

Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme

Universität Stuttgart  
Universitätsstraße 38  
D-70569 Stuttgart

Bachelorarbeit

# **Benutzerinteraktion in Augmented Reality mittels Eyetracking**

Nelusa Pathmanathan

|                     |   |
|---------------------|---|
| <b>Studiengang:</b> | Informatik  |
| <b>Prüfer/in:</b>   | Jun.-Prof. Dr. Michael Sedlmair                     |
| <b>Betreuer/in:</b> | Michael Becher, M.Sc.,<br>Dipl.-Inf. Nils Rodrigues |
| <b>Beginn am:</b>   | 3. März 2019  |
| <b>Beendet am:</b>  | 17. September 2019                                  |



## **Kurzfassung**

Augmented Reality ermöglicht es, eine Schnittstelle zwischen der virtuellen Welt und der realen Welt zu schaffen. Neben einfachen Smartphones, die Augmented Reality unterstützen, gibt es auch Head Mounted Displays (HMD), mit dessen Hilfe der Benutzer virtuelle Objekte in der realen Welt sehen und mit ihnen interagieren kann. Für die Interaktion sind oft sowohl Armbewegungen als auch kurze Kopfbewegungen notwendig, die vom Anwender bei längerem Gebrauch als sehr ermüdend und anstrengend empfunden werden können. Ein mögliches Beispiel für diesen Anwendungsfall ist die Durchführung von langen Texteingaben. Hier müsste der Benutzer mit dem Kopf jeden einzelnen Buchstaben anvisieren und ihn mit einer Handgeste auswählen. Ziel dieser Arbeit ist es, einen Prototyp zu entwickeln, der die Interaktion mit virtuellen Objekten durch das Blickverhalten des Benutzers in Kombination mit einem externen Gerät ermöglicht. Dies soll zu einer benutzerfreundlicheren Interaktion beitragen. Zu diesem Zweck wird die Microsoft HoloLens verwendet, in die ein externer binokularer Eyetracker eingebaut ist, der von Pupil Labs speziell für die Microsoft HoloLens entwickelt wurde. In einer Anwenderstudie wird der entwickelte Prototyp mit vier verschiedenen Interaktionsmethoden getestet. Abschließend werden die Ergebnisse der Studie ausgewertet und diskutiert.

## **Abstract**

Augmented Reality makes it possible to create an interface between the virtual world and the real world. In addition to simple smartphones that support Augmented Reality, there are also Head Mounted Displays (HMD) that allow users to see and interact with virtual objects in the real world. The interaction often requires both arm and short head movements, which can be perceived as very tiring and strenuous by the user during prolonged use. A possible example of this use case would be the performance of long text inputs where the user would have to aim at every single letter with his head and select it with a hand gesture. The aim of this work is to develop a prototype that enables the interaction with virtual objects with the user's gaze behaviour in combination with an external device. This should contribute to a more user friendly interaction. For this purpose the Microsoft HoloLens is used, in which an external binocular eye tracker is built in, which was developed by Pupil Labs especially for the Microsoft HoloLens. In a user study the developed prototype will be tested with four different interaction methods. Finally, the results of the study will be evaluated and discussed.



# Inhaltsverzeichnis

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. Einleitung</b>  | <b>9</b>  |
| <b>2. Grundlagen</b>  | <b>11</b> |
| 2.1. Mixed Reality, Virtual Reality und Augmented Reality . . . . . | 11        |
| 2.2. Immersive Analytics . . . . .                                  | 13        |
| 2.3. Eyetracking . . . . .  | 13        |
| 2.4. Benutzerinteraktion . . . . .                                  | 15        |
| <b>3. Verwandte Arbeiten</b>  | <b>17</b> |
| 3.1. Augenbasierte Interaktion mit 2D Displays . . . . .            | 17        |
| 3.2. Augenbasierte Interaktion in 3D . . . . .                      | 17        |
| <b>4. Verwendete Hard-und Software</b>                              | <b>21</b> |
| 4.1. Microsoft HoloLens 1st Gen und Binocular Add-on . . . . .      | 21        |
| 4.2. Unity Engine . . . . .   | 22        |
| 4.3. Pupil Software . . . . .                                       | 25        |
| <b>5. Design und Implementierung</b>                                | <b>29</b> |
| 5.1. Aufgabenstellung . . . . .                                     | 29        |
| 5.2. Entwurfskonzept des Prototyps . . . . .                        | 29        |
| 5.3. Implementierung des Prototyps . . . . .                        | 33        |
| 5.4. Funktionen des Tools . . . . .                                 | 36        |
| 5.5. Freie Rotation . . . . .                                       | 37        |
| 5.6. Freie Translation . . . . .                                    | 38        |
| 5.7. Verbesserung und Erweiterungen . . . . .                       | 38        |
| <b>6. Benutzerstudie</b>  | <b>41</b> |
| 6.1. Studiendesign . . . . .  | 41        |
| 6.2. Bewertung . . . . .  | 41        |
| 6.3. Teilnehmer . . . . .   | 42        |
| 6.4. Ausrüstung . . . . .   | 42        |
| 6.5. Ablauf . . . . .   | 43        |
| <b>7. Evaluation</b>  | <b>45</b> |
| 7.1. Hypothesen . . . . .   | 45        |
| 7.2. Auswertungen . . . . .   | 45        |
| 7.3. Beobachtungen . . . . .  | 51        |
| 7.4. Diskussion . . . . .   | 52        |
| <b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>                              | <b>55</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Literaturverzeichnis</b>            | <b>57</b> |
| <b>A. Anhang</b>                       | <b>65</b> |
| A.1. Diagramme . . . . .               | 65        |
| A.2. Einverständniserklärung . . . . . | 67        |
| A.3. Fragebögen . . . . .              | 69        |

# Abbildungsverzeichnis

|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.1. | Ein virtueller Embryo im Bauch einer schwangeren Frau. Diese Abbildung zeigt die Forschung mit Augmented Reality im Bereich der Medizin im Jahre 1997.[Azu97]   | 9  |
| 2.1. | Eine vereinfachte Version des Reality-Virtuality Kontinuums.[SH16]  | 11 |
| 2.2. | Elektroden werden periorbital angebracht. [Tri12]   | 14 |
| 3.1. | Ein Augmented Reality Gerät mit einem HMD und einer Szenenkamera auf der rechten Seite und einem Eyetracker auf der linken Seite. [LJC11]   | 18 |
| 3.2. | Transformationstool in Virtual Reality, welches die Manipulationen: Skalierung, Rotation und Translation unterstützt.[GBR+19]   | 18 |
| 4.1. | Handgesten zur Interaktion mit der HoloLens.  | 21 |
| 4.2. | Die Microsoft HoloLens mit integrierten Eyetrackern in Abbildung 4.2a und der dazugehörige Klicker in Abbildung 4.2b. Unten in Abbildung 4.2c ist die interne Sicht der HoloLens abgebildet.  | 23 |
| 4.3. | Die grafische Benutzeroberfläche der Unity Anwendung ist zu sehen. Der blau markierte Bereich ist das <i>Hierarchy</i> Fenster. Der braun markierte Bereich weist auf die Buttons hin, die zur Manipulation eines Objektes verwendet werden können. Im Lila markierten Bereich ist der <i>Inspector</i> zu sehen. Das <i>Project</i> Fenster ist grün markiert. | 24 |
| 4.4. | a) zeigt das <i>World Window</i> der Pupil Capture Anwendung. Über den blau umrandeten Button kann der Plugin Manager geöffnet werden. Der rot markierte Kreis weist auf das HoloLens Relay Plugin hin. In b) ist der Videostream des linken Auges und in c) ist der Videostream des rechten Auges zu erkennen, der von den Augenkameras zurückgegeben wird.    | 26 |
| 4.5. | a) zeigt die UVC Source Einstellungen von dem linken Auge und b) zeigt die UVC Source Einstellungen von dem rechten Auge.   | 27 |
| 4.6. | a) zeigt die vom Pupil Manager bereitgestellte GUI zum Verbindungsaufbau mit dem Eyetracker und zum Starten der Kalibrierung. b) zeigt das Kalibrierungsfenster, welches von der Calibration Szene des pupil_plugins bereitgestellt wurde.  | 28 |
| 5.1. | Der Entwurf des Transformationstools in Abbildung 5.1a, angelehnt an das Design der Boundingbox aus Abbildung 5.1b im Holotoolkit.  | 30 |
| 5.2. | Hier sind die einzelnen Zustände des Transformationstools zu sehen. Das Tool befindet sich im Zustand a), wenn die Skalierung aktiviert wird. In b),c) und d) werden die verschiedenen Rotationsringe gezeigt. c) zeigt das Tool im Translationszustand.  | 31 |
| 5.3. | Hier ist das entworfene Menüfenster zu sehen. Abbildung 5.3a zeigt die Normalansicht des Menüfensters. In Abbildung 5.3b ist das Menüfenster um das Objektfenster erweitert. Die Ansicht des Menüs kann minimiert werden, wie in Abbildung 5.3c zu sehen.   | 32 |

|      |   |    |
|------|---|----|
| 5.4. | Übersicht über die gesamte Architektur, die genutzt wurde, um den Prototyp zu entwickeln. Die grünen Kästchen weisen auf die Komponenten innerhalb des Rechners hin. . . . .  | 33 |
| 5.5. | a) zeigt den Zustand des Objekts während dem anvisieren und b) zeigt den Zustand des Objekts nachdem aktivieren. . . . .  | 35 |
| 5.6. | Die Abbildung veranschaulicht die Berechnung zur Erkennung des Blickrichtungswechsels, während der Ausführung der Rotation mit dem Transformationstool. . .   | 36 |
| 5.7. | Berechnung des Abstands zwischen den zwei Geraden für die Freie Translation. g1 ist die erste Gerade die durch die Kamera Position und den Eye-Gaze Koordinaten verläuft. g2 ist die zweite Gerade, die auf der x-Achse des Objektkoordinatensystems liegt. . . . . | 38 |
| 5.8. | a) zeigt die freie Rotation und b) zeigt die freie Translation. . . . .   | 39 |
| 7.1. | In a) ist die User Experience bei der Verwendung des Prototyps mit unterschiedlichen Interaktionsmethoden zu erkennen. b) zeigt die Bewertung der einzelnen Funktionen für jede Interaktionsmethode. . . . .  | 46 |
| 7.2. | In a) ist die Bewertung der einzelnen Interaktionsmethoden zu erkennen. b) zeigt die Bewertung der einzelnen Funktionen des Prototyps. . . . .  | 49 |
| 7.3. | a) zeigt auf welche Selektionsmethode von den Probanden bevorzugt wurde. In b) ist zu erkennen, welche Anvisierungstechnik favorisiert wurde. . . . .   | 50 |
| 7.4. | Hier ist die Auswertung des Raw NASA TLX zu sehen. . . . .  | 50 |
| A.1. | Die User Experience der Probanden gemessen an der Likert Skala ohne die Betrachtung der Daten von zwei Probanden. . . . .   | 65 |
| A.2. | Bewertung der einzelnen Funktionen des Prototyps mit den verschiedenen Interaktionsmethoden anhand der Likert Skala. Die Daten von zwei Probanden wurden in der Auswertung nicht betrachtet. . . . .  | 66 |
| A.3. | Der erste Teil der Einverständniserklärung. . . . .   | 67 |
| A.4. | Teil 2 der Einverständniserklärung. . . . .   | 68 |
| A.5. | Fragen bezüglich der Person. . . . .  | 69 |
| A.6. | Fragen zu den einzelnen Funktionen des Prototypen. Dieser Fragebogen wurde für jede der einzelnen Interaktionsmethoden erneut ausgefüllt. . . . .   | 70 |
| A.7. | Allgemeiner Fragebogen zu der Bedienung des Prototypen. Bewertung der einzelnen Interaktionsmethoden. . . . .   | 71 |
| A.8. | Teil 2 des allgemeinen Fragebogens. . . . .   | 72 |
| A.9. | Der verwendete NASA TLX Fragebogen. . . . .   | 73 |



# 1. Einleitung



**Abbildung 1.1.:** Ein virtueller Embryo im Bauch einer schwangeren Frau. Diese Abbildung zeigt die Forschung mit Augmented Reality im Bereich der Medizin im Jahre 1997.[Azu97]

Die Technologien im Bereich der *Augmented Reality*(AR) ziehen immer mehr Aufmerksamkeit auf sich. Augmented Reality kann nicht nur im Unterhaltungssektor, sondern auch in der Medizin, Fertigung, Visualisierung, Wegplanung und im Militärbereich von großem Nutzen sein[Azu97]. Ein Augmented Reality System ergänzt die reale Welt mit virtuellen Objekten, die im gleichen Raum wie die reale Welt zu koexistieren scheinen[ABB+01]. So ist in Abbildung 1.1 ein virtuellen Embryo im Bauch einer schwangeren Frau zu sehen. Diese Art von Augmented Reality Anwendung wurde bereits im Jahre 1997 erforscht. Die Technologien haben sich seither soweit revolutioniert, dass nun selbst einfache Smartphones Augmented Reality Anwendungen unterstützen können[But11].

Neben Smartphones wurden auch Head Mounted Displays (HMD) entwickelt, welche Augmented Reality unterstützen. Die Microsoft HoloLens, die im Rahmen dieser Arbeit genutzt wird, gehört zu einer dieser HMDs. AR ermöglicht nicht nur die Visualisierung von virtuellen Objekten in die reale Welt, sie unterstützt auch die Interaktion mit diesen Objekten[ZDB08]. Die Interaktion gestaltet sich bei der Microsoft HoloLens genauso, wie sie von Virtual Reality HMDs bekannt ist. Im Zentrum des Displays befindet sich ein Cursor der mit Kopfbewegungen gesteuert werden kann. Die Verwendung von Handgesten oder eines externen Klickers ermöglicht die Selektion von verschiedenen Objekten.

Es stellt sich die Frage, wie nutzerfreundlich diese Art von Interaktionsmethode ist. Einfache Kopfbewegungen sind zwar in der Regel nicht sehr anstrengend, jedoch kann die dauerhafte Anwendung von Kopfbewegungen zur Ermüdung führen. Dasselbe gilt für die Nutzung von Handgesten. Auf die Dauer ermüden die Arme, sodass die Nutzung von Handgesten zu Anstrengungen für den Nutzer führen. Eine gute Alternative hierfür wäre die Nutzung von Eyetracker. Die Gestaltung der Interaktion zwischen Mensch und Computer durch die Erkennung der Augenbewegungen, stellt eine komfortable und natürliche Alternative dar[SJ00]. Da die Augen während der Interaktion mit

einem Rechner ohnehin bewegt werden, stellt die Interaktion mithilfe des Blickes keine großen Herausforderungen für den Nutzer dar[Dre10]. Selbst die Microsoft HoloLens 2, die schon bald auf den Markt kommen wird, unterstützt die Interaktion mit Eyetracking[Cor19].

Im Bereich der Mensch-Computer-Interaktion wird das Eyetracking hauptsächlich genutzt, um das Blickverhalten eines Menschen zu untersuchen oder um die Interaktion mit Benutzerschnittstellen durch den Blick zu kontrollieren[PB06]. Mithilfe der Eyetracker kann die Kopfbewegung durch den Blick ersetzt werden. Somit kann die Blickrichtung genutzt werden, um die Objekte anzuvisieren, die der Nutzer betrachtet. In dieser Arbeit wird der Klicker der HoloLens genutzt. Der Klicker muss im Gegensatz zur Handgeste nicht in einer bestimmten Position gehalten werden und verhindert somit die entstehende Ermüdung im Armbereich.

## Gliederung

Die Arbeit ist in folgender Weise gegliedert:

**Kapitel 2- Grundlagen:** In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit grundlegenden inhaltlich relevanten Themenbereiche abgedeckt.

**Kapitel 3- Verwandte Arbeiten:** Dieses Kapitel stellt verschiedene Arbeiten vor die mit der Zielsetzung in dieser Arbeit verwandt sind. Hierbei wird zunächst auf Arbeiten eingegangen, die sich mit blick basierter Interaktion in 2D beschäftigen haben. Anschließend wird auf die Arbeiten eingegangen, die sich mit der Blick basierten Interaktion im 3D Raum beschäftigen.

**Kapitel 4- Verwendete Hard- und Software:** Dieses Kapitel stellt die verwendeten Hardware und Software Komponenten vor, die für die Entwicklung des Prototyps genutzt wurden.

**Kapitel 5- Design und Implementierung:** Hier wird auf die Implementierung des Prototyps eingegangen. Zudem wird auch der Entwurf des Manipulationstools vorgestellt, das für diese Arbeit erstellt wurde.

**Kapitel 6- Benutzerstudie:** Dieses Kapitel stellt das Studiendesign, sowie die verschiedenen Bewertungsmethoden, die für die Auswertung der Studie genutzt wurden vor. Zudem wird der Ablauf der Studie beschrieben.

**Kapitel 7- Evaluation:** In diesem Kapitel werden die einzelnen Ergebnisse der Auswertungen in Form von verschiedenen Diagrammen vorgestellt und anschließend diskutiert.

**Kapitel 8- Zusammenfassung und Ausblick:** Das letzte Kapitel gibt eine kurze Zusammenfassung der Ergebnisse dieser Arbeit und es wird ein Ausblick gegeben, der Verbesserungen sowie Erweiterungen in diesem Themenbereich vorschlägt.

## 2. Grundlagen

Die Arbeit strebt die Entwicklung eines Prototyps in Augmented Reality an. Daher werden im folgenden Abschnitt die Begriffe bezüglich AR, VR und Mixed Reality kurz definiert.

### 2.1. Mixed Reality, Virtual Reality und Augmented Reality

Milgram und Kishino [MK94] stellen das Konzept des *Virtuality Kontinuums* vor. Wie in Abbildung 2.1 zu sehen ist, stellt das eine Ende des Kontinuums die reale Umgebung und das andere Ende des Kontinuums die virtuelle Umgebung dar. Alle Umgebungsarten, die zwischen diesen beiden Extrema liegen, werden als Mixed Reality (MR) Umgebungen definiert. Die reale Umgebung besteht einzig und allein aus realen Objekten. Diese Umgebung kann sowohl direkt als auch indirekt betrachtet werden. Bei einer indirekten Betrachtung wird zum Beispiel eine Videoaufnahme der echten Welt betrachtet. Bei der direkten Betrachtung wird die reale Szene mit bloßem Auge betrachtet. [MK94]

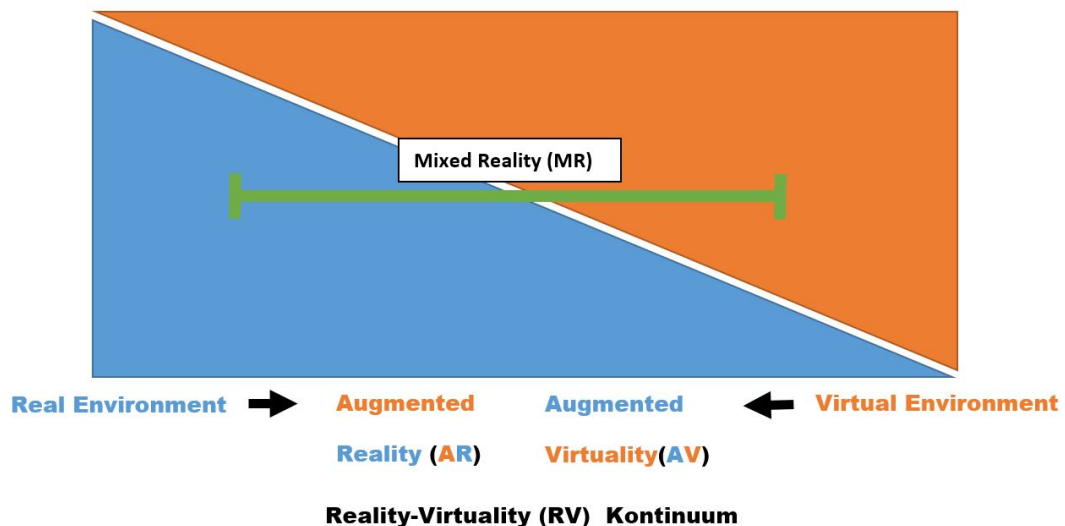


Abbildung 2.1.: Eine vereinfachte Version des Reality-Virtuality Kontinuums.[SH16]

## 2. Grundlagen

---

Sobald wir eine reale Umgebung mit virtuellen Objekten ergänzen, bewegen wir uns im Virtuality Kontinuum ein Stück nach rechts in Richtung der virtuellen Umgebungen. Das Ergänzen der realen Umgebung mit virtuellen Objekten ist auch bekannt als Augmented Reality oder erweiterte Realität. Azuma et al. [ABB+01] beschreiben, was für Eigenschaften ein AR-System haben sollte. Demnach sollen AR-Systeme die Eigenschaft haben reale und virtuelle Objekte in einer realen Umgebung zu kombinieren. Des Weiteren sollen AR-Systeme interaktiv gestaltet sein und in Echtzeit laufen können. Auch sollten reale und virtuelle Objekte in Beziehung zueinander gebracht werden können. Azuma weist in dieser Arbeit ausdrücklich darauf hin, dass diese Definition von AR-Systemen nicht auf spezielle Geräte oder Sinne eingeschränkt wird, sondern für jede Art von AR-System gelten sollte.

Hauptsächlich werden AR-Systeme durch den visuellen Sinn wahrgenommen, jedoch besteht auch die Möglichkeit Augmented Reality über den Hörsinn, Tastsinn und den Geruchssinn aufzunehmen [ABB+01]. Verschiedene Arten von Displays ermöglichen die Unterstützung von Augmented Reality. Es können sowohl Video see-through Anzeigetechnologien als auch Optical see-through Technologien verwendet werden, um eine Augmented Reality Umgebung zu erschaffen. Video see-through Displays basieren darauf, die reale Welt aufzunehmen und virtuelle Objekte in Echtzeit mit in die Aufnahme einzublenden. Das Optical see-through Display verwendet keine Kamera, hier wird die reale Umgebung durch ein transparentes Display gesehen. Die virtuellen Objekte werden hier mittels transparenter Spiegel und Linsen dargestellt. [Van07] Die Hauptarten von Displays sind Head-Mounted Displays (HMD), Handheld-Displays und räumliche Displays [CFA+11].

Die nächste Stufe auf dem Virtuality Kontinuum ist die Augmented Virtuality (AV) Umgebung. Die Erweiterung der virtuellen Welt durch reale Objekte. In dieser Art von Umgebung wird der Nutzer zwar von einer vollkommen synthetischen Welt umschlossen, dennoch wird diese Welt durch reale Bilddaten erweitert. Ein Beispiel ist das Anzeigen der Hände eines Nutzers in einer virtuellen Welt. Eine virtuelle Umgebung hingegen besteht einzig und allein aus virtuellen Objekten. Diese Welt kann die Grenzen der physischen Welt überschreiten, sodass selbst die physikalischen Gesetze nicht mehr existieren. [MK94]

Hauptsächlich wird Virtual Reality mit HMDs genutzt. Neben den HMDs gibt es aber auch die Cave Automatic Virtual Environment (CAVE), welche eine immersive Umgebung bietet. Die CAVE ist ein spezieller Raum, der wie ein Würfel aufgebaut ist. Auf den Wänden, Boden und Decke werden 3D Bilder projiziert, so dass der Nutzer in diese Umgebung eingetaucht wird. [CSD93] Um eine stereoskopische Sicht zu erhalten, tragen die Nutzer innerhalb der CAVE eine Brille. Mit dieser Brille werden auch die Kopfbewegungen des Nutzers erfasst, um die Position und Orientierung des Nutzers zu erkennen. Für die Interaktion innerhalb der CAVE wird ein drei dimensionaler Controller verwendet. Um den Nutzern ein akustisches Signal zu senden, sind auch Lautsprecher innerhalb oder außerhalb der CAVE an verschiedenen Positionen angebracht. [Muh15]

Die Technologien im Bereich des Mixed Reality streben eine immersive Darstellung an. Infolge dessen wird der Themenbereich Immersive Analytics in kurzen Worten erläutert.

## 2.2. Immersive Analytics

Heutzutage steht uns eine große Menge an komplexer Daten zur Verfügung, die es uns erschweren, die uns zugrundeliegenden Daten zu verstehen und zu analysieren [DMI+18]. Massive und komplexe Datensätze helfen uns nicht weiter, wenn wir nicht in der Lage sind, irgendeine Art von Muster in diesen Daten zuerkennen. Die visuelle Darstellung dieser Datensätze hilft uns dabei, diese Daten intuitiver zu gestalten. [DDD+14] Der Forschungsschwerpunkt von Immersive Analytics besteht darin, das Datenverständnis sowie den Umgang mit diesen Daten, so einfach wie möglich zu gestalten.

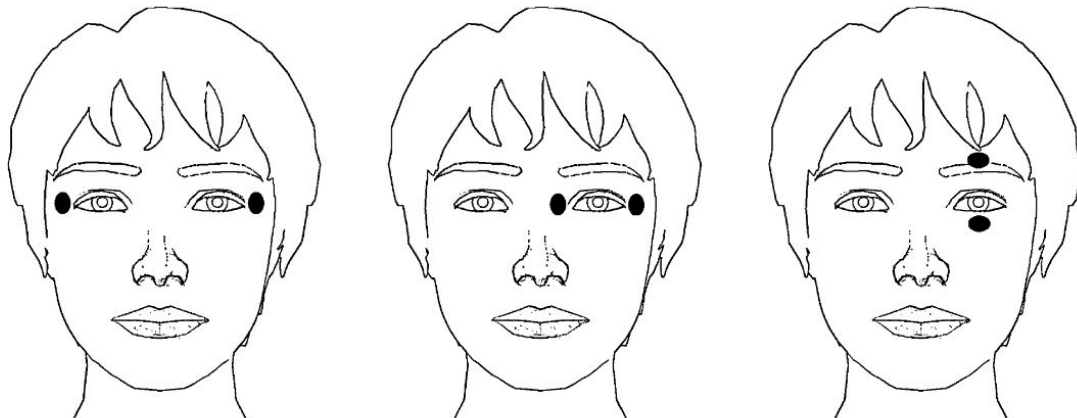
Der Begriff Immersion kann in mentale Immersion und physikalische Immersion eingeteilt werden. In einer mentalen Immersion wird der Benutzer geistig in eine Interaktion mit einbezogen, dass er die reale Welt um ihn herum vergisst. [Muh15] Die physikalische Immersion besteht darin, den Nutzer in eine synthetische Umgebung einzubeziehen, sodass er den Unterschied zwischen der realen Umgebung und der künstlichen Umgebung nicht merkt [Wil96]. Das Ziel von Immersive Analytics ist es, herauszufinden welche Arten von Technologien es ermöglichen, eine immersive Datenanalyse zu kreieren. Zu den Technologien, die Immersive Analytics unterstützen, gehören AR-Geräte, VR-Geräte, große Displays mit hoher Auflösung aber auch haptische und akustische Feedbacks sowie Gesten- und Berührungsgesteuerte Interaktionen. [BBa+16] Kollaborationen sind ein wichtiger Bestandteil, um große und komplexe Daten einfacher und schneller zu verstehen, da oft Experten aus verschiedenen Bereichen gefragt sind [FNT+13]. Daher beschäftigt sich Immersive Analytics nicht nur damit, Daten immersiv darzustellen, sondern auch diese Daten so darzustellen, dass eine kollaborative Arbeit ermöglicht wird [CCC+15].

Die Interaktion des entwickelten Prototyps unterstützt Eyetracking. Daher werden verschiedene Eyetracking Methoden kurz erläutert. Zudem wird auf das Midas Touch Problem eingegangen, welches bei der Gestaltung der Interaktion mit Eyetracking als Eingabe beachtet werden muss.

## 2.3. Eyetracking

In der Mensch-Computer Interaktion kann das Eyetracking für zwei verschiedene Anwendungsfälle genutzt werden. Zum einen wird das Eyetracking genutzt, um das Blickverhalten des Nutzers zu analysieren. So kann zum Beispiel das Blickverhalten und die Informationsverarbeitung des Nutzers auf einer bestimmten Benutzeroberfläche analysiert werden und es können somit Aussagen über die Nutzerfreundlichkeit dieser Benutzeroberfläche getroffen werden [EW07]. Ein weiteres Anwendungsgebiet von Eyetracking besteht darin, die Eyetracker als Eingabegerät für die Mensch-Computer-Interaktion zu nutzen. Mithilfe von Eyetracking ist es möglich, eine Interaktion aufzubauen, die keinen physischen Kontakt mit dem Computer erfordert [SA13]. Verschiedene Methoden wurden entwickelt, um die Bewegungen der Augen zu messen.

Zu einer der bekanntesten Methoden gehört die Elektrookulografie. In dieser Methode werden Elektroden, wie in Abbildung 2.2 zu sehen periorbital angebracht. Die Elektroden messen bei der Bewegung der Augen, eine Veränderung im Potential des elektrischen Feldes. Diese Veränderung kann genutzt werden, um die Bewegungen der Augen zu verfolgen. [MB14]



**Abbildung 2.2.:** Elektroden werden periorbital angebracht. [Tri12]

Eine weitere Methode zur Messung der Augenbewegungen ist die *Cornea-Reflex-Methode*. Diese Methode gehört zu einer der am meist verbreitetsten Techniken, die genutzt wird, um den Blickpunkt des Nutzers zu messen. Im Gegensatz zur Elektrookulografie ist diese Technik nicht invasiv [PB06]. Dieses Verfahren benötigt für die Messung der Augenbewegung hauptsächlich eine Infrarotkamera und eine Bildverarbeitungssoftware. Diese Methode nutzt eine Infrarot LED, die in der Infrarotkamera eingebettet ist, um das Auge zu beleuchten. [PB06] Je nachdem, ob das Licht auf der Achse oder außerhalb der Achse des Auges gerichtet ist, kann es entweder zu einem *bright-pupil*-Effekt oder zu einem *dark-pupil* Bild führen.

Um ein *bright-pupil*-Effekt zu erzielen, muss das Licht auf der Achse des Auges gerichtet sein. [MB14] Sobald das Licht die Retina durchdringt, wird ein großer Anteil wieder zurückgeworfen, so dass die Pupille hell aufleuchtet. Die Beleuchtung des Auges durch die Infrarot LED führt auch dazu, dass eine Hornhautreflektion erzeugt wird. Diese Reflektion sieht aus wie ein kleines Funkeln auf dem Auge. [PB06] Ungenauigkeiten werden durch die Messung der Relationen zwischen Pupillenzentrum und der Hornhaut Reflektion kompensiert [MB14]. Die Blickrichtung kann durch die Berechnung des Vektors zwischen dem Pupillenzentrum und der Hornhautreflektion und weiteren trigonometrischen Berechnungen herausgefunden werden [PB06].

Es gibt verschiedene Metriken [SD14] in der Eyetracking-Forschung, die genutzt werden, um bestimmte Sachverhalte zu messen. Im Folgenden werden einige dieser Metriken genannt.

**Fixation:** Bei der Fixation wird ein bestimmter Punkt für längere Zeit betrachtet [EW07]. Dies hält in der Regel 100 bis 400ms an [JCH04]. Während der Fixierung einer Position tauchen Mikrosakkaden auf [SCTH67]. Diese Mikrosakkaden sind unwillkürliche Augenbewegungen. Die Größe von diesen Augenbewegungen liegt bei  $1^\circ$  [MMTH09].

**Sakkade:** Sakkaden sind schnelle Bewegungen der Augen, die zwischen den Fixationen auftauchen [SG00]. Diese dauern in der Regel 30ms [JCH04].

**Eye-Gaze:** Der Gaze ist der Punkt in einer Szene, auf welchem der Blick des Nutzers gerichtet ist. Dieser stellt den Vektor zwischen dem Blickpunkt und dem Auge dar. [JCH04]

Bei der Gestaltung der Interaktion mit Eyetracking müssen einige Herausforderungen in Betracht gezogen werden. Zu einer der bekanntesten Probleme bei der Nutzung des Eyetracking als Eingabe gehört das *Midas Touch* Problem. Es beschreibt das Problem, dass unabhängig davon, wo der Nutzer hinschaut, unbeabsichtigt ein neuer Befehl aktiviert wird [JK03]. Dieses Problem weist darauf hin, Interaktionsmethoden mit Eyetracking so zu gestalten, dass es möglich ist, die Eingabe der Augen nur dann als Eingabe auszuwerten, wenn der Nutzer dies auch beabsichtigt. Ansonsten soll es dem Nutzer ermöglicht werden, seine Umgebung ohne die Tätigung einer Eingabe zu betrachten. [Jac90]

## 2.4. Benutzerinteraktion

Es existieren verschiedene Arten von Interaktionstechniken, die die Mensch-Computer Interaktion vereinfachen. Auf traditionellen Benutzeroberflächen werden die Interaktionstypen Selektion [Roz13], Texteingabe [MS02], Scrollen [MH04] und Feedback [YT09] am häufigsten verwendet.

### 2.4.1. Selektion

Die Selektion wird oft genutzt, um bestimmte Elemente auf der Benutzeroberfläche auszuwählen. Traditionelle Benutzeroberflächen benutzen die Maus als Eingabegerät, um auf bestimmte Objekte zu zeigen und anschließend nach Bedarf diese auszuwählen [Roz13]. Bei Touchoberflachen wird anstelle der Maus ein Finger genutzt, um bestimmte Objekte auf der Benutzeroberfläche zu selektieren [YT09]. Diese beiden Selektionsmethoden basieren auf direkter Eingabe.

Die Selektion kann aber auch durch indirekte Eingaben ausgeführt werden. Der Gebrauch von einem Eyetracker als Eingabegerät hilft dabei, die Objekte aus einer gewissen Entfernung mithilfe des Eye-Gazes auszuwählen [SA13]. Es existieren verschiedene Ansätze, um die Elemente auf der Benutzeroberfläche mit dem Eye-Gaze zu selektieren. Alexander de Luca et al. [DWD07] präsentieren drei verschiedene Techniken. Zu diesen gehört die *dwell-time* Methode, die *Look and Shoot* Methode, sowie die *Gaze Gestures* Methode. Die *dwell time* Methode basiert darauf ein fixiertes Objekt zu selektieren, wenn der Nutzer das Objekt länger als einen festgelegten Schwellwert anschaut [WM87]. Die *Look and Shoot* Methode basiert auf die Interaktionsmethode, die auch für das Konzept dieser Arbeit genutzt wurde. Der Nutzer selektiert ein Objekt mit seinem Blick und klickt auf eine Taste, um die Selektion auszulösen. Bei der *Gaze Gestures* Methode handelt es sich darum, ein Muster mithilfe der Augenbewegungen auszuführen [DS07]. Bei einer erfolgreichen Ausführung des Musters wird die Selektion ausgelöst.

Bei der Nutzung von HMDs wird der Headgaze für die Anvisierung von verschiedenen virtuellen Objekten genutzt [BRP18]. Der Headgaze ist ein Cursor, der sich im Zentrum des Displays befindet. Handgesten oder externe Controller ermöglichen die Selektion des anvisierten Objektes. Blattgerste et al. [BRP18] untersuchen den Ersatz des Headgazes durch den Eye-Gaze. Diese Art von Selektion ist auch Gegenstand dieser Arbeit.

### 2.4.2. Texteingabe

Ein weiterer wichtiger Interaktionstyp ist die Texteingabe. Die am häufigsten verwendete Hardware hierbei ist die Tastatur [MS02]. Während bei üblichen PCs die Tastatur als externes Hardwaregerät angebracht ist, kann auf Touchoberflächen die Tastatur innerhalb des Bildschirms erscheinen. Wird ein Textfeld auf der Benutzeroberfläche ausgewählt, erscheint die Tastatur auf dem Bildschirm [FLW12]. Auf demselben Prinzip baut auch die Texteingabe bei HMDs auf [YGY+17]. Yu et al. [YGY+17] stellen verschiedene Selektionsmethoden vor, um die Buchstaben auf der virtuellen Tastatur auszuwählen.

### 2.4.3. Textscrollen

Das Scrollen von Fenstern wird oft genutzt, um bei einer begrenzten Display Ansicht die verschiedenen Informationen einzusehen. Dies wird vor allem in traditionellen graphischen Benutzeroberflächen verwendet, da große Mengen von Daten nicht innerhalb eines Fensters angezeigt werden können. [MH04] Die Anzeige von Fenstern kann auch in 3D Umgebungen unterstützt werden [FMHS93]. Daher kann das Scrollen von Fenstern auch eine mögliche Interaktion in 3D Umgebungen sein.

### 2.4.4. Feedback

Eines der wichtigsten Elemente bei der Interaktion mit einem Computer ist die Rückmeldung die der Nutzer von der Nutzerschnittstelle erhält. Das Feedback dient dazu, dem Nutzer bei der Selektion eines Elementes mit einer visuellen Rückmeldung zu unterstützen. Diese Art von Rückmeldung bestätigt eine erfolgreiche oder gescheiterte Interaktion. Feedback kann nicht nur visuell, sondern auch auditiv oder taktil an den Nutzer zurückgegeben werden. [SS98]. Eine Möglichkeit für visuelles Feedback besteht darin, Objekte mit denen der Nutzer interagiert hervorzuheben. Die Anzeige des Cursor auf dem Bildschirm als auch die Veränderung des Cursors, wenn er auf ein bestimmtes Element auf der Benutzeroberfläche zeigt, gehört auch zu einem visuellen Feedback [CB05]. In dieser Arbeit wird ausschließlich das visuelle Feedback verwendet, um die Interaktion mit dem Prototyp zu erleichtern.



## 3. Verwandte Arbeiten

### 3.1. Augenbasierte Interaktion mit 2D Displays

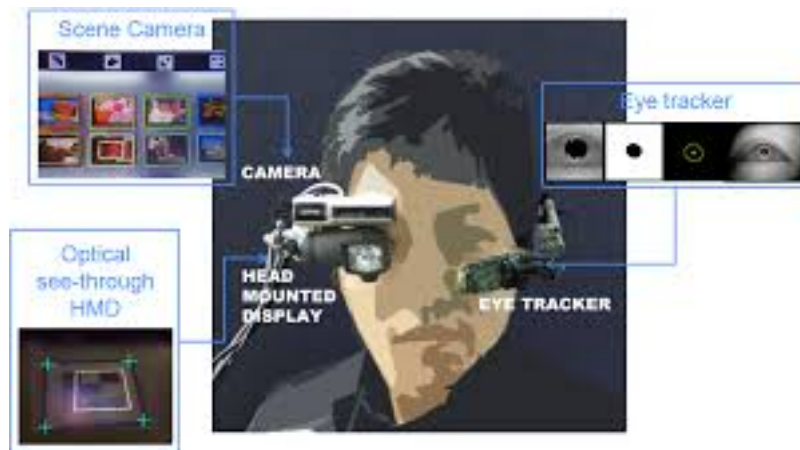
Eye-Gaze basierte Interaktionsmethoden sind in der Mensch Computer Interaktion schon ein längerer Forschungsgegenstand. Pfeuffer et al. untersuchen die Interaktion von Eye-Gaze mit Touch [PACG14]. Hierbei wurde der Eye-Gaze für die Selektion und der Touch für die Manipulation angewandt. Der Nutzer kann mithilfe seines Blickes verschiedene Ziele anvisieren, die dann durch eine Touch-Eingabe auf dem Display manipuliert werden können. Es spielt hierbei keine Rolle, wo der Nutzer die Touch-Eingabe auf der Oberfläche des Displays ausführt.

Vidal et al. [VPBG13] stellen eine neuartige Eyetracking Methode vor. Es basiert darauf, die Bewegungsbahn der Augen auf die Bewegungsbahn der Objekte abzustimmen. Mit dieser Methode soll das Objekt von Interesse erkannt werden. Die Annahme hier ist, dass die Augen das Objekt von Interesse verfolgen. Hierbei haben verschiedene Objekte auf dem Display verschiedene Bewegungsbahnen. Die Methode vergleicht die Trajektorie der Objekte im Sichtfeld mit der Trajektorie der Augen. Wenn die beiden Bewegungsbahnen übereinstimmen, wird das Objekt, dessen Bewegungsbahn mit der Bewegungsbahn des Auges übereinstimmt, als das vom Nutzer betrachtete Objekt erkannt.

*Gaze Gesture* ist eine Interaktionstechnik, die nicht auf Fixierungen und Verweilzeiten basiert. In dieser Technik werden die Augenbewegungen analysiert, insbesondere die Blickgesten. Heiko Drewes und Albrecht Schmidt [DS07] haben diese Technik innerhalb einer Nutzerstudie untersucht. Die Studie hat ergeben, dass die Ausführung von komplexen Blickgesten keine Herausforderungen für den Nutzer darstellen. Zudem konnte mithilfe der Studie festgestellt werden, welche Blickgesten während der Interaktion unbeabsichtigt auftauchen.

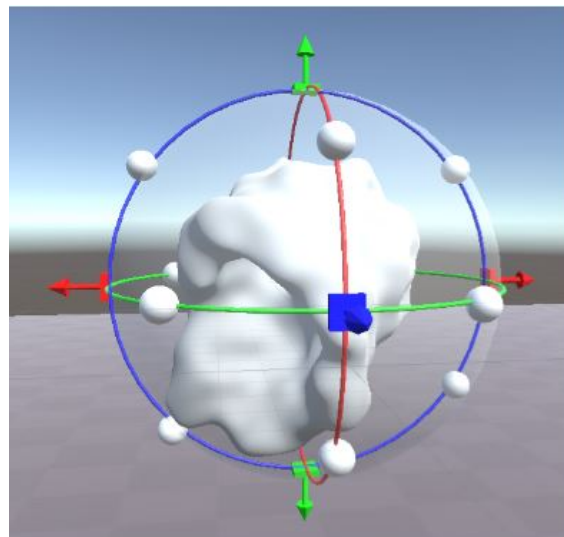
### 3.2. Augenbasierte Interaktion in 3D

Lee et al. [LPL+11] stellen eine Methode zur Interaktion in AR mit Eyetracking vor. Hierbei wurde, wie in Abbildung 3.1 zu sehen eine monokulare optische see-through HMD genutzt, mit einer Szenenkamera und einem Eyetracker. Für die Interaktion wird sowohl der Blick als auch das halbe Blinzeln des Benutzers verwendet. Mit dieser Interaktion soll es ermöglicht werden mit dem Augmented Reality System zu interagieren ohne die Hände zu nutzen. Mit der Augenbewegung ist es möglich die Ziele anzuvisieren. Wird ein Element längere Zeit betrachtet, beginnt das System die Verweilzeit zu zählen. Wenn diese Verweilzeit länger ist als ein vordefiniertes Zeitintervall, wird der Cursor auf das betrachtete Element fixiert. Anschließend kann mithilfe eines halben Blinzeln das Objekt ausgewählt werden.



**Abbildung 3.1.:** Ein Augmented Reality Gerät mit einem HMD und einer Szenenkamera auf der rechten Seite und einem Eye Tracker auf der linken Seite. [LJC11]

Groß et al. [GBR+19] untersuchen die Interaktion mit Eyetracking in Virtual Reality. Diese Arbeit verwendet die Fove VR-Brille mit integriertem Eyetracking. Es wurde ein User Interface Design für die Objektmanipulation in VR vorgestellt, welches Eyetracking verwendet. Das Design bietet die Manipulationen Skalierung, Rotation und Translation an. Zudem kann der Blick genutzt werden, um über das Menü zu navigieren. In Abbildung 3.2 ist das Tooldesign, das für diese Arbeit entworfen wurde, zu sehen.



**Abbildung 3.2.:** Transformationstool in Virtual Reality, welches die Manipulationen: Skalierung, Rotation und Translation unterstützt.[GBR+19]

Die Fove wurde auch in der Arbeit von Qian und Teather [QT17] genutzt. Hier wurde innerhalb einer Studie die Selektion mit Headgaze und Eye-Gaze verglichen. In dieser Studie wurden die Ziele in verschiedene Tiefen innerhalb der virtuellen Umgebung platziert. Die Eye-Gaze basierte Selektion wurde mit der Headgaze basierten Selektion verglichen. Zudem wurde eine dritte Kondition

eingeführt, die sowohl die Headgaze basierte als auch die Eye-Gaze basierte Selektion verwendet hat. Entgegen ihren Erwartungen wurde die Eye-Gaze basierte Selektion schlechter bewertet als die Headgaze basierte Selektion. Das Ergebnis der Eye-Gaze basierten Selektion deutete auf eine schlechte Leistung, bezüglich Fehlerrate, Auswahlzeit und Durchsatz, hin. Jedoch wurde auch erwähnt, dass die schlechte Eyetracking Qualität eine mögliche Ursache für dieses Ergebnis darstellt.

Die Arbeit von Blattgerste et al. [BRP18] untersucht auch die Interaktion mit Headgaze und Eye-Gaze, sowohl in Augmented Reality als auch in Virtual Reality. Zu dem werden verschiedene Sichtfeldgrößen betrachtet. Das Ergebnis dieser Studie zeigt, dass die Interaktion mit Eye-Gaze den Headgaze in den Bereichen Geschwindigkeit, Arbeitsbelastung, erforderliche Kopfbewegung und Benutzerpräferenz übertrifft. Außerdem stiegen die Vorteile für die Eye-Gaze basierte Interaktion mit zunehmendem Sichtfeld an. Für diese Studie wurde die HTC Vive genutzt und es wurde ein AR-Display mit konfigurierbaren *Field of View*(FoV)-Größen vor dem Kopf des Benutzers simuliert. Für das Eyetracking wurden die *SMI HTC Vive Integration Scientific Premium* Eyetracker genutzt.

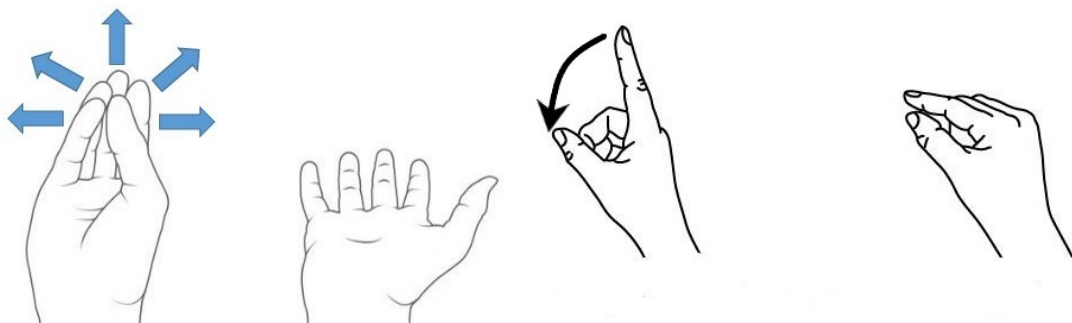


## 4. Verwendete Hard-und Software

Für die Entwicklung des Prototyps wurden verschiedene Hardwaregeräte und Softwareanwendungen genutzt. Im Folgenden werden diese genauer definiert.

### 4.1. Microsoft HoloLens 1st Gen und Binocular Add-on

Die Microsoft HoloLens <sup>1</sup> ist das erste weltweit ungebundene Mixed Reality HMD, welches für Entwickler als Development Kit freigegeben wurde [Ber17]. Sie erfordert keine Anbindung an ein separates Rechenggerät und ist somit ein völlig eigenständiges HMD [EMP+17]. Das stereoskopische HMD besitzt 2 16:9 Light-Engines, die Licht durch die holographischen Linsen projizieren, was zu einer Gesamtauflösung von 2,3 Millionen Lichtpunkten führt. [HAN+18] Die Linsen sind transparent, sodass der Nutzer durch sie hindurchschauen kann. Eine Reihe von feinen unsichtbaren Rillen, die innerhalb der Linsen enthalten sind, ermöglichen es, dass sich virtuelle Objekte an verschiedenen Positionen und Abständen im Raum befinden. [Tay16] Zum Steuern der Anwendungen, die auf der HoloLens laufen, werden hauptsächlich Handgesten oder Sprachbefehle verwendet. Es existieren zwei Arten von Handgesten, mit welchen die HoloLens gesteuert werden kann. Die Bloomgeste, die in Abbildung 4.1a zu sehen ist, wird verwendet, um das Hauptmenü zu öffnen oder zu schließen. Die Airtap Geste in Abbildung 4.1b wird genutzt, um virtuelle Objekte zu selektieren. Zum Setup der HoloLens gehört ein Klicker, der in Abbildung 4.2b zu sehen ist. Dieser kann anstelle der Airtap Geste verwendet werden.



(a) Bloom Geste<sup>2</sup> wird verwendet, um das Hauptmenü zu öffnen oder zu schließen. (b) Airtap Geste<sup>2</sup> wird verwendet, um Objekte zu selektieren.

**Abbildung 4.1.:** Handgesten zur Interaktion mit der HoloLens.

<sup>1</sup><https://docs.microsoft.com/de-de/windows/mixed-reality/hololens-hardware-details> Zuletzt überprüft am 03.09.2019

<sup>2</sup><https://docs.microsoft.com/en-us/dynamics365/mixed-reality/guides/authoring-gestures> Zuletzt überprüft am 08.09.2019

Zur Darstellung von realistischen dreidimensionalen holographischen Bildern in Echtzeit verfügt die Microsoft HoloLens über drei Prozessoren, auf welchen die Verarbeitungsaufgaben verteilt werden. Zu diesen gehören die Zentraleinheit (CPU), die Grafikprozessoreinheit (GPU) und die holographische Verarbeitungseinheit (HPU). [Tay16] Ein weiterer Bestandteil der HoloLens ist die Trägheitsmesseinheit (IMU), welche über einen Beschleunigungssensor, einen Gyroskop und ein Magnetometer beinhaltet [HAN+18]. Diese kann, gemeinsam mit den Headtracking Kameras die Kopfhaltung eines Benutzers aus der Position und Ausrichtung des HoloLens-Systems bestimmen [LDZS18]. Die CPU besteht aus einer Intel Atom x5-Z8100 mit 1.04 GHz. Für die GPU wurde auch ein Prozessor von Intel genutzt. [Tay16] Die HPU wurde speziell von Microsoft hergestellt. [Cora]

Das HMD ist mit fünf Kameras ausgestattet. Wie in Abbildung 4.2c zu sehen, befindet sich eine im Zentrum des Displays und zwei sind jeweils auf der rechten und linken Seite des Displays platziert. Während die Kamera im Zentrum des Displays eine Auflösung von 2.4 megapixel hat und Videos oder Bilder aufnehmen kann, sind die restlichen vier Kameras dafür zuständig, die Kopfbewegungen des Nutzers in Bezug auf die Umgebung zu verfolgen [Tay16]. Mithilfe der integrierten Infrarotkamera, die einen Blickwinkel von  $120^{\circ} \times 120^{\circ}$  hat und des Infrarotlaserprojektors, kann die HoloLens den Abstand zu den jeweiligen Objekten im Raum bestimmen. Dazu werden die Objekte mithilfe des Lasers zuerst gescannt. Die Objekte reflektieren dieses Infrarotlicht zurück zur Infrarotkamera. Hierdurch kann eine Laserreichweite erhalten werden, die den Abstand zu den Objekten erkennt. Zur Erkennung von Sprachbefehlen besitzt die HoloLens außerdem noch ein Mikrofon. [Tay16]

Da die Microsoft HoloLens der ersten Generation keine integrierten Eyetracker besitzt, wurden von Pupil Labs speziell eigene entwickelt. Das HoloLens Binocular Add-on<sup>3</sup> verfügt über 200Hz Augen-Kameras sowie eine Weltkamera und einen USB-C-Anschluss. In dieser Arbeit wurde der Eyetracker für das rechte Auge durch einen Pupil Pro Eyetracker von Pupil Labs ersetzt. In Abbildung 4.2c ist die HoloLens mit den integrierten Binocular Add-on zu sehen. Die Augenkamera des Pupil Pro Eyetrackers hatte im Allgemeinen eine höhere Auflösung als die des Binocular Add-ons. Die maximale Auflösung bei dem Pupil Pro Eyetracker liegt bei  $1920 \times 1080$ , während die maximale Auflösung bei dem Binocular Add-on  $400 \times 400$  beträgt. Hinsichtlich der Framerate war der Eyetracker des Pupil Pro Headsets niedriger. Die Framerate betrug hier maximal 120 Hz.

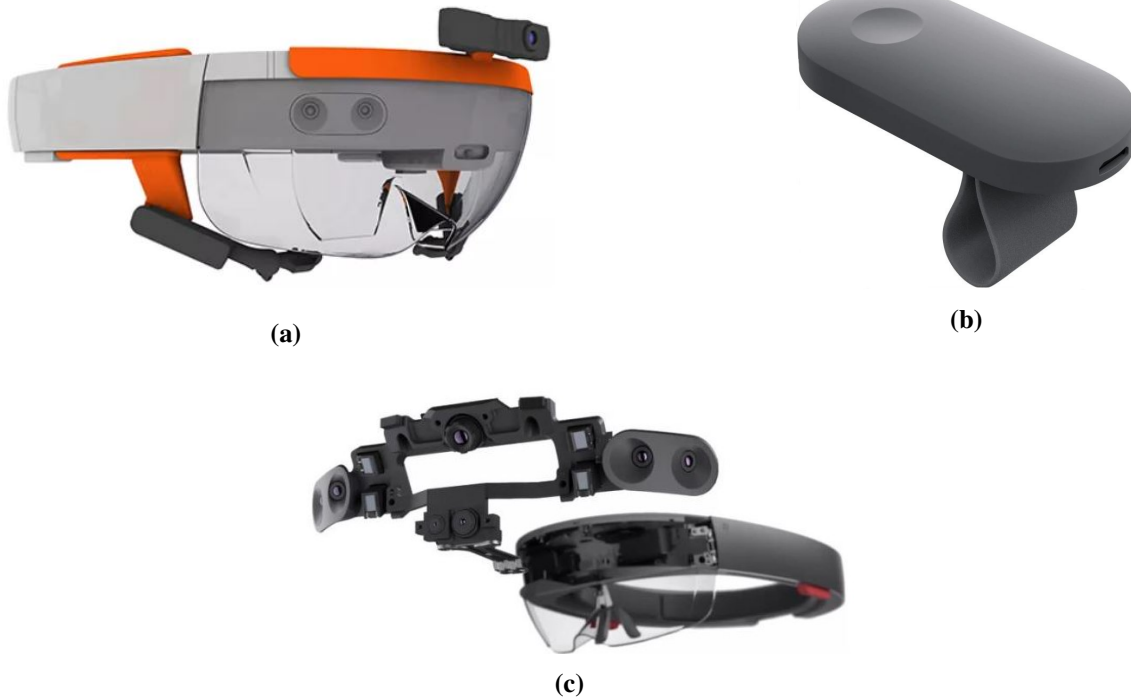
## 4.2. Unity Engine

Unity ist eine Spiele- Engine<sup>4</sup>, die eine Echtzeitplattform anbietet, mit der Spiele entwickelt werden können. Seit der Unity Version 2017.2 wird ein Support für die HoloLens angeboten [Tece]. In Abbildung 4.3 ist die grafische Benutzeroberfläche(GUI) der Unity Anwendung zu sehen. Unity bietet die Möglichkeit, verschiedene Szenen zu bauen. Diese Szenen bestehen aus verschiedenen *Gameobjects*, die innerhalb von Unity erstellt werden können. Ein Gameobject ist die Basisklasse für alle Objekte in der Unityszene [Tecc]. Der blau markierter Bereich in Abbildung 4.3 zeigt das *Hierarchy* Fenster. Hier können verschiedene Szenen eingefügt werden, die im *Scene*-Fenster

---

<sup>3</sup><https://pupil-labs.com/products/vr-ar/> Zuletzt überprüft am 03.09.2019

<sup>4</sup><https://unity.com/de> Zuletzt überprüft am 03.09.2019



**Abbildung 4.2.:** Die Microsoft HoloLens mit integrierten Eyetrackern<sup>5</sup> in Abbildung 4.2a und der dazugehörige Klicker<sup>6</sup> in Abbildung 4.2b. Unten in Abbildung 4.2c ist die interne Sicht der HoloLens abgebildet<sup>1</sup>.

angezeigt und bearbeitet werden können. Das *Scene*-Fenster befindet sich im Zentrum der GUI. Innerhalb der Szenen befinden sich die erstellten Gameobjects der Szene, diese können auch im Hierarchy-Fenster betrachtet werden.

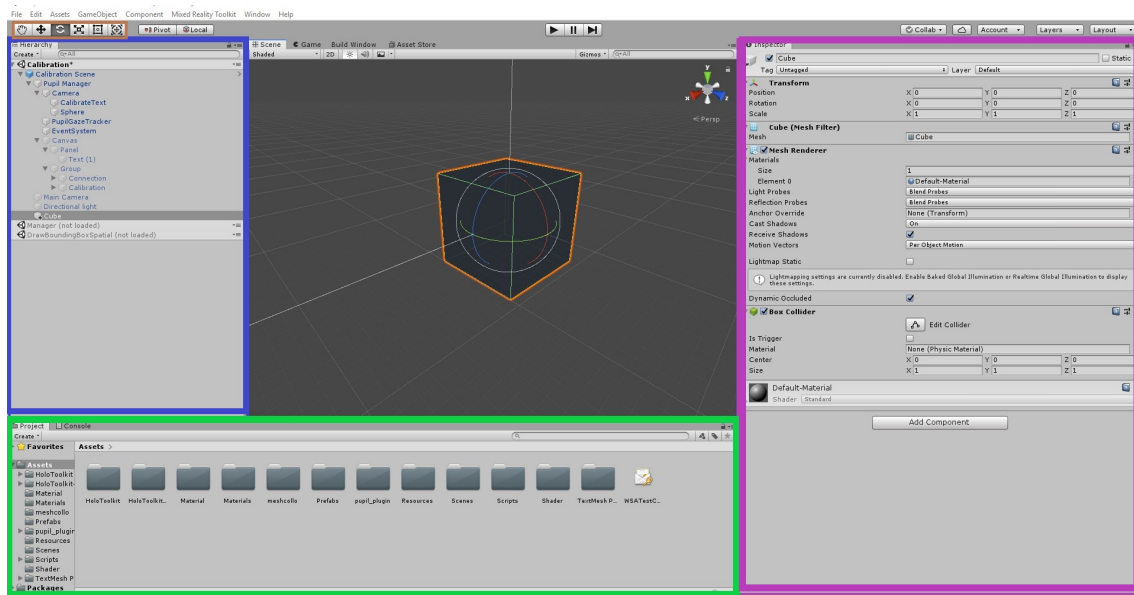
Unity bietet zudem an, *Prefabs* in eine Szene zu importieren. Prefabs sind vordefinierte Gameobjects, die in Unity erstellt wurden. Die Einstellungen, die an einem Prefab vorgenommen wurden, werden bei dem Import in eine Szene beibehalten. Um ein Gameobject als Prefab zu speichern, muss es in den Assets Ordner reingeladen werden. [Tec19a] So können verschiedene Gameobjects in mehreren Szenen wiederverwendet werden. Der Assets Ordner wird von Unity bei der Erstellung eines Projektes im Projekt Ordner angelegt. Hier können alle Materialien erstellt und abgelegt werden, die innerhalb der Unityszene gebraucht werden. Zu diesen gehören zum Beispiel die Skripte, die importierten Pakete, die Texturen der erstellten Objekte und weiteres. Der grün markierte Bereich in Abbildung 4.3 zeigt das *Project*-Fenster, welches den Assets Ordner beinhaltet.

Die einzelnen Gameobjects können verschiedene Komponenten enthalten. Die häufig gebrauchten Komponenten sind der *Meshrenderer* und der *Collider*. Der Meshrenderer kann genutzt werden, um einen Mesh visuell darzustellen. Objekte, die eine Collider Komponente besitzen, können durch die *Physics.Raycast()*-Methode auf einen Schnitt mit einem Strahl überprüft werden. Diese Methode

<sup>5</sup><https://docs.pupil-labs.com/#pupil-hardware> Zuletzt überprüft am 04.09.2019

<sup>6</sup><https://www.microsoft.com/de-de/p/microsoft-hololens-commercial-suite/944xgcf64z5b?activetab=pivot%3aoverviewtab> Zuletzt überprüft am 04.09.2019

## 4. Verwendete Hard-und Software



**Abbildung 4.3.:** Die grafische Benutzeroberfläche der Unity Anwendung ist zu sehen. Der blau markierte Bereich ist das *Hierarchy* Fenster. Der braun markierte Bereich weist auf die Buttons hin, die zur Manipulation eines Objektes verwendet werden können. Im Lila markierten Bereich ist der *Inspector* zu sehen. Das *Project* Fenster ist grün markiert.

wird von der Unity Engine angeboten und schickt von einer gegebenen Ursprungsposition und einer gegebenen Richtung einen Strahl in die Szene. Für die Entwicklung mit der HoloLens werden das *Holotoolkit*<sup>7</sup> und die *Holotoolkit-Examples*<sup>7</sup> Pakete angeboten, die in Unity importiert werden können. Das Holotoolkit bietet den Inputmanager und die HoloLensCamera als Prefabs an, welche in die Szene integriert und mit welchen verschiedene Funktionen implementiert werden können.

Der Inputmanager verwaltet die Eingaben, die von der HoloLens unterstützt werden. Zu diesen gehört der Headgaze, die Handgesten sowie die Eingaben durch den Klicker. Die HoloLensCamera wird dazu verwendet, die Unityszene auf dem Display der HoloLens sehen zu können. Das Holotoolkit-Examples enthält einige Beispielsszenen. Zudem können auch verschiedene Objekte und Skripte aus dem Holotoolkit-Examples in die eigene Szene integriert werden. Das Holotoolkit stellt eine Bibliothek mit dem Namen *HoloToolkit.Unity.InputModule* zur Verfügung. Innerhalb dieser Bibliothek lassen sich Schnittstellen finden, welche die Eingaben für die HoloLens erkennen. Unity bietet an, die erstellten Szenen als eine App zu bauen und zu nutzen. Das Bereitstellen und Starten der App kann über Visual Studio erfolgen. Nach der Bereitstellung über Visual Studio lässt sich die App auch innerhalb der HoloLens wiederfinden. Visual Studio ist eine Entwicklungsumgebung, die von Microsoft entwickelt wurde. Diese Umgebung unterstützt die .NET Programmiersprachen und die Erstellung von Universal Windows Plattform (UWP) Anwendungen.

<sup>7</sup><https://github.com/microsoft/MixedRealityToolkit-Unity/releases/tag/2017.4.3.0> Zuletzt überprüft am 08.09.2019



Unity kann zusammen mit Visual Studio genutzt werden, um Skripte in der Programmiersprache C# zu erstellen. Die Skripte, die innerhalb von Unity erstellt werden, erben alle von der Basisklasse *MonoBehaviour*. Diese Klasse ermöglicht die Verbindung zu den internen Funktionen von Unity. Bei der Erstellung eines Skriptes werden die Methoden *Update()* und *Start()* automatisch generiert. Die *Update()*-Methode wird innerhalb jedes Frames einmal durchlaufen. Die *Start()*-Methode wird vor Beginn der Szene aufgerufen. Hier können Initialisierungen implementiert werden. Wird ein Skript als Komponente an ein Objekt angehängt, übernimmt das Objekt alle Funktionen die innerhalb dieses Skriptes implementiert worden sind. Hierdurch kann das Verhalten des Objektes gesteuert werden. [Tebc]

### 4.3. Pupil Software

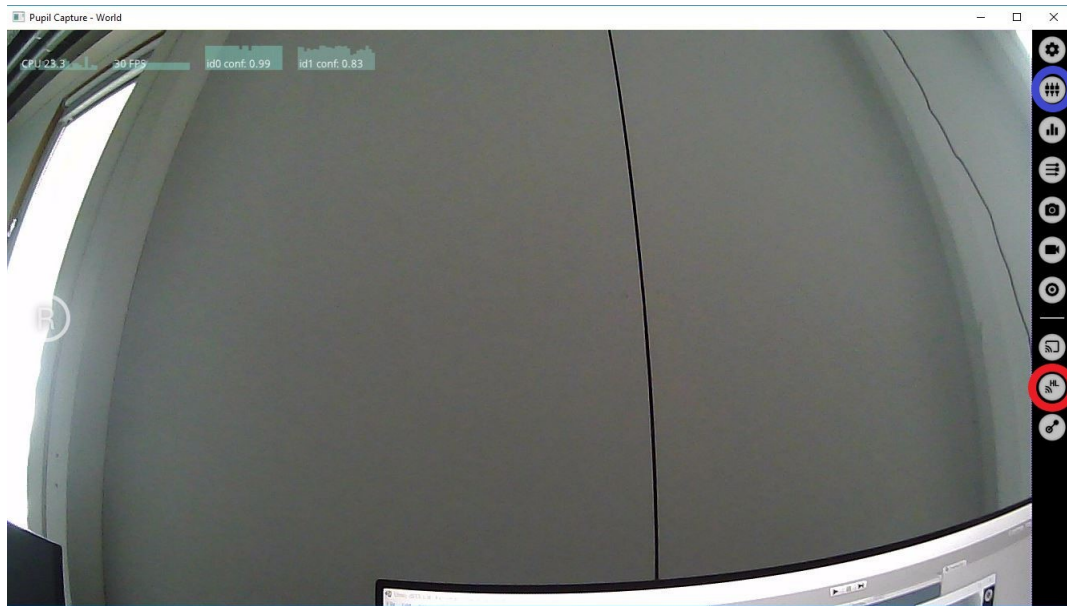
Im Folgenden werden einige Eigenschaften der Pupil Software beschrieben, die in der Arbeit von Kassner et al. [KPB14] definiert wurden. Pupil Capture und Pupil Player sind die zwei Hauptbestandteile der Pupil Software. Pupil Capture ist ein in Echtzeit laufendes Programm, das die Videostreams von den beiden Augenkameras und der Weltkamera erhält, um diese aufzunehmen oder zu verarbeiten. Pupil Player ermöglicht die Visualisierung der aufgenommenen Daten. Zusätzlich lassen sich die Videos von Visualisierungen und Datensätzen exportieren [Gmb]. Der Algorithmus zur Erkennung der Pupille, versucht die *dark pupil* zu lokalisieren, indem er das Bild der Augenkameras nutzt.

Es werden verschiedene Schritte durchlaufen, um die Pupille zu erkennen. Im ersten Schritt wird das Bild der Augen in ein Graustufenbild invertiert. Hier wird versucht die Region der Pupille einzuschätzen. Im nächsten Schritt wird der *Canny-Edge-Detection* Algorithmus [CAN87] verwendet, um die Kanten innerhalb des Augenbildes zu lokalisieren. Daraufhin versucht der Algorithmus die dunklen Regionen zu erkennen. Um spektrale Reflexionen auszuschließen, werden die übrigen Kanten, die sich nicht innerhalb der dunklen Regionen befinden, herausgefiltert. Die verbleibenden Kanten, werden über verbundene Komponenten in Konturen extrahiert [85]. Basierend auf der Krümmungskontinuität dieser Konturen, werden diese in Subkonturen aufgeteilt. Es werden verschiedene Ellipsen auf eine Teilmenge der Konturen platziert und von diesen Ellipsen wird die am besten geeignete Ellipse durch eine erweiterte kombinatorische Suche herausgefunden.

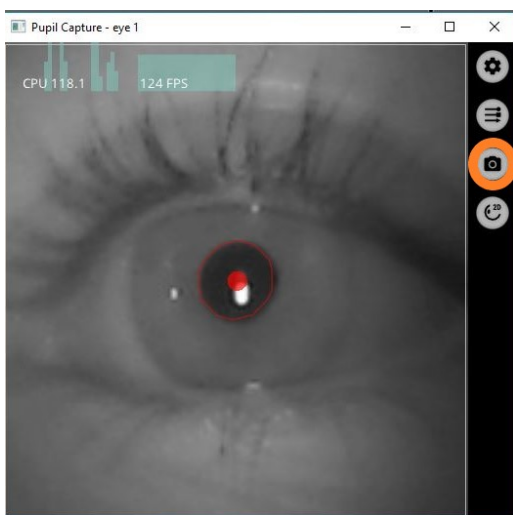
Da der Algorithmus das Feedback, das er durch den Augenvideostream erhält, sammelt, verbessert sich der Detektionsalgorithmus mit der Zeit. Genauere Informationen über die Funktionsweise des Detektionsalgorithmus sind in der Arbeit von Kassner et al. [KPB14] verfügbar.

In Abbildung 4.4 erkennt man die grafische Benutzeroberfläche der Pupil Capture Software, welche in dieser Arbeit genutzt wird. Das Hauptfenster besteht aus dem *World Window*, welches den Videostream der Weltkamera zurückgibt. An der Seitenleiste von diesem Fenster sind verschiedene Funktionalitäten eingerichtet. Über den blau umrandeten Button lässt sich der Plugin Manager öffnen. Hier kann das HoloLens Relay Plugin aktiviert oder deaktiviert werden. Wenn das Plugin aktiv ist wird es am Rand des World Windows aufgelistet. In Abbildung 4.4a weist der rot umrandete Button auf das HoloLens Relay Plugin hin. Mithilfe von diesem Plugin kann über UDP eine Verbindung zwischen dem Eyetracker und der HoloLens hergestellt werden. Die in Abbildung 4.4b und in Abbildung 4.4c zu sehenden Fenster zeigen den Videostream der verschiedenen Augenkameras an. Aufgrund der verschiedenen Eyetracker pro Auge ist zu erkennen, dass die Auflösung der Kamera vom rechten Auge höher ist als die vom linken Auge.

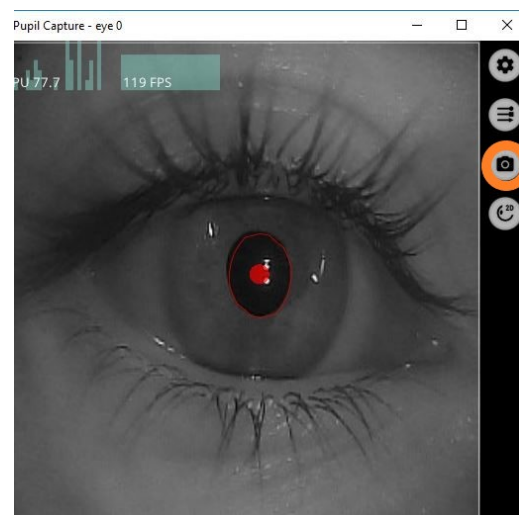
#### 4. Verwendete Hard-und Software



(a)



(b) Videostream der linken Binocular Add-on Augenkamera



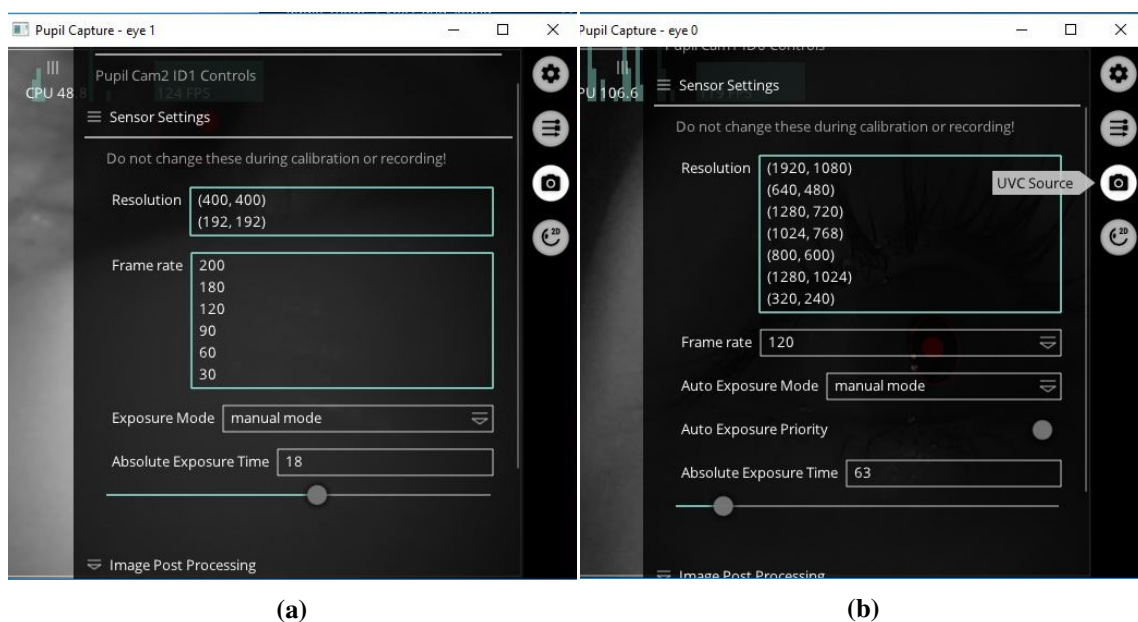
(c) Videostream der rechten Pupil Pro Augenkamera

**Abbildung 4.4.:** a) zeigt das *World Window* der Pupil Capture Anwendung. Über den blau umrandeten Button kann der Plugin Manager geöffnet werden. Der rot markierte Kreis weist auf das HoloLens Relay Plugin hin. In b) ist der Videostream des linken Auges und in c) ist der Videostream des rechten Auges zu erkennen, der von den Augenkameras zurückgegeben wird.

Diese beiden Fenster lassen sich über das *World Window* öffnen. Innerhalb dieser Fenster sind auch verschiedene Funktionalitäten an den Seitenleisten zu erkennen. Über den *UVC Source* Button, der auf den Abbildungen orange umrandet ist, können Einstellungen an den Sensoren der Augenkameras verrichtet werden. Eine oft verwendete Einstellungsoption ist die *Absolute Exposure Time*, die in Abbildung 4.5 zu sehen ist. Diese ermöglicht es die Belichtung auf dem Auge zu verringern oder zu

verstärken. Diese Einstellung hat große Auswirkungen auf die Erkennung der Pupille durch den Pupillen-Detektionsalgorithmus. Innerhalb der *Sensor settings* auf Abbildung 4.5a ist zu sehen, dass die maximale Auflösung der Augenkamera bei 400x400 Pixel liegt. Weiterhin ist zu erkennen, dass die maximale Framerate bei 200 Hz liegt. Im Gegensatz hierzu ist auf Abbildung 4.5b zu erkennen, dass die maximale Auflösung bei 1920x1080 Pixel liegt und die maximale Framerate 120 Hz beträgt.

Auf dem World Window (Abbildung 4.4a) ist die Konfidenz des Pupillendetektionsalgorithmus für beide Augen zu erkennen. Dieser kann Werte zwischen 0 und 1 annehmen. Liegt der Wert bei 0 bedeutet dies, dass die Pupillen nicht erkannt werden. Liegt der Wert bei 1 werden die Pupillen zu 100% erkannt. Wenn die Konfidenz über einem gewissen Schwellwert liegt, ist die Erkennung der Pupille garantiert.



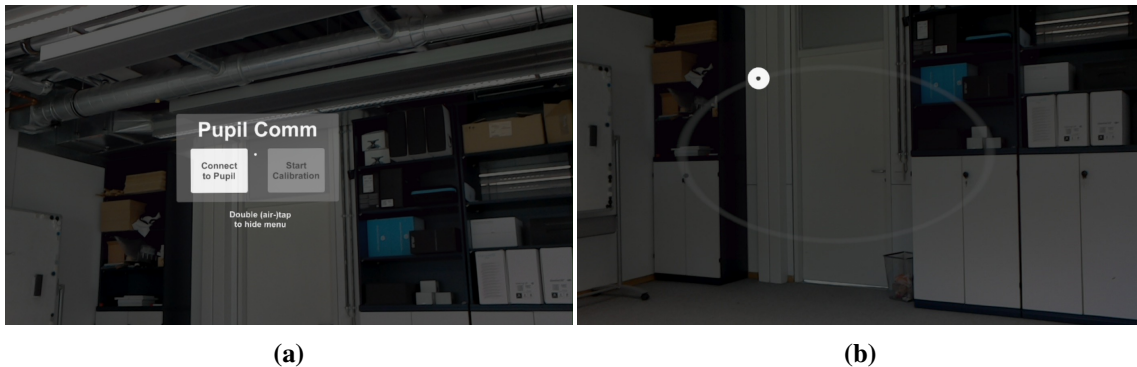
**Abbildung 4.5.:** a) zeigt die UVC Source Einstellungen von dem linken Auge und b) zeigt die UVC Source Einstellungen von dem rechten Auge.

Mit dem von Pupil Labs zusammengestellten hmd-eyes Paket<sup>6</sup> können Unity Anwendungen für VR und AR mit Eyetracking entwickelt werden. Die HMDs für VR und AR, nutzen hierfür die Eyetracker von Pupil Labs. Der Import von diesem Paket in Unity erstellt innerhalb des Assets Ordner einen Ordner mit dem Namen *pupil\_plugin* bereit. Im *pupil\_plugin* lässt sich eine Szene mit dem Namen *Calibration* finden. Diese Szene beinhaltet das Prefab *Pupil Manager*, der eine GUI bereitstellt, die den Anwender durch den Verbindungsprozess mit dem Eyetracker und den Kalibrierungsprozess begleitet [Lab]. In Abbildung 4.6a ist die GUI zu sehen, die von dem Pupil Manager bereitgestellt wird. Nach einer erfolgreichen Verbindung mit dem Eyetracker kann die Kalibrierung gestartet werden. In Abbildung 4.6b ist das Kalibrierungsfenster zu sehen, das von der Calibration Szene bereitgestellt wurde. Die Kalibrierung besteht darin, den weißen Marker, welcher an verschiedenen Positionen auf der Ellipse auftaucht, mit dem Auge zu verfolgen. Hierdurch kann

<sup>6</sup><https://github.com/pupil-labs/hmd-eyes/releases/tag/v1.0-beta>

#### 4. Verwendete Hard-und Software

---



**Abbildung 4.6.:** a) zeigt die vom Pupil Manager bereitgestellte GUI zum Verbindungsaufbau mit dem Eyetracker und zum Starten der Kalibrierung. b) zeigt das Kalibrierungsfenster, welches von der Calibration Szene des pupil\_plugins bereitgestellt wurde.

berechnet werden, wo sich der Blickpunkt des Nutzers auf dem Display der HoloLens befindet. Nach einer erfolgreichen Kalibrierung, wird die Unity Szene, die in der Pupil Manager Komponente festgelegt wurde, mit den Eye-Gaze Daten geladen.

Das Fenster für den Verbindungsaufbau in Abbildung 4.6a lässt sich normalerweise mit einem doppelten Airtap schließen und wieder öffnen. In dieser Arbeit wurde diese Funktion ersetzt durch das Drücken der Taste M auf einer Bluetooth Tastatur, die sich mit der HoloLens verbinden lässt. Der Grund für diesen Ersatz war, dass der Pupil Manager im Hintergrund immer aktiv ist. Während der Interaktion mit einer Szene in der die Eye-Gaze Daten rein geladen wurden, führt das Auslösen des doppelten Airtaps dazu, dass der Pupil Manager die Interaktion mit dieser Szene abbricht und erneut die GUI aus Abbildung 4.6a anzeigt.

Pupil Capture kann nicht unmittelbar auf der HoloLens gestartet werden. Die Kommunikation zwischen der HoloLens und der Pupil Capture Anwendung wird über UDP geregelt. Um eine Verbindung zwischen der Pupil Capture Software und der HoloLens zu ermöglichen, müssen ein paar Einstellungen innerhalb von Unity vorgenommen werden. Das pupil\_plugin beinhaltet im *Resources* Ordner die Instanz *PupilSettings*. Hier muss die IP Adresse des Rechners eingegeben werden, auf welchem die Pupil Capture Software läuft. Weiterhin muss die Port Nummer eingegeben werden, die auch im HoloLens Relay Plugin eingegeben wurde. Mit diesen Informationen lässt sich eine UDP Kommunikation zwischen der HoloLens und der Pupil Capture Anwendung aufbauen.

## 5. Design und Implementierung

Für das Konzept dieser Arbeit wurde ein Prototyp entwickelt. Dieser unterstützt die Selektion und Manipulation von Objekten mittels Eyetracking. Im Folgenden wird der Entwurf des Prototypen vorgestellt und es werden einige Details zur Implementierung gegeben.

### 5.1. Aufgabenstellung

Das Konzept dieser Arbeit ist es eine Interaktion in Augmented Reality mittels Eyetracking zu ermöglichen. Die Interaktion soll die verschiedenen Manipulationstypen Skalierung, Rotation und Translation unterstützen. Zudem soll es möglich sein verschiedene Objekte zu laden auf welchen diese Manipulationen ausgeführt werden können. Die Selektion von verschiedenen Elementen soll über den Klicker der HoloLens ablaufen.

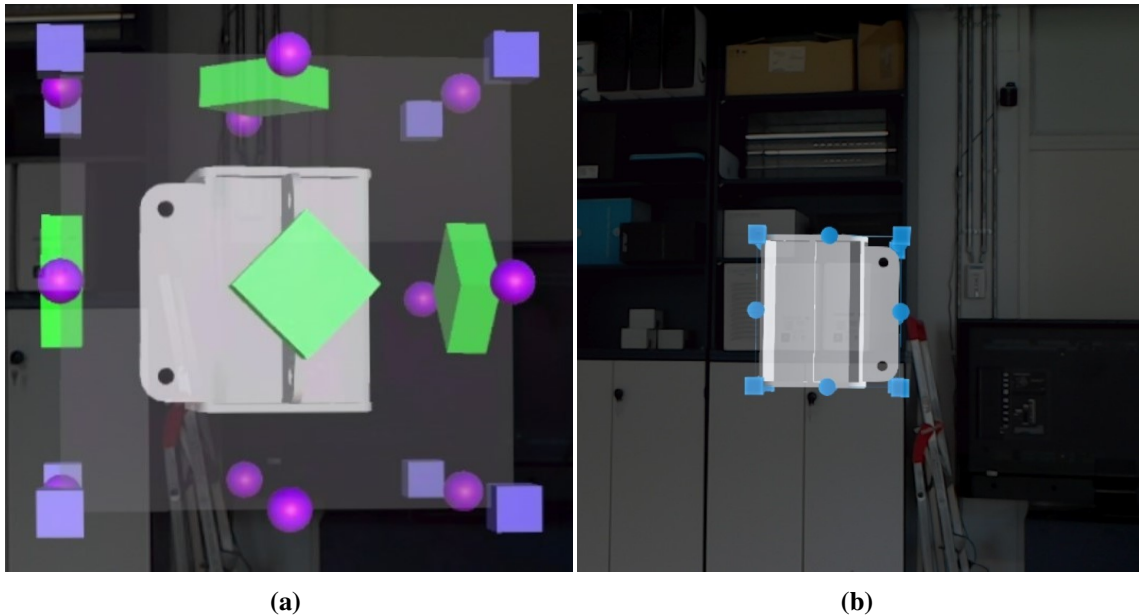
### 5.2. Entwurfskonzept des Prototyps

In diesem Abschnitt werden die Entwurfsprinzipien des Prototypen vorgestellt. Zuerst wird auf den Entwurf des Tools und anschließend auf den Entwurf des Menüs eingegangen.

#### 5.2.1. Entwurf des Tools

Das Tooldesign lehnt sich an den Entwurf der Boundingbox (siehe Abbildung 5.1b), die im Holotoolkit genutzt wird, an. In Abbildung 5.1a ist das Tool zu sehen, welches entworfen wurde, um die einzelnen Transformationen durchzuführen. An den Ecken des Tools sind kleine Würfel angebracht. Diese werden verwendet, um das Objekt zu skalieren. In Abbildung 5.2a ist der Zustand des Tools nach der Aktivierung eines Würfels zu erkennen. Mithilfe der Pfeile kann der Nutzer die Größe des Objektes einstellen. Die Sphären, die sich in der Mitte jeder Kante befinden, dienen zur Rotation des Objekts. Bei Selektion einer Kugel erscheint ein Ring um das Tool. Abbildung 5.2b zeigt den Ring, der genutzt wird, um das Objekt um die x-Achse zu rotieren. Der Ring in Abbildung 5.2c wird genutzt, um das Objekt um die z-Achse zu rotieren. In Abbildung 5.2d ist der Ring zu sehen, der genutzt wird, um das Objekt um die y-Achse zu drehen. Je nachdem, welche Kugel ausgewählt wurde, kann sich die Ausrichtung des Ringes unterscheiden. Ein weiterer Bestandteil des Tools sind die Rauten, die auf den Seiten des Tools angebracht wurden. Mithilfe von diesen Rauten kann das Objekt im Raum verschoben werden. In Abbildung 5.2e ist der Zustand des Tools nach der Aktivierung einer Raute zu erkennen. Durch das Selektieren einer Raute, erscheint ein Steuerkreuz um die Raute. Dieses kann genutzt werden, um das Objekt im Raum zu bewegen. Damit der Nutzer

eine Übersicht darüber enthält, welches Toolelement er zum jetzigen Zeitpunkt ausgewählt hat, werden, bis auf das selektierte Toolelement selbst, die restlichen Elemente des Transformationstools ausgeblendet.

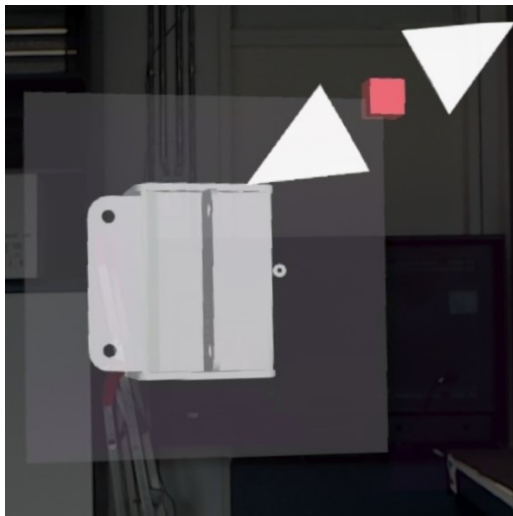


**Abbildung 5.1.:** Der Entwurf des Transformationstools in Abbildung 5.1a, angelehnt an das Design der Boundingbox aus Abbildung 5.1b im Holotoolkit.

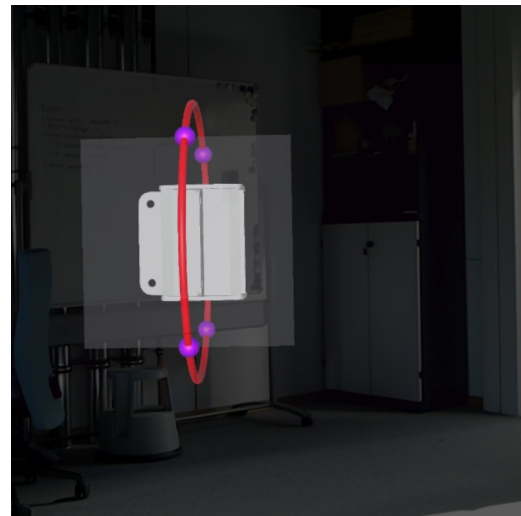
### 5.2.2. Entwurf des Menüfensters

Das Design der graphischen Benutzeroberfläche ist minimalistisch gehalten, indem ein schlichtes Menüfenster in die Szene integriert wurde. Über das Menü können alle Hauptfunktionen des Prototypen gesteuert werden. Das Menüfenster besteht, wie in Abbildung 5.3a zu sehen aus einfachen Buttons, die aneinander geordnet wurden. Diese Buttons nennen sich *Holographic Button* und lassen sich als Prefab im Holotoolkit-Examples Packet finden. Das Menüfenster des Prototyps besteht aus sieben Buttons. Jedes dieser einzelnen Buttons besitzt eine spezielle Funktion. Das Menüfenster wird um drei weitere Buttons erweitert, wenn der Objects Button ausgewählt wird. Abbildung 5.3b zeigt die Erweiterung des Menüs. Jedes dieser drei Buttons steht für ein Objekt, das in die Szene geladen werden kann. Abbildung 5.3c zeigt das Menüfenster im minimierten Zustand.

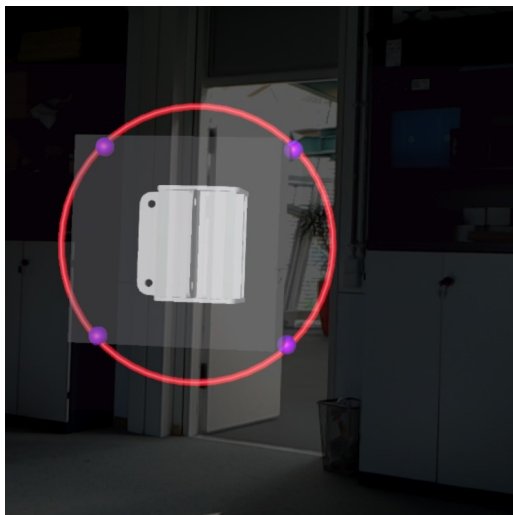




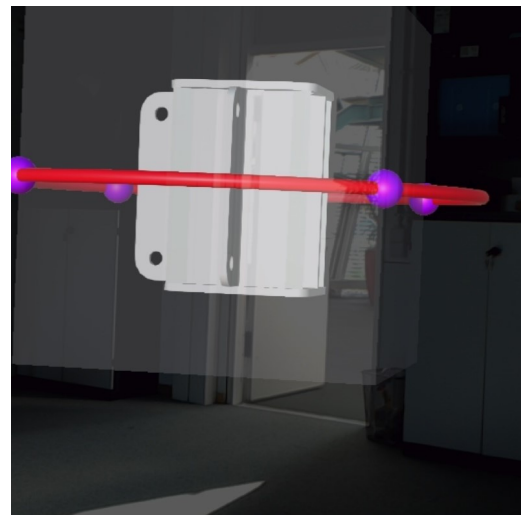
(a)



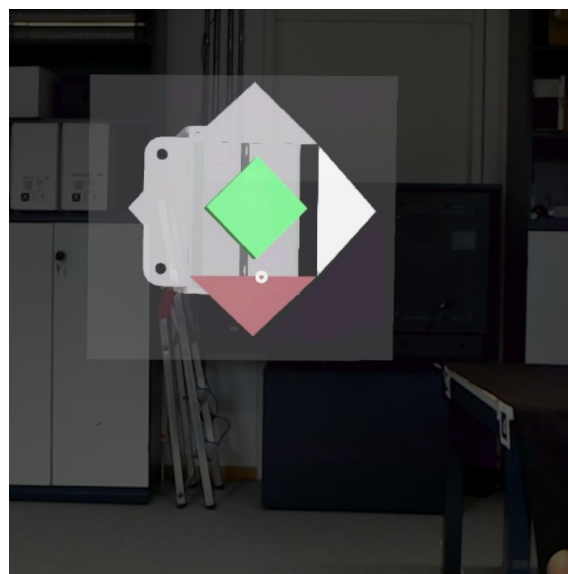
(b)



(c)

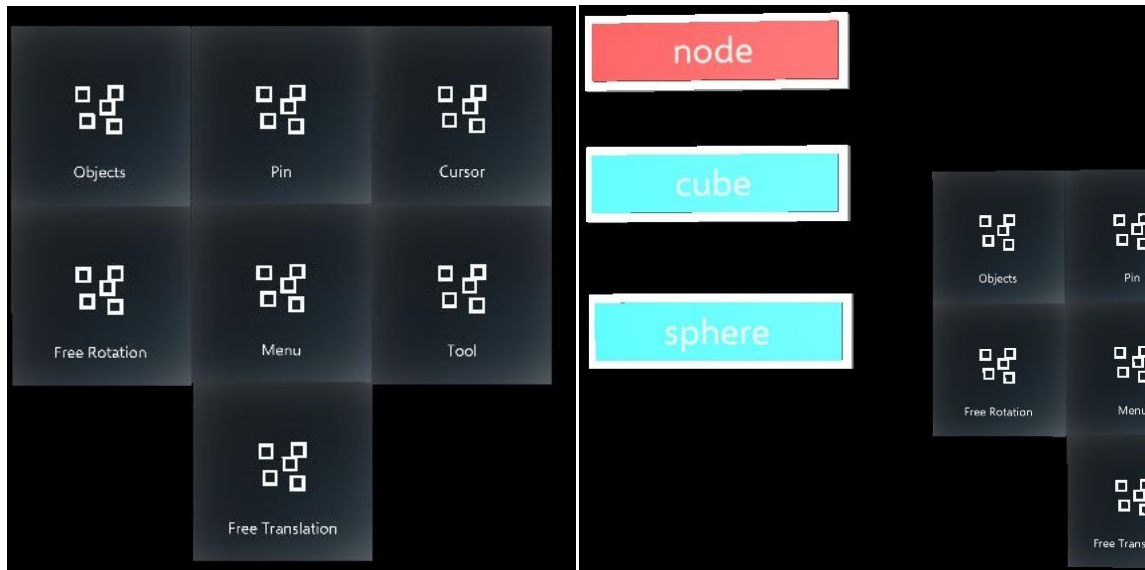


(d)



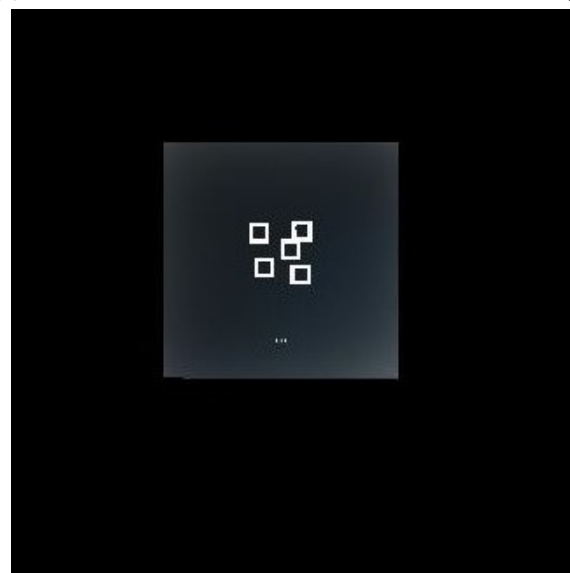
(e)

**Abbildung 5.2.:** Hier sind die einzelnen Zustände des Transformationstools zu sehen. Das Tool befindet sich im Zustand a), wenn die Skalierung aktiviert wird. In b),c) und d) werden die verschiedenen Rotationsringe gezeigt. c) zeigt das Tool im Translationszustand.



(a)

(b)



(c)

**Abbildung 5.3.:** Hier ist das entworfene Menüfenster zu sehen. Abbildung 5.3a zeigt die Normalansicht des Menüfensters. In Abbildung 5.3b ist das Menüfenster um das Objektfenster erweitert. Die Ansicht des Menüs kann minimiert werden, wie in Abbildung 5.3c zu sehen.

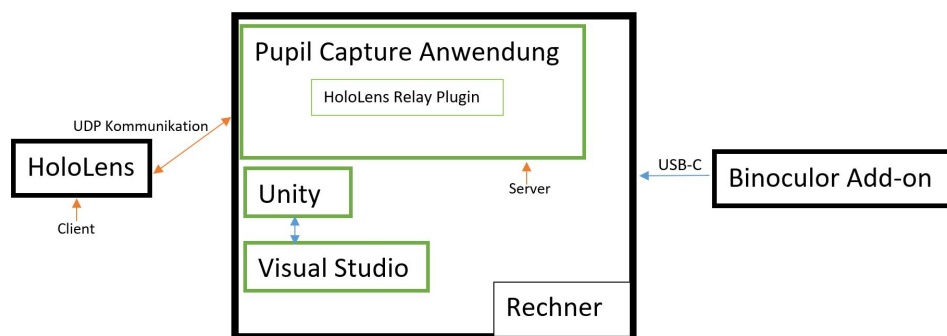


## 5.3. Implementierung des Prototyps

Im folgenden Abschnitt wird beschrieben, wie die einzelnen Funktionalitäten des Prototypen implementiert wurden.

### 5.3.1. Vorbereitungen

In Abbildung 5.4 ist ein Überblick über die gesamte Architektur gegeben. Wie auf der Grafik zu erkennen, wird der Eyetracker an einen Rechner angeschlossen. Auf diesem Rechner laufen die Anwendungen Pupil Capture und Unity. Wie schon in Kapitel 4 erwähnt stellt Visual Studio die entwickelte Anwendung auf der HoloLens bereit. Die Kommunikation zwischen der HoloLens und dem Pupil Capture ist über UDP festgelegt.



**Abbildung 5.4.:** Übersicht über die gesamte Architektur, die genutzt wurde, um den Prototyp zu entwickeln. Die grünen Kästchen weisen auf die Komponenten innerhalb des Rechners hin.

Bevor mit der Implementierung begonnen werden kann, müssen einige Einrichtungen in Unity vorgenommen werden. Um eine HoloLens kompatible Anwendung zu erstellen, muss in den *Build settings* von Unity zunächst die Plattform auf *Universal Windows Platform* gewechselt werden. Bei Mixed Reality Anwendungen muss unter den Player Settings in Unity, innerhalb der XR Settings, ein Haken bei dem *Virtual Reality Supported* Kontrollkästchen gesetzt werden. Weiterhin ist es empfohlen, in den Quality Settings die Qualität auf *Very Low* zu setzen [Corb].

Wie in Kapitel 4 beschrieben, bietet Microsoft das Holotoolkit Paket an, welches verschiedene Prefabs und Bibliotheken zur Verfügung stellt. Die beiden Prefabs *Inputmanager* und *HoloLensCamera* wurden in die entwickelte Unity Szene mit eingebaut. Die Schnittstellen *IInputClickhandler* und *IInputhandler* aus der *Holotoolkit.Unity.Input* Bibliothek wurden verwendet, um die Klick Ereignisse, während der Interaktion zu erkennen.

Die Einbindung des Eyetracking in die Unity Szene erfolgt, wie in Kapitel 4 beschrieben, über das *hmd-eyes* Paket, welches von Pupil Labs angeboten wird. Das *Pupil Manager* Skript, welches sich innerhalb des *Pupil Manager* Prefabs befindet, wartet auf *Pupil Events* und kann zum Beispiel das Laden einer neuen Szene nach einer erfolgreichen Kalibrierung auslösen. Die *Pupil Capture* Software muss während der Ausführung der Anwendung im Hintergrund laufen, da diese über

eine UDP-Kommunikation Daten an die HoloLens sendet. Für die Durchführung der Kalibrierung wurde die Calibration Szene genutzt, die sich innerhalb des pupil\_plugin befindet. In dieser Kalibrierungsszene wird auf eine Szene verwiesen, die nach erfolgreicher Kalibrierung geladen wird. In der neu geladenen Szene befindet sich die Benutzeroberfläche des oben beschriebenen Prototyps. Da über UDP eine Verbindung zwischen der HoloLens und Pupil Capture aufgebaut wird, muss sichergestellt werden, dass sich sowohl der PC auf welchem sich Pupil Capture befindet als auch die HoloLens im selben Netzwerk befinden.

### 5.3.2. Implementierung der Interaktion

Für die Gestaltung einer intuitiven Interaktion mit der Benutzeroberfläche wurde ein visuelles Feedback implementiert. Objekte, die mit dem Eye-Gaze anvisiert werden, leuchten wie in Abbildung 5.5a gelb auf. Sobald ein Objekt angeklickt wird, ändert sich die Farbe des Objektes, wie in Abbildung 5.5b zu sehen von gelb auf rot. Rote Objekte deuten auf aktivierte Objekte hin.

Um die verschiedenen Funktionen freizuschalten, muss zuerst das gewünschte Objekt, auf welchem die Funktion angewandt werden soll, aktiviert werden und anschließend muss im Menü die gewünschte Funktion ausgewählt werden. Um die verschiedenen Manipulationen mit dem Tool durchzuführen, ist eine Zweischrittverifikation notwendig. Im ersten Schritt wird das Objekt, das die Manipulation auslösen soll, mit einem Klick aktiviert. Im zweiten Schritt wird dieses Objekt mit dem Eye-Gaze anvisiert und die Taste des Klickers (siehe Abbildung 4.2b) wird gedrückt gehalten. Dieser Schritt löst im Prinzip die Manipulation des Objektes aus. Nachdem die Transformation gestartet wurde, kann der Nutzer seinen Blick vom selektierten Objekt abwenden. Diese Zweischrittverifikation dient zum einen dazu, ein freies Blickverhalten zu ermöglichen. Zum anderen kann hierdurch verhindert werden, dass der Nutzer versehentlich während der Ausführung einer Transformation ein anderes Toolelement selektiert. Die freie Rotation kann auch durch die Zweischrittverifikation ausgelöst werden. In diesem Fall wird auf dem zu manipulierenden Objekt selbst die Verifikation durchgeführt.

Damit auf die Eyetrackingdaten zugegriffen werden kann, bietet Pupil Labs eine Schnittstelle an. Diese ist innerhalb der Klasse PupilTools zu finden. Die Klasse PupilTools stellt eine Methode bereit, die es ermöglicht, auf verschiedene Topics zuzugreifen. Für den Zugriff auf die Eyetrackingdaten, bietet Pupil an, verschiedene Topics zu abonnieren. Je nachdem, welches Topic abonniert wurde, können die Daten zu diesem Topic geladen werden. Zu den verschiedenen Topics gehören Gaze, Blink, Frame Publishing und Pupil. Durch das Abonnement auf das Topic Gaze kann zum Beispiel auf die Augenpositionen zugegriffen werden. Hier ist zu beachten, dass das Laden der Eye-Gaze Daten nur bei einer erfolgreichen Kalibrierung möglich ist. [Lab] Da der geladene Eye-Gaze Punkt nur aus den x und y Koordinaten besteht, wurde dieser mit der Funktion *Camera.ViewPortToWorldPoint()* in eine 3D Position im Raum umgewandelt [Teca]. Das Ziel ist es, die Interaktion mit den Objekten durch den Eye-Gaze zu ermöglichen. Damit erkannt wird, dass der Eye-Gaze auf den Objekten liegt, wird Raycasting verwendet. Es wird ein Strahl erzeugt, der auf der Nearplane der Kamera beginnt und durch die 2D Eye-Gaze Positionen läuft [Tec19b]. Zusätzlich wird abgefragt, ob der Strahl sich mit einem Objekt in der Szene schneidet [Tec19c]. Das Holotoolkit bietet die Bibliothek *Holotoolkit.Inputmodules* an. Innerhalb dieser Bibliothek sind Schnittstellen wie der *IInputClickHandler* oder der *IInputHandler* vorhanden, die verschiedene Methoden zur Erkennung der Klickereignisse zur Verfügung stellen.



**Abbildung 5.5.:** a) zeigt den Zustand des Objekts während dem anvisieren und b) zeigt den Zustand des Objekts nachdem aktivieren.

### 5.3.3. Funktionalitäten des Menüfensters

Die Funktionen der einzelnen Buttons, die sich im Menüfenster befinden, werden im folgendem beschrieben.

**Objects** Durch den Objects Button können verschiedene Objekte selektiert werden. Ein Klick auf diesen Button aktiviert drei weitere Buttons, die die verschiedenen Objekte laden oder wieder deaktivieren. Jedes dieser drei Buttons steht für ein Objekt das geladen oder wieder deaktiviert werden kann. Die Objekte befinden sich im Resources Ordner, der im Assets Ordner der Unity Szene angelegt wurde. Die einzelnen Objekte werden aus diesem Ordner geladen.

**Cursor** Mithilfe des Cursor Buttons kann die Sichtbarkeit des Cursors aktiviert oder deaktiviert werden.

**Free Rotation** Um die freie Rotation des Objektes zu aktivieren, muss zunächst das Objekt selbst und anschließend der Free Rotation Button im Menü selektiert werden. Die Deaktivierung der freien Rotation erfolgt über denselben Button.

**Tool** Die Aktivierung des Transformationstools erfolgt äquivalent zur Aktivierung der freien Rotation. Das Objekt, auf welches das Transformationstool angewandt werden soll, muss zunächst selektiert werden, anschließend kann über das Menü der Button *Tool* selektiert werden, welcher das Transformationstool auf das Objekt legt.

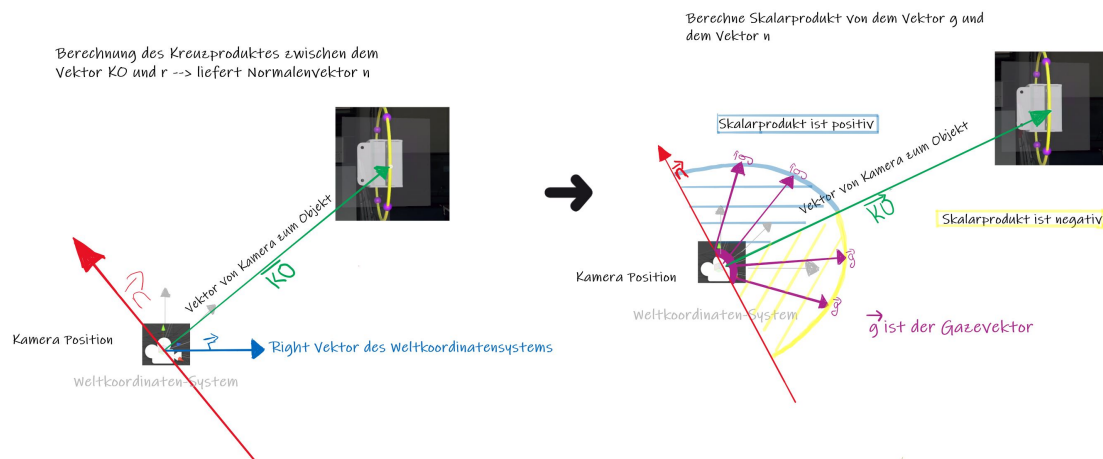
**Menu** Mithilfe des Menübuttons kann das Menüfenster, minimiert oder maximiert werden.

**Pin** Der Pin Button ermöglicht es, das Fenster an eine bestimmte Position im Raum anzuheften.

**Free Translation** Die Free Translation wird, wie auch schon bei den anderen Manipulationsfunktionen *Free Rotation* und *Tool*, über diesen Button aktiviert und wieder deaktiviert.

Das Menü beinhaltet sowohl das im Holotoolkit Paket vorhandene *Billboard* Skript als auch das *Tagalong* Skript. Diese beiden Skripte ermöglichen es, dass die Orientierung des Menüs sich immer an den Nutzer richtet und gleichzeitig dem Sichtfeld des Nutzers folgt. Auch kann das Menü durch einen doppelten Airtap entweder hervorgerufen oder versteckt werden.

## 5. Design und Implementierung



**Abbildung 5.6.:** Die Abbildung veranschaulicht die Berechnung zur Erkennung des Blickrichtungswechsels, während der Ausführung der Rotation mit dem Transformationstool.

### 5.4. Funktionen des Tools

Hier wird auf die einzelnen Funktionen des Tools näher eingegangen. Das Tool enthält die Funktionen Rotation, Skalierung und Translation. Die Aktivierung der einzelnen Manipulationen erfolgt, wie oben beschrieben, über die Zweischnittverifikation.

#### 5.4.1. Transformationstypen

**Rotation** Bei dieser Transformationsart wird das Objekt um seine eigenen Achsen gedreht. Die Achse, um welche das Objekt gedreht werden soll, hängt davon ab, welche Sphäre selektiert wurde. Der Ring läuft durch diejenigen Sphären, die genutzt werden können, um diesen Ring zu aktivieren oder zu deaktivieren. Die Ringe sind orthogonal zu den Koordinatenachsen des Objektes positioniert. Wenn der Benutzer während der Rotation seine Blickrichtung ändert, wird auch die Rotationsrichtung des Objektes verändert. Schaut der Nutzer zum Beispiel bei der Bedienung des Rotationsringes aus Abbildung 5.2b nach oben rotiert das Objekt nach vorne. Bewegt sich der Blick des Nutzers nach unten, beginnt die Rotation ihre Richtung zu ändern und das Objekt rotiert nach hinten. Nach der Ausführung der Rotation wird die Boundingbox wieder auf ihre Ursprungspostion gesetzt.

In Abbildung 5.6 veranschaulicht die durchgeführte Berechnung, zur Erkennung des Wechsels in der Blickrichtung. Um den Wechsel in der Blickrichtung festzustellen wurde zunächst das Kreuzprodukt zwischen dem *Right*-Vektor der Weltkoordinaten Achse und dem Vektor, der von der Kamera zum Objekt zeigt, berechnet. Anschließend wurde das Skalarprodukt von dem resultierenden Vektor und dem Eye-Gaze Vektor berechnet. Wenn sich das Vorzeichen des Skalarproduktes geändert hat, konnte festgestellt werden, dass der Nutzer in die entgegengesetzte Richtung schaut. Für die vertikal ausgerichteten Ringe wurde der

*Right*-Vektor für die Kreuzproduktberechnung genommen. Bei der Kreuzproduktberechnung für den horizontal ausgerichteten Ring wurde anstelle des *Right*-Vektors der Up-Vektor des Weltkoordinatensystems genommen.

Für die Rotationsgeschwindigkeit wurde ein konstanter Faktor definiert, der anschließend mit der von Unity bereitgestellten *Time.deltaTime* Variable multipliziert wurde. Die *Time.deltaTime* Variable gibt die Zeit in Sekunden zurück, die zwischen dem letzten und aktuellen Frame liegt [Tecd]. Die Geschwindigkeit der Rotation liegt somit bei 15 Grad pro Sekunde.

**Translation** Durch die Selektion einer Raute auf dem Tool erscheint ein Steuerkreuz, mit welchem das Objekt im Raum verschoben werden kann. Abhängig davon, welche Raute selektiert wird, kann das Objekt auch in die Tiefen des Raumes verschoben werden. Die Pfeile auf dem Tool weisen dabei auf die zu verschiebende Richtung hin. Da für die Bewegung des Objektes ein konstanter Faktor gewählt wurde, welcher mit der *Time.deltaTime* Variable multipliziert wird, bewegt sich das Objekt um 0.2 m pro Sekunde in eine ausgewählte Richtung.

**Skalierung** Für die Skalierung müssen die Würfel an den Ecken des Tools selektiert werden. Es tauchen zwei Pfeile auf, wobei ein Pfeil nach innen und ein Pfeil nach außen gerichtet ist. Mit diesen Pfeilen kann das Objekt größer oder kleiner skaliert werden. Wird der nach außen gerichtete Pfeil aktiviert, wird das Objekt vergrößert. Bei der Aktivierung des nach innen gerichteten Pfeils wird das Objekt verkleinert. Das Objekt kann nur bis zu einer bestimmten Grenze verkleinert oder vergrößert werden. Auch hier wird das Objekt pro Sekunde, um 0.1 m<sup>3</sup>, skaliert.

Wie in Abschnitt 5.3.2 beschrieben, muss die Taste des Klickers gedrückt gehalten werden, um die Manipulation auszuführen. Die Manipulation wird solange ausgeführt bis der Nutzer die Taste loslässt. Solange die Taste gedrückt gehalten wird, wird die Funktion zur Manipulation des Objektes innerhalb der *Update()*- Funktion der *Main*-Klasse pro Frame aufgerufen.

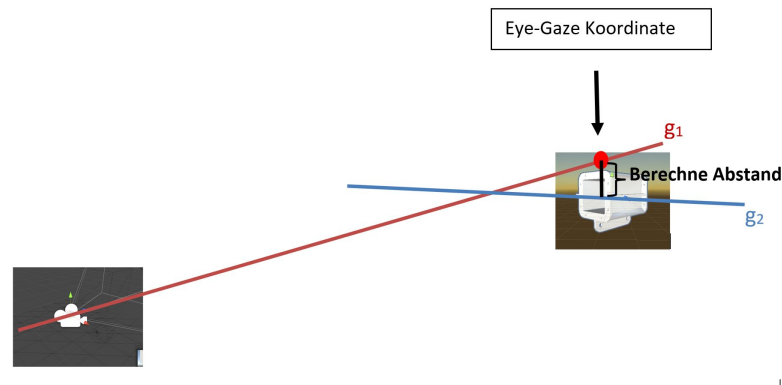
## 5.5. Freie Rotation

Neben dem Tool, welches Rotationen um verschiedene Achsen ausführen kann, wurde noch eine andere Art von Rotation in die Implementierung eingebaut. Die freie Rotation wird durch die Blickrichtung gesteuert. Diese wird über das Menü selektiert. Hierbei muss, wie auch schon bei der Selektion des Tools, zunächst das Objekt ausgewählt werden, auf welchem die freie Rotation angewandt werden soll. Nachdem die freie Rotation freigeschaltet wurde, erscheint, wie in Abbildung 5.8a zu sehen, ein Ring in der Mitte des Objekts. Dieser stellt die *Deadzone* visuell dar. Bei der Fixierung der *Deadzone* bleibt die Rotation stehen. Befindet sich der Blick in der Nähe der *Deadzone*, verlangsamt sich die Rotation. Um die freie Rotation zu starten, muss der Nutzer zunächst das Objekt wieder selektieren, seinen Blick auf das Objekt richten und die Taste des Klickers gedrückt halten. Die Rotation hängt von der Blickrichtung ab. Im Allgemeinen rotiert das Objekt immer zur *Deadzone* hin. Hierbei wird der Punkt, der auf dem Objekt betrachtet wird, zur *Deadzone* rotiert. Schaut der Nutzer in die *Deadzone* oder außerhalb des Objekts, stoppt die Rotation trotz festgehaltener Taste. Sobald der Blick von der *Deadzone* hinausgeht und auf dem Objekt liegt, wird die Rotation fortgesetzt. [GBR+19]

## 5.6. Freie Translation

Für die freie Translation wird der Abstand zwischen zwei Geraden berechnet. In Abbildung 5.7 ist die Berechnung als Grafik dargestellt. Der Ortsvektor der ersten Gerade liegt auf der Kameraposition und der Richtungsvektor ist die Differenz zwischen den Eye-Gaze Koordinaten und der Kameraposition. Die zweite Gerade liegt auf der x-Achse des Objektkoordinatensystems. Bei der Aktivierung der freien Translation erscheint die Gerade, die durch das Objekt geht. Auf Abbildung 5.8b ist diese Gerade zuerkennen. Wenn der Abstand unter einem vordefinierten Schwellwert liegt, wird die Farbe dieser Gerade auf Grün gesetzt. Wenn der Nutzer die Taste des Klickers betätigt, während die Gerade grün ist, verschiebt sich das Objekt auf der x-Achse an die Position, wo sich der Gaze befindet. Für die Berechnung des Abstands von den zwei Geraden wurde davon ausgegangen, dass die beiden Geraden windschief zueinander liegen. Dementsprechend wurde die Gleichung (5.1) für die Berechnung des Abstands von windschiefen Geraden genutzt. Der Vektor  $\vec{a}$  ist die Position des Objektes und der Vektor  $\vec{b}$  ist die Position der Kamera. Der Vektor  $\vec{n}$  beschreibt den Normalenvektor, der durch das Kreuzprodukt der Richtungsvektoren von den beiden Geraden entsteht.

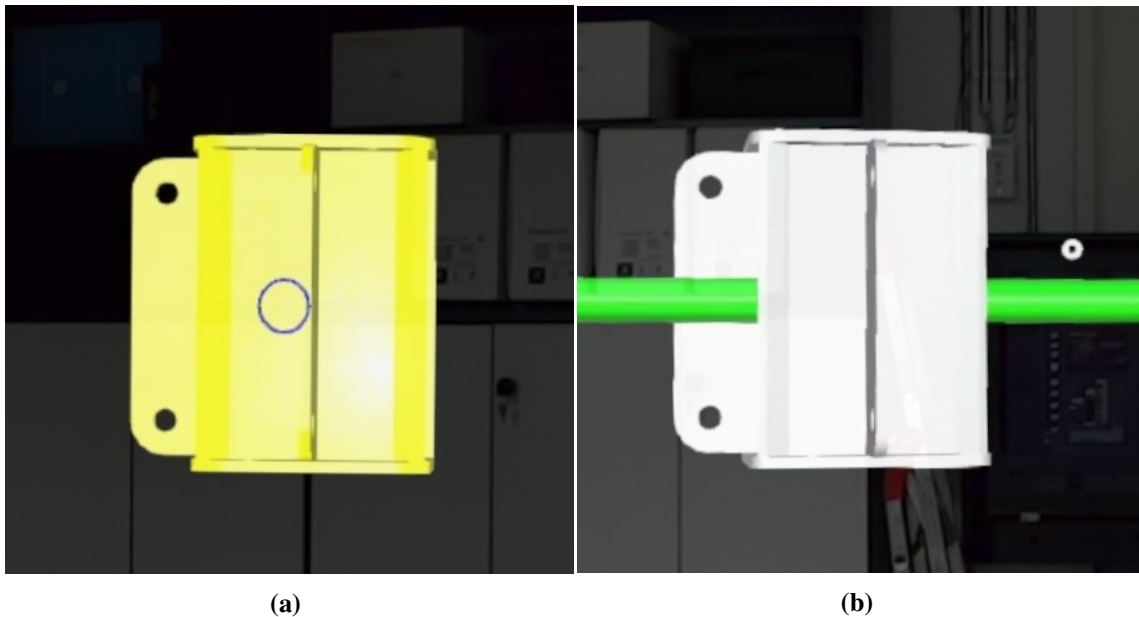
$$d = \frac{|(\vec{a} - \vec{b}) \times \vec{n}|}{|\vec{n}|} \quad (5.1)$$



**Abbildung 5.7.:** Berechnung des Abstands zwischen den zwei Geraden für die Freie Translation.  $g_1$  ist die erste Gerade die durch die Kamera Position und den Eye-Gaze Koordinaten verläuft.  $g_2$  ist die zweite Gerade, die auf der x-Achse des Objektkoordinatensystems liegt.

## 5.7. Verbesserung und Erweiterungen

Nach der Durchführung der Studie, die in Kapitel 6 näher erläutert wird, wurden auf der Basis des Nutzerfeedbacks einige Verbesserungen an dem Prototyp vorgenommen. Weiterhin wurde der Prototyp um die Funktion freie Translation erweitert. Zudem kamen die Funktionen zum Anheften des Menüs an eine feste Position im Raum und das Verkleinern des Menüfensters hinzu. Auch



**Abbildung 5.8.:** a) zeigt die freie Rotation und b) zeigt die freie Translation.

wurde das visuelle Feedback verändert. Zu Beginn waren alle Objekte grau, sodass jedes inaktive Objekt auf die Farbe Grau zurückgesetzt wurde. Jetzt ist es möglich, dass jedes inaktive Objekt seine ursprüngliche Farbe erhält. Inaktive Objekte sind diejenigen Objekte, die nicht vom Nutzer betrachtet werden und nicht aktiviert sind. Zuvor konnte bei der Aktivierung des Objekts direkt erkannt werden, dass das Objekt rot eingefärbt wurde. Jetzt muss der Blick des Nutzers vom betrachteten Objekt abgewandt werden, um die rote Einfärbung des Objektes zu erkennen. Die Pfeile der Skalierungen waren im ursprünglichen Prototypen gleichseitig. Nun sind diese Pfeile gleichschenkelig.





## 6. Benutzerstudie

Um den Prototyp zu evaluieren wurde eine Studie in einem kleinen Rahmen durchgeführt. Die Teilnehmer konnten innerhalb der Studie verschiedene Interaktionsmethoden mit dem Prototyp testen und vergleichen. Im Folgendem Abschnitt wird das verwendete Studiendesign beschrieben.

### 6.1. Studiendesign

Es wurde ein Within-Subjects Design genutzt. Die Probanden haben folgende Interaktionsmethoden getestet: Headgaze mit Klicker, Headgaze mit Handgeste, Eye-Gaze mit sichtbarem Cursor sowie Eye-Gaze ohne sichtbaren Cursor. Bei den Interaktionsmethoden, die den Eye-Gaze verwendet haben, wurde für die Selektion immer der Klicker verwendet. Um Übungseffekte auszuschließen, wurde die Reihenfolge in der die Probanden die Interaktionsmethoden getestet haben, randomisiert. Es existieren zwei unabhängige Variablen. Die erste unabhängige Variable besteht aus den verschiedenen Interaktionsmethoden, die zweite unabhängige Variable stellt die implementierten Funktionen des Prototyps dar. Die abhängige Variable ist die User Experience. Diese wurde anhand der Bewertungen von den einzelnen Testpersonen ermittelt.

Die Probanden sollten die verschiedenen Interaktionsmethoden und die Funktionen des Prototyps bewerten. Dieser Abschnitt stellt die verwendeten Bewertungsmethoden vor.

### 6.2. Bewertung

In diesem Abschnitt werden die für die Auswertung der Studie genutzten Bewertungsmethoden dargestellt.

#### 6.2.1. Likert-Skala

Bei der Likert-Skala handelt es sich um eine Folge von Aussagen, denen auf einer abgestuften Skala, entweder zugestimmt oder abgelehnt werden kann. Die Skala dieser Studie beinhaltet die Antwortalternativen von *stimme stark zu*, *neutral* bis hin zu *stimme stark nicht zu*. Die Fragen müssen negativ und positiv ausgerichtet sein. Eine Auswertungsalternative ist, die Fragen zunächst in eine Richtung zu invertieren, sodass zum Beispiel die Antwort *stimme stark zu* immer positiv ausgeprägt und die Antwortalternative *stimme stark nicht zu* immer negativ ausgeprägt ist. Die Likert-Skala kann mittels Summenindex ausgewertet werden. Hierfür müssen die Werte der einzelnen Fragen zunächst addiert werden. Der ermittelte Wert wird anschließend durch die Anzahl der Fragen geteilt. [BB14]

### 6.2.2. NASA Task Load Index

Der NASA TLX wurde in dieser Studie als NASA Raw Task Load Index ausgewertet. Beim NASA TLX besteht der Fragebogen aus zwei Teilen. Im ersten Teil werden die sechs Skalen paarweise verglichen. Es existieren 15 solcher Vergleiche. Der Proband wählt hierbei die Anforderung aus, welche seiner Meinung nach am Effektivsten für die Erledigung der Aufgabe beigetragen hat. Im zweiten Teil wird für jedes einzelne der sechs Skalen das Ausmaß gemessen. Hierfür kann der Proband auf einer Skala von 0 bis 20 einen Wert auswählen, wobei 0 sehr niedrig und 20 als sehr hoch bewertet wird. Die sechs Skalen der Nasa TLX lauten wie folgt:

- Geistige Anforderung
- Körperliche Anforderung
- Zeitliche Anforderung
- Leistung
- Aufwand
- Frustration

Für die Auswertung des NASA RTLX[Har06] wird nur der zweite Fragebogen benötigt, welcher im Anhang zu finden ist. Weitere Informationen zum NASA TLX sind in [Har86] zu finden.

### 6.3. Teilnehmer

Der Prototyp wurde von insgesamt 12 Teilnehmern getestet. Das Alter dieser Testpersonen lag zwischen 18 und 23 Jahren. Drei Testpersonen waren weiblich und neun männlich. Das höchste Bildungsniveau erreichten sieben Teilnehmer mit der allgemeinen Hochschulreife und fünf mit dem Bachelor. Die Mehrheit der Teilnehmer absolvieren ein Studium im Bereich der Softwaretechnik, Informatik oder Medieninformatik oder haben bereits ein Studium in diesen Bereichen absolviert. Von diesen Teilnehmern streben fünf einen Masterabschluss und sieben einen Bachelorabschluss an. Die meisten Teilnehmer trugen während des Ablaufs der Studie eine Brille. Nur ein Teilnehmer hatte zuvor noch keine Erfahrung mit Augmented Reality, Mixed Reality oder Virtual Reality. Viele Teilnehmer haben bereits Erfahrungen mit der Microsoft HoloLens gesammelt. Auch gab es einige, die sowohl Erfahrungen mit der Oculus Rift Virtual Reality Brille als auch mit den Windows Mixed Reality Headsets gesammelt haben. Regelmäßig haben jedoch nur zwei von zwölf Teilnehmern Augmented Reality, Virtual Reality oder Mixed Reality Geräte genutzt.

### 6.4. Ausrüstung

Die Studie wurde in einem Raum durchgeführt, in dem sich die Teilnehmer frei bewegen konnten. Die Studie selbst wurde hauptsächlich im Sitzen durchgeführt. Zudem wurde auf eine störungsfreie Umgebung geachtet. Die Microsoft HoloLens mit eingebautem Eyetracker von Pupil Labs stand zur

Verfügung. Sowie ein Klicker, der speziell für die HoloLens entworfen wurde. Zudem stand ein Rechner zur Verfügung auf welchem die Anwendung gestartet wurde, damit diese auf der HoloLens ausgeführt werden konnte.

## **6.5. Ablauf**

Die Teilnehmer erhielten zunächst eine Aufwandsentschädigung von 10 Euro und bestätigten den Erhalt mit ihrer Unterschrift. Anschließend wurde ihnen der Studienablauf geschildert, der wie folgt war: Im ersten Schritt mussten die Teilnehmer nach dem erfolgreichen Aufsetzen der HoloLens eine Kalibrierung der HoloLens durchführen. Daraufhin wurde die Anwendung gestartet. Nach dem Start der Anwendung wurden die Teilnehmer dazu aufgefordert, eine Kalibrierung der Eyetracker durchzuführen. Bei einer gelungenen Kalibrierung konnten die Teilnehmer das Menü des Prototyps sehen. Nun durften die Probanden die verschiedenen Interaktionsmethoden testen. Je nach Interaktionsmethode mussten die Teilnehmer eine erneute Kalibrierung der Eyetracker durchführen. Für jeden Probanden war die Reihenfolge, in der sie die Interaktionsmethoden getestet haben unterschiedlich.

Die Teilnehmer wurden nach der Ausführung der einzelnen Funktionen, bezüglich der Bedienung dieser Funktionen befragt. Der Fragebogen hierfür lässt sich im Anhang A.3 finden. Diese Fragen wurden für jede der getesteten Interaktionsmethoden gestellt. Als den Probanden der Studienablauf erklärt wurde, haben jene auch die Einverständniserklärung unterzeichnet. Hierbei wurden die Teilnehmer vor der Unterzeichnung über die möglichen Risiken einer Augenbeschädigung aufgrund der Infrarotbestrahlung, welche durch die Verwendung der Eyetracker hervorgerufen wird, belehrt. Nach Abschluss der Studie durften die Probanden einen Fragebogen bezüglich der Nutzung des Prototyps und der verschiedenen Interaktionsmethoden im Allgemeinen ausfüllen.



## 7. Evaluation

Basierend auf der Vorarbeit von Groß et al. [GBR+19] und einigen Annahmen, die während der Implementierung des Prototyps zustande gekommen sind, wurden folgende Hypothesen aufgestellt.

### 7.1. Hypothesen

- **H1:** Das Eyetracking ist für das Anvisieren von virtuellen Objekten am besten geeignet.
- **H2:** Der Klicker ist für das Selektieren von virtuellen Objekten am besten geeignet.
- **H3:** Das visuelle Feedback, das von den virtuellen Objekten zurückgegeben wird, ist intuitiv.
- **H4:** Die Translation und die Skalierung der virtuellen Objekte ist im Gegensatz zur Rotation intuitiver.
- **H5:** Die freie Rotation wird der Rotation mit Tool bevorzugt.

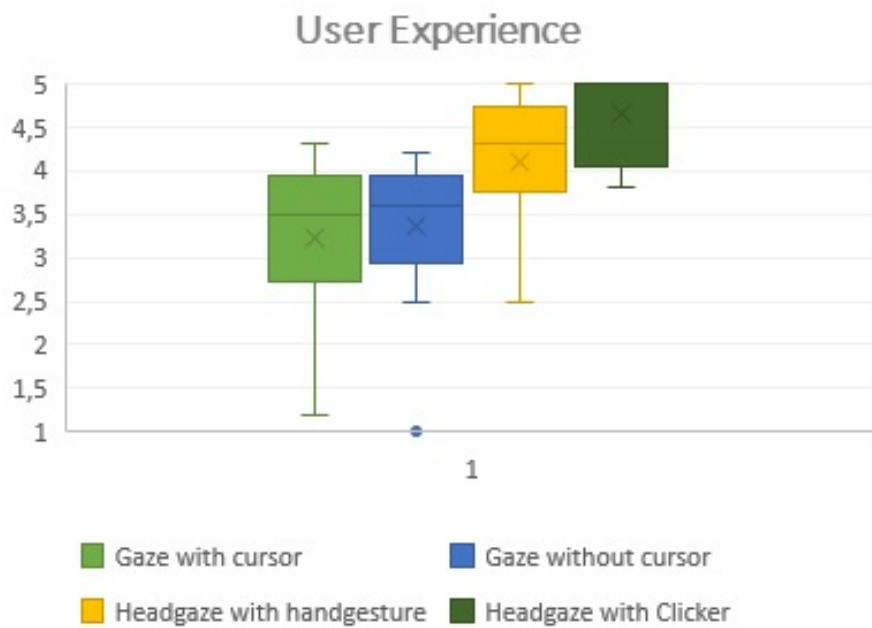
Diese Hypothesen lassen sich mithilfe der Ergebnisse, die aus der Benutzerstudie gewonnen wurden, auswerten.

Für die Auswertung wurden die ausgefüllten Fragebögen der Teilnehmer verwendet. Diese sind im Anhang A.3 zu finden.

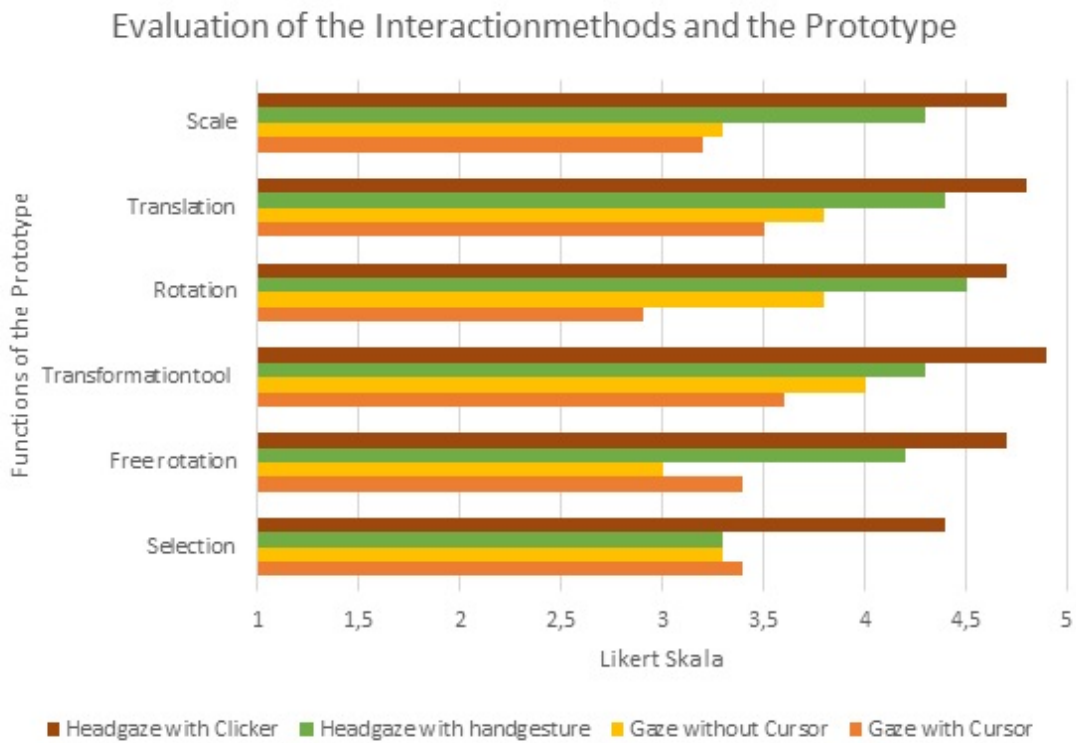
### 7.2. Auswertungen

Durch die Auswertung des Fragebogens im Anhang A.3 Abbildung A.6 können Aussagen zu der User Experience und zu den Funktionen des Prototyps getroffen werden. Abbildung 7.1a zeigt die User Experience der einzelnen Interaktionsmethoden anhand eines Boxplot Diagramms. Der Fragebogen wurde anhand der Likert Skala bewertet. Für die Berechnung der User Experience wurde daher die in Kapitel 6 genannte Auswertungsalternative genutzt. Um ein einheitliches Ergebnis zu erhalten, wurden die positiv ausgerichteten Aussagen des Fragebogens negativ invertiert.

Auf der Abbildung 7.1a ist zu erkennen, dass die User Experience der Teilnehmer bei der Nutzung der Interaktionsmethode Headgaze mit Klicker am besten abgeschnitten hat. Der Durchschnittswert liegt hier bei 4,7. Besonders auffällig ist, dass die obere Grenze des Boxplots und der Median übereinstimmen. Beide Werte liegen exakt auf 5. Zudem lässt sich im Vergleich zu den anderen Interaktionsmethoden feststellen, dass der Wertebereich sich ausschließlich zwischen 4 und 5 aufhält. Eine große Variation im Wertebereich lässt sich bei der Interaktionsmethode Eye-Gaze mit Cursor finden. Der Bereich erstreckt sich von 1,2 bis 4,3. Im Durchschnitt liegt der Wert für diese



(a)



(b)

**Abbildung 7.1.:** In a) ist die User Experience bei der Verwendung des Prototyps mit unterschiedlichen Interaktionsmethoden zu erkennen. b) zeigt die Bewertung der einzelnen Funktionen für jede Interaktionsmethode.

Interaktionsmethode bei 3,2 und wurde im Vergleich zu den anderen Methoden am schlechtesten bewertet. Der Median der einzelnen Interaktionsmethoden liegt immer über dem Mittelwert, dies deutet auf eine nicht gleichmäßige Verteilung hin.

Bei der Betrachtung des Boxplotdiagramms fällt ein Ausreißer auf dem Wert 1 bei der Interaktionsmethode Eye-Gaze ohne Cursor auf. Dieser Ausreißer ist die Ursache einer fehlgeschlagenen Kalibrierung der Eyetracker. Bei einem Teilnehmer konnte der die Interaktionsmethode Eye-Gaze mit Cursor nicht getestet werden und bei dem anderen Teilnehmer war es nicht möglich, die Interaktionsmethode Eye-Gaze ohne Cursor zu testen. Aufgrund dessen wurden die beiden Interaktionsmethoden für die jeweiligen Teilnehmer maximal negativ bewertet. In diesem Fall lagen bei der Auswertung die Werte für jede der Aussagen im Fragebogen aus Abbildung A.6 auf dem Wert 1.

Im Anhang A.1 ist in Abbildung A.1 dasselbe Diagramm für die User Experience zu sehen wie in Abbildung 7.1a. Jedoch wurden bei der Auswertung für das Diagramm in Abbildung A.1 die obengenannten Teilnehmer ausgeschlossen. Es ist kein großer Unterschied bei der Bewertung der Interaktionsmethoden zu erkennen. Die Interaktionsmethode Headgaze mit Klicker ist noch immer an erster Stelle, was die User Experience betrifft und die Interaktionsmethode Eye-Gaze mit Cursor ist immer noch die am schlechtesten bewertete Methode. Es fällt auf, dass der Ausreißer bei der Interaktionsmethode Eye-Gaze ohne Cursor verschwunden ist und der Wertebereich bei der Interaktionsmethode Eye-Gaze ohne Cursor kleiner geworden ist.

Bei dem Vergleich der beiden Anvisierungstechniken Headgaze und Eye-Gaze fällt auf, dass die Anvisierung mit dem Headgaze im Allgemeinen nutzerfreundlicher war als die Anvisierung mit dem Eye-Gaze. Die Bewertung der beiden Methoden mit Eyegaze liegen im Durchschnitt ungefähr bei 3, während die Methoden mit dem Headgaze im Durchschnitt sogar über 4 liegen.

Das in Abbildung 7.1b zu sehende Diagramm zeigt die Bewertung der einzelnen Funktionen des Prototyps bei der Nutzung der verschiedenen Interaktionsmethoden. Hierfür wurde der Durchschnitt der Bewertung für die einzelnen Funktionen aus dem Fragebogen aus Abbildung A.6 berechnet. Wie schon auf Abbildung 7.1a zu erkennen war, wurden die Funktionen bei welchen die Interaktionsmethode Headgaze mit Klicker verwendet wurde, am besten bewertet. Auffällig ist, dass die Funktion Free Rotation bei der Interaktionsmethode Eye-Gaze ohne Cursor sehr schlecht bewertet wurde. Die Interaktionsmethode Eye-Gaze mit Cursor wurde hat in diesem Fall sogar besser abgeschnitten. Ein möglicher Grund hierfür kann das fehlende visuelle Feedback bei der Anvisierung der Deadzone sein. Dadurch, dass der Cursor in dieser Interaktionsmethode nicht sichtbar ist, hatte der Proband keinerlei visuellen Feedback erhalten, der ihm bestätigen konnte, ob sein Blick sich innerhalb der Deadzone befand oder nicht.

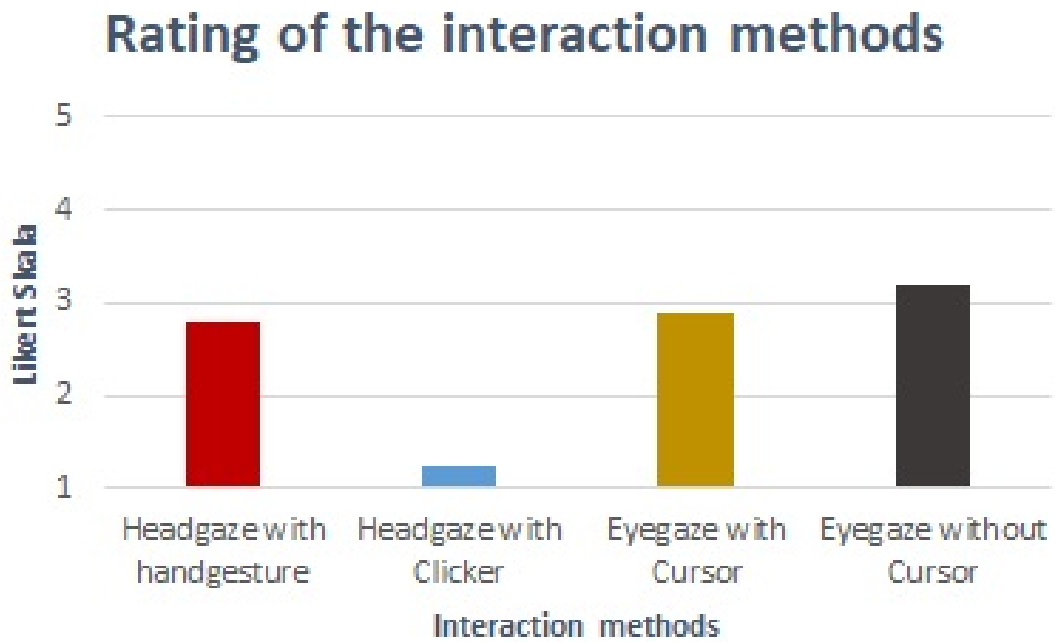
Ein weiterer Punkt der auffällt ist die Bewertung der Selektion. Im Vergleich zu den restlichen Funktionen, wurde die Selektion vor allem bei den Interaktionsmethoden Headgaze mit Handgesten, Eye-Gaze mit Cursor und Eye-Gaze ohne Cursor sehr schlecht bewertet. Gründe für die schlechte Bewertung der Selektion bei der Nutzung der Interaktion mit dem Eye-Gaze kann auf die schlechte Eyetracking Qualität zurückgeführt werden. Die Ursache für die schlechte Bewertung der Selektion bei der Nutzung des Headgaze mit den Handgesten, könnte möglicherweise darin liegen, dass die Probanden die Nutzung der Handgesten nicht gewohnt waren und sie nicht richtig Anwenden konnten. Eine weitere Ursache hierfür könnte jedoch auch darin liegen, dass die HoloLens nicht in der Lage war die Handgesten zu erkennen, obwohl sie richtig ausgeführt wurden.

In Abbildung A.2 ist das Diagramm erneut ohne die 2 Teilnehmer, dargestellt. Es fällt auf, dass bei der Bewertung der Funktion Selektion, die Interaktionsmethode mit Handgesten am schlechtesten abgeschnitten hat. Zudem wurde die Interaktionsmethode Eye-Gaze ohne Cursor bei der Funktion Skalierung etwas schlechter bewertet als die Interaktionsmethode Eye-Gaze mit Cursor. Ansonsten ist das meiste ähnlich zu den vorherigen Diagrammen mit leichten Änderungen bei der Bewertung, die jedoch bei der Betrachtung des Gesamtbilds nicht großartig auffallen.

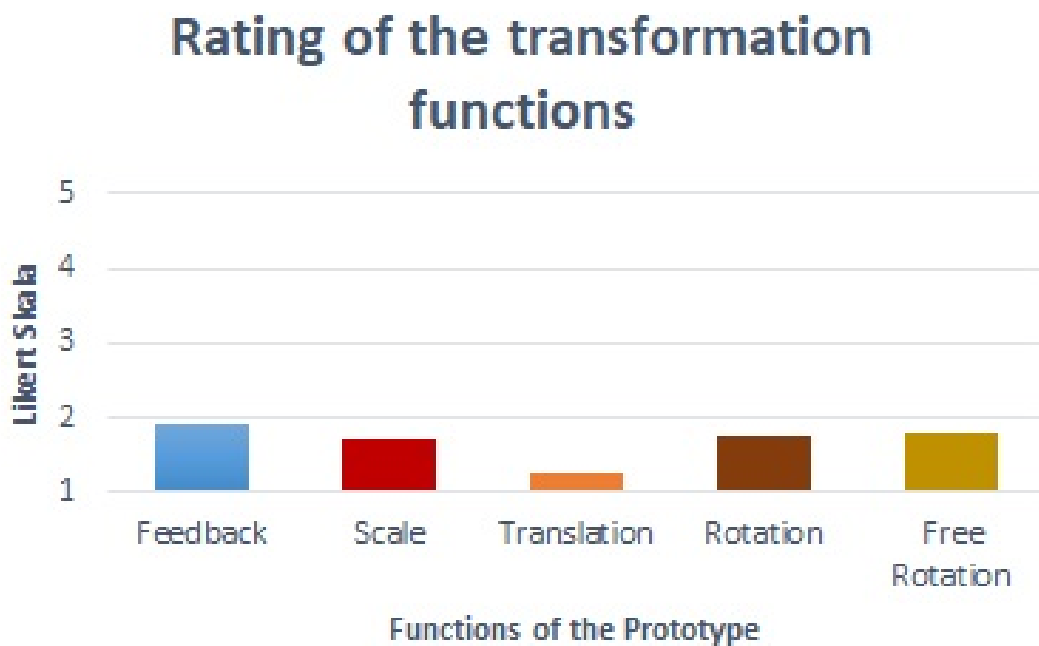
Das in Abbildung 7.2a dargestellte Diagramm, zeigt die Bewertung der einzelnen Interaktionsmethoden im Allgemeinen. Für die Auswertung wurde der Fragebogen aus Abbildung A.7 und Abbildung A.8 genutzt. Dieser wurde von den Probanden nach der Studie ausgefüllt. Es ist zu beachten, dass in diesem Teil des Fragebogens, niedrige Werte positiv und hohe Werte negativ sind. Wie auch schon bei der Auswertung des vorherigen Fragebogens aus Abbildung A.6 festgestellt wurde, haben die Probanden die Interaktion mit dem Headgaze und dem Klicker am besten bewertet. Im Durchschnitt liegt der Wert bei 1,25. Ein Unterschied zum vorherigen Diagramm liegt bei der Bewertung der Interaktionsmethoden Eye-Gaze mit Cursor und Eye-Gaze ohne Cursor. Hier wurde die Methode Eye-Gaze mit Cursor etwas besser bewertet als die Methode Eye-Gaze ohne Cursor. Bei dem Vergleich der Methoden Headgaze mit Handgeste und Eye-Gaze mit Cursor fällt auf, dass diese im Durchschnitt ungefähr gleich auf sind.

Weiterhin wurden die Teilnehmer gefragt, wie intuitiv sie die Nutzung der einzelnen Funktionen des Prototyps fanden. Das Diagramm in Abbildung 7.2b zeigt, dass die Nutzung der Funktionen im Allgemeinen sehr intuitiv gestaltet war. Am besten hat die Translationsfunktion des Prototyps abgeschnitten, diese wurde im Durchschnitt mit 1,25 bewertet. Das visuelle Feedback wurde als am wenigsten intuitiv bewertet. Der Wert liegt hier im Durchschnitt bei 1,9. Das in Abbildung 7.3a dargestellte Diagramm zeigt, welche Anvisierungsmethode die Probanden bevorzugt haben. Bis auf einen Teilnehmer hat der Rest der Probanden den Headgaze gewählt. Auf die Frage hin, welche Selektionsmethode die Probanden bevorzugen, hat wie in Abbildung 7.3b zu sehen, die Mehrheit den Klicker gewählt. Zum Abschluss durften die Probanden noch den NASA TLX ausfüllen. Dieser wurde, wie in Kapitel 6 beschrieben als Raw NASA TLX ausgewertet. Das Boxplot Diagramm auf Abbildung 7.4 zeigt die Bewertung der einzelnen Anforderungen. Im Durchschnitt wurden die physischen Anforderungen, der Aufwand und die Frustration am höchsten bewertet. Die Mittelwerte liegen bei diesen Anforderungen zwischen 12 und 14. Es sind zwei Ausreißer bei der Anforderung Aufwand zu sehen, die in entgegengesetzten Extrema liegen. Die Anforderungen Leistung, geistige Beanspruchung und zeitliche Beanspruchung wurden im Durchschnitt eher niedriger bewertet. An diesem Diagramm ist auch zu erkennen, dass keine Gleichverteilung vorliegt.





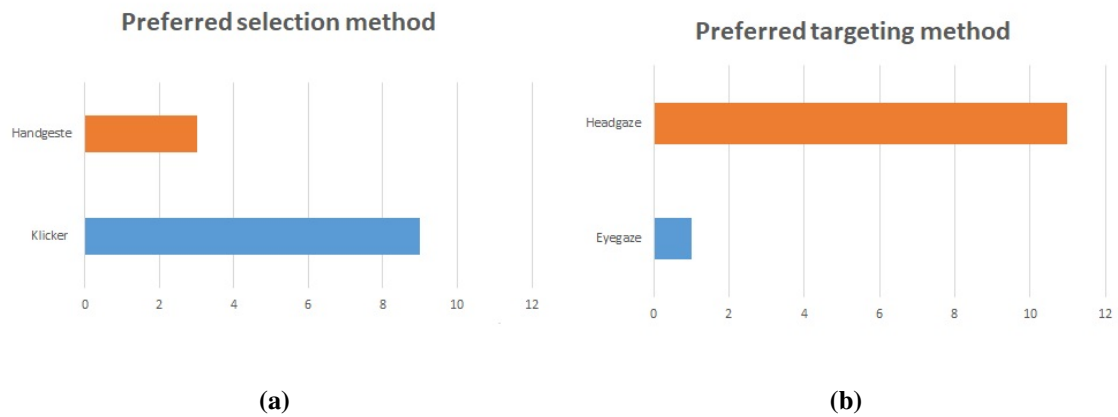
(a)



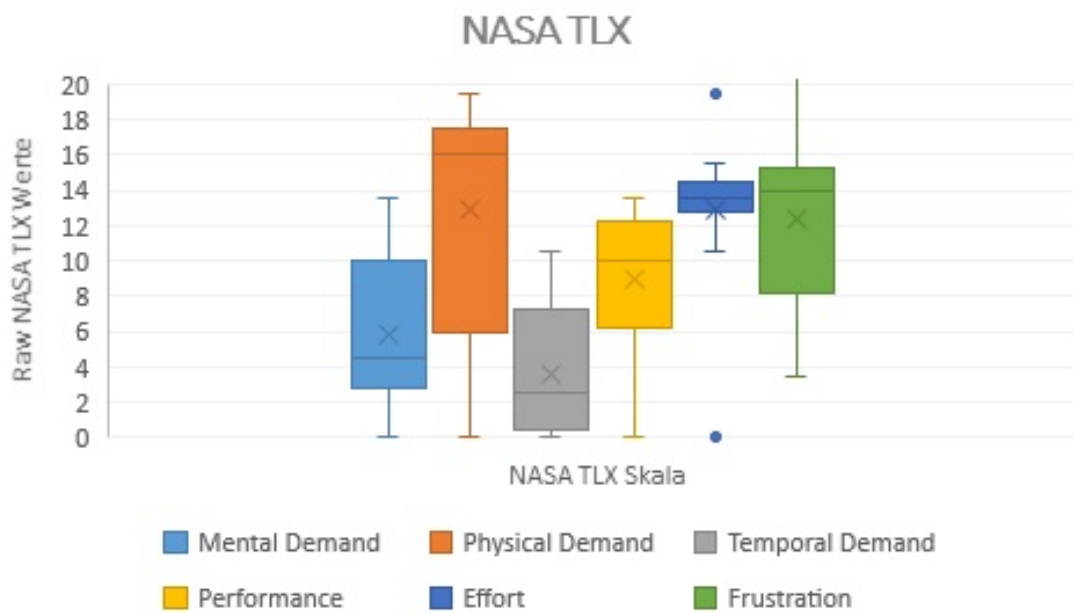
(b)

**Abbildung 7.2.:** In a) ist die Bewertung der einzelnen Interaktionsmethoden zu erkennen. b) zeigt die Bewertung der einzelnen Funktionen des Prototyps.

## 7. Evaluation



**Abbildung 7.3.:** a) zeigt auf welche Selektionsmethode von den Probanden bevorzugt wurde. In b) ist zu erkennen, welche Anvisierungstechnik favorisiert wurde.



**Abbildung 7.4.:** Hier ist die Auswertung des Raw NASA TLX zu sehen.

### 7.3. Beobachtungen

Die Teilnehmer wurden während des Ablaufs der Studie beobachtet. Schon zu Beginn der Studie ist aufgefallen, dass die Teilnehmer Schwierigkeiten hatten, die HoloLens aufzusetzen. Die größte Herausforderung hierbei war, die HoloLens so einzurichten, dass die Eyetracker die Augen des Probanden gut erkennen konnten. Die Durchführung der Kalibrierung auf der HoloLens sowie die Durchführung der Kalibrierung für die Eyetracker funktionierte problemlos.

Die Studie dauerte für jeden Teilnehmer im Durchschnitt ca. 1 Stunde. Hinsichtlich der Interaktionsmethoden hatten die meisten Probanden Schwierigkeiten bei den Interaktionsmethoden mit Eye-Gaze. Das größte Problem hierbei war die schlechte Kalibrierungsqualität der Eyetracker, wie in Kapitel 4 definiert, muss die Konfidenz des Pupillen detektionsalgorithmus über einen bestimmten Schwellwert liegen. Obwohl die Konfidenz für die Erkennung der Pupillen für jeden Teilnehmer über 90 Prozent lag, war es nicht möglich den Prototyp mit gut kalibrierten Eye-Gaze Punkt zu bedienen. In manchen Fällen wiesen die Eyetracker zu Beginn eine gute Kalibrierung auf, diese wurde jedoch mit der Zeit schlechter. Durch diese schlechte Kalibrierungsqualität, war es für die Teilnehmer sehr herausfordernd die einzelnen Bedienelemente des Prototyps anzuvisieren.

Bei den Interaktionsmethoden Eye-Gaze ohne Cursor empfanden einige Teilnehmer die Anvisierung der Bedienelemente angenehmer als mit Cursor. Dies kann darauf zurückzuführen sein, dass die Teilnehmer nicht die Möglichkeit hatten den Eye-Gaze Cursor anzuvisieren, der vor allem aufgrund der schlechten Eyetracking Qualität nicht immer dort aufgetaucht war, wo die Probanden hingeschaut haben. Zudem empfanden einige die Sichtbarkeit des Eye-Gaze Cursors irritierend, da dieser hektischen Bewegungen durchführt.

Ein weiterer Nachteil der sich während der Studie ergeben hat, war der Sitz der HoloLens auf dem Kopf des Probanden. Da die Teilnehmer die HoloLens so fest wie möglich an ihren Kopf anbringen mussten, traten bei vielen Teilnehmern aufgrund des hohen Drucks auf ihrem Kopf Schmerzen auf.

Am einfachsten waren die Interaktionsmethoden mit dem Headgaze. Die Interaktionsmethode Headgaze mit Klicker konnte von den meisten Teilnehmern am schnellsten durchgeführt werden. Bei der Interaktionsmethode Headgaze mit Handgeste konnten einige Teilnehmer die Handgeste nicht so ausführen, dass sie von der HoloLens auf Anhieb erkannt wurde. Erst nach mehreren Anläufen wurde die Handgeste der Teilnehmer von der HoloLens erkannt.

Im Allgemeinen konnten die Teilnehmer den Prototyp gut bedienen. Bei der Ausführung der Transformationen mit dem Transformationstool hatten einige zu Beginn Schwierigkeiten die Transformationen durchzuführen. Nach einer kurzen Erklärung der in Kapitel 5 definierten Zweischrittverifikation, konnten die Teilnehmer das Transformationstool problemlos bedienen. Auch für die Ausführung der freien Rotation musste den Teilnehmern zunächst die Bedienung der freien Rotation erklärt werden.

### 7.4. Diskussion

Aufgrund der mangelhaften Qualität der Eyetracker, die für die Microsoft HoloLens der ersten Generation verwendet werden, ist die Nutzungsqualität des Prototyps begrenzt. Wie in der Arbeit von Blattgerste et al. [BRP18] gezeigt wurde, stellt das Konzept des Eyetracking eine bessere Alternative zum Headgaze dar. Weil in dieser Arbeit kein stabiles Eyetracking gegeben ist, können die Interaktionsmethoden mittels Eyetracking nur eingeschränkt bewertet werden. Die Erkenntnisse, die mittels dieser Studie getroffen wurden, können als Wegweiser für zukünftige AR Entwicklungen verwendet werden, die für die Interaktion Eyetracking nutzen.

Die Abbildung 7.1a und Abbildung 7.2b zeigen, dass die absolute Mehrheit die Interaktionsmethode Headgaze mit Klicker bevorzugt. Bei dem Vergleich der Interaktionsmethoden mit Headgaze und mit Eye-Gaze fällt auf, dass die beiden Interaktionsmethoden, die den Headgaze verwenden, im Allgemeinen besser bewertet wurden, als die Methoden die den Eye-Gaze verwenden. Zudem hat die Mehrheit in Abbildung 7.3a den Headgaze als bevorzugte Anvisierungsmethode gewählt. Somit kann die H1 verworfen werden. Die Probanden wurden nach der Auswahl der Anvisierungsmethode gefragt, welche Entscheidung sie getroffen hätten, wenn die Stabilität des Eyetrackings gut gewesen wäre. Die Mehrheit hat anschließend für den Eye-Gaze gestimmt. Es ist zu erkennen, dass die Interaktion mit dem Eyetracking von der Mehrheit der Probanden gewünscht ist. Hierfür ist jedoch ein stabiler Eye-Gaze notwendig.

Die H2 lässt sich bestätigen. Die Abbildung 7.1a zeigt, dass hinsichtlich der User Experience die Interaktionsmethode Headgaze mit Handgeste im Durchschnitt schlechter bewertet worden ist, als die Methode Headgaze mit Klicker. Zudem ist in Abbildung 7.1b zu erkennen, dass bei der Funktion Selektion die Methode Headgaze mit Handgeste neben der Interaktionsmethode Eye-Gaze mit Cursor, mit am schlechtesten bewertet wurde. Abbildung 7.2a zeigt auf, dass die Probanden, die Interaktionsmethode Headgaze mit Handgesten im Vergleich zu der Interaktionsmethode Headgaze mit Klicker nicht so gut bewertet haben. Weiterhin wurde in Abbildung 7.3a die Selektionsmethode Klicker von den Meisten bevorzugt. Vermutlich bevorzugen die Teilnehmer den Klicker, da mit diesem die Selektion schneller ausgeführt werden kann. Die Handgesten erfordern die Haltung der Hand in einer strengen Position, damit diese von der HoloLens erkannt werden kann. Wird eine Interaktion für längere Zeit mit den Handgesten bedient, tauchen während der Interaktion Ermüdung im Armbereich auf. Dies wird auch als Gorilla-Effekt bezeichnet [HGMI14].

Bei der Betrachtung der Abbildung 7.2b ist zu erkennen, dass im Vergleich zu den anderen Funktionen des Prototyps das visuelle Feedback, das von den Objekten zurückgegeben wurde, am schlechtesten bewertet wurde. Wenn die Bewertung der einzelnen Funktionen im Allgemeinen betrachtet wird, ist zu erkennen, dass die Funktionen von gut bis sehr gut bewertet worden. Daher kann nicht davon ausgegangen werden, dass das visuelle Feedback nicht intuitiv war. Des Weiteren ist anzumerken, dass die Bedienung der Funktionen in Abbildung 7.1b bei der Nutzung des Headgaze mit Klicker hauptsächlich sehr gut bewertet wurden. Da für eine erfolgreiche Nutzung dieser Funktionen das visuelle Feedback eine bedeutende Rolle spielt, kann die Hypothese H3 nicht verworfen werden.

Abbildung 7.1b sind die einzelnen Bewertungen der Funktionen, je nach verwendeter Interaktionsmethode dargestellt. Es ist festzustellen, dass die Funktionen Rotation, Skalierung und Translation im Allgemeinen alle ähnlich bewertet wurden für jede einzelne Interaktionsmethode. Nur bei der Interaktionsmethode Eye-Gaze ohne Cursor wurde die Rotation etwas schlechter bewertet

als die übrigen Funktionen. In Abbildung 7.2b wurde die Translation am besten bewertet. Die Interaktionsmethode Skalierung wurde hier ausschließlich um 0,5 Punkte besser bewertet als die Rotation. Die Hypothese H4 wurde aufgestellt, da davon ausgegangen wurde, dass die Nutzung der Pfeile für die Translation und Skalierung eine bekannte Methode darstellen. Die Nutzung eines Rings für die Durchführung einer Manipulation ist primär nur aus speziellen 3D-Grafikanwendungen, wie zum Beispiel Maya, Blender etc. bekannt. Aufgrund der in den Auswertungen erhaltenen Ergebnisse kann die Hypothese H4 nicht verworfen werden.

Auch für die Hypothese H5 können erneut die Abbildung 7.1b und Abbildung 7.2b betrachtet werden. Es fällt auf, dass die beiden Funktionen Rotation und freie Rotation bei den Interaktionsmethoden mit Headgaze ähnlich bewertet wurden. Diese Funktionen wurden jedoch für die Interaktionsmethoden, die den Eye-Gaze verwenden unterschiedlich bewertet. Die freie Rotation wurde bei der Verwendung des Eye-Gaze mit Cursor besser bewertet als die Rotation. Aber bei der Interaktionsmethode Eye-Gaze ohne Cursor wurde die freie Rotation schlechter bewertet als die Rotation. Die Abbildung 7.2b zeigt auch keine großen Unterschiede bei der Bewertung der beiden Funktionen auf. Die freie Rotation ist, um 0,5 Punkte schlechter bewertet worden als die Rotation. Die Hypothese H5 kann somit nicht bestätigt werden. Die Nutzung der beiden Rotationstechniken stellte für die Mehrheit der Nutzer keine Probleme dar. Die Nutzung der freien Rotation war nach einer kurzen Erklärung der Bedienung für alle Probanden problemlos durchzuführen. Dasselbe gilt für die Rotation auf dem Tool. Hier wurde dem Probanden die Bedienung der Rotation kurz erklärt und die Rotation konnte problemlos durchgeführt werden.

Das Ergebnis der Studie zeigt, dass das genutzte Tool für die Manipulation, sowie die freie Rotation, eine Manipulation der Objekte mittels Eyetracking ermöglichen. Weiterhin ist zu bemerken, dass das visuelle Feedback, welches von den Elementen zurückgegeben wird, die Interaktion mit dem Prototyp vereinfacht. Die Studie zeigt außerdem, dass die Nutzung der Microsoft HoloLens im Alltag nicht ideal ist. Wie bei der Auswertung des NASA TLX in Abbildung 7.4 zu erkennen, ist die physische Beanspruchung sehr hoch. Das Gewicht der HoloLens, welches ca. bei einem halben Kilo liegt, ist nicht für längeres Tragen geeignet. Die Nutzung der HoloLens mit den binocular Add-ons erhöht die physische Beanspruchung, da hier aufgrund der starken Befestigung der HoloLens an den Kopf ein großer Druck auf dem Kopf ausgeübt wird.

Wie oben schon genannt, spielt die Qualität des Eyetracking eine große Rolle bei der Gestaltung der Interaktion mit Eyetracking. Um eine Interaktion mit dem Eye-Gaze zu ermöglichen muss die Stabilität des Eye-Gazes, gleichermaßen stabil zudem Headgaze sein. Um eine genaue Aussagekraft darüber zu erhalten, inwiefern der Eye-Gaze für die Interaktion besser ist als der Headgaze, muss die Studie daher mit einem besseren Eyetracker wiederholt werden.



## 8. Zusammenfassung und Ausblick

### Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Prototyp entwickelt, um die Interaktion in Augmented Reality mit Eyetracking und einem externen Controller zu ermöglichen. Hierfür wurde als Augmented Reality Gerät die Microsoft HoloLens und als externer Controller der Klicker verwendet. Für das Eyetracking wurde das Binocular Add-on von Pupil Labs verwendet. Die GUI vom Prototyp besteht aus einem Menü, welche verschiedene Funktionen bereitstellt.

Es ist möglich über das Menü verschiedene Objekte auszuwählen, die anschließend in der Szene auftauchen. Mit diesen Objekten können verschiedene Manipulationen durchgeführt werden. Die Funktionen freie Rotation und freie Translation können direkt über das Menü freigeschaltet werden, um die Manipulation des Objektes durchzuführen. Bei der freien Rotation ist es möglich das Objekt von allen Richtungen aus in den Mittelpunkt des Objektes zu rotieren. Die freie Translation ermöglicht das Verschieben des Objektes an der x-Achse. Das Menü stellt zudem die Aktivierung eines Transformationstools bereit. Dieses Tool kann die Manipulationen Rotation, Skalierung und Translation durchführen. Neben den einzelnen Funktionen zur Durchführung der Manipulationen wurde ein visuelles Feedback mit eingerichtet. Dieses unterstützt den Nutzer bei der Interaktion mit dem Prototyp.

Der entwickelte Prototyp wurde innerhalb einer Studie getestet. Hierbei wurden die Funktionen des Transformationstools und die freie Rotation für verschiedene Interaktionsmethoden getestet. Zu diesen Interaktionsmethoden gehört der Headgaze mit Klicker, der Headgaze mit Handgesten, der Eye-Gaze mit Cursor und der Eye-Gaze ohne Cursor. Basierend auf den entwickelten Prototyp wurden Hypothesen aufgestellt, die anschließend bestätigt oder verworfen wurden. Die Auswertung hat ergeben, dass die Mehrheit der Probanden die Interaktionsmethode Headgaze mit Klicker bevorzugt haben. Des Weiteren hat die Auswertung ergeben, dass die Bedienung der einzelnen Funktionen intuitiv gestaltet ist. Bei der Auswertung haben sich die Hypothesen H2 und H3 bestätigt. Die Hypothesen H1, H4 und H5 wurden verworfen.

### Ausblick

Die Interaktion mit dem Eye-Gaze wird in viele Bereichen der Mensch Computer Interaktion erfolgreich eingesetzt. Selbst die HoloLens 2, die schon bald auf den Markt kommen wird, unterstützt die Interaktion mittels Eye-Gaze. Für die Interaktion spielt die Stabilität des Eye-Gazes eine wichtige Rolle. In zukünftigen Arbeiten sollte, die Interaktion mittels Eye-Gaze, mit einem stabilen Eye-Gaze nochmals überprüft werden. Auch kann in Erwägung gezogen werden, die realen Objekte der Welt in die Interaktion mit einzubeziehen. So soll zum Beispiel beim Anvisieren von realen Objekten ein Feedback zurückgegeben werden können.

## 8. Zusammenfassung und Ausblick

---

Des Weiteren können weitere Interaktionsmöglichkeiten mit dem Eye-Gaze untersucht werden. Wie zum Beispiel Möglichkeiten bei denen der Eye-Gaze auch dazu genutzt werden kann, um Selektionen durchzuführen mithilfe von z.B der *dwell time*, dem Blinzeln oder durch die Nutzung von *Gaze Gestures*. Dies würde ermöglichen, dass der Nutzer, während der Interaktion mit der Augmented Reality Umgebung keinen Gebrauch von seinen Händen machen müsste. Auch kann die Ausführung von Texteingabe mithilfe von Eye-Gaze in Augmented Reality untersucht werden.



## Literaturverzeichnis

- [85] „Topological structural analysis of digitized binary images by border following“. In: *Computer Vision, Graphics, and Image Processing* 30.1 (1985), S. 32–46. ISSN: 0734-189X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0734-189X\(85\)90016-7](https://doi.org/10.1016/0734-189X(85)90016-7). URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0734189X85900167> (zitiert auf S. 25).
- [ABB+01] R. Azuma, Y. Baillet, R. Behringer, S. Feiner, S. Julier, B. MacIntyre. „Recent advances in augmented reality“. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 21.6 (Nov. 2001), S. 34–47. DOI: [10.1109/38.963459](https://doi.org/10.1109/38.963459) (zitiert auf S. 9, 12).
- [Azu97] R. T. Azuma. „A Survey of Augmented Reality“. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6.4 (1997), S. 355–385. DOI: [10.1162/pres.1997.6.4.355](https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355). eprint: <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>. URL: <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355> (zitiert auf S. 9).
- [BB14] N. Baur, J. Blasius. *Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung*. Wiesbaden: Springer VS, 2014. ISBN: 3531178091 9783531178097 9783531189390 3531189395. URL: [http://www.worldcat.org/search?qt=worldcat\\_org\\_all&q=9783531178097](http://www.worldcat.org/search?qt=worldcat_org_all&q=9783531178097) (zitiert auf S. 41).
- [BBa+16] Bach, Benjamin, D. and Raimund, Carpendale, Sheelagh, Dwyer, Tim, C. Christopher, Lee, Bongshin. „Immersive Analytics: Exploring Future Interaction and Visualization Technologies for Data Analytics“. In: Nov. 2016, S. 529–533. DOI: [10.1145/2992154.2996365](https://doi.org/10.1145/2992154.2996365) (zitiert auf S. 13).
- [Ber17] W. J. C. Bernard C. Kress. *Optical architecture of HoloLens mixed reality headset*. 2017. DOI: [10.1117/12.2270017](https://doi.org/10.1117/12.2270017). URL: <https://doi.org/10.1117/12.2270017> (zitiert auf S. 21).
- [BRP18] J. Blattgerste, P. Renner, T. Pfeiffer. „Advantages of Eye-gaze over Head-gaze-based Selection in Virtual and Augmented Reality Under Varying Field of Views“. In: *Proceedings of the Workshop on Communication by Gaze Interaction*. COGAIN '18. Warsaw, Poland: ACM, 2018, 1:1–1:9. ISBN: 978-1-4503-5790-6. DOI: [10.1145/3206343.3206349](https://doi.org/10.1145/3206343.3206349). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3206343.3206349> (zitiert auf S. 15, 19, 52).
- [But11] B. Butchart. *Augmented Reality for Smartphones*. English. UKOLN, University of Bath, März 2011 (zitiert auf S. 9).
- [CAN87] J. CANNY. „A Computational Approach to Edge Detection“. In: *Readings in Computer Vision*. Hrsg. von M. A. Fischler, O. Firschein. San Francisco (CA): Morgan Kaufmann, 1987, S. 184–203. ISBN: 978-0-08-051581-6. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-051581-6.50024-6>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080515816500246> (zitiert auf S. 25).

- [CB05] A. Cockburn, S. Brewster. „Multimodal feedback for the acquisition of small targets“. In: *Ergonomics* 48.9 (2005). PMID: 16251152, S. 1129–1150. DOI: [10.1080/00140130500197260](https://doi.org/10.1080/00140130500197260). eprint: <https://doi.org/10.1080/00140130500197260>. URL: <https://doi.org/10.1080/00140130500197260> (zitiert auf S. 16).
- [CCC+15] T. Chandler, M. Cordeil, T. Czauderna, T. Dwyer, J. Glowacki, C. Goncu, M. Klappers-tueck, K. Klein, F. Schreiber, E. Wilson. „Immersive Analytics“. In: *2015 big data visual analytics (BDVA 2015) : Hobart, Australia, 22-25 September 2015*. Piscataway, NJ: IEEE, 2015, S. 73–80. ISBN: 978-1-4673-7343-2. DOI: [10.1109/BDVA.2015.7314296](https://doi.org/10.1109/BDVA.2015.7314296) (zitiert auf S. 13).
- [CFA+11] J. Carmigniani, B. Furht, M. Anisetti, P. Ceravolo, E. Damiani, M. Ivkovic. „Augmented reality technologies, systems and applications“. In: *Multimedia Tools and Applications* 51.1 (Jan. 2011), S. 341–377. ISSN: 1573-7721. DOI: [10.1007/s11042-010-0660-6](https://doi.org/10.1007/s11042-010-0660-6). URL: <https://doi.org/10.1007/s11042-010-0660-6> (zitiert auf S. 12).
- [Cora] M. Corporation. *Microsoft HoloLens*. SZuletzt überprüft am 16.09.2019". URL: <https://www.bechtle.com/shop/medias/5a1430f79ce96955066d0b10.pdf?context=bWFzdGVyfHJvb3R8NjA0ODN8YXBwbGljYXRpb24vcGRmfGhlNC9oM2UvOTQ3MDY4ODYyNDY3MC5wZGZ8MmUwZjQ0YWMyYmUxMTk3MGE0MmJkNWQxNjI4NmU1MzFiN2Q2MDU4MDYxYjM0MmJiYjKzNzQ5NmY0Njc0YjJhZA> (zitiert auf S. 22).
- [Corb] M. Corporation. *MR Basics 100: Getting started with Unity*. SZuletzt überprüft am 16.09.2019". URL: <https://docs.microsoft.com/de-de/windows/mixed-reality/holograms-100> (zitiert auf S. 33).
- [Cor19] M. Corporation. *Gaze*. SZuletzt überprüft am 16.09.2019". 2019. URL: <https://docs.microsoft.com/de-de/windows/mixed-reality/gaze> (zitiert auf S. 10).
- [CSD93] C. Cruz-Neira, D.J. Sandin, T.A. DeFanti. „Surround-screen Projection-based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE“. In: *Proceedings of the 20th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques. SIGGRAPH '93*. Anaheim, CA: ACM, 1993, S. 135–142. ISBN: 0-89791-601-8. DOI: [10.1145/166117.166134](https://doi.org/10.1145/166117.166134). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/166117.166134> (zitiert auf S. 12).
- [DDD+14] C. Donalek, G. Djorgovski, S. Davidoff, A. Cioc, A. Wang, G. Longo, J. S. Norris, J. Zhang, E. Lawler, S. Yeh, A. Mahabal, M. Graham, A. Drake. „Immersive and Collaborative Data Visualization Using Virtual Reality Platforms“. In: Okt. 2014. DOI: [10.1109/BigData.2014.7004282](https://doi.org/10.1109/BigData.2014.7004282) (zitiert auf S. 13).
- [DMI+18] T. Dwyer, K. Marriott, T. Isenberg, K. Klein, N. Riche, F. Schreiber, W. Stuerzlinger, B. H. Thomas. „Immersive Analytics: An Introduction“. In: *Immersive Analytics*. Hrsg. von K. Marriott, F. Schreiber, T. Dwyer, K. Klein, N. H. Riche, T. Itoh, W. Stuerzlinger, B. H. Thomas. Cham: Springer International Publishing, 2018, S. 1–23. ISBN: 978-3-030-01388-2. DOI: [10.1007/978-3-030-01388-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01388-2_1). URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-01388-2\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01388-2_1) (zitiert auf S. 13).
- [Dre10] H. Drewes. „Eye Gaze Tracking for Human Computer Interaction“. März 2010. URL: <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bvb:19-115914> (zitiert auf S. 10).

- [DS07] H. Drewes, A. Schmidt. „Interacting with the Computer Using Gaze Gestures“. In: *Proceedings of the 11th IFIP TC 13 International Conference on Human-computer Interaction - Volume Part II. INTERACT'07*. Rio de Janeiro, Brazil: Springer-Verlag, 2007, S. 475–488. ISBN: 3-540-74799-0, 978-3-540-74799-4. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1778331.1778385> (zitiert auf S. 15, 17).
- [DWD07] A. De Luca, R. Weiss, H. Drewes. „Evaluation of Eye-gaze Interaction Methods for Security Enhanced PIN-entry“. In: *Proceedings of the 19th Australasian Conference on Computer-Human Interaction: Entertaining User Interfaces. OZCHI '07*. Adelaide, Australia: ACM, 2007, S. 199–202. ISBN: 978-1-59593-872-5. DOI: [10.1145/1324892.1324932](https://doi.org/10.1145/1324892.1324932). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/1324892.1324932> (zitiert auf S. 15).
- [EMP+17] G. Evans, J. Miller, M. I. Pena, A. MacAllister, E. Winer. *Evaluating the Microsoft HoloLens through an Augmented Reality assembly application*. 2017. DOI: [10.1117/12.2262626](https://doi.org/10.1117/12.2262626). URL: <https://doi.org/10.1117/12.2262626> (zitiert auf S. 21).
- [EW07] C. Ehmke, S. Wilson. „Identifying Web Usability Problems from Eye-tracking Data“. In: *Proceedings of the 21st British HCI Group Annual Conference on People and Computers: HCI...But Not As We Know It - Volume 1. BCS-HCI '07*. University of Lancaster, United Kingdom: British Computer Society, 2007, S. 119–128. ISBN: 978-1-902505-94-7. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1531294.1531311> (zitiert auf S. 13, 14).
- [FLW12] L. Findlater, B. Lee, J. Wobbrock. „Beyond QWERTY: Augmenting Touch Screen Keyboards with Multi-touch Gestures for Non-alphanumeric Input“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems. CHI '12*. Austin, Texas, USA: ACM, 2012, S. 2679–2682. ISBN: 978-1-4503-1015-4. DOI: [10.1145/2207676.2208660](https://doi.org/10.1145/2207676.2208660). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2207676.2208660> (zitiert auf S. 16).
- [FMHS93] S. Feiner, B. MacIntyre, M. Haupt, E. Solomon. „Windows on the World: 2D Windows for 3D Augmented Reality“. In: *Proceedings of the 6th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology. UIST '93*. Atlanta, Georgia, USA: ACM, 1993, S. 145–155. ISBN: 0-89791-628-X. DOI: [10.1145/168642.168657](https://doi.org/10.1145/168642.168657). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/168642.168657> (zitiert auf S. 16).
- [FNT+13] A. Febretti, A. Nishimoto, T. Thigpen, J. Talandis, L. Long, J. D. Pirtle, T. Peterka, A. Verlo, M. Brown, D. Plepys, D. Sandin, L. Renambot, A. Johnson, J. Leigh. „CAVE2: A Hybrid Reality Environment for Immersive Simulation and Information Analysis“. In: *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering* 8649 (März 2013), S. 03–. DOI: [10.1117/12.2005484](https://doi.org/10.1117/12.2005484) (zitiert auf S. 13).
- [GBR+19] A. Groß, M. Becher, G. Reina, T. Ertl, M. Krone. „A User Interaction Design for Object Manipulation via Eye Tracking in Virtual Reality“. In: *Workshop on Novel Input Devices and Interaction Techniques (NIDIT)* (2019) (zitiert auf S. 18, 37, 45).
- [Gmb] P.L. GmbH. *Getting Started*. SZuletzt überprüft am 16.09.2019". URL: <https://docs.pupil-labs.com/#getting-started> (zitiert auf S. 25).

- [HAN+18] M. G. Hanna, I. Ahmed, J. Nine, S. Prajapati, L. Pantanowitz. „Augmented Reality Technology Using Microsoft HoloLens in Anatomic Pathology“. In: *Archives of Pathology & Laboratory Medicine* 142.5 (2018). PMID: 29384690, S. 638–644. DOI: 10.5858/arpa.2017-0189-0A. eprint: <https://doi.org/10.5858/arpa.2017-0189-0A>. URL: <https://doi.org/10.5858/arpa.2017-0189-0A> (zitiert auf S. 21, 22).
- [Har06] S. G. Hart. „Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later“. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 50.9 (2006), S. 904–908. DOI: 10.1177/154193120605000909. eprint: <https://doi.org/10.1177/154193120605000909>. URL: <https://doi.org/10.1177/154193120605000909> (zitiert auf S. 42).
- [Har86] S. G. Hart. „NASA Task load Index (TLX). Volume 1.0; Paper and pencil package“. In: (1986) (zitiert auf S. 42).
- [HGMI14] J. D. Hincapié-Ramos, X. Guo, P. Moghadasian, P. Irani. „Consumed Endurance: A Metric to Quantify Arm Fatigue of Mid-air Interactions“. In: *Proceedings of the 32Nd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '14. Toronto, Ontario, Canada: ACM, 2014, S. 1063–1072. ISBN: 978-1-4503-2473-1. DOI: 10.1145/2556288.2557130. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2556288.2557130> (zitiert auf S. 52).
- [Jac90] R. J. K. Jacob. „What You Look at is What You Get: Eye Movement-based Interaction Techniques“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '90. Seattle, Washington, USA: ACM, 1990, S. 11–18. ISBN: 0-201-50932-6. DOI: 10.1145/97243.97246. URL: <http://doi.acm.org/10.1145/97243.97246> (zitiert auf S. 15).
- [JCH04] A. J. Hornof, A. Cavender, R. Hoselton. „EyeDraw: a system for drawing pictures with the eyes.“ In: Jan. 2004, S. 1251–1254. DOI: 10.1145/985921.986036 (zitiert auf S. 14).
- [JK03] R. J. Jacob, K. S. Karn. „Commentary on Section 4 - Eye Tracking in Human-Computer Interaction and Usability Research: Ready to Deliver the Promises“. In: *The Mind's Eye*. Hrsg. von J. Hyönä, R. Radach, H. Deubel. Amsterdam: North-Holland, 2003, S. 573–605. ISBN: 978-0-444-51020-4. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-044451020-4/50031-1>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780444510204500311> (zitiert auf S. 15).
- [KPB14] M. Kassner, W. Patera, A. Bulling. „Pupil: An Open Source Platform for Pervasive Eye Tracking and Mobile Gaze-based Interaction“. In: (Apr. 2014). arXiv: 1405.0006 [cs-cv]. URL: <http://arxiv.org/abs/1405.0006> (zitiert auf S. 25).
- [Lab] P. Labs. *Developer Documentation*. SZuletzt überprüft am 16.09.2019". URL: <https://github.com/pupil-labs/hmd-eyes/blob/034a3c613cee7cd725c49189944229d7bb7120fe/docs/Developer.md> (zitiert auf S. 27, 34).
- [LDZS18] Y. Liu, H. Dong, L. Zhang, A. E. Saddik. „Technical Evaluation of HoloLens for Multimedia: A First Look“. In: *IEEE MultiMedia* 25.4 (Okt. 2018), S. 8–18. ISSN: 1070-986X. DOI: 10.1109/MMUL.2018.2873473 (zitiert auf S. 22).

- [LJC11] S. Lee, Jae-Young Lee, J. Choi. „Design and implementation of an interactive HMD for wearable AR system“. In: *2011 17th Korea-Japan Joint Workshop on Frontiers of Computer Vision (FCV)*. Feb. 2011, S. 1–6. DOI: [10.1109/FCV.2011.5739727](https://doi.org/10.1109/FCV.2011.5739727) (zitiert auf S. 18).
- [LPL+11] J. Lee, H. Park, S. Lee, T. Kim, J. Choi. „Design and Implementation of an Augmented Reality System Using Gaze Interaction“. In: *2011 International Conference on Information Science and Applications*. Apr. 2011, S. 1–8. DOI: [10.1109/ICISA.2011.5772406](https://doi.org/10.1109/ICISA.2011.5772406) (zitiert auf S. 17).
- [MB14] P. Majaranta, A. Bulling. „Eye Tracking and Eye-Based Human–Computer Interaction“. In: *Advances in Physiological Computing*. Hrsg. von S. H. Fairclough, K. Gilleade. London: Springer London, 2014, S. 39–65. ISBN: 978-1-4471-6392-3. DOI: [10.1007/978-1-4471-6392-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6392-3_3). URL: [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6392-3\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-6392-3_3) (zitiert auf S. 13, 14).
- [MH04] T. Moscovich, J. F. Hughes. „Navigating Documents with the Virtual Scroll Ring“. In: *Proceedings of the 17th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '04. Santa Fe, NM, USA: ACM, 2004, S. 57–60. ISBN: 1-58113-957-8. DOI: [10.1145/1029632.1029642](https://doi.org/10.1145/1029632.1029642). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/1029632.1029642> (zitiert auf S. 15, 16).
- [MK94] P. Milgram, F. Kishino. „A Taxonomy of Mixed Reality Visual Displays“. In: *IEICE Trans. Information Systems* vol. E77-D, no. 12 (Dez. 1994), S. 1321–1329 (zitiert auf S. 11, 12).
- [MMTH09] S. Martinez-Conde, S. L. Macknik, X. G. Troncoso, D. H. Hubel. „Microsaccades: a neurophysiological analysis“. In: *Trends in Neurosciences* 32.9 (2009), S. 463–475. ISSN: 0166-2236. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tins.2009.05.006>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166223609001076> (zitiert auf S. 14).
- [MS02] I. S. MacKenzie, R. W. Soukoreff. „Text Entry for Mobile Computing: Models and Methods, Theory and Practice“. In: *Human–Computer Interaction* 17.2-3 (2002), S. 147–198. DOI: [10.1080/07370024.2002.9667313](https://doi.org/10.1080/07370024.2002.9667313). eprint: <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/07370024.2002.9667313>. URL: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/07370024.2002.9667313> (zitiert auf S. 15, 16).
- [Muh15] M. A. Muhanna. „Virtual reality and the CAVE: Taxonomy, interaction challenges and research directions“. In: *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences* 27.3 (2015), S. 344–361. ISSN: 1319-1578. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jksuci.2014.03.023>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319157815000439> (zitiert auf S. 12, 13).
- [PACG14] K. Pfeuffer, J. Alexander, M. K. Chong, H. Gellersen. „Gaze-touch: Combining Gaze with Multi-touch for Interaction on the Same Surface“. In: *Proceedings of the 27th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '14. Honolulu, Hawaii, USA: ACM, 2014, S. 509–518. ISBN: 978-1-4503-3069-5. DOI: [10.1145/2642918.2647397](https://doi.org/10.1145/2642918.2647397). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2642918.2647397> (zitiert auf S. 17).
- [PB06] A. Poole, L. Ball. „Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Current status and future prospects“. In: Jan. 2006, S. 211–219 (zitiert auf S. 10, 14).



- [QT17] Y. Y. Qian, R. J. Teather. „The Eyes Don’T Have It: An Empirical Comparison of Head-based and Eye-based Selection in Virtual Reality“. In: *Proceedings of the 5th Symposium on Spatial User Interaction*. SUI ’17. Brighton, United Kingdom: ACM, 2017, S. 91–98. ISBN: 978-1-4503-5486-8. DOI: [10.1145/3131277.3132182](https://doi.org/10.1145/3131277.3132182). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3131277.3132182> (zitiert auf S. 18).
- [Roz13] D. Rozado. „Mouse and Keyboard Cursor Warping to Accelerate and Reduce the Effort of Routine HCI Input Tasks“. In: *IEEE Transactions on Human-Machine Systems* 43.5 (Sep. 2013), S. 487–493. ISSN: 2168-2291. DOI: [10.1109/THMS.2013.2281852](https://doi.org/10.1109/THMS.2013.2281852) (zitiert auf S. 15).
- [SA13] A. Sharma, P. Abrol. „Eye Gaze Techniques for Human Computer Interaction: A Research Survey“. In: 2013 (zitiert auf S. 13, 15).
- [SCTH67] R. M. Steinman, R. J. Cunitz, G. T. Timberlake, M. Herman. „Voluntary Control of Microsaccades during Maintained Monocular Fixation“. In: *Science* 155.3769 (1967), S. 1577–1579. ISSN: 0036-8075. DOI: [10.1126/science.155.3769.1577](https://doi.org/10.1126/science.155.3769.1577). eprint: <https://science.sciencemag.org/content/155/3769/1577.full.pdf>. URL: <https://science.sciencemag.org/content/155/3769/1577> (zitiert auf S. 14).
- [SD14] C. Sharma, S. K. Dubey. „Analysis of eye tracking techniques in usability and HCI perspective“. In: *2014 International Conference on Computing for Sustainable Global Development (INDIACom)*. März 2014, S. 607–612. DOI: [10.1109/IndiaCom.2014.6828034](https://doi.org/10.1109/IndiaCom.2014.6828034) (zitiert auf S. 14).
- [SG00] D. D. Salvucci, J. H. Goldberg. „Identifying Fixations and Saccades in Eye-tracking Protocols“. In: *Proceedings of the 2000 Symposium on Eye Tracking Research & Applications*. ETRA ’00. Palm Beach Gardens, Florida, USA: ACM, 2000, S. 71–78. ISBN: 1-58113-280-8. DOI: [10.1145/355017.355028](https://doi.org/10.1145/355017.355028). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/355017.355028> (zitiert auf S. 14).
- [SH16] D. Schmalstieg, T. Höllerer. *Augmented Reality - Principles and Practice*. English. United States: Addison-Wesley Professional, Juni 2016 (zitiert auf S. 11).
- [SJ00] L. E. Sibert, R. J. K. Jacob. „Evaluation of Eye Gaze Interaction“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI ’00. The Hague, The Netherlands: ACM, 2000, S. 281–288. ISBN: 1-58113-216-6. DOI: [10.1145/332040.332445](https://doi.org/10.1145/332040.332445). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/332040.332445> (zitiert auf S. 9).
- [SS98] A. Spink, T. Saracevic. „Human-computer interaction in information retrieval: nature and manifestations of feedback“. In: *Interacting with Computers* 10.3 (Juni 1998), S. 249–267. ISSN: 0953-5438. DOI: [10.1016/S0953-5438\(98\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0953-5438(98)00009-5). eprint: <http://oup.prod.sis.lan/iwc/article-pdf/10/3/249/2037508/iwc10-0249.pdf>. URL: [https://doi.org/10.1016/S0953-5438\(98\)00009-5](https://doi.org/10.1016/S0953-5438(98)00009-5) (zitiert auf S. 16).
- [Tay16] A. G. Taylor. *Develop Microsoft HoloLens Apps Now*. 1st. Berkely, CA, USA: Apress, 2016. ISBN: 1484222016, 9781484222010 (zitiert auf S. 21, 22).
- [Teca] U. Technologies. *Camera.ViewportToWorldPoint*. SZuletzt überprüft am 16.09.2019". URL: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Camera.ViewportToWorldPoint.html> (zitiert auf S. 34).

- [Techb] U. Technologies. *Creating and Using Scripts*. SZuletzt überprüft am 16.09.2019". URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/CreatingAndUsingScripts.html> (zitiert auf S. 25).
- [Tecc] U. Technologies. *GameObject*. SZuletzt überprüft am 16.09.2019". URL: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/GameObject.html> (zitiert auf S. 22).
- [Tecd] U. Technologies. *Time.deltaTime*. SZuletzt überprüft am 16.09.2019". URL: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Time-deltaTime.html> (zitiert auf S. 37).
- [Tece] U. Technologies. *Unity wird immersiv-mit Windows Mixed Reality*. SZuletzt überprüft am 16.09.2019". URL: <https://unity3d.com/de/partners/microsoft/mixed-reality> (zitiert auf S. 22).
- [Tec19a] U. Technologies. *Prefabs*. SZuletzt überprüft am 16.09.2019". 2019. URL: <https://docs.unity3d.com/Manual/Prefabs.html> (zitiert auf S. 23).
- [Tec19b] U. Technologies. *Unity Documentation*. 2019. URL: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Camera.ViewportPointToRay.html> (zitiert auf S. 34).
- [Tec19c] U. Technologies. *Unity Documentation*. SZuletzt überprüft am 16.09.2019". 2019. URL: <https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Physics.Raycast.html> (zitiert auf S. 34).
- [Tri12] P. Trillenber. „Elektrookulographie“. In: *Das Neurophysiologie-Labor* 34.3 (2012), S. 98–106. ISSN: 1439-4847. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neulab.2012.08.002>. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1439484712000269> (zitiert auf S. 14).
- [Van07] R. Van Krevelen. *Augmented Reality: Technologies, Applications, and Limitations*. Apr. 2007. DOI: [10.13140/RG.2.1.1874.7929](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1874.7929) (zitiert auf S. 12).
- [VPBG13] M. Vidal, K. Pfeuffer, A. Bulling, H. W. Gellersen. „Pursuits: Eye-based Interaction with Moving Targets“. In: *CHI '13 Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*. CHI EA '13. Paris, France: ACM, 2013, S. 3147–3150. ISBN: 978-1-4503-1952-2. DOI: [10.1145/2468356.2479632](https://doi.org/10.1145/2468356.2479632). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/2468356.2479632> (zitiert auf S. 17).
- [Wil96] B. Wilson. *Constructivist Learning Environments: Case Studies in Instructional Design*. Educational Technology Publications, 1996. ISBN: 9780877782902. URL: <https://books.google.de/books?id=mpsHa5f712wC> (zitiert auf S. 13).
- [WM87] C. Ware, H. H. Mikaelian. „An Evaluation of an Eye Tracker As a Device for Computer Input2“. In: *Proceedings of the SIGCHI/GI Conference on Human Factors in Computing Systems and Graphics Interface*. CHI '87. Toronto, Ontario, Canada: ACM, 1987, S. 183–188. ISBN: 0-89791-213-6. DOI: [10.1145/29933.275627](https://doi.org/10.1145/29933.275627). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/29933.275627> (zitiert auf S. 15).
- [YGY+17] C. Yu, Y. Gu, Z. Yang, X. Yi, H. Luo, Y. Shi. „Tap, Dwell or Gesture?: Exploring Head-Based Text Entry Techniques for HMDs“. In: *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. Denver, Colorado, USA: ACM, 2017, S. 4479–4488. ISBN: 978-1-4503-4655-9. DOI: [10.1145/3025453.3025964](https://doi.org/10.1145/3025453.3025964). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/3025453.3025964> (zitiert auf S. 16).

- [YT09] K. Yatani, K. N. Truong. „SemFeel: A User Interface with Semantic Tactile Feedback for Mobile Touch-screen Devices“. In: *Proceedings of the 22Nd Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. UIST '09. Victoria, BC, Canada: ACM, 2009, S. 111–120. ISBN: 978-1-60558-745-5. DOI: [10.1145/1622176.1622198](https://doi.org/10.1145/1622176.1622198). URL: <http://doi.acm.org/10.1145/1622176.1622198> (zitiert auf S. 15).
- [ZDB08] F. Zhou, H. B.-L. Duh, M. Billinghurst. „Trends in Augmented Reality Tracking, Interaction and Display: A Review of Ten Years of ISMAR“. In: *Proceedings of the 7th IEEE/ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality*. ISMAR '08. Washington, DC, USA: IEEE Computer Society, 2008, S. 193–202. ISBN: 978-1-4244-2840-3. DOI: [10.1109/ISMAR.2008.4637362](https://doi.org/10.1109/ISMAR.2008.4637362). URL: <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2008.4637362> (zitiert auf S. 9).

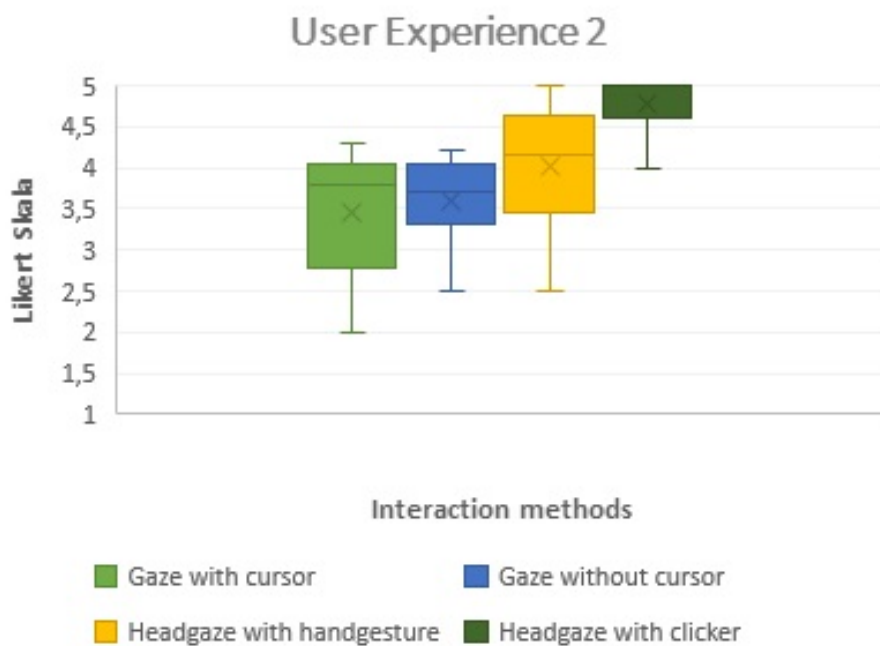
Alle URLs wurden zuletzt am 16. 09. 2019 geprüft.



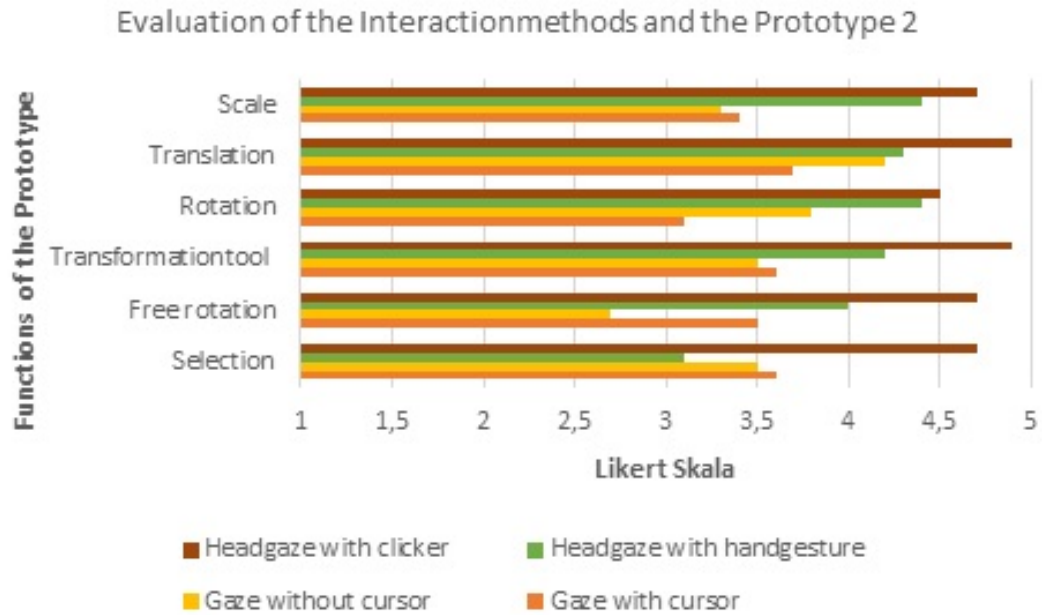
# A. Anhang

## A.1. Diagramme

In diesem Abschnitt sind die Diagramme für die User Experience (Abbildung 7.1a) und die Evaluation der einzelnen Interaktionsmethoden des Prototyps (Abbildung 7.1b) aus Kapitel 7 nochmal ausgeführt. Diesmal wurden die Daten der zwei Probanden, bei welchen das Eyetracking versagt hatte, aus der Auswertung entzogen.



**Abbildung A.1.:** Die User Experience der Probanden gemessen an der Likert Skala ohne die Betrachtung der Daten von zwei Probanden.



**Abbildung A.2.:** Bewertung der einzelnen Funktionen des Prototyps mit den verschiedenen Interaktionsmethoden anhand der Likert Skala. Die Daten von zwei Probanden wurden in der Auswertung nicht betrachtet.

## A.2. Einverständniserklärung



Universität Stuttgart • VISUS • Allmandring 19 • 70569 Stuttgart

### Information und Einverständniserklärung zur Teilnahme an der Forschungsstudie „Benutzerinteraktion in Augmented Reality via Eyetracking“

Liebe(r) Studieninteressent/in,

wir laden Sie ein, an folgender Studie im Rahmen unserer Forschung des Sonderforschungsbereichs/ Transregio 161 teilzunehmen. Wir untersuchen verschiedene Interaktionsmethoden in Augmented Reality mit Eyetracking. In unserer aktuellen Studie, „**Benutzerinteraktion in Augmented Reality via Eyetracking**“, werden Sie verschiedene Interaktionsmethoden mit Eyetracking in Augmented Reality untersuchen. Die Studie dient dazu verschiedene Interaktionsmethoden in Augmented Reality miteinander zu vergleichen und zu bewerten.

#### Studienablauf

In dieser Studie werden Sie verschiedene Interaktionsmethoden mit der Hololens durchführen.

1.Schritt: Durchführung der Kalibration.

Hierfür werden Sie zunächst gebeten, eine Kalibration der Hololens durchzuführen, anschließend wird das Programm gestartet und Sie werden dazu aufgefordert, die Kalibration der Eyetracker durchzuführen.

2.Schritt: Test der Interaktionsmethoden.

Verschiedene Interaktionsmethoden werden von Ihnen mit der Hololens getestet. Je nach Interaktionsmethode, wird von Ihnen gefordert eine erneute Kalibrierung der Eyetracker durchzuführen.

Während der Interaktion, werden Ihnen einige Fragen zur Interaktionsmethode gestellt.

3.Schritt: Fragebogen ausfüllen.

Am Ende der Studie, werden Sie einen Fragebogen ausfüllen, in welchem Sie die genutzten Interaktionsmethoden bewerten können.

### Visualisierungsinstitut (VISUS)

#### Direktoren

Prof. Dr. Thomas Ertl  
Prof. Dr. Daniel Weiskopf

#### Ansprechpartner

Nils Rodrigues  
Michael Becher  
Jun.-Prof. Michael Sedlmair

#### Kontakt

Allmandring 19  
70569 Stuttgart  
T 0711 685-88634  
nils.rodrigues@visus.uni-stuttgart.de

www.visus.uni-stuttgart.de  
www.twitter.com/vis\_visus

09.09.2019



Seite 1



Abbildung A.3.: Der erste Teil der Einverständniserklärung.

**Weiterverarbeitung der aufgenommenen Daten**

Visualisierungsinstitut

Die Daten, die während der Studie aufgezeichnet werden, werden nur in anonymer Form gespeichert und können nicht auf eine bestimmte Person zurückgeführt werden. Die Daten werden zusammen mit den Ergebnissen anderer Versuchspersonen verarbeitet um gemittelte Werte zu erhalten, die dann statistisch ausgewertet und in wissenschaftlichen Zeitschriften oder Konferenzbeiträgen veröffentlicht werden. Sie stimmen der Nutzung und der Veröffentlichung Ihrer Daten für wissenschaftliche Zwecke zu. Diese Zustimmung kann jederzeit durch ein einfaches Schreiben widerrufen werden. Dabei müssen keine Gründe, die zu dieser Entscheidung beigetragen haben, genannt werden.

**Datenschutz**

Alle Angaben, die Rückschlüsse auf Ihre Person zulassen, werden von den MitarbeiterInnen des Projektes vollständig vertraulich behandelt, d.h. nicht an Dritte außerhalb des Forschungsprojekts weitergegeben oder veröffentlicht. Sollten Sie die Informationsweitergabe an Dritte wünschen, so geschieht dies ausschließlich auf Ihre schriftliche Veranlassung hin. Nur autorisierte MitarbeiterInnen haben Zugang zu dem erhobenen Datenmaterial. Die Computer auf denen solche personenbezogenen Daten gespeichert sind, sind mit dem Internet verbunden und speziell gegen unautorisierten Zugriff gesichert. Ein legaler Zugriff auf die Daten von außerhalb ist nicht möglich.

**Kosten und Aufwandsentschädigung**

Für die Teilnahme an der Studie entstehen Ihnen keine Kosten. Für Ihre Teilnahme erhalten sie eine pauschale Aufwandsentschädigung von 10 € (EUR) aus Mitteln des Sonderforschungsbereich/ Transregio 161.

**Risiken und Rechte**

Die Teilnahme an der Studie ist mit gewissen Risiken verbunden. Eine erhöhte Infrarotbestrahlung (Wärmestrahlung), die durch den Pupil Labs Eye-Tracker hervorgerufen wird, kann schädlich für die Augen sein. Es ist möglich, dass Sie während der Studie trockene Augen kriegen und deshalb häufiger Blinzeln müssen. Ihre Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Durch Ihre Einwilligung gehen Sie keinerlei Verpflichtungen ein. Sie können Ihre Einwilligung jederzeit widerrufen, ohne dass Ihnen ein rechtlicher Nachteil entsteht. Sie können die Studie jederzeit und ohne Angaben von Gründen abbrechen, ohne dass Ihnen ein rechtlicher Nachteil entsteht.

**Einverständniserklärung**

- Ich habe die vorausgehende Erklärung gelesen bzw. vorgelesen und übersetzt bekommen und verstanden.
- Ich wurde von dem Versuchsleiter über die Studie aufgeklärt und meine Fragen wurden für mich befriedigend und umfassend beantwortet.
- Ich weiß, dass Daten über meine Person nur anonym verarbeitet werden, und dass alle autorisierten ProjektmitarbeiterInnen, die Zugang zu Angaben und Daten zu meiner Person haben, unter Schweigepflicht stehen.
- Mir ist bekannt, dass die erhobenen Informationen auf Computern gespeichert und verarbeitet werden, die mit dem Internet verbunden sind.
- Ich nehme freiwillig an der Studie teil und weiß, dass ich die Teilnahme jederzeit abbrechen kann.

\_\_\_\_\_  
Nachname, Vorname

\_\_\_\_\_  
Ort, Datum und Unterschrift des Teilnehmers

\_\_\_\_\_  
Datum und Unterschrift des Versuchsleiters

**Vielen Dank für Ihre Teilnahme!**



**Abbildung A.4.:** Teil 2 der Einverständniserklärung.

### A.3. Fragebögen

ID:

## Questionnaire

(Personal data)

1. Gender :             Male                       Female                       Other
  
2. Age: \_\_\_\_\_
  
3. What is your highest educational level?
  - Higher education entrance qualification
  - Bachelor
  - Master
  - Diploma
  - Other \_\_\_\_\_
  
4. What subject did you/are you study/studying?  
\_\_\_\_\_
  
5. Which degree are you pursuing?
  - Bachelor
  - Master
  - State examination
  - Other \_\_\_\_\_
  
6. Are you wearing any visual aid?
  - No
  - Glasses
  - Contact lenses

**Abbildung A.5.:** Fragen bezüglich der Person.

## Questionnaire

(Interaction with gaze with cursor/Interaction with gaze without cursor/Interaction with Headgaze and Clicker/Interaction with Headgaze and handgesture)

| ID :  | Strongly agree<br>1 | Agree<br>2 | Neutral<br>3 | Disagree<br>4 | Strongly disagree<br>5 |
|---|---------------------|------------|--------------|---------------|------------------------|
| The selection process was problematic.  |                     |            |              |               |                        |
| The free rotation could be carried-out without any problems.                        |                     |            |              |               |                        |
| The various transformation tools on the box could be quickly targeted and selected. |                     |            |              |               |                        |
| The rotation at the different directions of the axis was problematic.               |                     |            |              |               |                        |
| The translation was problematic.  |                     |            |              |               |                        |
| The scaling was problematic.  |                     |            |              |               |                        |

Where there any other issues, during the interaction?

**Abbildung A.6.:** Fragen zu den einzelnen Funktionen des Prototypen. Dieser Fragebogen wurde für jede der einzelnen Interaktionsmethoden erneut ausgefüllt.

ID:

## Questionnaire (General)

### 1. Questions regarding the interaction design in general.

#### 1.1 Evaluate the individual interaction methods according to their ease of use.

|  | Strongly agree<br>1 | Agree<br>2 | Neutral<br>3 | Disagree<br>4 | Strongly disagree<br>5 |
|--|---------------------|------------|--------------|---------------|------------------------|
| The feedback returned from the selected objects was intuitive. |                     |            |              |               |                        |

|  | Strongly agree<br>1 | Agree<br>2 | Neutral<br>3 | Disagree<br>4 | Strongly disagree<br>5 |
|--|---------------------|------------|--------------|---------------|------------------------|
| The operation of the individual transformation tools was intuitive |                     |            |              |               |                        |
| Scale  |                     |            |              |               |                        |
| Translation  |                     |            |              |               |                        |
| Rotation   |                     |            |              |               |                        |
| Free Rotation  |                     |            |              |               |                        |

**Abbildung A.7.:** Allgemeiner Fragebogen zu der Bedienung des Prototypen. Bewertung der einzelnen Interaktionsmethoden.

ID:

## Questionnaire (General)

### 2. Questions on interaction methods in general.

2.1 How would you rate each of the interaction method ?

|                            | Very good<br>1 | Good<br>2 | Ok<br>3 | Bad<br>4 | Very bad<br>5 |
|----------------------------|----------------|-----------|---------|----------|---------------|
| Headgaze with hand gesture |                |           |         |          |               |
| Headgaze with clicker      |                |           |         |          |               |
| Gaze with cursor           |                |           |         |          |               |
| Gaze without cursor        |                |           |         |          |               |

2.2 Which selection method would you prefer?

- Clicker       Hand gesture

2.3 Which targeting method is better?

- Eyegaze       Headgaze

**Abbildung A.8.:** Teil 2 des allgemeinen Fragebogens.







### **Erklärung**

Ich versichere, diese Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen benutzt und alle wörtlich oder sinngemäß aus anderen Werken übernommene Aussagen als solche gekennzeichnet. Weder diese Arbeit noch wesentliche Teile daraus waren bisher Gegenstand eines anderen Prüfungsverfahrens. Ich habe diese Arbeit bisher weder teilweise noch vollständig veröffentlicht. Das elektronische Exemplar stimmt mit allen eingereichten Exemplaren überein.

---

Ort, Datum, Unterschrift