

Institut für Visualisierung und Interaktive Systeme

Universität Stuttgart  
Universitätsstraße 38  
D-70569 Stuttgart

Bachelorarbeit

## **Vergleich verschiedener Input Methoden aus Immersive Analytics**

Annalena Streichert

<b>Studiengang:</b>	Informatik
<b>Prüfer/in:</b>	Jun.-Prof. Dr. Michael Sedlmair
<b>Betreuer/in:</b>	Magdalena Schwarzl M.Sc., Katrín Angerbauer M.Sc.
<b>Beginn am:</b>	16. Mai 2019
<b>Beendet am:</b>	16. November 2019



## Kurzfassung

Die Technologien Virtual und Augmented Reality gewinnen zunehmend an Bedeutung und werden in vielen verschiedenen Anwendungsgebieten eingesetzt. Die Einsatzbereiche umfassen unter anderem die Forschung, die Automobil- und die Spieleindustrie. Daher wird es immer wichtiger, die passenden Eingabemethoden für die neuen Technologien bereitzustellen. Besonders im Hinblick auf den Bereich Immersive Analytics sind natürliche Interaktionen wichtig, um die Datenanalyse optimal zu unterstützen und ein immersives Nutzererlebnis zu schaffen.

In dieser Arbeit sollen fünf Eingabemethoden untersucht werden: Touch, Eyetracking, Leap Motion Controller, Headtracking und SenseGloves. Dafür wurde eine Anwendung entwickelt, in der mit den verschiedenen Eingabemethoden geometrische Formen nachgezeichnet werden können. Mit der entwickelten Anwendung wurde eine Nutzerstudie durchgeführt. In der Nutzerstudie wurden die Eingabemethoden hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit, Belastung, Genauigkeit und zur Eingabe benötigten Zeit, verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Eingabemethode einen signifikanten Einfluss auf diese gemessenen Variablen hat. Die Touch-Eingabe hat alle anderen Eingabemethoden hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit, Belastung und Genauigkeit übertroffen. Nur bei der benötigten Zeit hat die Eingabe durch Eyetracking am besten abgeschnitten. Die Ergebnisse können einen Ausgangspunkt für zukünftige Forschung in diesem Bereich bilden.

Mit den Erkenntnissen dieser Arbeit soll eine Auswahl der passenden Eingabemethoden für die verschiedenen Anwendungsgebiete ermöglicht werden. Außerdem können auf der Grundlage der Arbeit die existierenden Technologien weiterentwickelt werden, sodass die Eingabe den Bedürfnissen der Nutzer entspricht.





# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>15</b>
<b>2. Grundlagen</b>	<b>17</b>
2.1. Immersive Analytics . . . . .	17
2.2. Virtual Reality . . . . .	17
2.3. Augmented Reality . . . . .	17
<b>3. Verwandte Arbeiten</b>	<b>19</b>
3.1. Zeichnen durch Handgesten im 3D-Raum . . . . .	19
3.2. Interaktion mit der Maus in einer 3D Umgebung . . . . .	20
3.3. Eyetracking als Eingabemethode . . . . .	20
3.4. Touch-Eingabe . . . . .	21
3.5. Grundlagen für diese Arbeit . . . . .	22
<b>4. Verwendete Hard- und Software</b>	<b>23</b>
4.1. Unity Engine . . . . .	23
4.2. Apple iPad Air 2 . . . . .	23
4.3. Tobii Eye Tracker 4C . . . . .	23
4.4. Leap Motion Controller . . . . .	24
4.5. VIVE Tracker (2018) . . . . .	25
4.6. SenseGloves . . . . .	26
4.7. Computer und Bildschirm . . . . .	26
<b>5. Implementierung</b>	<b>27</b>
5.1. Architektur der Anwendung . . . . .	27
5.2. Berechnung der Abweichung . . . . .	28
5.3. Benutzerinterface und Navigation . . . . .	28
5.4. Zeichnen mit den Eingabegeräten . . . . .	29
<b>6. Benutzerstudie</b>	<b>31</b>
6.1. Methodik . . . . .	31
6.2. Apparat . . . . .	33
6.3. Ablauf . . . . .	33
6.4. Ergebnisse . . . . .	35
6.5. Einschränkungen . . . . .	44
<b>7. Diskussion</b>	<b>45</b>
7.1. Ergebnisse der Benutzerstudie . . . . .	45
7.2. Auswirkungen auf das Design . . . . .	50

<b>8. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>53</b>
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>55</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>59</b>

# Akronyme

**API** Application Programmer Interface

**AR** Augmented Reality

**DOF** Degrees of Freedom

**FOV** Field of View

**HMD** Head Mounted Displays

**IA** Immersive Analytics

**MCI** Mensch-Computer-Interaktion

**NASA TLX** Nasa Task Load Index

**PCCR** pupil centre corneal reflection

**SDK** Software Development Kit

**UI** User Interface

**VR** Virtual Reality



# Abbildungsverzeichnis

2.1. Reality-Virtuality-Continuum nach Milgram. Basierend auf [MTUK94]. . . . .	18
4.1. Aufnahmen des Studiensettings. . . . .	24
4.2. Visualisierung von einer (a) Realen (durch Infrarot aufgenommenen) und (b) Schematischen Ansicht des Leap Motion Controllers [WBRF13]. . . . .	25
4.3. Aufnahme der getragenen SenseGloves mit den befestigten VIVE Trackern von der Seite und von oben. . . . .	26
5.1. Aufbau der Anwendung . . . . .	27
5.2. Screenshots der Anwendung . . . . .	28
5.3. Aufnahmen der getragenen SenseGloves a in der Ausgangsposition und b in der Zeichenposition. . . . .	30
6.1. Erfahrung der Teilnehmer mit den Eingabemethoden . . . . .	32
6.2. Screenshots der Formen, die in der Studie mit den Eingabegeräten nachgezeichnet werden. . . . .	32
6.3. Studienablauf . . . . .	33
6.4. Ergebnisse für „ <i>Ich würde die Eingabemethode gerne regelmäßig nutzen.</i> “ von „Stimme überhaupt nicht zu“(1) nach „Stimme voll und ganz zu“(5). . . . .	35
6.5. Ergebnisse für „ <i>Ich konnte die Form mithilfe der Eingabemethode akkurat nachzeichnen.</i> “ von „Stimme überhaupt nicht zu“(1) nach „Stimme voll und ganz zu“(5). . . . .	36
6.6. Ergebnisse für „ <i>Mir hat es gefallen, die Eingabemethode zu nutzen.</i> “ von „Stimme überhaupt nicht zu“(1) nach „Stimme voll und ganz zu“(5). . . . .	37
6.7. Ergebnisse für die Gesamtbelastung nach dem NASA TLX. . . . .	41
6.8. Aufgezeichnete Abweichung für jede Eingabemethode. . . . .	42
6.9. Zum Zeichnen benötigte Zeit in Sekunden für jede Eingabemethode. . . . .	43
6.10. Korrelation zwischen der gemessenen Abweichung und der zum Zeichnen benötigten Zeit in Sekunden für jeden Teilnehmer. . . . .	43
6.11. Ranking der Eingabemethoden von der besten (1) zu der schlechtesten (5) . . . .	44
7.1. Übereinandergelegte Zeichnungen der Versuchsgruppen 1 und 2 (siehe Tabelle 6.1). . . . .	48
A.1. Ergebnisse der einzelnen Kategorien des NASA TLX Teil 1. . . . .	66
A.2. Ergebnisse der einzelnen Kategorien des NASA TLX Teil 2. . . . .	66



## Tabellenverzeichnis

6.1. Zuordnung der Eingabemethoden zu den geometrischen Formen für die fünf unterschiedlichen Teilnehmergruppen . . . . .	33
7.1. Übersicht über die Ergebnisse der Studie. Aussage 1: „ <i>Ich würde die Eingabemethode gerne regelmäßig nutzen.</i> “ Aussage 2: „ <i>Ich konnte die Form mithilfe der Eingabemethode akkurat nachzeichnen.</i> “ Aussage 3: „ <i>Mir hat es gefallen, die Eingabemethode zu nutzen.</i> “ . . . . .	49
7.2. Kommentare der Teilnehmer zu den Eingabemethoden absteigend nach der Häufigkeit sortiert. Die Häufigkeit für jeden Kommentar steht in der Klammer. . . . .	50





# Verzeichnis der Algorithmen

5.1. Nearest Point on Curve Algorithmus . . . . .	29
---	----



# 1. Einleitung

Seit einigen Jahrzehnten forschen Wissenschaftler an neuer tragbarer Hardware zur Darstellung von digitalen Informationen. Für tragbare Hardware, die immer weiter ausgereift ist, werden zunehmend neue Anwendungen im Bereich Virtual und Augmented Reality entwickelt. Dadurch kam das Bedürfnis nach alternativen Input Methoden auf, um die Hardware besser bedienen zu können. Die bisher gängigen mechanischen Eingabegeräte, wie zum Beispiel Tastatur, Maus und Joysticks, sind nicht mehr passend für die gewünschte natürliche und direkte Interaktion im 3D-Raum. So wird zum Beispiel in einem Virtual Reality Spiel die Immersion des Spielers in die virtuelle Welt möglich: Der Spieler vergisst die reale Welt um ihn herum und taucht komplett in das Spiel ein. Dafür sorgen jedoch nicht nur die Technologien zur Darstellung des Inhaltes, sondern auch die neuen Input Methoden, wie zum Beispiel Eyetracking und Gestenerkennung [TMO11].

Die innovative Hardware wird aber nicht mehr nur in Computerspielen eingesetzt. Sie wird zunehmend auch für Privatpersonen erschwinglich und funktioniert zuverlässiger. Das führt dazu, dass heute alle möglichen Systeme mit den innovativen Eingabemethoden bedient werden können: von dem Fernseher zu Hause, dessen Programme mithilfe von Gestensteuerung gewechselt werden können, bis hin zu dem Multimedia System im Auto, bei dem die Lautstärke durch kreisende Handbewegungen lauter oder leiser gemacht werden kann [Ash14; Sam18].

Durch die zunehmende Bedeutung der neuen Input Methoden wird es immer wichtiger, einen Überblick über die verschiedenen Technologien zu bekommen. Dabei ist es auf der einen Seite wichtig, welche Eingabemethoden die höchste Genauigkeit haben, auf der anderen Seite muss jedoch auch beachtet werden, welche Methoden die beste User Experience bieten.

Das Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene neue Input Methoden mithilfe einer Nutzerstudie zu vergleichen. Die Probanden sollen mehrere geometrische Figuren auf dem Bildschirm mit den verschiedenen Input Technologien nachzeichnen. Dafür werden Augen-, Kopf-, Touch-, und Handbewegungen verwendet, die mithilfe von Eyetracker, SenseGloves, iPad, Leap Motion Controller und VIVE Trackern aufgezeichnet werden. Dabei wird die Abweichung zu der vorgegebenen geometrischen Figur und die Zeit, die die Probanden dafür benötigen, gemessen. Außerdem werden anhand eines Fragebogens die Erfahrungen der Probanden mit dem jeweiligen Eingabegerät festgehalten. Die gesammelten Daten werden schließlich statistisch ausgewertet und dargestellt.

Die Arbeit ist in folgender Weise gegliedert: In Kapitel 2 werden die Grundlagen der Arbeit beschrieben. In Kapitel 3 wird ein Überblick über verwandte Arbeiten und den bisherigen Forschungsstand gegeben. In Kapitel 4 wird auf die verwendete Hardware und die zur Implementierung genutzte Software eingegangen. Kapitel 5 stellt die Implementierung der Studie vor. In Kapitel 6 wird die durchgeführte Benutzerstudie beschrieben und die Ergebnisse werden präsentiert. Kapitel 7 diskutiert die Ergebnisse der Studie und die Auswirkungen der Ergebnisse auf das Design der Anwendung. Schließlich fasst Kapitel 8 die Ergebnisse der Arbeit zusammen und stellt Anknüpfungspunkte für zukünftige Arbeiten vor.



## 2. Grundlagen

### 2.1. Immersive Analytics

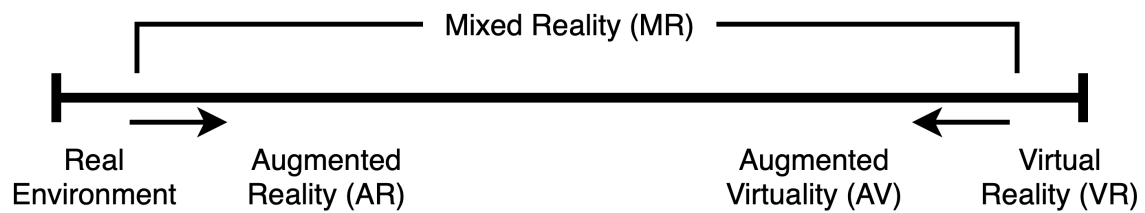
Die Bezeichnung Immersive Analytics (IA) setzt sich aus den Begriffen Immersive und Analytics zusammen. Immersion beschreibt den Effekt aufgrund von Reizen so tief in eine virtuelle Welt einzutauchen, dass die reale Welt nicht mehr wahrgenommen wird. Analytics bedeutet die Untersuchung und Auswertung von Daten. Daraus lässt sich die Definition des Forschungsbereiches Immersive Analytics ableiten: die Verwendung von Analysetools, um das Datenverständnis zu verbessern. Das Ziel ist es, die Barrieren zwischen Personen, deren Daten, und den Tools, die sie für die Analyse nutzen, zu beseitigen [MSD+18]. Diese Verbesserung wird durch viele Faktoren ermöglicht. Virtuelle Daten können mithilfe von Augmented Reality (AR) Technologien mit realen Objekten verknüpft werden. So entsteht eine dreidimensionale Arbeitsumgebung, mit der mithilfe von neuen intuitiven Eingabemethoden, wie zum Beispiel Stimme oder Gesten, interagiert werden kann. Da der Arbeitsplatz nicht mehr an einen einzigen Computer gebunden ist, wird eine Zusammenarbeit zwischen mehreren Personen, unabhängig davon wo sie sich momentan befinden, möglich [MSD+18].

### 2.2. Virtual Reality

Jerald definiert Virtual Reality (VR) als eine computer-generierte digitale Umgebung, die erlebt und mit der interagiert werden kann, als wäre die Umgebung real [Jer16]. Alle Sinneseindrücke, die ein Mensch bei einer Aktion in der realen Welt erlebt, soll er auch bei der Durchführung der Aktion in der virtuellen Welt wahrnehmen. Das geschieht durch das Zusammenspiel vieler verschiedener Komponenten. Dabei geht es nicht nur um die visuelle und auditive, sondern auch um die haptische Darstellung. Wenn der Nutzer seinen Kopf dreht, verändert sich sein Sichtfeld passend dazu. Wenn der Nutzer einen Knopf drückt, drückt er ihn wie in der realen Welt mit dem Finger und bekommt eine haptische Rückmeldung. Die Entwicklung von VR wird stark von den Fortschritten der zugrunde liegenden Hardware getrieben [DBGJ13]. Nach bisherigem Stand der Technik ist die Interaktion mit VR-Systemen nur durch am Körper getragene Hardware, wie Controller, Handschuhe und Head Mounted Displays (HMD) möglich.

### 2.3. Augmented Reality

AR bedeutet die Erweiterung der Realität. Wie in Abbildung 2.1 zu sehen, befindet sich AR in dem Reality-Virtuality-Continuum zwischen der realen und virtuellen Umgebung (VR). Die reale Welt wird mit virtuellen Elementen angereichert, sodass virtuelle und reale Welt verschmelzen



**Abbildung 2.1.:** Reality-Virtuality-Continuum nach Milgram. Basierend auf [MTUK94].

[DBGJ13]. Das virtuelle Element befindet sich nicht statisch an einem Platz auf dem Bildschirm, sondern bewegt sich mit der realen Welt. Ein Beispiel dafür ist eine Einrichtungsapp: Ein Sessel wird über eine AR-App auf dem Smartphone in einem realen Raum platziert. Das ist möglich, da die Kamera die Umgebung aufzeichnet und das Smartphone die reale Umgebung mit dem virtuellen Sessel zusammenfügt. Wenn dann das Smartphone bewegt wird, bewegt sich der Sessel nicht mit, sondern bleibt in der realen Welt an dem gleichen Platz stehen. Die virtuellen Elemente werden dauerhaft an den momentanen Standpunkt und Blickwinkel des Betrachters angepasst. Dafür sind mehrere Schritte notwendig:

1. Videoaufnahme
2. Tracking
3. Registrierung
4. Darstellung
5. Ausgabe

Diese Schritte werden immer wieder durchlaufen, sodass die Darstellung kontinuierlich angepasst wird [DBGJ13].

## 3. Verwandte Arbeiten

Diese Arbeit basiert auf dem Gebiet der Mensch-Computer-Interaktion (MCI) und beschäftigt sich speziell mit Eingabemethoden für den Forschungsbereich IA. In diesem Kapitel werden verwandte Arbeiten zu diesem Themenbereich vorgestellt, die die Grundlage für diese Arbeit bilden oder als Inspiration dienen.

### 3.1. Zeichnen durch Handgesten im 3D-Raum

Es wurden schon früh Anwendungen entwickelt in denen ohne Berührung eines Eingabegerätes nur durch die Bewegung der Hände im Raum gezeichnet werden kann. Crowley et al. [CBC+95] haben schon 1995 die Anwendung FingerPaint entwickelt, die es ermöglicht mit den Fingern auf dem Bildschirm zu zeichnen ohne den Bildschirm zu berühren. Die Erkennung wann gezeichnet werden soll erfolgt über das Drücken der Leertaste während dem Zeichnen.

In jüngerer Zeit kamen immer mehr kostengünstige Tiefenkameras auf den Markt. Die Einführung des Leap Motion Controllers 2012 hat neue Möglichkeiten für die Gestenerkennung eröffnet.

2013 hat Sutton [Sut13] in Zusammenarbeit mit Corel und Leap Motion die Painter Freestyle Software entwickelt, die zunächst als Beta Version erhältlich ist. Die Software ermöglicht es durch Handbewegungen im Raum, die über den Leap Motion Controller erkannt werden, zu zeichnen.

Von Lyu et al. [LZC+17] wurde ebenfalls eine Zeichenumgebung entwickelt, bei der die Hände von dem Leap Motion Controller getrackt werden. Im Gegensatz zu den vorherigen kann der Nutzer mithilfe von Handgesten einen virtuellen Airbrush über den Bildschirm bewegen, als wäre er auf seinem Finger fixiert. Wenn der von dem Finger ausgehende Strahl den Bildschirm schneidet, wird die Farbe auf dem Bildschirm angezeigt. Mit der linken Hand kann der Nutzer den Farbton auswählen und mit der rechten Hand kann er zeichnen. Mit der Biegung des rechten Fingers kann während des Zeichnens die Weichheit des Airbrush gesteuert werden. Umso weiter der Daumen von der Hand entfernt wird, umso größer wird der Airbrushdurchmesser. Mit den restlichen drei Fingern kann der Nutzer die Transparenz verändern.

Einen anderen Ansatz verfolgen Kim et al. [KALB18]. Da Handbewegungen wichtige räumliche Hinweise enthalten aber für detaillierte Zeichnungen zu unpräzise sind, nutzen Kim et al. [KALB18] Handgesten in ihrer agilen 3D-Zeichenumgebung um ein grobes Gerüst zu erstellen. Die Handgesten werden über den Leap Motion Controller aufgezeichnet und ein Algorithmus extrahiert nur die beabsichtigten Formen aus den aufgezeichneten Daten. Der Nutzer kann dann das entstandene Gerüst als Referenz für eine detaillierte 3D-Form nutzen, die er mit einem Stift auf dem Tablet ergänzen kann. So ist es möglich, der Zeichnung feinere Details hinzuzufügen. Kim et al. [KALB18] haben ihre Zeichenumgebung in einer Studie getestet. Die Teilnehmer mochten es die groben Striche durch Handbewegungen zu erstellen. Als größte Vorteile der neuen Technologie wurden Zeiteffizienz, Genauigkeit bei der Skalierung und bei dem Erstellen des richtigen Größenverhältnisses genannt.

## 3.2. Interaktion mit der Maus in einer 3D Umgebung

Die Maus ist ein ideales Eingabegerät für 2D-Umgebungen und manche 3D-Umgebungen [Zha98]. Sun et al. [SSR18] haben die Effizienz und Genauigkeit von Maus, Handtracking und Trackpad für 3D-Positionierungsaufgaben mit dem HTC Vive verglichen. Dabei wird das Handtracking und das Trackpad über die HTC Vive Controller aufgezeichnet. Für viele Probanden war die Maus am angenehmsten, da sie ihre Hände während der Benutzung der Maus auf dem Schreibtisch ablegen konnten. Die Hälfte der Probanden hat sogar die zweite Hand genutzt, um den Controller während des Zeigens zu stabilisieren. Die Studie führte zu dem Ergebnis, dass die Maus in Bezug auf Effizienz und Genauigkeit die beiden anderen Input Methoden übertrifft.

## 3.3. Eyetracking als Eingabemethode

Menschen entdecken ihre Umwelt mit ihren Augen. Sie schauen aber nicht zufällig herum, sondern schauen auf das, an dem sie gerade arbeiten [JC76]. Daher bietet sich Eyetracking als Eingabemethode an.

Eyetracking ist schon lange ein wichtiges Forschungsthema in der MCI, da es viele Vorteile gegenüber anderen Input Methoden hat [ZMI99]:

1. Es gibt Situationen, in denen die Hände für etwas anderes benötigt werden und für die Eingabe nicht frei sind. Das ist zum Beispiel bei körperlich eingeschränkten Personen der Fall. Für die Interaktion durch Eyetracking werden keine Hände benötigt, sodass auch ohne Hände die Interaktion mit dem Computer möglich ist.
2. Die Augen bewegen sich schneller als andere Körperteile. Daher ist durch Eyetracking eine schnellere Auswahl oder Eingabe möglich.
3. Durch Eyetracking als Eingabemethode kann die Erschöpfung, die durch Bedienung der Tastatur oder der Maus verursacht wird, reduziert werden.

Ware und Mikaelian [WM87] haben bereits 1987 zwei Studien durchgeführt: In der einen wurden drei Auswahlmethoden verglichen, in der anderen haben sie sich mit der Zielgröße beschäftigt. Ihre Ergebnisse zeigen, dass die Eingabe mit einem Eyetracker schneller ist als mit der Maus oder mit anderen konventionellen Eingabemethoden, wenn die Zielgröße nicht zu klein ist.

Auch die Studie von Sibert und Jacob [SJ00], in der die Teilnehmer zwei verschiedene Auswahlaufgaben durchgeführt haben, führte zu dem Ergebnis, dass Eyetracking deutlich schneller ist als die Auswahl mit der Maus. Anstatt die Maustaste als Bestätigung der Auswahl zu verwenden, haben Sibert und Jacob [SJ00] eine Fixationszeit von 150ms als Bestätigung verwendet.

### Midas Touch Problem

Die naive Annahme ist, dass bei Eyetracking die Augenbewegungen den Mauscursor bewegen. Das ist jedoch nicht sinnvoll, da Menschen es nicht gewohnt sind, Geräte nur mit ihrem Blick zu steuern. Da Menschen mit ihren Augen die Umgebung erkunden, sind sie es gewohnt etwas genauer anzuschauen, ohne dass es eine Auswirkung hat. Für eine normale visuelle Wahrnehmung



ist es notwendig, dass Menschen erst eine Szene mit ihren Augen scannen können, ohne dass jede Bewegung eine Computeranweisung auslöst [Jac90]. Wenn das nicht gewährleistet ist, ist es wie Midas Touch: Überall wo man hinschaut, wird eine andere Anweisung aktiviert. Das kann verhindert werden, indem eine zusätzliche Bestätigung notwendig ist, die signalisiert, wann die Augenbewegungen zur Eingabe verwendet werden sollen und wann nicht. Dafür gibt es drei verschiedene Ansätze:

1. Tastendruck: Der Nutzer bestätigt die Auswahl eines Objektes, indem er eine Taste drückt.
2. Fixationszeit: Ein Objekt wird ausgewählt, indem der Nutzer eine bestimmte Zeit auf das Objekt fixiert ist.
3. Blinzeln: Der Nutzer blinzelt, um ein Objekt auszuwählen.

Die letzten beiden Ansätze haben den Vorteil, dass keine zusätzliche Hardware außer dem Eyetracker notwendig ist.

Jacob [Jac90] kommt zu dem Ergebnis, dass eine Auswahl über die Fixationszeit nur dann sinnvoll ist, wenn die Auswahl schnell wieder rückgängig gemacht werden kann, falls ein Objekt unbeabsichtigt länger fixiert wurde. Die Fixationszeit muss immer länger gewählt werden, als ein Nutzer braucht, um das jeweilige Objekt genau anzuschauen, damit sichergestellt ist, dass die Auswahl beabsichtigt war. Durch die Fixationszeit geht der Geschwindigkeitsvorteil von Eyetracking im Vergleich zu anderen Eingabemethoden verloren. Für Aufgaben, bei denen die Zeit ein wichtiger Faktor ist, bietet sich daher die Bestätigung durch Tastendruck an [Jac90].

### 3.4. Touch-Eingabe

Touchdisplays sind heute standardmäßig in vielen elektronischen Geräten, wie zum Beispiel bei Smartphones und Tablets, verbaut. Daher nutzen die meisten Personen diese Eingabemethode täglich. Die größten Vorteile der Eingabemethode sind Schnelligkeit und Einfachheit. Es ist für Menschen eine natürliche Interaktion ein Objekt durch Zeigen auszuwählen oder den unteren Bereich einer Internetseite durch Hochwischen sichtbar zu machen. Der größte Nachteil der Touch-Eingabe ist, dass oft keine präzise Selektion möglich ist. Die Ursache hierfür ist, dass der Finger des Nutzers viel größer ist als ein einzelner Pixel und die Kontaktfläche des Fingers mit dem Bildschirm variiert, je nach Kontaktwinkel und Druck der ausgeübt wird [BWB06].

Hooten und Adams [HA11] haben eine Studie durchgeführt, bei der sie Fehler und Geschwindigkeit bei Zeichenaufgaben für touch- und maus-basierte Eingabe verglichen. Sie kamen bei ihrer Studie zu dem Ergebnis, dass touch-basierte Interaktion bis zu doppelt so schnell ist als maus-basierte Interaktion. Die Eingabe mit der Maus führt hingegen zu einem viel kleineren Fehler als die Eingabe mit Touch. Unabhängig von der Eingabemethode führen gebogene Formen zu einem größeren Fehler als lineare Formen [HA11].

#### **3.5. Grundlagen für diese Arbeit**

Es haben bereits einige Arbeiten die neuen Eingabemethoden, wie zum Beispiel Touch oder Gestenerkennung, mit der Maus verglichen [HA11; SSR18]. Daher werden in dieser Arbeit die neuen Eingabemethoden untereinander verglichen, sodass ein Überblick über die verschiedenen Technologien ermöglicht wird.

Die Berechnung der Abweichung während des Zeichenvorgangs erfolgt nach dem von Hooten und Adams [HA11] vorgestellten Algorithmus.

Das Ergebnis der Studie von Hooten und Adams [HA11], dass die Genauigkeit einer Zeichnung davon abhängen kann, ob eine Form gerade oder gebogen ist, dient als Grundlage für die Auswahl der geometrischen Formen in dieser Studie.

Um Midas Touch Problem nach Jacob [Jac90] zu verhindern, ist eine zusätzliche Bestätigung des Zeichenvorgangs notwendig. Aus den von Jacob [Jac90] vorgeschlagenen Ansätzen wurde für die Bestätigung des Zeichenvorgangs das Drücken der Leertaste ausgewählt.

## 4. Verwendete Hard- und Software

Es wurde schon viel in dem Bereich der 2D- und 3D-Eingabemethoden geforscht. In bisherigen Arbeiten wurden jedoch meistens 3D-Eingabegeräte mit der Maus verglichen und nicht die neuen innovativen Eingabemethoden untereinander. Daher werden in dieser Arbeit die Eingabemethoden Touch, Eyetracking, Gestenerkennung über den Leap Motion Controller und die SenseGloves sowie Headtracking miteinander verglichen. Diese in der Studie verwendeten Eingabemethoden und die zur Implementierung der Studie verwendete Software werden in dem folgenden Kapitel vorgestellt.

### 4.1. Unity Engine

Die Unity Engine<sup>1</sup> ist eine Entwicklungsumgebung für Anwendungen aller Art. Unity wird vor allem für die Entwicklung von Computerspielen, VR- und AR-Anwendungen verwendet. Mit Unity können zwei- und dreidimensionale Anwendungen erstellt werden. Die zugrunde liegende Programmiersprache ist C#.

Durch die gute Hardwareunterstützung in Form von SDKs und Plugins ist Unity eine hilfreiche Entwicklungsumgebung, besonders für die Entwicklung von Anwendungen im Bereich VR und AR.

### 4.2. Apple iPad Air 2

Für die Touch-Eingabe in der Studie wurde ein Apple iPad Air 2<sup>2</sup> verwendet. Aufgrund des größeren Bildschirms von Tablets im Vergleich zu Smartphones wurde die Touch-Eingabe der Nutzerstudie an einem Tablet durchgeführt. Das iPad hat ein 9,7“ Multi-Touch Display mit einer Auflösung von 2048 x 1536 Pixeln bei 264 ppi.

### 4.3. Tobii Eye Tracker 4C

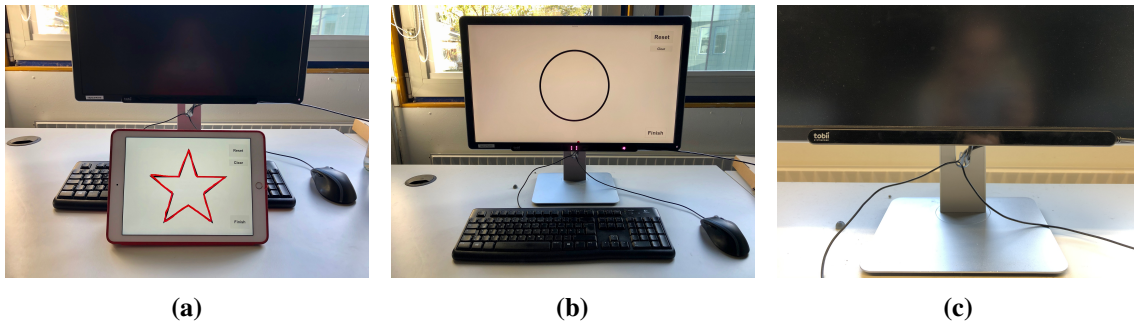
Mit dem Tobii Eye Tracker 4C<sup>3</sup> wurde das Eyetracking in der Studie durchgeführt. Er funktioniert für 97% der Bevölkerung und ist somit momentan der am kompatibelste Eyetracker auf dem Markt. Die Augen werden unabhängig von Augenfarbe, Kontaktlinsen oder Brille erkannt. Der Tobii Eye Tracker

---

<sup>1</sup><https://unity.com>

<sup>2</sup><https://www.apple.com>

<sup>3</sup><https://gaming.tobii.com>



**Abbildung 4.1.:** Aufnahmen des Studiensettings.

4C kann mit jedem Bildschirm genutzt werden, der die maximale Bildschirmgröße von 27" bei einem Seitenverhältnis von 16:9 und 30" bei einem Seitenverhältnis von 21:9 nicht überschreitet. Dabei muss der Eyetracker mittig an dem unteren Bildschirmrand mit einem magnetischen Klebestreifen, wie in Abbildung 4.1c zu sehen, befestigt und mit dem Computer über USB verbunden werden. Damit die Augen korrekt erkannt werden, sollte der Nutzer einen Abstand zwischen 50 und 95 cm zu dem Gerät einhalten.

Die Tobii Eyetracker nutzen die pupil centre corneal reflection (PCCR) Technologie. Dabei wird eine Nahinfrarotbeleuchtung verwendet, um Reflexionen auf der Hornhaut und auf der Pupille des Nutzers zu erzeugen. Die Bilder der Augen und der Reflexionen werden von Bildsensoren aufgenommen. Bildverarbeitungsalgorithmen und ein physiologisches 3D-Modell der Augen werden dann verwendet, um die Position der Augen im Raum und den Blickpunkt mit hoher Genauigkeit zu schätzen.

Vor der Benutzung muss der Eyetracker für jede Testperson mithilfe der Tobii Eye Tracking Core Software<sup>4</sup> kalibriert werden.

Die Tobii Eyetracker werden von den Game Engines Unreal und Unity mithilfe eines Plugins unterstützt.

#### 4.4. Leap Motion Controller

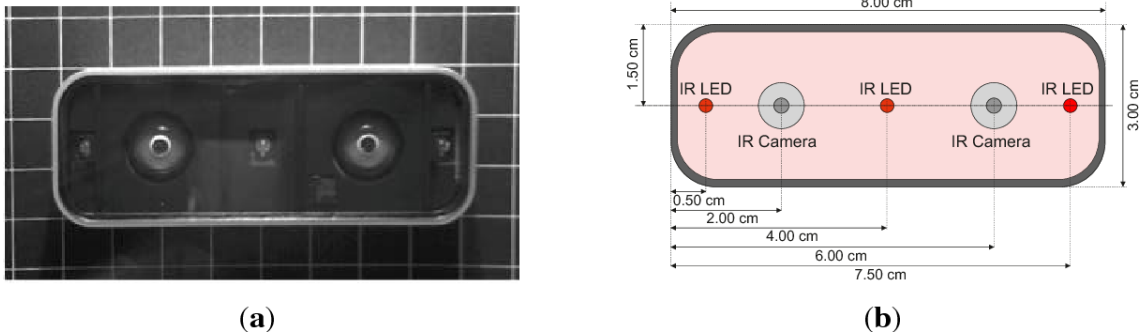
Die Gestenerkennung in der Studie wurde mithilfe des Leap Motion Controllers<sup>5</sup> durchgeführt. Der Leap Motion Controller wurde für das Erfassen von Finger- und Handbewegungen in interaktiven Anwendungen entwickelt. Im Vergleich zu anderen Tiefenkameras, wie zum Beispiel der Microsoft Kinect<sup>6</sup> liefert der Leap Motion Controller weniger Informationen (nur ein paar Schlüsselpunkte statt der kompletten Tiefenmap) und der Interaktionsbereich ist limitiert, aber die extrahierten Daten sind genauer [DK18]. Der Leap Motion Controller hat eine Framerate von 200 fps, die Microsoft Kinect hingegen hat nur eine Framerate von 30fps. Laut Hersteller beträgt die Genauigkeit des Sensors bei der Erfassung der Fingerspitzen ca. 0.01 mm.

---

<sup>4</sup><https://gaming.tobii.com>

<sup>5</sup><https://www.leapmotion.com>

<sup>6</sup><https://www.microsoft.com>



**Abbildung 4.2.:** Visualisierung von einer (a) Realen (durch Infrarot aufgenommenen) und (b) Schematischen Ansicht des Leap Motion Controllers [WBRF13].

Der Leap Motion Controller in Verbindung mit dem aktuellen API liefert Positionen im kartesischen Raum mit vordefinierten Objekten, wie zum Beispiel Fingerspitzen. Die gelieferten Positionen beziehen sich auf den Mittelpunkt des Controllers, der sich an dem mittleren Infrarotsender befindet. Wie in Abbildung 4.2 zu sehen, besteht der Controller aus zwei Infrarot Kameras und aus drei Infrarotsendern.

#### 4.5. VIVE Tracker (2018)

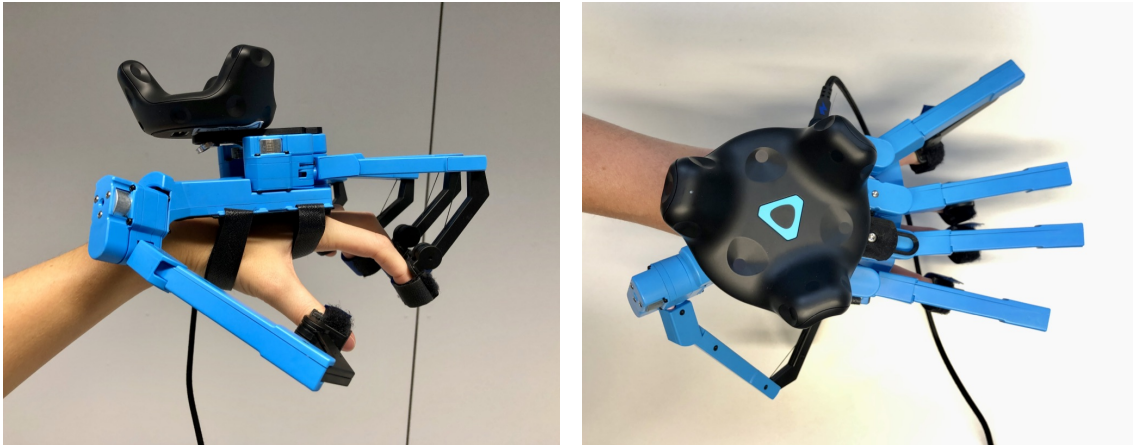
Der VIVE Tracker (2018)<sup>7</sup> wurde in der Studie für das Headtracking und für die Erkennung der Position der SenseGloves im Raum genutzt. Der Tracker gehört zu dem VIVE VR-System und wird normalerweise zusammen mit einem HMD verwendet. Das VIVE VR-System verwendet die VALVE Lighthouse Technologie<sup>8</sup> für das Tracking der Headsets, Controller und Tracker. Dafür werden mindestens zwei Basisstationen benötigt, die in den Ecken des Raumes platziert werden. Es können bis zu vier Basisstationen in einem Raum angebracht werden, um eine Fläche von bis zu 10m x 10m abzudecken. Jede Basisstation hat ein Field of View (FOV) von 160° x 115°. Die Basisstationen enthalten Laser, die 100 Mal pro Sekunde den Raum abtasten, um photonische Sensoren am Headset, den Controllern und den Trackern zu verfolgen.

Da in der Studie Formen am Bildschirm nachgezeichnet werden, wird das HMD nicht benötigt. Daher wurde die Konfiguration so verändert, dass der VIVE Tracker auch ohne das HMD erkannt wird. Der Tracker kann an beliebigen Gegenständen oder Körperteilen befestigt werden, sodass diese von den Basisstationen erfasst werden. Um den Kopf der Teilnehmer zu tracken, wurde der VIVE Tracker an einem Strap befestigt. Der Strap wird dann wie ein Stirnband auf den Kopf gezogen, sodass der Tracker auf der Stirn der positioniert ist.

Alle von den Basisstationen erkannte Objekte können mithilfe des SteamVR Plugins<sup>7</sup> in ein Unity Projekt eingebaut werden.

<sup>7</sup><https://www.vive.com>

<sup>8</sup><https://www.valvesoftware.com>



**Abbildung 4.3.:** Aufnahme der getragenen SenseGloves mit den befestigten VIVE Trackern von der Seite und von oben.

#### 4.6. SenseGloves

Die SenseGloves<sup>9</sup> wurden, wie der Leap Motion Controller, zur Gestenerkennung in der Studie verwendet. Um die Bewegung der SenseGloves im Raum tracken zu können, wurden VIVE Tracker an den SenseGloves befestigt. Die SenseGloves werden über USB mit dem Computer verbunden. Sie können die Hand, die Finger und das Handgelenk mit 24 Degrees of Freedom (DOF) genau tracken. Im Vergleich zu anderen Geräten können die SenseGloves außerdem Force-Feedback und taktiles Feedback geben. Force-Feedback ist mit einem Gewicht von bis zu 1.8 kg bei jedem Finger möglich. Mithilfe der Motoren in jedem Finger können die SenseGloves zusätzlich taktiles Feedback in Form von Vibrationen geben.

Die SenseGloves können mithilfe des Unity SDKs in Verbindung mit dem SteamVR Plugin<sup>7</sup> in ein Unity Projekt eingebunden werden.

#### 4.7. Computer und Bildschirm

Das Zeichenprogramm lief für alle Eingabemethoden, außer der Touch-Eingabe, auf einem PC. Der verwendete Bildschirm hat eine Bildschirmdiagonale von 24" bei einer Ultra HD Auflösung von 3840 x 2160 Pixeln. Das Studiensetting wurde in Abbildung 4.1 dargestellt.

---

<sup>9</sup><https://www.senseglove.com>

## 5. Implementierung

In diesem Kapitel wird auf die Implementierung des Unity Projekts für die Benutzerstudie eingegangen. Als erstes wird darauf eingegangen welche Erweiterungen installiert wurden und wie die Hardware in das Projekt eingebunden wurde. Als Nächstes wird die Navigation in der Anwendung und die Berechnung der Abweichung erläutert.

### 5.1. Architektur der Anwendung

Für das Zeichnen in der Anwendung wurde die Unity Erweiterung Free Draw - Simple Drawing on Sprites/2D Textures<sup>1</sup> verwendet. Die Pinseldicke wurde auf drei eingestellt und die Linienfarbe auf Rot. Das in der Unity Erweiterung enthaltene *Drawable*-Skript wurde für jede Eingabemethode so verändert, dass mit der jeweiligen Eingabemethode anstatt mit der Maus gezeichnet werden kann. Auf die Daten der Eingabemethoden kann mithilfe der bereitgestellten SDKs zugegriffen werden (siehe Kapitel 4).

Jede Zeichenszene enthält ein weißes Sprite-Objekt mit der Bezeichnung *ReadWriteEnabledImage* auf dem gezeichnet werden kann, wenn sich der Cursor innerhalb des Rechtecks befindet. Dem Sprite-Objekt wurde die nachzuzeichnende Form zugeordnet.

Für jede Form wurde ein *Renderer*-Skript erstellt, das die Punkte der Form enthält. Alle Formen außer der Kreis wurden über den Inspector mithilfe von GameObjects erstellt oder werden von dem *LineRenderer* gezeichnet. Die Punkte des Kreises werden in dem *CircleRenderer*-Skript

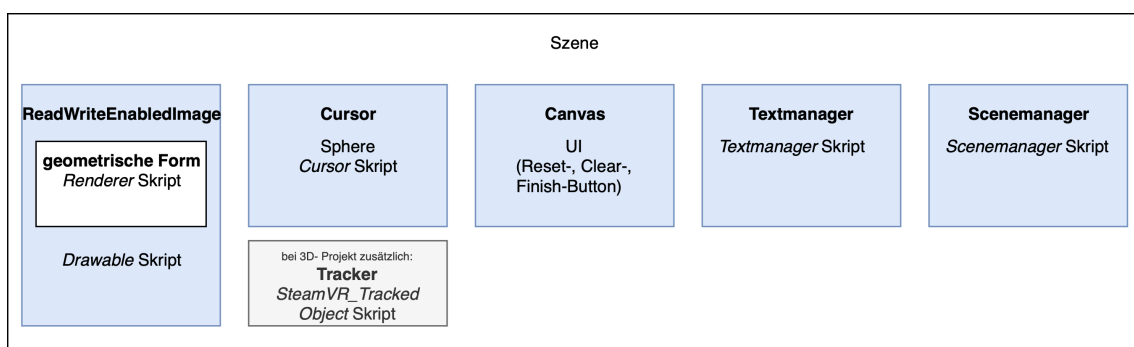
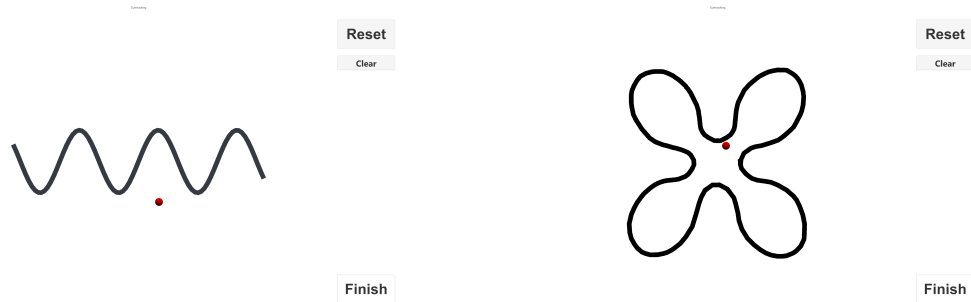


Abbildung 5.1.: Aufbau der Anwendung

<sup>1</sup><https://assetstore.unity.com>



**Abbildung 5.2.:** Screenshots der Anwendung

berechnet und der Kreis wird durch den `LineRenderer` in dem Skript gezeichnet. Die Berechnung der Abweichung für jedes Update, die Berechnung der durchschnittlichen Abweichung, sowie die Aufzeichnung der benötigten Zeit erfolgt ebenfalls in dem *Renderer*-Skript.

Für jede Szene wurde ein `Cursor GameObject` erstellt, dem mithilfe des zugeordneten *Cursor*-Skriptes die Position der Eingabemethode zugewiesen wird. Bei dem 3D-Projekt für die Eingabe mit Headtracking oder *SenseGloves*, die mithilfe der *SteamVR* Erweiterung erfolgt, wird die Position der Tracker innerhalb des `CameraRigs` dargestellt. Daher musste zusätzlich ein `Tracker GameObject` erstellt werden, das in dem *Cursor* Skript so gespiegelt wird, dass der `Cursor` die Position der Eingabemethode auf dem Bildschirm korrekt abbildet.

Außerdem enthält jede Szene das `User Interface (UI)` und die `GameObjects` *Textmanager* und *Scenemanager*, denen die zugehörigen Skripte zugeordnet wurden. Das *Textmanager*-Skript schreibt die aufgezeichneten Werte, die durchschnittliche Abweichung und die benötigte Zeit in eine Textdatei. Das *Scenemanager*-Skript ermöglicht es, zwischen den verschiedenen Szenen zu wechseln.

Das Programm für das iPad, den *Eyetracker* und den *Leap Motion Controller* wurde als `Unity 2D-Projekt` implementiert. Die *VIVE Tracker* für das Headtracking und die *SenseGloves* wurden in ein `3D-Projekt` eingebunden, da das *SteamVR Plugin* nur in `3D-Projekten` funktioniert.

### 5.2. Berechnung der Abweichung

Die Abweichung der Zeichnung von der vorgegebenen geometrischen Form wurde mithilfe des Algorithmus 5.1 bestimmt. Die Berechnung erfolgt in der `Update Methode` und wird somit in jedem `Frame` aufgerufen. Jede geometrische Form ist durch eine bestimmte Anzahl diskreter Punkte bestimmt, die in einer Liste gespeichert werden. Für die momentane `Cursorposition` wird der nächstliegende Punkt auf der geometrischen Form bestimmt. Die Distanz zu diesem Punkt entspricht der kürzesten Distanz zu der geometrischen Form.

### 5.3. Benutzerinterface und Navigation

Beim Starten einer Versuchskondition erscheint als erstes die Startszene. In dem Eingabefeld muss die Teilnehmer ID des Probanden eingegeben und die Eingabe bestätigt werden. Darauf folgt eine Probeszene, in der der Teilnehmer das jeweilige Gerät testen kann. Das Eingabegerät



**Algorithmus 5.1** Nearest Point on Curve Algorithmus**Input:** Liste mit Punkten der geometrischen Form  $L$ , Anzahl der Punkte  $n$  und Cursorposition  $p$ **Output:** Die kürzeste Distanz von  $p$  zu einem Punkt aus  $L$ ,  $D_{min}$ **procedure** CALCULATEDISTANCE( $L, n, p$ ) $D_{min} = \infty$ **for**  $i$  **to**  $n$  **do** $D \leftarrow \sqrt{(L_x[i] - p_x)^2 + (L_y[i] - p_y)^2}$ **if**  $D < D_{min}$  **then** $D_{min} \leftarrow D$ **end if****end for****end procedure**

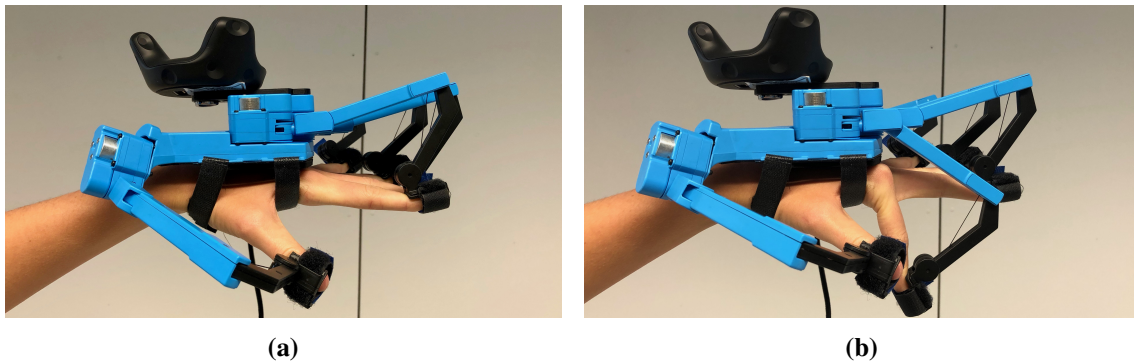
über das das Zeichnen erfolgt und die geometrische Form, die nachgezeichnet wird, variiert je nach Versuchskondition. Die Buttons werden in jeder Versuchskondition durch das Drücken der linken Maustaste ausgewählt. In den beiden Zeichenszenen kann die Zeichnung durch einen Klick auf den Reset- und anschließend auf den Clear-Button zurückgesetzt werden. Bei dem Klick auf dem Reset-Button werden die Werte zurückgesetzt und ein Screenshot erstellt. Bei dem Klick auf den Clear-Button wird das Gezeichnete gelöscht. Wenn der Teilnehmer den Zeichenvorgang abgeschlossen hat, kann er durch das Drücken der linken Maustaste auf den Finish-Button die Testszene starten, in der eine geometrische Form nachgezeichnet wird. Auch in dieser Szene können die Werte und die Zeichnung wie oben beschrieben zurückgesetzt werden. Wenn der Finish-Button angeklickt wird, wird die Versuchskondition beendet und der Durchschnitt und die Summe der Werte berechnet und mit der Anzahl der Updates und der benötigten Zeit in eine Textdatei geschrieben. Außerdem wird ein Screenshot der Zeichnung erstellt.

## 5.4. Zeichnen mit den Eingabegeräten

Wie in Abbildung 5.2 zu sehen, wurde für jede Eingabemethode ein Cursor in Form eines roten Kreises implementiert, sodass die Nutzer wissen, wo sie sich momentan mit ihrem Zeigegerät auf dem Bildschirm befinden. Damit das Zeichnen beginnt, muss eine Bestätigung erfolgen. In welcher Form diese Bestätigung erfolgt, unterscheidet sich für die verschiedenen Eingabegeräte.

Für die Touch-Kondition kann die Form durch berühren des Displays und nachziehen der Form mit dem Finger, nachgezeichnet werden. Da das Zeichnen bereits mit der Berührung des Displays gestartet wird, wird keine weitere Bestätigung benötigt.

Bei dem Eyetracking wird die Form durch die Bewegung der Augen nachgezeichnet. Wie in Abschnitt 3.3 beschrieben ist bei der Verwendung von Eyetracking eine Bestätigung notwendig. Die Auswahl über die Fixationszeit ist bei der Zeichenaufgabe nicht möglich, da die Augen sich kontinuierlich bewegen müssen, um die Form nachzuzeichnen, und somit keine längere Fixation auf eine Stelle des Bildschirms möglich ist. Eine andere Möglichkeit ist, das Zeichnen durch Blinzeln zu starten und zu beenden. Das ist ebenfalls für das Zeichnen unpassend, da das Zeichnen immer wieder unterbrochen werden würde, wenn ein natürliches unkontrolliertes Blinzeln erfolgt. Daher ist die einzig mögliche Bestätigungsmethode des Zeichnens bei der Verwendung eines Eyetrackers



**Abbildung 5.3.:** Aufnahmen der getragenen SenseGloves a in der Ausgangsposition und b in der Zeichenposition.

das Drücken einer Taste. Da die Leertaste den größten Bereich der Tastatur einnimmt und daher am einfachsten zu finden ist, wurde sie als Bestätigungsmethode für das Eyetracking gewählt. Während die Leertaste gedrückt gehalten wird, wird in der Anwendung gezeichnet. Wenn die Leertaste nicht mehr gedrückt wird, stoppt der Zeichenvorgang.

Bei der Gestenerkennung mit dem Leap Motion Controller kann die Form durch die Bewegung der Hand und des Zeigefingers im Raum nachgezeichnet werden. Der Cursor in der Anwendung befindet sich an der Position der Fingerspitze des Zeigefingers. Damit kontrolliert werden kann, wann das Zeichnen gestartet wird, ist auch hier eine Bestätigung notwendig. Der Leap Motion Controller kann die aufgezeichneten Werte der Finger nicht fest den einzelnen Fingern zuordnen. Daher wurde der Zeigefinger dadurch bestimmt, dass er der einzige ausgestreckte Finger ist. Der erste Ansatz für das Starten des Zeichnens war, das Anwinkeln bzw. Drücken des Zeigefingers im Raum als Bestätigung zu verwenden. Das führte zu dem Problem, dass der Zeigefinger nicht mehr als ausgestreckt erkannt wurde. Da dies das einzige Kriterium für die Einordnung als Zeigefinger war, hätte dieser dann nicht mehr von den anderen Fingern unterschieden werden können. Daher wurde auch für den Leap Motion Controller die Leertaste als Bestätigung für das Zeichnen implementiert. Um das Zeichnen zu starten, muss die Leertaste gedrückt werden und während des Zeichenvorgangs gedrückt bleiben. Erst wenn der Zeichenvorgang beendet werden soll, kann sie losgelassen werden.

Das Zeichnen mithilfe des Headtrackings erfordert ebenfalls eine Bestätigung. Da mit dem Kopf alleine nur das Nachfahren der Form möglich ist, muss das Starten des Zeichenvorgangs durch ein anderes Gerät erfolgen. Da die Tastatur in Verbindung mit dem SteamVR Plugin nicht mehr erkannt wird, wurde das Drücken der linken Maustaste als Zeichensignal gewählt. Die Maustaste muss während dem Zeichnen gedrückt gehalten werden, wenn sie losgelassen wird, endet der Zeichenvorgang.

Die SenseGloves ordnen jeden Finger eindeutig zu. Daher kann der Zeichenvorgang mit den SenseGloves gestartet werden, indem der Zeigefinger nach unten angewinkelt wird (siehe Abbildung 5.3b). Zusätzlich wurde Force Feedback implementiert, sodass der Nutzer ein Einrasten spürt, wenn der Winkel des Zeigefingers klein genug ist, um das Zeichnen zu starten. Während der Zeigefinger sich in dem Winkel befindet, wird gezeichnet. Sobald der Zeigefinger wieder angehoben wird, wird der Zeichenvorgang beendet (siehe Abbildung 5.3a). Dabei spielt es keine Rolle, in welcher Position sich die anderen vier Finger befinden.

## 6. Benutzerstudie

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Benutzerstudie durchgeführt, um die unterschiedlichen Eingabemethoden im Hinblick auf Zeit, Genauigkeit und Benutzerfreundlichkeit zu vergleichen. In diesem Kapitel wird die Durchführung der Benutzerstudie beschrieben. Schließlich werden die daraus resultierenden Ergebnisse erläutert und es wird auf die Einschränkungen, die bei der Diskussion der Ergebnisse beachtet werden sollten, eingegangen.

### 6.1. Methodik

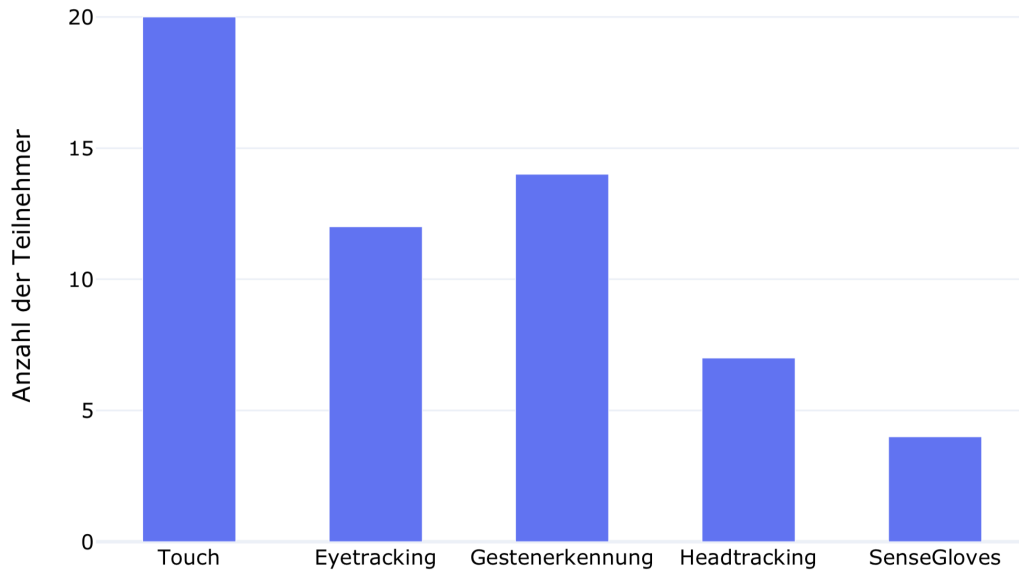
Die Nutzerstudie wurde im Repeated Measures Design mit fünf Konditionen durchgeführt. An der Studie haben insgesamt 20 Personen teilgenommen. Fast alle Teilnehmer waren Universitätsstudenten, die meisten davon studieren Informatik oder Medieninformatik. Das Alter der Teilnehmer lag zwischen 18 und 52 Jahren ( $M=24.15$ ,  $SD=6.84$ ), 14 von ihnen waren männlich und 6 weiblich. Wie in Abbildung 6.1 zu sehen, hatten alle Teilnehmer bereits Erfahrung mit Touch als Eingabemethode und nutzen es täglich zur Bedienung ihres Smartphones. 12 der 20 Teilnehmer hatten bereits einmalig Eyetracking bei einer anderen Studie genutzt, die restlichen 8 hatten keine Erfahrung damit. Alle außer 6 Teilnehmern hatten schon Erfahrung mit Gestenerkennung, die meisten davon durch die Benutzung von Spielekonsolen oder AR-Brillen. 7 Teilnehmer gaben an, bereits Erfahrung mit Headtracking zu haben. Sie haben Headtracking bei anderen Studien, zum Gaming oder in Verbindung mit VR-Brillen genutzt. Die Mehrheit der Teilnehmer hatte keine Erfahrung mit den SenseGloves, 4 Teilnehmer gaben an, die SenseGloves bereits selber für eine Studie verwendet zu haben. Die Teilnehmer wurden durch Mailinglisten der Universität und soziale Netzwerke rekrutiert. Für die Teilnahme an der Studie hat jeder Teilnehmer 10€ erhalten.

Die unabhängige Variable ist die Art der Eingabemethode. Die abhängigen Variablen können in quantitative und qualitative Variablen unterteilt werden. Als abhängige quantitative Variablen wurden die Abweichung der Zeichnung von der vorgegebenen Form, die für die Zeichnung benötigte Zeit und die kognitive Belastung gemessen. Die quantitative abhängige Variablen ist die Usability, die mithilfe von mehreren Fragebögen gemessen wurde.

Die fünf verschiedenen Eingabemethoden wurden jeweils einer geometrischen Form zugeordnet. Die geometrischen Formen in den Projekten, die auf dem Bildschirm nachgezeichnet wurden, füllen ein Quadrat mit 18cm Kantenlänge maximal aus. Da der Abstand, der bei der Benutzung des iPads eingehalten wird kleiner ist als der Abstand zu dem Bildschirm, wurde dort eine maximale Größe von 12cm gewählt. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Teilnehmer einen Abstand von ungefähr 60cm zu dem Bildschirm einhalten und von ca. 40cm zu dem iPad.

Damit die Eingabemethoden unabhängig von der geometrischen Form beurteilt werden können, wurde mit jeder Eingabemethode jede Form nachgezeichnet. Die Genauigkeit der Zeichnung kann davon abhängen, ob eine Form linear oder gebogen ist [HA11]. Damit dieser Faktor nicht zur

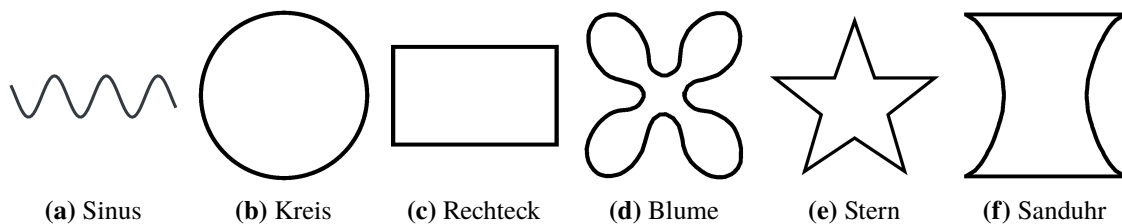
## Erfahrung mit der Eingabemethode



**Abbildung 6.1.:** Erfahrung der Teilnehmer mit den Eingabemethoden

Störvariable wird, wurden jeweils zwei lineare und zwei gebogene geometrische Formen, sowie eine kombinierte Form ausgewählt, sodass der Anteil von linear und gebogen ausgeglichen ist. Die Testpersonen wurden zufällig fünf verschiedenen Gruppen mit unterschiedlichen Eingabemethode-Form Zuordnungen zugeteilt. Die Festlegung der Eingabemethode-Form-Zuordnungen erfolgte durch Counterbalancing mit Latin Squares. Die Reihenfolge, in der die Teilnehmer die Eingabemethoden genutzt haben wurde randomisiert, um sicherzustellen, dass die Reihenfolge keinen Einfluss auf das Ergebnis hat.

Jeder Teilnehmer hat jede Eingabemethode ein Mal verwendet und jeweils eine geometrische Form nachgezeichnet.



**Abbildung 6.2.:** Screenshots der Formen, die in der Studie mit den Eingabegeräten nachgezeichnet werden.

Eingabe	Gruppe 1	Gruppe 2	Gruppe 3	Gruppe 4	Gruppe 5
Touch	Sanduhr	Kreis	Rechteck	Blume	Stern
Eyetracking	Kreis	Rechteck	Blume	Stern	Sanduhr
Leap Motion	Rechteck	Blume	Stern	Sanduhr	Kreis
Headtracking	Blume	Stern	Sanduhr	Kreis	Rechteck
SenseGloves	Stern	Sanduhr	Kreis	Rechteck	Blume

**Tabelle 6.1.:** Zuordnung der Eingabemethoden zu den geometrischen Formen für die fünf unterschiedlichen Teilnehmergruppen

## 6.2. Apparat

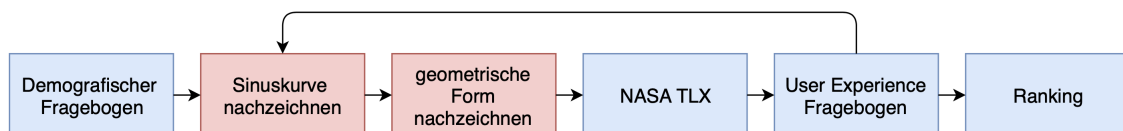
Das Programm zum Nachzeichnen der Formen läuft auf einem Computer, an dem die Eingabegeräte angeschlossen sind. Für die verschiedenen Versuchsbedingungen werden als Eingabegeräte iPad, Eyetracker, Leap Motion Controller, VIVE Tracker mit Trackerstrap und SenseGloves benötigt. Die Teilnehmer sitzen während des Zeichenvorgangs an einem Tisch, auf dem der an den Computer angeschlossene Bildschirm steht. Dort wird für alle Versuchsbedingungen, außer bei der Verwendung des iPads, das Unity-Programm, in dem die geometrischen Formen aus Abbildung 6.2 nachgezeichnet werden, angezeigt. Zur Eingabe der Teilnehmer ID und zum Starten des Zeichnens mit dem Eyetracker und dem Leap Motion Controller wird die Tastatur benötigt. Zur Navigation in der Anwendung wird die Maus benötigt. Außerdem steht ein Laptop neben dem Bildschirm, an dem die Teilnehmer die Fragebögen beantworten. Die Fragebögen außer dem Nasa Task Load Index (NASA TLX) wurden mit Google Forms<sup>1</sup> erstellt. Der NASA TLX wurde in einem html-File verwendet, das die Werte als csv-Datei abspeichert. Die Einverständniserklärung liegt in Papierform vor.

## 6.3. Ablauf

Die Studie wurde in einem Projektlabor an der Universität durchgeführt.

Als Erstes haben die Teilnehmer die Einverständniserklärung unterschrieben. Jedem Teilnehmer wurde eine zufällige ID zugeteilt, damit die Daten anonym verarbeitet werden können.

Der Ablauf der Studie ist in Abbildung 6.3 zu sehen. Die Fragebögen sind in Blau unterlegt, die Zeichenaufgaben in Rot.



**Abbildung 6.3.:** Studienablauf

<sup>1</sup><https://www.google.com/forms>

Nach dem Unterschreiben der Einverständniserklärung füllten die Teilnehmer einen demografischen Fragebogen aus. Alle Fragebögen lagen in Englisch vor, die Teilnehmer konnten jedoch auf Deutsch oder Englisch antworten und bei Verständnisproblemen nachfragen. Der Fragebogen enthielt demografische Fragen und Fragen zu der Erfahrung der Probanden mit den fünf getesteten Eingabemethoden.

Die abgefragten demografischen Angaben waren: Alter, Geschlecht, Beruf, Händigkeit und Sehschwächen. Außerdem wurde abgefragt, ob die Teilnehmer eine Brille oder Kontaktlinsen tragen. Der Fragebogen enthielt außerdem Fragen zu der Erfahrung mit den Eingabemethoden. Zu jeder Eingabemethode wurde gefragt, ob die Teilnehmer Erfahrung mit dem jeweiligen Gerät haben und wenn ja, wie häufig sie es benutzen. Dabei konnten sie aus den Möglichkeiten: „nur ein Mal“, „ein Mal im Monat“, „zwei oder drei Mal im Monat“, „ein Mal die Woche“, „mehrmals die Woche“, „täglich“ oder „keine Erfahrung“ auswählen. Wenn die Teilnehmer bereits Erfahrung mit dem Gerät haben sollten sie angeben, für was sie die Eingabemethode genutzt haben.

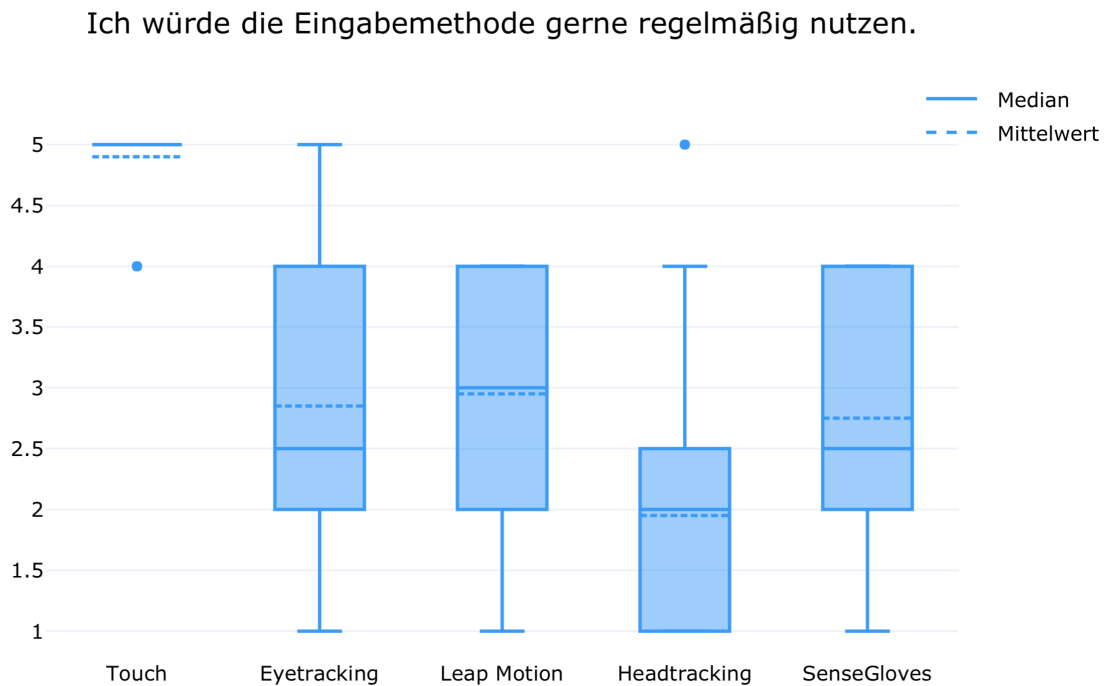
Danach wurde ihnen der Zweck und Ablauf der Studie erläutert. Die Teilnehmer führten alle jede der fünf Eingabemethoden ein Mal durch. Jede der fünf Versuchsbedingungen hat den gleichen im Folgenden beschriebenen Ablauf.

Als Erstes haben die Teilnehmer in der Testszene die Sinuskurve aus Abbildung 6.2a nachgezeichnet, um sich kurz mit der Funktionsweise des Eingabegeräts vertraut zu machen. Als sie fertig waren, konnten sie mit der Maus den „Finish“-Button anklicken, damit die aufgezeichnete Szene beginnt. In der Szene zeichneten die Teilnehmer die erste der geometrischen Formen aus Abbildung 6.2b bis 6.2f mit der Eingabemethode nach. Je nachdem, in welche Gruppe die Teilnehmer eingeteilt wurden, unterschieden sich die Zuordnungen von Gerät und Form (siehe Tabelle 6.1). Als sie das Zeichnen abgeschlossen hatten, konnten sie wieder auf „Finish“ klicken, um die Anwendung zu schließen.

Danach beantworteten die Teilnehmer zwei Fragebögen: den NASA TLX und einen Fragebogen, der die User Experience, Vor- und Nachteile sowie mögliche Anwendungsgebiete der Eingabemethode abfragte. In dem User Experience-Fragebogen sollten die Teilnehmer die folgenden Aussagen bewerten: „Ich würde die Eingabemethode gerne regelmäßig nutzen.“, „Ich konnte die Form mithilfe der Eingabemethode akkurat nachzeichnen.“ und „Mir hat es gefallen, die Eingabemethode zu nutzen.“. Die Aussagen konnten sie auf einer 5-Punkte-Skala von „Stimme überhaupt nicht zu“ (1) nach „Stimme voll und ganz zu“ (5) einordnen. Danach wurde abgefragt, für was die Eingabemethode hilfreich wäre, was an der Eingabemethode gut war und was schlecht. Außerdem beinhaltet der Fragebogen ein freies Kommentarfeld.

Danach begann die nächste Versuchsbedingung. Für jede Versuchsbedingung wurde der oben beschriebene Ablauf wiederholt, jedoch mit der nächsten Eingabemethode und einer anderen geometrischen Form.

Nachdem die Versuchsteilnehmer alle fünf Versuchsbedingungen abgeschlossen hatten, beantworteten sie einen finalen Fragebogen. Der finale Fragebogen enthielt ein Ranking, in dem die Teilnehmer alle fünf Eingabemethoden von 1 bis 5 sortieren sollten: von der ihrer Meinung nach besten Eingabemethode, die mit „1“ markiert werden sollte, zu der ihrer Meinung nach schlechtesten mit „5“.



**Abbildung 6.4.:** Ergebnisse für „Ich würde die Eingabemethode gerne regelmäßig nutzen.“ von „Stimme überhaupt nicht zu“(1) nach „Stimme voll und ganz zu“(5).

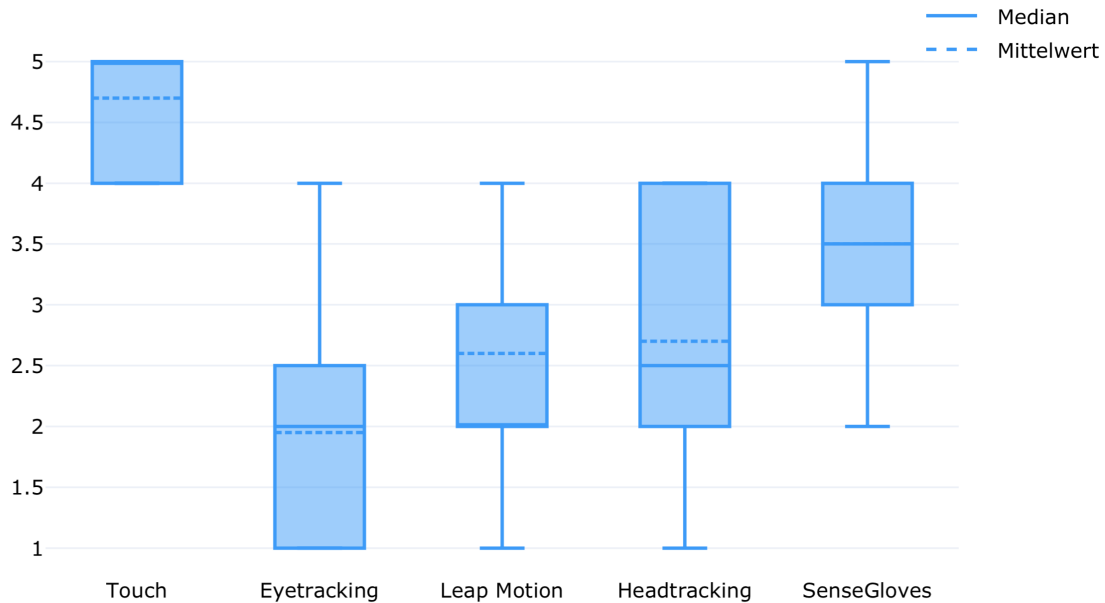
## 6.4. Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse, die in der Benutzerstudie erfasst wurden, präsentiert. Dabei wird auf die Erfahrung der Teilnehmer und auf das subjektive Feedback zu den Eingabemethoden eingegangen. Außerdem werden die während des Zeichenvorgangs gemessenen Werte präsentiert.

### Subjektive Bewertung der Aussagen

Die Aussage „Ich würde die Eingabemethode gerne regelmäßig nutzen.“ wurde für die Touch-Eingabe mit einem Mittelwert von 4.90 (SD =0.30) und einem Modus von 5 bewertet. Die Eingabe mithilfe von Eyetracking hatte einen Mittelwert von 2.85 (SD=1.31) und einen Modus von 2. Für den Leap Motion Controller wurde die Aussage im Mittel mit 2.95 (SD=1.12) bewertet und mit einem Modus von 4. Das Headtracking hat eine Bewertung der Aussage mit dem Mittelwert 1.95 (SD=1.12) und dem Modus 1 erhalten. Der Mittelwert für die SenseGloves war 2.75 (SD=1.04) und der Modus 2. Die Bewertung der Aussage wurde in Abbildung 6.4 visualisiert. Der Friedman-Test zeigte eine signifikante Differenz zwischen den Bedingungen mit  $X^2(4) = 37.09, p < .01$ . Der paarweise Wilcoxon-Test zeigte, dass die Teilnehmer die Touch-Eingabe (M=4.90) gegenüber den anderen Eingabemethoden bevorzugen (M=2.85, M=2.95, M=1.95, M=2.75),  $p < .01$ . Außerdem zeigte der Test, dass die Teilnehmer das Eyetracking (M=2.85) und den Leap Motion Controller (M=2.95) gerne regelmäßiger nutzen würden als die SenseGloves (M=2.75),  $p < .01$ . Für die anderen Tests wurde keine signifikante Differenz festgestellt.

Ich konnte die Form mithilfe der Eingabemethode akkurat nachzeichnen.

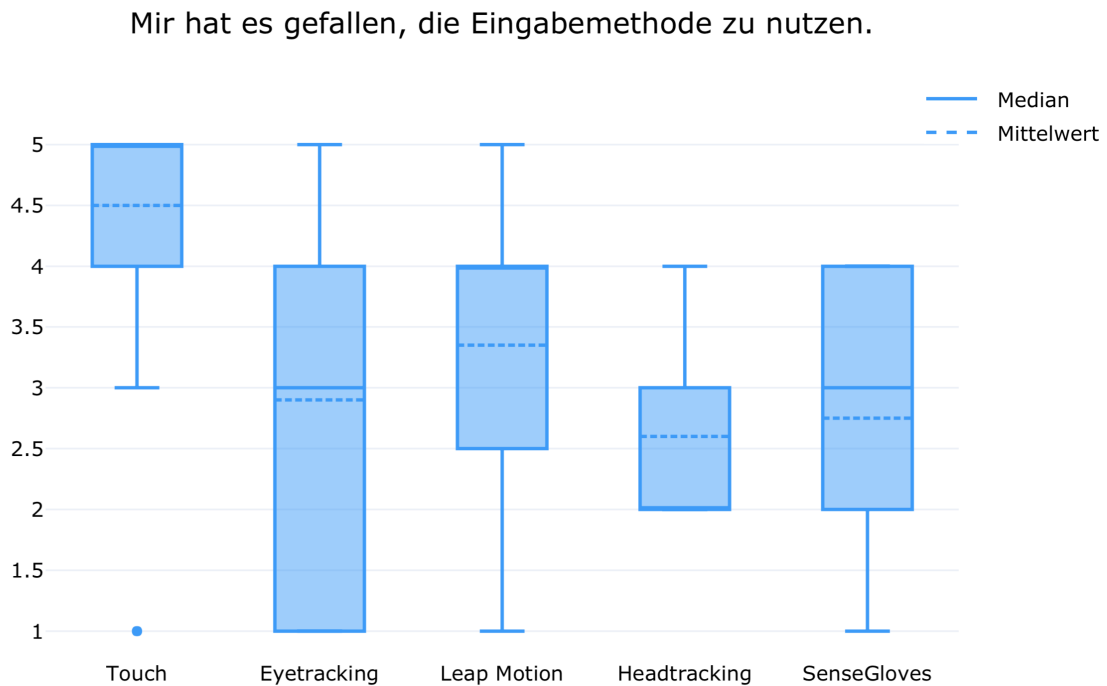


**Abbildung 6.5.:** Ergebnisse für „Ich konnte die Form mithilfe der Eingabemethode akkurat nachzeichnen.“ von „Stimme überhaupt nicht zu“(1) nach „Stimme voll und ganz zu“(5).

Für die Aussage „Ich konnte die Form mithilfe der Eingabemethode akkurat nachzeichnen.“ erhielt die Touch-Eingabe einen Mittelwert von 4.70 (SD=0.46) und einen Modus von 5. Die Eingabe mithilfe von Eyetracking wurde mit einem Mittelwert von 1.95 (SD=0.97) und dem Modus 1 bewertet. Der Leap Motion Controller hat einen Mittelwert von 2.60 (SD=0.86) und einen Modus von 2 erreicht. Für das Headtracking war der Mittelwert 2.70 (SD=1.10) und die Modi 2 und 4. Die SenseGloves erhielten für die Aussage im Mittel eine Bewertung von 3.50 (SD=1.02) und die Modi 3 und 4. Die Bewertungen der Aussage für die verschiedenen Eingabemethoden wurden in Abbildung 6.5 dargestellt. Der Friedman-Test zeigte eine signifikante Differenz zwischen den Bedingungen mit  $X^2(4) = 43.27, p < .01$ . Der paarweise Wilcoxon-Test zeigte, dass die Teilnehmer die Touch-Eingabe (M=4.70) gegenüber den anderen Eingabemethoden bevorzugen (M=1.95, M=2.60, M=2.70, M=3.50),  $p < .01$ . Außerdem zeigte der Test, dass die Teilnehmer die SenseGloves (M=3.50) als akkurater bewertet haben als das Eyetracking (M=1.95) und den Leap Motion Controller (M=2.60),  $p < .01$ . Für die anderen Tests wurde keine signifikante Differenz festgestellt.

Die Bewertung der Aussage „Mir hat es gefallen, die Eingabemethode zu nutzen.“ ergab für die Touch-Eingabe einen Mittelwert von 4.50 (SD=0.97) und einen Modus von 5. Die Eingabe mithilfe von Eyetracking hat einen Mittelwert von 2.90 (SD=1.51) und einen Modus von 1 erhalten. Für den Leap Motion Controller war der Mittelwert 3.35 (SD=1.06) und der Modus 4. Der Mittelwert für das Headtracking war 2.60 (SD=0.80) und der Modus 2. Die Eingabe mithilfe von den SenseGloves hatte einen Mittelwert von 2.75 (SD=1.09) und einen Modus von 3. Mehr Details sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Der Friedman-Test zeigte eine signifikante Differenz zwischen den Bedingungen mit  $X^2(4) = 27.80, p < .01$ . Der paarweise Wilcoxon-Test zeigte, dass den Teilnehmer die Touch-





**Abbildung 6.6.:** Ergebnisse für „Mir hat es gefallen, die Eingabemethode zu nutzen.“ von „Stimme überhaupt nicht zu“(1) nach „Stimme voll und ganz zu“(5).

Eingabe (M=4.50) am besten gefallen hat im Vergleich zu den anderen Eingabemethoden (M=2.90, M=3.35, M=2.60, M=2.75),  $p < .01$ . Für die anderen Tests wurde keine signifikante Differenz festgestellt.

### Subjektives Feedback zu Anwendungsgebieten und Vor- und Nachteilen

Die Teilnehmer wurden gefragt, für welche Aufgaben die Eingabemethode ihrer Meinung nach hilfreich wäre, was ihnen an der Eingabemethode gut gefallen hat und was sie nicht mochten.

Bei der Touch-Eingabe gaben die meisten Teilnehmer an, dass sie die Eingabemethode zum Zeichnen oder für alle möglichen Aufgaben, bei denen Bildschirme genutzt werden und keine weitere Eingabemethode benötigt wird sinnvoll finden. Zwei Teilnehmer gaben an, Touch sei für „fast alles“ sinnvoll. Außerdem wurde genannt, dass Touch zum Gaming hilfreich ist. Den Teilnehmern hat an der Eingabe mithilfe von Touch die Einfachheit, dadurch, dass die Eingabe sehr intuitiv ist, und die Genauigkeit gefallen. Als weiterer Vorteil der Eingabemethode wurde genannt, dass man die Eingabe mit Touch schon gewohnt ist. Die genannten Nachteile waren: Ungenauigkeit, bei dem Nachzeichnen werden Teile des Bildschirms verdeckt, teilweise anstrengend, man muss den Bildschirm berühren, was nicht immer möglich ist, und dass manche Eingabegeräte die Berührung nicht gut erkennen. Für 6 Teilnehmer hatte die Touch-Eingabe keine Nachteile. Eine Person gab an, lieber die Maus zu verwenden.

Als Einsatzgebiete für Eyetracking wurde vor allem die Eingabe für eingeschränkte Personen genannt, die ihre Hände entweder aufgrund von Behinderungen oder Beschäftigungen mit anderen Aufgaben nicht verwenden können. Außerdem wäre nach den Teilnehmern das Eyetracking in Situationen hilfreich, in denen der Bildschirm zu weit entfernt ist, um Touch zu verwenden. Außerdem wurden als Einsatzgebiete die Spielsteuerung, Kamerasteuerung in VR und wissenschaftliche Studien genannt. Die beschriebenen Vorteile der Eingabemethode waren die leichte Verständlichkeit und die Schnelligkeit. Laut den Teilnehmern wurden die Augenbewegungen präzise erkannt und die Kalibrierung ging schnell. Zudem wurde von mehreren Teilnehmern angegeben, dass es Spaß macht Eyetracking als Eingabemethode zu verwenden. Der am häufigsten beschriebene Nachteil war, dass die Augen sich sehr schnell bewegen und daher keine präzise Eingabe möglich ist. Außerdem hat die Mehrheit Teilnehmer die Eingabe als anstrengend empfunden, da man sich sehr darauf konzentrieren muss, den Blick zu fixieren und nicht zu blinzeln.

Die Teilnehmer sahen als mögliche Anwendungsbereiche für den Leap Motion Controller die Eingabe in VR und AR, um eine bessere Integration der Hände zu ermöglichen. Eine weitere Aufgabe, für die laut den Teilnehmern der Leap Motion Controller hilfreich wäre, ist das Zeigen auf weit entfernte Bildschirme, bei denen keine Touch-Eingabe möglich ist, zum Beispiel an öffentlichen Orten. Die Teilnehmer haben außerdem Zeichnen, Gaming oder Präsentationen als mögliche Einsatzgebiete genannt. Den Teilnehmern hat an der Gestenerkennung gefallen, dass sie intuitiv ist, da Menschen es gewohnt sind auf Dinge zu zeigen und daher eine sehr natürliche Interaktion mit dem Leap Motion Controller möglich ist. Weitere positive Aspekte waren, dass man kein haptisches Eingabegerät in der Hand halten und nichts anfassen muss. Nicht gefallen hat den Teilnehmern, dass die Eingabe auf Dauer anstrengend für den Arm ist und es schwer war, die Form genau nachzuzeichnen, da der Arm immer leicht zittert. Außerdem wurden angegeben, dass der Leap Motion Controller teilweise ungenau war und Störungen hatte.

Der am häufigsten genannte Einsatzbereich für das Headtracking war die Eingabe für eingeschränkte Personen, die ihre Hände nicht nutzen können. Einige Testperson fanden die Eingabe durch Headtracking nur als Ergänzung zu anderen Eingabemethoden sinnvoll, zum Beispiel für die Steuerung der Kamerabewegung. Die Teilnehmer mochten an der Eingabemethode, dass sie einfach zu nutzen ist und die Hände während der Nutzung frei sind. Außerdem wurde genannt, dass Headtracking sehr präzise ist und es Spaß macht es zu nutzen. Als Nachteile von Headtracking als Eingabemethode wurde angegeben, dass die Kopfbewegungen ungewohnt sind und in der Öffentlichkeit auf Ablehnung stoßen könnten. Einige Teilnehmer haben sich unwohl gefühlt, mit ihrem Kopf die Eingabe zu steuern. Manche Teilnehmer haben die Eingabe als unpräzise und anstrengend empfunden.

Die Teilnehmer nannten als mögliche Anwendungsgebiete für die Eingabe mithilfe der SenseGloves vor allem die Eingabe in VR und AR, um eine realistischere Interaktion mit virtuellen Objekten zu ermöglichen. Außerdem wurden als mögliche Einsatzbereiche kreatives Arbeiten und Gaming genannt. Den Teilnehmern hat es Spaß gemacht, die SenseGloves als Eingabemethode zu nutzen. Ihnen hat an der Eingabemethode gefallen, dass sie zum Zeichnen sehr genau war. Mehrere Teilnehmer gaben an, dass sich das Zeichnen real angefühlt hat und das Force Feedback hilfreich war. Alle Teilnehmer hat gestört, dass der Handschuh schwer und unhandlich ist und bei der Eingabe außerhalb von VR teilweise die Sicht auf den Bildschirm verdeckt.

### Subjektiv empfundene Belastung

Die subjektiv empfundene Belastung wurde mithilfe des NASA TLX abgefragt. Dabei wurden für jede Eingabemethode die Gesamtbelastung und die Teilbelastungen aufgezeichnet, um auf die einzelnen Bereiche der Belastung eingehen zu können.

Die Gesamtbelastung bei der Eingabe mithilfe von Touch wurde mit dem Mittelwert 19.83 (SD=11.23) bewertet. Für die Eingabe mit Eyetracking lag der Mittelwert bei 49.29 (SD=18.71) und für die Eingabe mit dem Leap Motion Controller bei 48.00 (SD=17.83). Die Eingaben mithilfe von Headtracking und den SenseGloves ergaben Mittelwerte für die Gesamtbelastung von 44.79 (SD=16.84) und 43.88 (SD=16.76). Die Gesamtbelastung für alle Eingabemethoden wurde in Abbildung 6.7 dargestellt. Der Friedman-Test zeigte eine signifikante Differenz zwischen den Bedingungen für die Gesamtbelastung mit  $X^2(4) = 41.04, p < .01$ . Der Wilcoxon-Test zeigte, dass die Teilnehmer die Touch-Eingabe (M=19.83) gegenüber den anderen Eingabemethoden (M=49.29, M=48.00, M=44.79, M=43.88) im Bezug auf die Gesamtbelastung bevorzugen,  $p < .01$ . Für die anderen Tests wurde keine signifikante Differenz festgestellt.

Die mentale Anforderung hatte für die Touch-Eingabe einen Mittelwert von 17.00 (SD=13.64) und für die Eyetracking-Eingabe einen Mittelwert von 52.52 (SD=30.19). Für die Eingabe mit dem Leap Motion Controller wurde ein Mittelwert von 42.25 (SD=30.72). Die Eingabe mithilfe von Headtracking wurde im Mittel mit 40.00 (SD=27.39) bewertet. Für die Eingabe mit den SenseGloves war der Mittelwert der mentalen Anforderung 34.00 (SD=24.63). Der Friedman-Test zeigte eine signifikante Differenz zwischen den Bedingungen für die mentale Anforderung mit  $X^2(4) = 29.45, p < .01$ . Der paarweise Wilcoxon-Test zeigte, dass die Teilnehmer die Touch-Eingabe (M=17.00) gegenüber der Eingabe mit den SenseGloves (M=34.00) und gegenüber der Eyetracking-Eingabe (M=52.52) in Hinblick auf die mentale Anforderung bevorzugen mit  $p < .01$ . Für die anderen Tests wurde keine signifikante Differenz festgestellt.

Der Mittelwert der physischen Anforderung bei der Benutzung von Touch als Eingabemethode lag bei 20.50 (SD=13.87). Für das Eyetracking betrug die mittlere physische Anforderung 38.00 (SD=29.72). Die physische Anforderung bei der Eingabe mit dem Leap Motion Controller hatte einen Mittelwert von 57.75 (SD=23.48) und die Eingabe mithilfe von Headtracking einen Mittelwert von 52.75 (SD=24.11). Der Mittelwert für die SenseGloves lag bei 69.75 (SD=22.88). Der Friedman-Test zeigte eine signifikante Differenz zwischen den Bedingungen für die physische Belastung mit  $X^2(4) = 41.38, p < .01$ . Der paarweise Wilcoxon-Test zeigte, dass die Teilnehmer die Touch-Eingabe (M=20.50) gegenüber allen anderen Eingabemethoden (M=38.00, M= 57.75, M= 52.75, M=69.75) im Hinblick auf die physische Anforderung signifikant bevorzugen,  $p < .01$ . Außerdem hat der Eyetracker (M=38.00) eine signifikant bessere Bewertung erhalten als der Leap Motion Controller (M=57.25),  $p < .01$ . Die physische Anforderung wurde für die SenseGloves (M=69.75) signifikant am höchsten bewertet verglichen mit allen anderen Eingabemethoden (M=20.50, M=38.00, M= 57.75, M= 52.75),  $p < .01$ . Für die anderen Tests wurde keine signifikante Differenz festgestellt.

Die zeitliche Anforderung bei der Touch-Eingabe hatte einen Mittelwert von 17.75 (SD=14.27) und bei der Eingabe mit Eyetracking einen Mittelwert von 32.75 (SD=29.47). Die zeitliche Anforderung für die Eingabe mit dem Leap Motion Controller wurde mit einem Mittelwert von 27.00 (SD=20.82) bewertet. Bei der Eingabe mithilfe von Headtracking wurde die zeitliche Anforderung im Mittel mit 25.00 (SD=16.73) bewertet und für die SenseGloves mit 26.75 (SD=24.3). Für die zeitliche Belastung wurde mit dem Friedman-Test keine signifikante Differenz zwischen den Bedingungen gefunden mit  $X^2(4) = 5.81, p = .21379$ .

Außerdem wurde die empfundene Leistung abgefragt, die für die Touch-Eingabe einen Mittelwert von 30.00 (SD=27.57) erhielt. Bei der Eingabe mithilfe von Eyetracking lag der Mittelwert bei 59.75 (SD=28.48) und bei der Eingabe mit dem Leap Motion Controller bei 58.75 (SD=20.36). Das Headtracking erhielt im Mittel eine Bewertung von 53.00 (SD=21.18) und die SenseGloves von 40.25 (SD=21.71). Der Friedman-Test zeigte eine signifikante Differenz zwischen den Bedingungen für die empfundene Leistung mit  $X^2(4) = 20.06, p < .01$ . Der paarweise Wilcoxon-Test zeigte, dass die Teilnehmer ihre Leistung bei Verwendung der Touch-Eingabe (M=30.00) signifikant besser eingeschätzt haben als bei dem Eyetracker (M=59.75), dem Leap Motion Controller (M=58.75) und dem Headtracking (M=53.00),  $p < .01$ . Außerdem zeigte der Test, dass die erbrachte Leistung für die SenseGloves (M=34.00) signifikant besser eingeschätzt wurde als für das Headtracking (M=53.00),  $p < .01$ . Für die anderen Tests wurde keine signifikante Differenz festgestellt.

Die Anstrengung bei der Benutzung von Touch als Eingabemethode wurde im Mittel mit 20.50 (SD=16.04) bewertet. Für die Eyetracking-Eingabe lag der Mittelwert bei 58.00 (SD=24.00) und bei der Eingabe mit dem Leap Motion Controller bei 52.75 (SD=24.92). Bei der Eingabe durch Headtracking wurde die Anstrengung im Mittel mit 52.00 (SD=20.94) bewertet. Für die SenseGloves war der Mittelwert 53.00 (SD=24.62). Der Friedman-Test zeigte eine signifikante Differenz zwischen den Bedingungen für die Anstrengung mit  $X^2(4) = 36.47, p < .01$ . Der paarweise Wilcoxon-Test zeigte, dass die Anstrengung bei der Verwendung von Touch (M=20.50) signifikant niedriger war als bei der Verwendung aller anderen Eingabemethoden (M=58.00, M=52.75, M=52.00, M=53.00),  $p < .01$ . Für die anderen Tests wurde keine signifikante Differenz festgestellt.

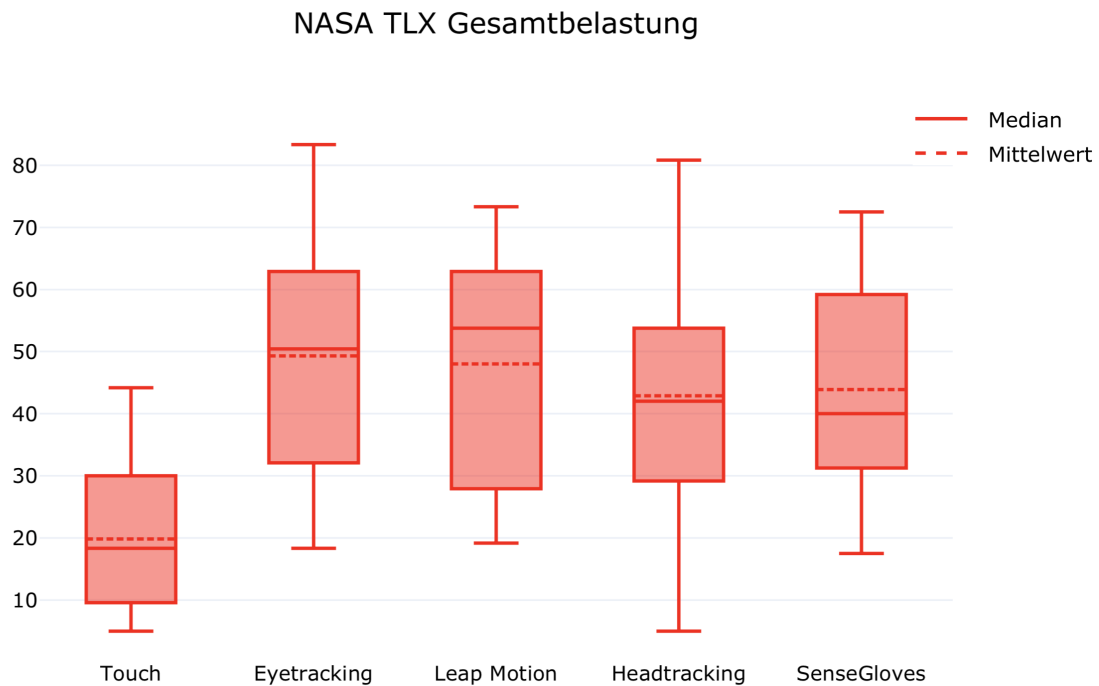
Schließlich wurde die empfundene Frustration bewertet, die für die Touch-Eingabe im Mittelwert bei 13.25 (SD=11.86) lag. Für die Eingabe mithilfe von Eyetracking wurde die Frustration mit einem Mittelwert von 55.00 (SD=23.24) bewertet. Der Leap Motion Controller hatte einen Mittelwert von 49.50 (SD=17.1). Die Frustration wurde für die Eingabe durch Headtracking mit 43.25 (SD=22.65) bewertet und für die Eingabe mit den SenseGloves mit 39.50 (SD=22.07). Der Friedman-Test zeigte eine signifikante Differenz zwischen den Bedingungen für die Frustration mit  $X^2(4) = 43.69, p < .01$ . Der paarweise Wilcoxon-Test zeigte, dass die Frustration bei der Touch-Eingabe (M=13.25) signifikant niedriger war als bei allen anderen Eingabemethoden (M=55.00, M=49.50, M=43.25, M=39.50),  $p < .01$ . Außerdem zeigte der Test, dass das Zeichnen mit den SenseGloves (M=39.50) zu einer signifikant niedrigeren Frustration führte als mit dem Eyetracking (M=55.00),  $p < .01$ . Für die anderen Tests wurde keine signifikante Differenz festgestellt.

Die Bewertungen der einzelnen Kategorien des NASA TLX wurden ebenfalls visualisiert und sind im Anhang zu finden (siehe Abbildung A.1 und A.2).

### **Gemessene Abweichung**

Um die Genauigkeit, mit der die Teilnehmer die Formen nachzeichnen konnten, zu messen, wurde für jede Zeichnung die Abweichung berechnet.

Die durchschnittliche Abweichung bei dem Zeichnen mithilfe von Touch betrug 0.10 (SD=0.02). Für die Eingabe mithilfe von Eyetracking lag die durchschnittliche Abweichung bei 0.27 (SD=0.15). Das Zeichnen mit dem Leap Motion Controller führte zu einer durchschnittlichen Abweichung von 0.13 (SD=0.04). Dabei wurden die Punkte nicht miteinbezogen, bei denen der Leap Motion Controller die Hand beziehungsweise den ausgestreckten Zeigefinger nicht erkannt hat. Der Mittelwert der Abweichung für die Headtracking-Eingabe war wie bei der Touch-Eingabe ebenfalls 0.10 (SD=0.03).



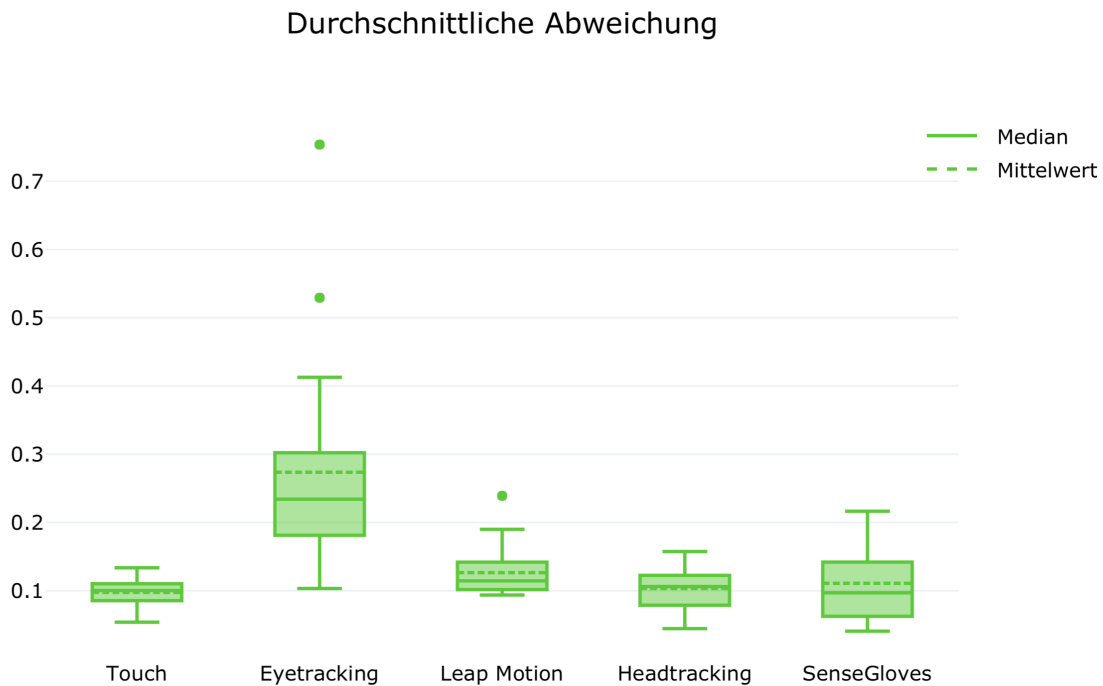
**Abbildung 6.7.:** Ergebnisse für die Gesamtbelastung nach dem NASA TLX.

Das Zeichnen mit den SenseGloves hatte eine durchschnittliche Abweichung von 0.11 (SD=0.05). Bei zwei Teilnehmern wurde die Abweichung für die SenseGloves nicht aufgezeichnet. Daher wurde der Durchschnitt für die SenseGloves nur aus 18 Werten berechnet. Die Abweichungen für die fünf Eingabemethoden wurden in Abbildung 6.8 visualisiert. Der Repeated Measures ANOVA zeigte, dass es eine statistisch signifikante Differenz zwischen den Eingabemethoden gibt, mit  $F_{4,85} = 19.20, p < .01$ . Der paarweise t-Test zeigte, dass die Touch-Eingabe (M=0.10) eine signifikant kleinere Abweichung hatte als die Eingabe mit Eyetracking (M=0.27),  $t = 5.29, p < .01$  und mit dem Leap Motion Controller (M=0.13),  $t = 3.47, p < .01$ . Außerdem zeigte der paarweise t-Test, dass das Zeichnen mit Eyetracking (M=0.27) zu einer signifikant größeren Abweichung führte, als die Eingabe mit dem Leap Motion Controller (M=0.13),  $t = -4.18, p < .01$ , dem Headtracking (M=0.10),  $t = -5.11, p < .01$  und den SenseGloves (M=0.11),  $t = -4.39, p < .01$ .

### Benötigte Zeit

Neben der Abweichung wurde während des Zeichenvorgangs die Zeit in Sekunden gemessen, die die Teilnehmer zum Nachzeichnen der Form benötigt haben.

Für das Nachzeichnen der geometrischen Formen mithilfe von Touch haben die Teilnehmer durchschnittlich 16.61s (SD=14.66) benötigt. Die Eyetracking-Eingabe führte durchschnittlich zu einer Zeit von 12.75s (SD=7.69). Der Mittelwert der benötigten Zeit für die Eingabe mit dem Leap Motion Controller lag bei 21.52s (SD=10.54). Die Zeit für das Nachzeichnen der Formen mithilfe von Headtracking betrug im Mittelwert 22.22s (SD=10.31). Das Nachzeichnen hat mit den SenseGloves im Mittelwert 28.82s (SD=12.12) gedauert. Bei zwei Teilnehmern wurde die Zeit, die zum Nachzeichnen mit den SenseGloves benötigt wurde, nicht aufgezeichnet. Daher wurde



**Abbildung 6.8.:** Aufgezeichnete Abweichung für jede Eingabemethode.

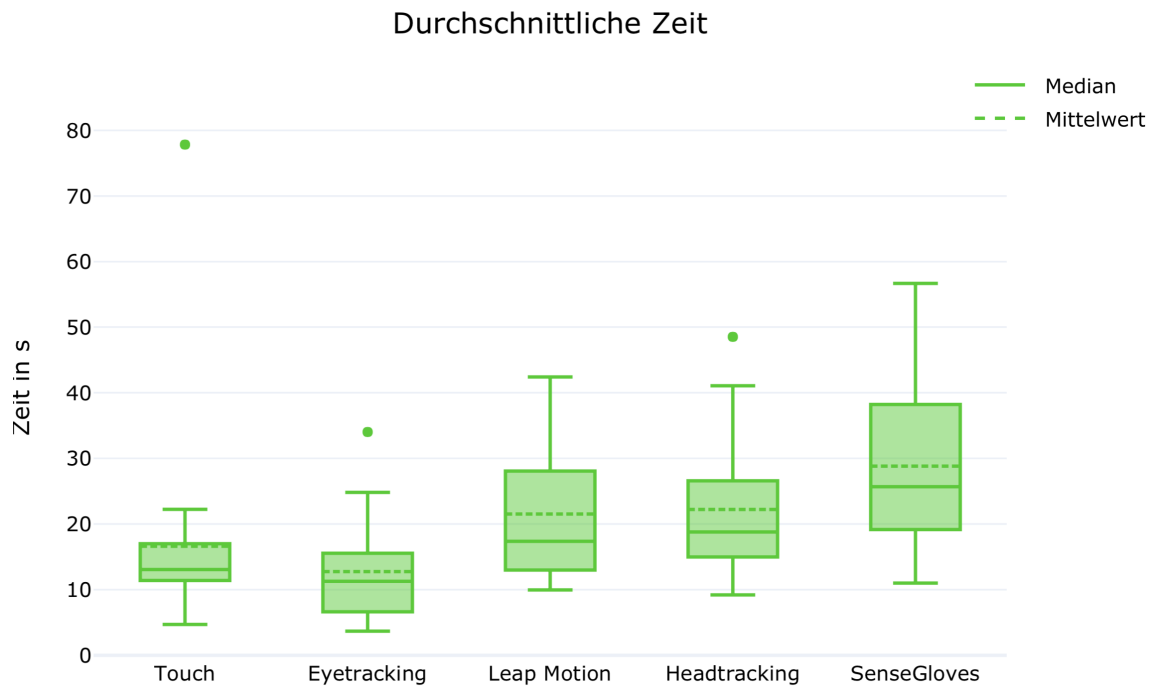
der Durchschnitt für die SenseGloves nur aus 18 Werten berechnet. Die zum Nachzeichnen der geometrischen Formen benötigte Zeit wurde in Abbildung 6.9 dargestellt. Der Repeated Measures ANOVA zeigte, dass es eine statistisch signifikante Differenz zwischen den Eingabemethoden gibt, mit  $F_{4,85} = 3.85, p < .01$ . Der paarweise t-Test zeigte, dass die Teilnehmer für das Nachzeichnen der Formen mit den SenseGloves ( $M=28.82s$ ) signifikant länger gebraucht haben, als mit Touch ( $M=16.61s$ ),  $t = 2.48, p < .05$ , Eyetracking ( $M=12.75s$ ),  $t = 4.83, p < .01$  und Leap Motion Controller ( $M=21.52s$ ),  $t = 2.49, p < .05$ . Außerdem zeigte der paarweise t-Test, dass die Teilnehmer bei dem Zeichnen mithilfe von Eyetracking ( $M=12.75s$ ) signifikant schneller waren, als bei dem Zeichnen mithilfe des Leap Motion Controllers ( $M=21.52s$ ),  $t = 5.09, p < .01$ , des Headtrackings ( $M=22.22s$ ),  $t = 3.86, p < .01$  und den SenseGloves ( $M=28.82s$ ),  $t = 4.83, p < .01$ .

### Korrelation von Abweichung und Zeit

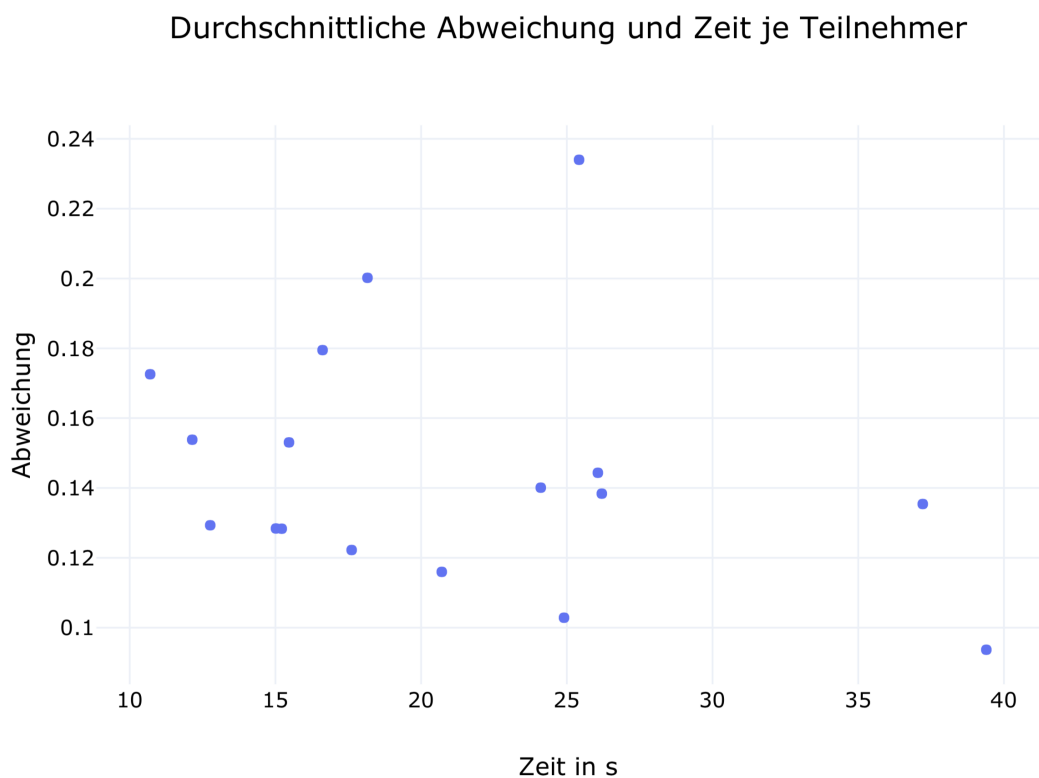
Von den 20 Studienteilnehmern wurden 17 vollständige Paare von Abweichung und Zeit aufgezeichnet, die in Abbildung 6.10 für jeden Teilnehmer dargestellt wurden. Die gemessene Abweichung und Zeit wurden auf Korrelation getestet. Der Test ergab, dass keine signifikante Korrelation der Variablen existiert.

### Ranking der Eingabemethoden

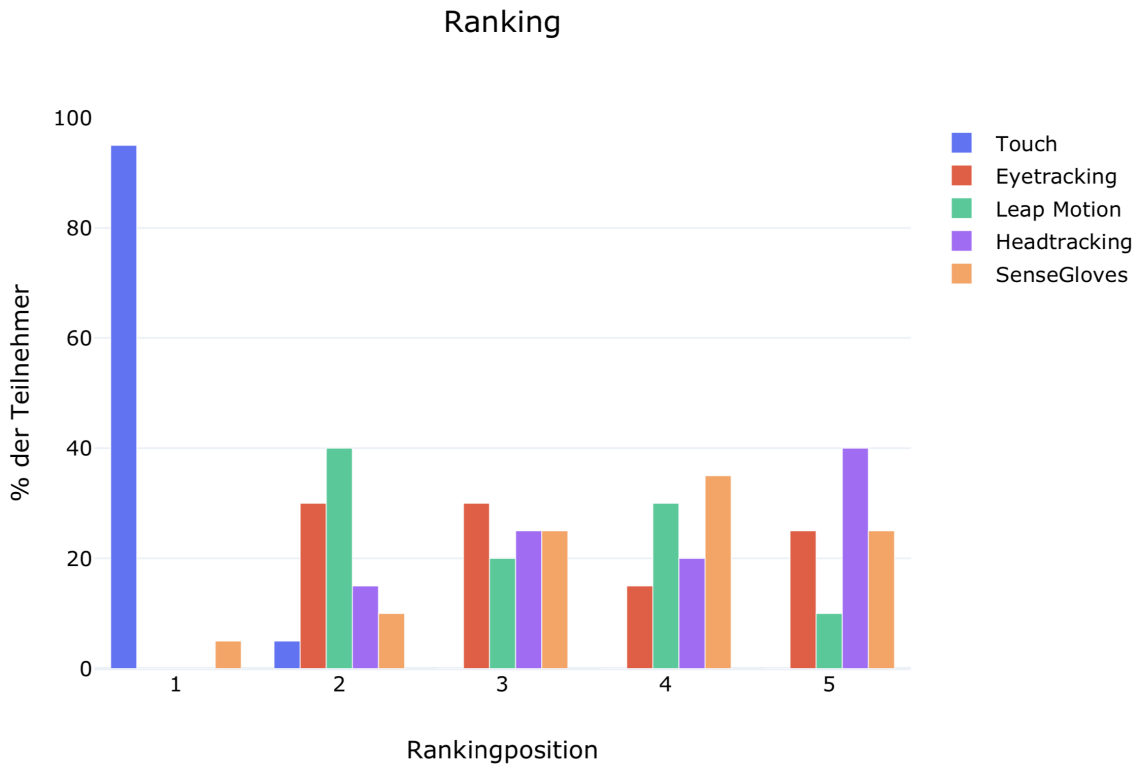
Die Teilnehmer sollten alle fünf Eingabemethoden von der, die ihnen am besten gefallen hat (1) bis zu der, die ihnen am schlechtesten gefallen hat (5) sortieren.



**Abbildung 6.9.:** Zum Zeichnen benötigte Zeit in Sekunden für jede Eingabemethode.



**Abbildung 6.10.:** Korrelation zwischen der gemessenen Abweichung und der zum Zeichnen benötigten Zeit in Sekunden für jeden Teilnehmer.



**Abbildung 6.11.:** Ranking der Eingabemethoden von der besten (1) zu der schlechtesten (5)

Wie in Abbildung 6.11 zu sehen, haben 95% der Teilnehmer die Touch-Eingabe als beste Eingabemethode angegeben, während 5% sie als zweitbeste angegeben haben. Das Eyetracking wurde von je 30% als zweit- oder drittbeste Eingabemethode bewertet, von 15% als viertbeste und von 25% als schlechteste Eingabemethode. 40% gaben die Gestenerkennung mit dem Leap Motion Controller als zweitbeste, 20% als drittbeste, 30% als viertbeste und 10% als schlechteste Eingabemethode an. Die Eingabe mithilfe von Headtracking wurde von 15% als zweitbeste Eingabemethode, von 25% als drittbeste, von 20% als viertbeste und von 40% als schlechteste Eingabemethode angesehen. Für 5% der Teilnehmer war die Eingabe mit den SenseGloves die beste Eingabemethode, für 10% die zweitbeste, für 25% die drittbeste, für 35% die viertbeste und für 25% die schlechteste Eingabemethode.

## 6.5. Einschränkungen

Die Stichprobe der Benutzerstudie war nicht repräsentativ, da alle außer einem Teilnehmer Studenten der Universität waren, die Fächer im Bereich (Medien-) Informatik studieren. Daher hat die Benutzerstudie eine eingeschränkte Aussagekraft.



## 7. Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Nutzerstudie unter Berücksichtigung der Einschränkungen und der Kommentare der Teilnehmer diskutiert. Schließlich werden die Auswirkungen auf das Design vorgestellt.

### 7.1. Ergebnisse der Benutzerstudie

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Nutzerstudie diskutiert und bewertet.

#### Subjektives Feedback

Nach jeder Versuchskondition bewerteten die Teilnehmer die drei Aussagen: „*Ich würde die Eingabemethode gerne regelmäßig nutzen*“, „*Ich konnte die Form mithilfe der Eingabemethode akkurat nachzeichnen*.“ und „*Mir hat es gefallen, die Eingabemethode zu nutzen*.“.

Die Aussagen „*Ich würde die Eingabemethode gerne regelmäßig nutzen*“ und „*Mir hat es gefallen, die Eingabemethode zu nutzen*.“ wurden für die Touch-Eingabe signifikant besser bewertet als für alle anderen Eingabemethoden. Ein entscheidender Faktor dafür ist die Erfahrung der Teilnehmer mit der Eingabemethode (siehe Abbildung 6.1). Die Teilnehmer gaben an, dass die Touch-Eingabe bereits eine „*bekannte Technologie*“ ist, die „*leicht zu nutzen [ist], da die Eingabe gewohnt ist*“. Auf der anderen Seite wurde für alle anderen vier Eingabemethoden angemerkt, dass die Eingabe „*sehr anstrengend*“ ist. Der Leap Motion Controller hat teilweise die Hand nicht richtig erkannt und musste daher bei manchen Teilnehmern neu gestartet werden. Das könnte die subjektiven Meinungen der Teilnehmer zu dem Gerät negativ beeinflusst haben. Ein negativer Faktor des Headtrackings war, dass die Teilnehmer sich „*unwohl gefühlt*“ haben die Eingabe zu nutzen. An den SenseGloves wurde die „*schwere und klobige Hardware*“ und die „*Verdeckung des Bildschirms*“ kritisiert.

Für die Aussage „*Ich konnte die Form mithilfe der Eingabemethode akkurat nachzeichnen*.“ wurde ebenfalls die Touch-Eingabe signifikant besser bewertet als alle anderen Eingabemethoden. Außerdem haben die SenseGloves (M=3.50) signifikant bessere Bewertungen erhalten als der Leap Motion Controller (M=2.60) und der Eyetracker (M=1.95). Das Zeichnen mit den SenseGloves wurde von den Teilnehmern als „*sehr genau*“ beschrieben, während bei dem Leap Motion Controller angemerkt wurde, dass „*die Hand immer leicht zittert*“ und die „*Hardware zu ungenau*“ ist. Bei dem Eyetracker wurde von den Teilnehmern angegeben, dass die Eingabe „*durch schnelle Augenbewegungen ungenau*“ ist.

Zwischen den anderen Versuchsbedingungen wurde keine paarweise Signifikanz festgestellt. Das könnte daran liegen, dass einige Teilnehmer mehrere der Eingabemethoden Eyetracking, Leap Motion Controller, Headtracking und SenseGloves, bezogen auf die drei Aussagen gleich bewertet haben.

### **Subjektiv empfundene Belastung**

Um eine genauere Bewertung der Eingabemethoden zu bekommen, sollten die Teilnehmer zusätzlich den NASA TLX ausfüllen.

Mithilfe des NASA TLX abgefragte subjektive Gesamtbelastung war für die Touch-Eingabe signifikant am niedrigsten im Vergleich zu den vier anderen Eingabemethoden.

Bezogen auf die mentale Anforderung wurde die Touch-Eingabe signifikant der Eingabe mit den SenseGloves und mit dem Headtracking vorgezogen. Ein Grund dafür könnte sein, dass die Teilnehmer die Eingabe mithilfe von Touch bereits gewohnt sind, da sie die Touch-Eingabe täglich nutzen und deshalb die mentale Anstrengung geringer ausfällt. Die SenseGloves und das Headtracking waren für einige der Teilnehmer unbekannte Eingabemethoden. Die, die bereits Erfahrung mit den Eingabemethoden hatten, haben sie im Gegensatz zu der Touch-Eingabe nur selten genutzt. Daher stellte die Eingabe mit den beiden Eingabemethoden für die Teilnehmer eine höhere mentale Anforderung dar.

Auch für die physische Anforderung wurde die Touch-Eingabe am besten bewertet. Bei dem Nachzeichnen mit Touch war nur eine kleine Bewegung des Zeigefingers und der Hand notwendig, während bei dem Nachzeichnen mit dem Leap Motion Controller, dem Headtracking und den SenseGloves ein größerer Bewegungsradius notwendig war, um die Formen nachzuzeichnen. Es war überraschend, dass der Eyetracker hinsichtlich der physischen Anforderung signifikant besser bewertet wurde als der Leap Motion Controller, da viele der Teilnehmer anmerkten, dass es „*sehr anstrengend*“ ist, die Augen kontrolliert zu bewegen. Wie bereits erwartet war bei der Verwendung der SenseGloves die physische Anforderung signifikant am höchsten. Viele Teilnehmer haben während der Studie angemerkt, dass die SenseGloves „*sehr schwer und klobig [sind]*“ und es daher „*anstrengend [ist], den Arm über längere Zeit hochzuhalten*“. Das spiegelt sich in dem „Gorilla-Arm“ Syndrom wider [HRGMI14]. Es besagt, dass das lange in die Luft halten des Armes bei der Eingabe durch Gesten bei den Nutzern zu Ermüdung führt.

Für die zeitliche Anforderung wurde keine signifikante Differenz zwischen den Eingabemethoden festgestellt. Die Teilnehmer konnten sich bei allen Zeichenaufgaben so viel Zeit lassen, wie sie benötigt haben. Dass durch die verschiedenen Versuchsbedingungen kein unterschiedlicher Zeitdruck erzeugt wurde, könnte der Grund dafür sein, dass kein signifikanter Unterschied hinsichtlich der zeitlichen Anforderung entstanden ist.

Die Teilnehmer haben ihre Leistung bei der Eingabe mithilfe von Touch signifikant besser eingeschätzt als bei der Eingabe mit allen anderen Eingabemethoden. Das spiegelt sich auch in der gemessenen Abweichung wider, die für die Touch-Eingabe zusammen mit der Headtracking-Eingabe am geringsten war. Obwohl die Abweichung für das Zeichnen mit Headtracking kleiner war als mit den SenseGloves, bewerteten die Teilnehmer ihre Leistung mit den SenseGloves signifikant besser als mit dem Headtracking. Das könnte daran liegen, dass sich die Teilnehmer mit den SenseGloves wohler gefühlt haben als bei der Verwendung des Headtrackings.

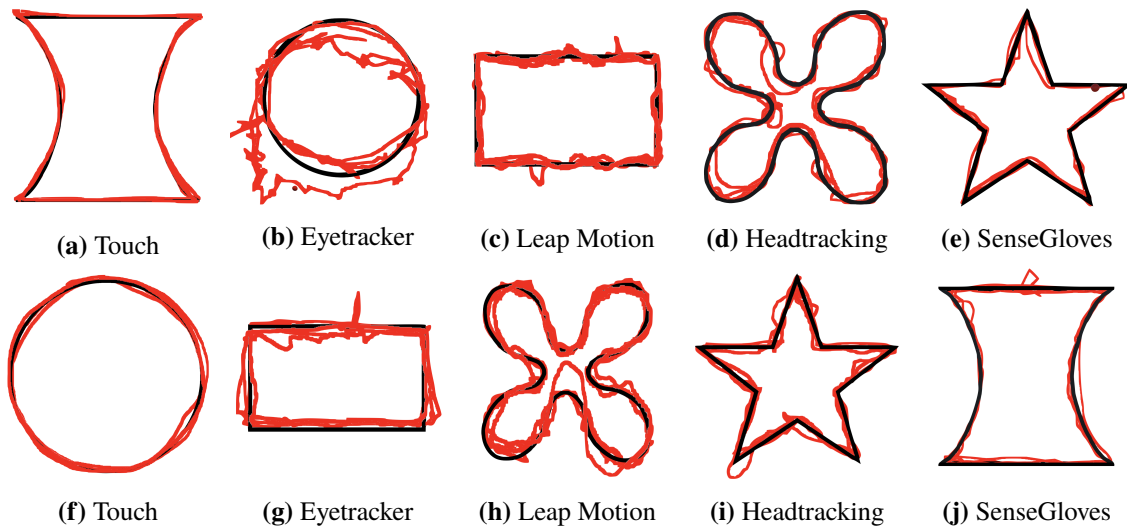
Die Anstrengung bei dem Nachzeichnen der Formen war bei der Touch-Eingabe signifikant kleiner als bei allen anderen Eingabemethoden. Die Touch-Eingabe war auch die einzige Eingabemethode, bei der von keinem Teilnehmer der Nachteil „*anstrengend*“ genannt wurde. Die Anstrengung setzt sich aus der physischen und der mentalen Belastung zusammen, für die die Touch-Eingabe ebenfalls die niedrigste Bewertung erhalten hat.

Die Frustration war für die Touch-Eingabe ebenfalls signifikant am niedrigsten. Außerdem war die Frustration für die SenseGloves signifikant niedriger als für den Eyetracker. Frustration bei der Eingabe hängt meistens damit zusammen, dass die Eingabe nicht wie gewünscht reagiert oder nicht das gewünschte Ergebnis erzielt wird. Die Teilnehmer gaben an, dass es ihnen bei dem Eyetracking wegen den „*schnellen Augenbewegungen*“ nicht möglich war, die Form genau nachzuzeichnen. Der Leap Motion Controller hatte bei einigen Teilnehmern kurze Aussetzer, die für die Berechnung ausgenommen wurden, für die Teilnehmer jedoch sichtbar waren. Diese Faktoren, die die Teilnehmer nicht kontrollieren konnten, könnten die Bewertung der Frustration negativ beeinflusst haben.

### **Gemessene Abweichung**

Die Eingabemethode hat wie in Abbildung 6.8 zu sehen, Auswirkungen auf die Genauigkeit, die bei dem Nachzeichnen der geometrischen Formen erreicht wurde.

Die Touch-Eingabe war zusammen mit dem Headtracking die Eingabemethode, mit der die kleinste Abweichung erzielt wurde. Die SenseGloves waren nur gering ungenauer. Der Leap Motion Controller war etwas ungenauer als die SenseGloves. Mit Abstand am ungenaueren war das Eyetracking. Der große Vorteil der Touch-Eingabe ist, dass das Nachzeichnen durch einen direkten Kontakt mit dem Bildschirm und der darauf angezeigten geometrischen Form geschieht. Dadurch ist der Finger stabiler, als wenn er sich im freien Raum bewegt. Das ist auch in Abbildung 7.1 zu sehen. Die Linien der Zeichnungen Abbildung 7.1a und Abbildung 7.1f, die mithilfe von Touch gezeichnet wurden, weisen weniger „*zittern*“ auf, als alle anderen Zeichnungen. Überraschend war, dass die aufgezeichnete Abweichung bei Verwendung des Headtrackings genau so klein war wie bei der Touch-Eingabe und kleiner als bei allen anderen Eingabemethoden. Ein Grund dafür könnte sein, dass der Kopf als Eingabemethode stabiler ist als zum Beispiel die ungestützte Hand. Obwohl viele Teilnehmer angaben, dass die Hardware der SenseGloves schwer war, konnten sie mit ihnen die Formen genauer nachzeichnen als mit dem Leap Motion Controller. Das ist wahrscheinlich auf die zum Tracking der Hand verwendete Hardware zurückzuführen. Während die für das Headtracking und die SenseGloves verwendeten VIVE Tracker die Position im Raum sehr genau aufgezeichnet haben, hatte der Leap Motion Controller einen sehr eingeschränkten Radius und manchmal Schwierigkeiten den ausgestreckten Finger oder die Hand richtig zu erkennen. Wie bereits erwartet, war das Eyetracking die Eingabemethode, die im Durchschnitt mit Abstand die höchste Abweichung hatte. Die Augenbewegungen von Menschen verlaufen nicht linear sondern in plötzlichen, ruckhaften Sakkaden [Jac91]. Daher war es für die Teilnehmer schwer, ihren Blick auf die Formen zu konzentrieren und ihre Augen kontrolliert entlang der Linie zu bewegen. Das spiegelt sich auch in den Zeichnungen Abbildung 7.1b und Abbildung 7.1g wider. Die ruckhaften Augenbewegungen resultieren in Ausschlägen der Linie. Dabei fällt auf, dass es den Teilnehmern bei der Eingabe mit Eyetracking leichter gefallen ist, lineare Formen nachzuzeichnen als gebogene.



**Abbildung 7.1.:** Übereinandergelegte Zeichnungen der Versuchsgruppen 1 und 2 (siehe Tabelle 6.1).

### Benötigte Zeit

Auch die zum Nachzeichnen benötigte Zeit wurde wie in Abbildung 6.9 zu sehen, von der Art der Eingabemethode beeinflusst.

Die Eingabemethode, mit der die Teilnehmer die geometrischen Formen durchschnittlich am schnellsten nachgezeichnet haben, war das Eyetracking. Die Augenbewegungen erfolgen in plötzlichen, ruckhaften Sakkaden [Jac91], sodass es den Teilnehmern nicht möglich war, ihre Augen langsam entlang der Linie zu bewegen. Die zweitschnellste Eingabemethode war die Touch-Eingabe. Der Bewegungsradius, in dem die Teilnehmer ihren Finger auf dem Tablet bewegen mussten, war kleiner als bei dem Leap Motion Controller und bei den SenseGloves. Außerdem konnten sie durch die direkte Berührung der Linie die Form nachzeichnen, sodass auch bei einer schnellen Eingabe eine hohe Genauigkeit möglich war. Die Eingabe mit dem Leap Motion Controller war schneller als die Eingabe mit dem Headtracking und den SenseGloves, da der Leap Motion Controller einen kleineren Bereich aufzeichnet. Daher war der Bewegungsradius kleiner und somit eine schnellere Eingabe möglich. Das Nachzeichnen der Formen mithilfe von Headtracking hat im Mittelwert kürzer gedauert als mit den SenseGloves, aber länger als mit allen anderen Eingabemethoden. Um mit dem Headtracking die Formen genau nachzeichnen zu können, musste der Kopf kontrolliert bewegt werden. Da der Kopf nicht so einen großen Bewegungsradius hat wie zum Beispiel der Arm, war ein kontrolliertes Nachzeichnen nur möglich, wenn der Kopf langsam bewegt wurde. Für das Nachzeichnen der Formen mit den SenseGloves haben die Teilnehmer mit Abstand am meisten Zeit benötigt. Das lag wahrscheinlich daran, dass der Bewegungsradius zum Nachzeichnen der Formen mit den SenseGloves größer war als zum Beispiel bei dem Leap Motion Controller. Außerdem waren die SenseGloves die schwerste Hardware, was dazu geführt hat, dass die Teilnehmer ihren Arm langsamer bewegt haben.

### Zusammenfassung der Werte

In Tabelle 7.1 wurden die in der Studie gemessenen Werte dargestellt.

Eingabe	Aussage 1 M (SD)	Aussage 2 M (SD)	Aussage 3 M (SD)	NASA TLX M (SD)	Abweichung M (SD)	Zeit in s M (SD)
Touch	4.90 (0.30)	4.70 (0.46)	4.50 (0.97)	19.83 (11.23)	0.10 (0.02)	16.61 (14.66)
Eyetracking	2.85 (1.31)	1.95 (0.97)	2.90 (1.51)	49.29 (8.71)	0.27 (0.15)	12.75 (7.69)
Leap Motion	2.95 (1.12)	2.60 (0.86)	3.35 (1.06)	48.00 (17.83)	0.13 (0.04)	21.52 (10.54)
Headtracking	1.95 (1.12)	2.70 (1.10)	2.60 (0.80)	44.79 (16.84)	0.10 (0.03)	22.22 (10.31)
SenseGloves	2.75 (1.04)	3.50 (1.02)	2.75 (1.09)	43.88 (16.76)	0.11 (0.05)	28.82 (12.12)

**Tabelle 7.1.:** Übersicht über die Ergebnisse der Studie.

Aussage 1: „*Ich würde die Eingabemethode gerne regelmäßig nutzen.*“

Aussage 2: „*Ich konnte die Form mithilfe der Eingabemethode akkurat nachzeichnen.*“

Aussage 3: „*Mir hat es gefallen, die Eingabemethode zu nutzen.*“

### Korrelation von Abweichung und Zeit

Bei der Durchführung der Studie war auffallend, dass die Teilnehmer unterschiedliche Ansätze verfolgt haben. Manche Teilnehmer haben versucht die Formen so perfekt wie möglich nachzuzeichnen und sich dafür sehr viel Zeit gelassen. Andere Teilnehmer haben die Formen hingegen schneller nachgezeichnet, und eine größere Abweichung gehabt. Das Verhältnis zwischen benötigter Zeit und Abweichung war jedoch wie in Abbildung 6.10 zu sehen, bei allen Teilnehmer unterschiedlich.

### Ranking der Eingabemethoden

Um den Gesamteindruck für die Eingabemethoden abzufragen, sollten die Teilnehmer ein Ranking der fünf Eingabemethoden erstellen (siehe Abbildung 6.11).

Fast allen Teilnehmer hat die Eingabe mit Touch am besten gefallen. Das spiegelt sich auch in allen anderen Kategorien wider: Die Touch Eingabe wurde für die Usability am besten bewertet, hatte die geringsten Teilbelastungen und Gesamtbelastung nach dem NASA TLX, die kleinste durchschnittliche Abweichung und die zweitkürzeste Zeit im Vergleich zu den anderen Eingabemethoden. Obwohl die Eingabe mit dem Leap Motion Controller die zweitgrößte Abweichung und die zweitgrößte Gesamtbelastung nach dem NASA TLX hatte und bei vielen Teilnehmern Fehler bei der Aufzeichnung auftraten, wurde er von der Mehrheit der Teilnehmer auf den zweiten Platz gewählt. Das lag wahrscheinlich daran, dass es den Teilnehmern insgesamt gefallen hat das Gerät zu nutzen, da ihnen die Eingabe Spaß gemacht hat und für die Eingabe keine Hardware am Körper getragen werden musste. Auf die dritte Position wurde von den meisten Teilnehmern der Eyetracker gewählt. Das war aufgrund der anderen Studienergebnisse sehr überraschend, da der Eyetracker für das Nachzeichnen die Eingabemethode mit der größten Abweichung war und im Mittelwert die größte Gesamtbelastung nach dem NASA TLX hatte. Der positive Gesamteindruck könnte daher kommen, dass viele Teilnehmer das Eyetracking als „*sehr unterhaltsam*“ bezeichnet haben und überrascht davon waren, wie gut die Erkennung der Augen funktioniert. Auf den vierten Platz wurden von der Mehrheit die SenseGloves gewählt. Ein wichtiger Faktor für die schlechte Einordnung der SenseGloves war, dass viele Teilnehmer an der Eingabe mit den SenseGloves die „*sehr schwere und klobige Hardware*“ gestört hat. Auf den letzten Platz wurde von den meisten Teilnehmern das Headtracking gewählt. Der Grund dafür könnte sein, dass viele Teilnehmer angaben, sich unwohl zu fühlen bei der Eingabe mit Headtracking, da die Bewegung „*seltsam*“ aussieht.

## 7. Diskussion

Eingabe	Vorteile	Nachteile
Touch	einfach zu nutzen (10) gewohnt (6) genau (5) intuitiv (5)	Finger verdeckt Teile des Bildschirms (3) ungenau (2) Bildschirm muss berührt werden (1)
Eyetracking	Hände sind frei (4)  unterhaltsam (4) einfach zu nutzen (3) schnelle Eingabe (3)	ungenau, da schnelle Augenbewegungen (13) anstrengend (4) reagiert auf Blinzeln (3)
Leap Motion	einfache zu nutzen (3) kein haptisches Eingabegerät in der Hand (3) natürliche Eingabe (3) Bildschirm muss nicht berührt werden (3) unterhaltsam (2) intuitiv (1)	ungenau, aufgrund von Aussetzern (12) anstrengend für den Arm (5)  kleiner Bereich des Sensors (2) nocht nicht ausgereift (1)
Headtracking	einfach zu nutzen (7) Hände sind frei (5) unterhaltsam (3)  genau (3)  nicht anstrengend (1)	unwohl bei der Eingabe gefühlt (5) anstrengend (3) würde in der Öffentlichkeit auf Ablehnung stoßen (2) Sicht auf den Bildschirm je nach Position eingeschränkt (1)
SenseGloves	genau (5) das Zeichnen fühlt sich real an (4) unterhaltsam (3)  Force Feedback (1) intuitiv (1) einfach zu nutzen (1)	Größe und Gewicht der Hardware (12) anstrengend für den Arm (6) Handschuh verdeckt Sicht auf den Bildschirm (6) unhandlich (2)

**Tabelle 7.2.:** Kommentare der Teilnehmer zu den Eingabemethoden absteigend nach der Häufigkeit sortiert. Die Häufigkeit für jeden Kommentar steht in der Klammer.

### 7.2. Auswirkungen auf das Design

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Auswirkungen der Studienergebnisse auf das Design der Anwendung. Dabei werden die in Tabelle 7.2 dargestellten Kommentare der Teilnehmer berücksichtigt.

Um eine Verunsicherung der Teilnehmer durch die ab und zu auftretenden Aussetzer des Leap Motion Controllers zu verhindern, wäre es möglich, dass diese Aussetzer schon während der Laufzeit herausgefiltert werden, sodass sie für die Teilnehmer nicht sichtbar sind. Dabei müsste überprüft werden, ob eine Filterung möglich ist, oder ob die Aussetzer eine zu lange Zeitspanne einnehmen, in der der Leap Motion Controller dann nicht reagieren würde.

Außerdem wäre es denkbar, die Augenbewegungen bei dem Eyetracking zu filtern, sodass das Zwinkern und das von Jacob [Jac91] beschriebene Zittern der Augen während einer Fixationsperiode keine Auswirkungen auf die Zeichnung hat.

Da einige Teilnehmer angemerkt haben, dass die SenseGloves während des Zeichnens teilweise die Sicht auf den Bildschirm verdeckt haben, könnten die SenseGloves in Zukunft in Verbindung mit einer VR-Brille getestet werden, um diesen Effekt zu verhindern.





## 8. Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden die fünf verschiedenen Eingabemethoden: Touch, Eyetracking, Leap Motion Controller, Headtracking und SenseGloves mithilfe einer Benutzerstudie verglichen.

Im ersten Schritt wurden die Grundlagen des Themas und die verwandten Arbeiten vorgestellt. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde eine Benutzerstudie entwickelt, in der die Teilnehmer fünf verschiedene geometrische Formen mit den fünf verschiedenen Eingabemethoden nachgezeichnet haben. Um die Benutzerstudie durchzuführen, wurde eine Unity Anwendung implementiert, in der die verschiedenen geometrischen Formen nachgezeichnet werden können. Die implementierte Anwendung berechnet die Abweichung der Zeichnung und die zum Zeichnen benötigte Zeit. In der Benutzerstudie wurde die Benutzerfreundlichkeit der Eingabemethoden und die Belastung, die bei der Verwendung der Eingabemethoden auftrat, mithilfe von Fragebögen ermittelt. Während der Zeichenaufgaben wurde die Abweichung und die Zeit gemessen.

Die statistische Auswertung der gesammelten Daten ergab, dass die Touch-Eingabe hinsichtlich der Benutzerfreundlichkeit, der Belastung und der Abweichung am besten abgeschnitten hat. Auch in der Gesamtwertung wurde die Touch-Eingabe mit Abstand als beste Eingabemethode bewertet. Dabei muss beachtet werden, dass die anderen Technologien noch lange nicht so ausgereift sind wie Touch, sondern noch am Anfang ihrer Entwicklung stehen. Unter der Annahme, dass die neuen Technologien noch weiterentwickelt werden, haben sie großes Potenzial. Viele Teilnehmer waren begeistert von den neuen Eingabemethoden, aber gaben an, dass sie für eine verlässliche Eingabe noch weiterentwickelt werden müssten. Jede der vier Eingabemethoden Eyetracking, Leap Motion Controller und SenseGloves hatte in unterschiedlichen Kategorien ihre Vor- und Nachteile. Daher ist für diese Geräte keine zusammenfassende Bewertung möglich. Die Teilnehmer sahen als wichtigste Merkmale von guten Eingabegeräten, dass die Hardware handlich ist, die Bewegungen genau erkannt werden und die Bedienung einfach ist.

Das Ziel der Arbeit war es, einen Überblick über die verschiedenen Eingabemethoden zu geben. Die Eingabemethoden wurden mithilfe einer Benutzerstudie bewertet, in der verschiedene geometrische Formen nachgezeichnet wurden. Die Eingabe mit den neuen Technologien ist jedoch nicht nur für Zeichenaufgaben interessant. Durch die zunehmende Bedeutung der Bereiche VR und AR, gibt es immer mehr Aufgaben, die mit den innovativen Eingabemethoden durchgeführt werden können. Daher könnten darauf aufbauend noch weitere Studien durchgeführt werden, in denen die Teilnehmer die Eingabemethoden für andere Aufgabenbereiche verwenden, sodass ein vollständiger Überblick über die Eingabemethoden ermöglicht wird.



## Literaturverzeichnis

- [Ash14] S. Ashley. *Touch-less control coming to cars*. 2014. URL: <https://www.gestigon.com/files/theme/images/newsimages/TouchLess.pdf> (zitiert auf S. 15).
- [BWB06] H. Benko, A. D. Wilson, P. Baudisch. „Precise Selection Techniques for Multi-touch Screens“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '06 10. New York, NY, USA: ACM, 2006, S. 1263–1272. doi: [10.1145/1124772.1124963](https://doi.org/10.1145/1124772.1124963) (zitiert auf S. 21).
- [CBC+95] J. Crowley, F. Berard, J. Coutaz et al. „Finger tracking as an input device for augmented reality“. In: *International Workshop on Gesture and Face Recognition*. 1995, S. 195–200 (zitiert auf S. 19).
- [DBGJ13] R. Dörner, W. Broll, P. Grimm, B. Jung. *Virtual und Augmented Reality (VR / AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, 2013. doi: [10.1007/978-3-642-28903-3](https://doi.org/10.1007/978-3-642-28903-3) (zitiert auf S. 17, 18).
- [DK18] A. Dzikri, D. E. Kurniawan. „Hand Gesture Recognition for Game 3D Object Using The Leap Motion Controller with Backpropagation Method“. In: *2018 International Conference on Applied Engineering (ICAE)*. 2018, S. 1–5. doi: [10.1109/INCAE.2018.8579400](https://doi.org/10.1109/INCAE.2018.8579400) (zitiert auf S. 24).
- [HA11] E. R. Hooten, J. A. Adams. „Comparing input error for mouse and touch input“. In: *2011 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics*. 2011, S. 2853–2858. doi: [10.1109/ICSMC.2011.6084114](https://doi.org/10.1109/ICSMC.2011.6084114) (zitiert auf S. 21, 22, 31).
- [HRGMI14] 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 SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '14. New York, NY, USA: ACM, Apr. 2014. doi: [10.1145/2556288.2557130](https://doi.org/10.1145/2556288.2557130) (zitiert auf S. 46).
- [JC76] M. A. Just, P. Carpenter. „Eye fixations and cognitive processes“. In: *Cognitive Psychology* 8 (1976), S. 441–480. doi: [10.1016/0010-0285\(76\)90015-3](https://doi.org/10.1016/0010-0285(76)90015-3) (zitiert auf S. 20).
- [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 8. New York, NY, USA: ACM, 1990, S. 11–18. doi: [10.1145/97243.97246](https://doi.org/10.1145/97243.97246) (zitiert auf S. 21, 22).
- [Jac91] R. J. K. Jacob. „The Use of Eye Movements in Human-computer Interaction Techniques: What You Look at is What You Get“. In: *ACM Trans. Inf. Syst.* (1991), S. 152–169. doi: [10.1145/123078.128728](https://doi.org/10.1145/123078.128728) (zitiert auf S. 47, 48, 51).
- [Jer16] J. Jerald. *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*. New York, NY, USA: Morgan und Claypool, 2016. doi: [10.1145/2792790](https://doi.org/10.1145/2792790) (zitiert auf S. 17).

- [KALB18] Y. Kim, S.-G. An, J. H. Lee, S.-H. Bae. „Agile 3D Sketching with Air Scaffolding“. In: *Extended Abstracts of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI EA '18. Montreal QC, Canada: ACM, 2018, D411:1–D411:1. ISBN: 978-1-4503-5621-3. DOI: [10.1145/3170427.3186522](https://doi.org/10.1145/3170427.3186522) (zitiert auf S. 19).
- [LZC+17] R. Lyu, Y. Ze, W. Chen, F. Chen, Y. Liu, L. Chen, H. Hao. „A flexible finger-mounted airbrush model for immersive freehand painting“. In: *2017 IEEE/ACIS 16th International Conference on Computer and Information Science (ICIS)*. 2017, S. 395–400. DOI: [10.1109/ICIS.2017.7960025](https://doi.org/10.1109/ICIS.2017.7960025) (zitiert auf S. 19).
- [MSD+18] K. Marriott, F. Schreiber, T. Dwyer, K. Klein, N. H. Riche, T. Itoh, W. Stürzlinger, B. H. Thomas. *Immersive Analytics*. Springer, 2018. DOI: [10.1007/978-3-030-01388-2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-01388-2) (zitiert auf S. 17).
- [MTUK94] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, F. Kishino. „Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum“. In: *Telemanipulator and Telepresence Technologies* 2351 (Jan. 1994). DOI: [10.1117/12.197321](https://doi.org/10.1117/12.197321) (zitiert auf S. 18).
- [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 8. New York, NY, USA: ACM, 2000, S. 281–288. DOI: [10.1145/332040.332445](https://doi.org/10.1145/332040.332445) (zitiert auf S. 20).
- [SSR18] J. Sun, W. Stuerzlinger, B. E. Riecke. „Comparing Input Methods and Cursors for 3D Positioning with Head-mounted Displays“. In: *Proceedings of the 15th ACM Symposium on Applied Perception*. SAP '18 8. New York, NY, USA: ACM, 2018, 8:1–8:8. DOI: [10.1145/3225153.3225167](https://doi.org/10.1145/3225153.3225167) (zitiert auf S. 20, 22).
- [Sam18] Samsung. *How to use the Gesture Control on Smart TV?* 2018. URL: <https://www.samsung.com/levant/support/tv-audio-video/how-to-use-the-gesture-control-on-smart-tv/> (zitiert auf S. 15).
- [Sut13] J. Sutton. „Air Painting with Corel Painter Freestyle and the Leap Motion Controller: A Revolutionary New Way to Paint!“ In: *ACM SIGGRAPH 2013 Studio Talks*. SIGGRAPH '13. New York, NY, USA: ACM, 2013. DOI: [10.1145/2503673.2503694](https://doi.org/10.1145/2503673.2503694) (zitiert auf S. 19).
- [TMO11] A. Thorpe, M. Ma, A. Oikonomou. „History and alternative game input methods“. In: *2011 16th International Conference on Computer Games (CGAMES)*. 2011, S. 76–93. DOI: [10.1109/CGAMES.2011.6000321](https://doi.org/10.1109/CGAMES.2011.6000321) (zitiert auf S. 15).
- [WBRF13] F. Weichert, D. Bachmann, B. Rudak, D. Fisseler. „Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller“. In: *Sensors*. 2013. DOI: [10.3390/s130506380](https://doi.org/10.3390/s130506380) (zitiert auf S. 25).
- [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 6. New York, NY, USA: ACM, 1987, S. 183–188. DOI: [10.1145/29933.275627](https://doi.org/10.1145/29933.275627) (zitiert auf S. 20).
- [ZMI99] S. Zhai, C. Morimoto, S. Ihde. „Manual and Gaze Input Cascaded (MAGIC) Pointing“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '99 8. New York, NY, USA: ACM, 1999, S. 246–253. DOI: [10.1145/302979.303053](https://doi.org/10.1145/302979.303053) (zitiert auf S. 20).

- [Zha98] S. Zhai. „User Performance in Relation to 3D Input Device Design“. In: *SIGGRAPH Comput. Graph.* 32.4 (1998), S. 50–54. doi: [10.1145/307710.307728](https://doi.org/10.1145/307710.307728) (zitiert auf S. 20).

Alle URLs wurden zuletzt am 14. 11. 2019 geprüft.



## A. Anhang

Der Anhang enthält die Fragebögen, die in der Studie (siehe Kapitel 6) verwendet wurden. Als Beispiel für den Fragebogen, den die Teilnehmer nach jeder Versuchsbedingung beantwortet haben, ist der Touch-Fragebogen angehängt. Die Fragebögen der anderen Eingabemethoden enthielten die gleichen Fragen. Außerdem sind die Ergebnisse der Einzelbelastungen des NASA TLX angehängt.

# Demographic Questionnaire

You can answer in English or German.

\*Required

1. Please enter your ID. \*

---

2. How old are you? \*

---

3. What is your gender? \*

*Mark only one oval.*

- female
- male
- other
- prefer not to answer

4. What is your profession? (If student, which subject are you studying?) \*

---

5. Are you right- or left-handed? \*

*Mark only one oval.*

- right
- left

6. Are you wearing...? \*

*Mark only one oval.*

- contact lenses
- glasses
- none of the two

7. Do you have other visual impairments (e.g. color blindness)? \*

*Mark only one oval.*

- no
- Other: \_\_\_\_\_

## Experience

You can answer in English or German.



8. **Do you already have experience with touch input? If so, how often do you use it? \***

*Mark only one oval.*

- only once
- once a month
- two to three times a month
- once a week
- several times a week
- everyday
- no experience with touch input

9. **If you already have experience with touch input: For what do you use it?**

---

10. **Do you already have experience with eye tracking? If so, how often do you use it? \***

*Mark only one oval.*

- only once
- once a month
- two to three times a month
- once a week
- several times a week
- everyday
- no experience with eye tracking

11. **If you already have experience with eye tracking: For what do you use it?**

---

12. **Do you already have experience with gesture recognition? If so, how often do you use it? \***

*Mark only one oval.*

- only once
- once a month
- two to three times a month
- once a week
- several times a week
- everyday
- no experience with gesture recognition

13. **If you already have experience with gesture recognition: For what do you use it?**

---

14. **Do you already have experience with sense gloves? If so, how often do you use them?**

\*

*Mark only one oval.*

- only once
- once a month
- two to three times a month
- once a week
- several times a week
- everyday
- no experience with sense gloves

15. **If you already have experience with sense gloves: For what do you use them?**

---

16. **Do you already have experience with head tracking ? If so, how often do you use it? \***

*Mark only one oval.*

- only once
- once a month
- two to three times a month
- once a week
- several times a week
- everyday
- no experience with head tracking

17. **If you already have experience with head tracking: For what do you use it?**

---

# Touch Questionnaire

You can answer in English or German.

\*Required

1. Please enter your ID. \*

---

2. I would like to use touch as input method frequently. \*

Mark only one oval.

1      2      3      4      5

Strongly disagree                  Strongly agree

3. I could accurately follow the shape using touch as input method. \*

Mark only one oval.

1      2      3      4      5

Strongly disagree                  Strongly agree

4. I liked using touch as input method. \*

Mark only one oval.

1      2      3      4      5

Strongly disagree                  Strongly agree

5. This input method would be useful/helpful for... \*

---

---

---

---

---

6. What do you like about using this input method? \*

---

---

---

---

---

7. What do you dislike about using this input method? \*

---

---

---

---

---

8. Further remarks and comments

---

---

---

---

---

# Final Questionnaire

\*Required

1. Please enter your ID. \*

---

2. Please rank all five input methods from best (1) to worst (5). \*

*Mark only one oval per row.*

	Touch	Eyetracking	Gesture Recognition	SenseGloves	Head Tracking
1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
5	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>

---

Powered by



### NASA TLX Einzelbelastungen Teil 1

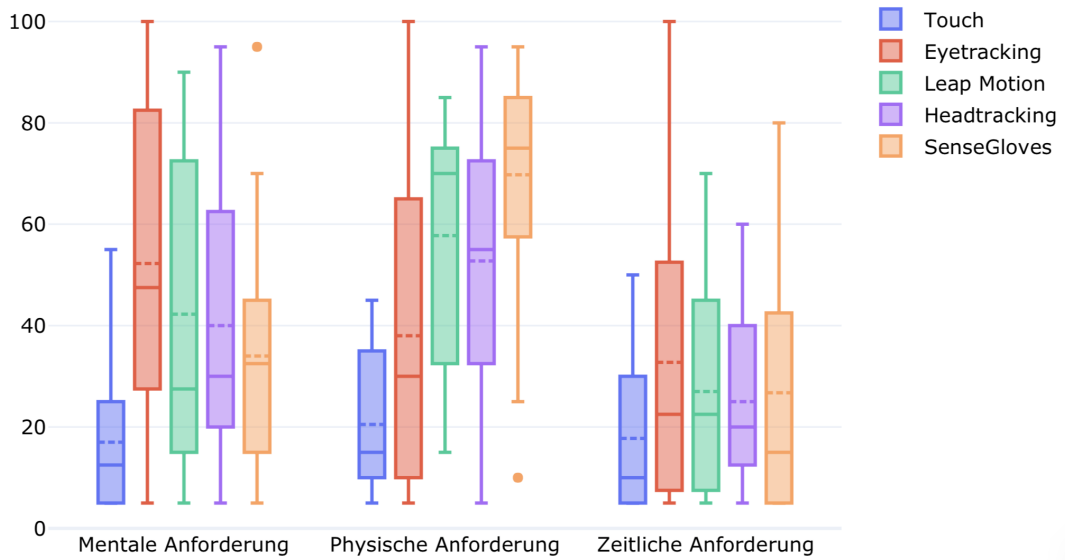


Abbildung A.1.: Ergebnisse der einzelnen Kategorien des NASA TLX Teil 1.

### NASA TLX Einzelbelastungen Teil 2

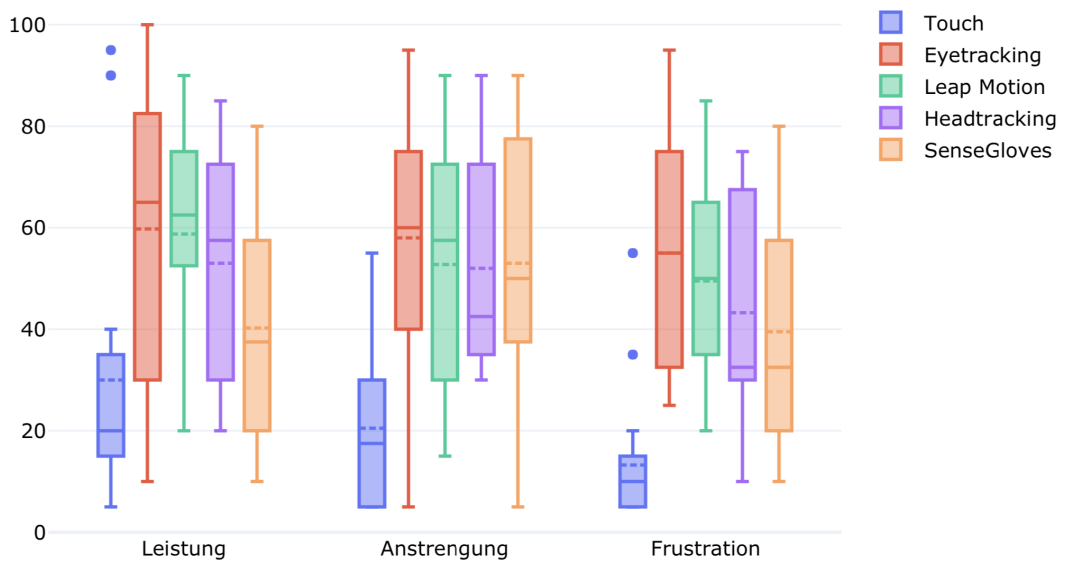


Abbildung A.2.: Ergebnisse der einzelnen Kategorien des NASA TLX Teil 2.

### **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