem kritischen Wert also war kein Datensatz normalverteilt



Abbildung 21: Ein Positionstracker an einer Schlaufe befestigt