



TECHNISCHE HOCHSCHULE MITTELHESSEN

THM

**CAMPUS
FRIEDBERG**

IEM

Informationstechnik-
Elektrotechnik-Mechatronik

Masterthesis

Fachgebiet: Human-Computer-Interaction (Mensch-Maschine-Interaktion)

Leap Motion: Qualität von Präzisionsgriffen

vorgelegt von

Kai Julian Krause, geb. am 06. Juli 1985 in Frankfurt am Main

Friedberg (Hessen), 08. April 2015

Gutachter:

Prof. Dr. Cornelius Malerczyk Technische Hochschule Mittelhessen
Ing. Benjamin Rupp, M. Sc. Technische Hochschule Mittelhessen

DANKSAGUNG

Das Verfassen einer Abschlussarbeit ist stets ein sehr persönlicher Prozess, an dessen Ende die Unterschrift einer einzelnen Person auf dem Papier geschrieben steht. Hierdurch rücken all jene Personen in den Hintergrund, die durch ihre fachliche oder moralische Unterstützung indirekt am Entstehungsprozess der Abschlussarbeit beteiligt waren. Ich möchte daher an dieser Stelle einigen Menschen meinen Dank aussprechen, ohne die diese Masterarbeit nicht die Form angenommen hätte, in der sie nun vorliegt.

Zuerst geht mein Dank an Prof. Dr. Cornelius Malerczyk, der durch seine interessanten Vorlesungen und Veranstaltungen dazu beigetragen hat, dass sich meine Abschlussarbeit mit einem Thema aus dem Fachgebiet der Mensch-Maschine-Interaktion auseinandersetzt. Ich danke ihm für die Bereitstellung des Themas sowie für die fachliche Betreuung und Begutachtung meiner Masterarbeit.

Ein ganz besonderes Dankeschön gilt meiner Freundin Eva-Marie, die mich in den nicht immer ganz einfachen sechs Monaten moralisch sehr unterstützt hat. Durch Deine liebevolle und motivierende Art hast Du einen immens wichtigen Beitrag zur Fertigstellung dieser Arbeit geleistet. Danke dafür!

Natürlich möchte ich auch meiner Familie danken. Allen voran meiner Mutter für ihre stets verständnisvolle und gutmütige Art. Meiner Schwester danke ich für ihr Verständnis dafür, dass ich in den vergangenen Monaten nur wenig Zeit für familiäre Unternehmungen aufbringen konnte.

Ein großer Dank geht darüber hinaus an Stefanie Herkner, für das Korrekturlesen meiner Arbeit und ihre motivierenden Worte.

Nicht zuletzt möchte ich allen Teilnehmern der durchgeführten Untersuchung meinen Dank aussprechen. Insbesondere danke ich den studentischen Teilnehmern und Kommilitonen, denen ich auf diesem Weg weiterhin viel Erfolg für das eigene Studium wünsche!

INHALTSVERZEICHNIS

Danksagung	i
Inhaltsverzeichnis	iii
Abbildungsverzeichnis	vi
1. Einleitung	9
1.1. Motivation und Problemstellung	9
1.2. Zielsetzung	15
1.3. Aufbau	16
2. Stand der Forschung	17
2.1. Bedeutung des Tastsinns	17
2.2. Taktile Rückmeldungen bei In-Air Controllern	17
2.2.1. Glas	18
2.2.2. HapticGlove	18
2.2.3. UltraHaptics	19
2.2.4. Aireal	20
2.3. Fingerbasierte direkte 3D-Interaktion	21
2.4. Systeme zur fingerbasierten direkten 3D-Interaktion	22
2.4.1. CyberGlove	22
2.4.2. ARTTrack Fingertracking	23
2.4.3. DepthSense	24
2.4.4. Kinect 3D Hand Tracking	24
2.4.5. ColorGlove	25
2.5. Reale und virtuelle Interaktion	26
2.5.1. Kinästhetische figurale Nachwirkung	27
2.5.2. Räumliches Sehen	27
2.6. Genauigkeit des Leap Motion Controllers	28
2.7. Leap Motion versus Computermaus	29
2.8. Zusammenfassung	30
3. Griffe der menschlichen Hand	33
3.1. Griffarten	33
3.1.1. Kraftgriffe	33
3.1.2. Präzisionsgriffe	34
4. Leap Motion Controller	37
4.1. Aufbau	37
4.2. Funktionsprinzip	38
4.3. Technische Daten	39
4.3.1. Bildwiederholrate	39
4.3.2. Latenz	40
4.3.3. Physikalischer Interaktionsraum	41
4.4. LeapSDK	42
4.4.1. Hand	42

4.4.2. Pointable, Finger und Tool.....	43
4.4.3. Bone	43
4.4.4. Datenformat	44
4.4.5. Gesture	45
4.4.6. InteractionBox	45
4.4.7. Config.....	46
4.4.8. Klassendiagramm der Tracking API.....	46
4.4.9. Zusammenfassung LeapSDK.....	47
4.5. Funktionsbedingte Begrenzungen und Einschränkungen.....	47
4.5.1. Interaktionsraum	48
4.5.2. Externe Lichtquellen.....	48
4.5.3. Selbstverdeckung.....	49
4.5.4. Taktile Rückmeldungen	50
4.5.5. Ergonomie.....	51
5. Entwicklung der Versuchsumgebung	53
5.1. Vorüberlegungen.....	53
5.2. Definition von Qualitätskriterien.....	54
5.3. Gestaltung von Interaktionsszenarien.....	55
5.3.1. Würfel-Platzieren.....	55
5.3.2. Scheibe-Drehen	57
5.3.3. Schlüssel-Umdrehen.....	58
5.4. Implementierung der virtuellen Interaktionsszenarien.....	58
5.4.1. Entwicklungsumgebung.....	58
5.4.2. Implementierung.....	60
5.4.2.1. Proband.....	60
5.4.2.2. Interaktionsobjekte	61
5.4.2.3. Griffe.....	62
5.4.2.4. Skalierung.....	65
5.4.2.5. Kamera & Bildschirm.....	65
5.4.2.6. Messwerterfassung.....	67
5.4.2.7. Fragebogen.....	68
5.4.3. Stereoskopische Ausgabe	68
5.5. Umsetzung der realen Testszzenarien.....	70
5.5.1. Messung der Interaktionsdauer.....	70
5.5.2. Messung der Genauigkeit.....	72
5.5.3. Messung von Versuchsanzahl und Griffsicherheit	73
6. Untersuchungen	75
6.1. Probanden	75
6.2. Versuchsanordnung.....	76
6.3. Ablauf.....	79
7. Ergebnisse	85
7.1. Probanden	85
7.2. Beobachtungen.....	87
7.2.1. Erstkontakt.....	87
7.2.2. Greiftechniken.....	89
7.3. Messergebnisse.....	93

7.3.1. Genauigkeit.....	93
7.3.2. Interaktionsdauer.....	96
7.3.3. Griffsicherheit	98
7.3.4. Anzahl der Versuche.....	100
7.4. Lerneffekt.....	101
7.5. Subjektives Meinungsbild.....	102
8. Zusammenfassung und Ausblick	105
8.1. Zusammenfassung	105
8.2. Ausblick	107
Abkürzungsverzeichnis	109
Literaturverzeichnis	111
Selbstständigkeitserklärung	117

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

1.1	Leap Motion Controller.....	10
1.2	Bedienung des Leap Motion Controllers.....	10
1.3	Steuerung einer Drohne mit Hilfe von Handgesten.....	11
1.4	Abbild eines Kopfes, erstellt mit der Anwendung „Sculpting“.....	12
1.5	Berührungslose Navigation durch Patientenaufnahmen.....	13
1.6	Steuerung eines Roboterarms mit Greifvorrichtung.....	13
1.7	Kraft TeleRobotics mini-master Kontrollpult mit Krafrückkopplung.....	14
2.1	Glasscheibe mit aufgemalten Tasten über dem Leap Motion Controller.....	18
2.2	Haptischer Handschuh mit Vibrationsmotoren.....	19
2.3	UltraHaptics Ultraschall-Feld.....	20
2.4	AIREAL System schießt einen Luftwirbel durch den Raum.....	20
2.5	Anwender kann den Flügelschlag eines virtuellen Schmetterlings spüren.....	21
2.6	CyberGlove II, CyberTouch, CyberGrasp.....	22
2.7	Fingertracking und ARTTrack5 Kamera.....	23
2.8	DS325 Time-Of-Flight Kamera.....	24
2.9	Microsoft Kinect.....	25
2.10	3D-Fingertracking mit dem Color Glove.....	25
2.11	Industrieroboter untersucht die Genauigkeit des Leap Motion Controllers.....	29
3.1	Kraftgriff am Lenkrad eines PKW.....	34
3.2	Fingerspitzengriff, Pinzettengriff, Dreipunktgriff, Schlüsselgriff.....	35
4.1	Explosionsgrafik des Leap Motion Controllers.....	37
4.2	Rohdaten des Leap Motion Controllers.....	38
4.3	Vergleich der Bildraten in den unterschiedlichen Betriebsmodi.....	39
4.4	Vergleich der Latenzzeiten in den unterschiedlichen Betriebsmodi.....	41
4.5	Interaktionsraum des Leap Motion Controllers.....	41
4.6	Normalenvektor, Richtungsvektor und lokaler Ursprung.....	42
4.7	Handmodell der Leap Motion Skeletal API.....	43
4.8	Ursprungspunkt des Leap Motion Controllers.....	44
4.9	Illustration der Leap Motion Gesten.....	45
4.10	Quaderförmiger Interaktionsraum durch LeapInteraktionBox.....	46
4.11	Klassendiagramm der Tracking-API.....	47
4.12	Störeinfluss durch Glühlampen.....	48
4.13	Zu vermeidende Haltung der Arme.....	51
4.14	Empfohlene Haltung der Arme.....	52

5.1	Interaktionsszenario „Würfel-Platzieren“	56
5.2	Interaktionsszenario „Scheibe-Drehen“	57
5.3	Interaktionsszenario „Schlüssel-Umdrehen“	58
5.4	Editor der Unity Entwicklungsumgebung	59
5.5	Handmodelle aus dem V2 Skeletal Assets Erweiterungspaket	59
5.6	Unterschiedlich texturierte Handmodelle	60
5.7	Virtuelle Interaktionsobjekte	61
5.8	Schlüssel und Schließzylinder	61
5.9	Deaktivierte Kollisionserkennung	63
5.10	Berechnete Griffposition beim Fingerspitzengriff	63
5.11	Berechnete Griffposition beim Dreipunktgriff	64
5.12	Berechnete Griffposition beim Schlüsselgriff	65
5.13	Blickwinkel der virtuellen Kamera	66
5.14	Der Winkel des Horizontalen Sichtfelds	67
5.15	Exemplarische Messergebnisse	67
5.16	Fragebogen zur Erfassung der subjektiven Meinungen	68
5.17	Konfiguration des „Anaglyph-izer“ Skripts	69
5.18	Stereoskopische Ausgabe	70
5.19	GoPro HD HERO2 Kamera erfasst den Interaktionsbereich	71
5.20	Elektronische Schaltung als visuelles Hilfsmittel	72
5.21	Veranschaulichung von translatorischen und rotatorischen Abweichungen	72
5.22	Winkelskala für das Ablesen der rotatorischen Abweichung	73
6.1	Versuchsanordnung	77
6.2	Versuchsanordnung für die realen Interaktionsszenarien	78
6.3	Versuchsanordnung für die virtuellen Interaktionsszenarien	78
6.4	Proband bearbeitet das Interaktionsszenario „Würfel-Platzieren“	79
6.5	Proband bearbeitet das Interaktionsszenario „Scheibe-Drehen“	80
6.6	Proband bearbeitet das Interaktionsszenario „Schlüssel-Umdrehen“	81
6.7	Proband platziert den virtuellen Würfel	81
6.8	Probandin greift nach der virtuellen Scheibe	82
6.9	Proband bearbeitet das Interaktionsszenario „Schlüssel-Umdrehen“	83
6.10	Proband bewertet seine Erfahrung mit dem Leap Motion Controller	83
7.1	Geschlechterverteilung im Probandenkollektiv	85
7.2	Geschlechterverteilung in den Untersuchungsgruppen	86
7.3	Altersverteilung im Probandenkollektiv	86
7.4	Frontaler Eintritt in das Interaktionsvolumen	87
7.5	Eintrittsposition oberhalb des Interaktionsobjekts	88
7.6	Fehlinterpretation der Funktionsweise	88
7.7	Greiftechniken der Probanden beim Interaktionsszenario „Würfel-Platzieren“	89
7.8	Angewinkelte Finger	90
7.9	Nach oben gerichtete Finger	91

7.10	Falsch angesetzte Hand.....	92
7.11	Fehlerhaft erkannte Hände.....	92
7.12	Translatorische Abweichungen beim „Würfel-Platzieren“	93
7.13	Rotatorische Abweichungen beim „Würfel-Platzieren“.....	95
7.14	Rotatorische Abweichungen beim „Scheibe-Drehen“	95
7.15	Interaktionsdauer beim „Würfel-Platzieren“	96
7.16	Interaktionsdauer beim „Schlüssel-Umdrehen“	97
7.17	Interaktionsdauer beim „Scheibe-Drehen“	98
7.18	Anzahl der Griffe beim „Würfel-Platzieren“	99
7.19	Anzahl der Griffe beim „Scheibe-Drehen“.....	99
7.20	Anzahl der Griffe beim „Schlüssel-Umdrehen“.....	100
7.21	Anzahl der Versuche beim „Würfel-Platzieren“.....	101
7.22	Subjektive Beurteilung des Leap Motion Controllers.....	103

1. Kapitel

Einleitung

1.1. Motivation und Problemstellung

Die menschliche Hand ist ein erstaunliches Werkzeug. Mit ihren fünf Fingern befähigt sie uns Gegenstände zu greifen, Formen und Oberflächen zu ertasten oder zwischen harten und weichen Materialien zu unterscheiden. Kein anderes Körperteil ist so vielseitig einsetzbar wie unsere Hand. Ihr Einsatzspektrum reicht von den kraftvollen Handgriffen eines Bauarbeiters bis hin zu den filigranen Fingerfertigkeiten eines Chirurgen. Die insgesamt 33 Muskeln und 27 Knochen ermöglichen eine enorme Anzahl unterschiedlicher Hand- und Fingerstellungen [KMR⁺09].

Im Gebiet der Mensch-Maschine-Interaktion beschäftigt man sich schon seit längerer Zeit mit der Entwicklung sogenannter Natural User Interfaces (NUI). Es handelt sich hierbei um Eingabemethoden, die darauf abzielen, die Interaktion mit Computersystemen natürlicher zu gestalten. Die Gestenerkennung bildet neben der Spracheingabe einen der Schwerpunkte im Bereich der NUI. Darüber hinaus bildet sie die Grundlage für die Bedienungsparadigmen aktueller Smartphones und Tabletcomputer.

Die zugrundeliegende Technologie in diesen Geräten nennt sich Multi-Touch. Sie gestattet die zeitgleiche Erkennung von mehreren Fingern und ermöglicht damit intuitive Gesten wie zum Beispiel das Vergrößern und Drehen eines Fotos mit Hilfe von Daumen und Zeigefinger. Die Natürlichkeit solcher Multi-Touch-Gesten ist jedoch Abhängig vom Kontext der Anwendung. Multi-Touch-Gesten sind stets zweidimensionaler Art und eignen sich daher am besten für die Interaktion mit zweidimensionalen Bedienungselementen. Das direkte Greifen von dreidimensionalen Objekten ist hingegen nicht möglich. Eine Manipulation jener Objekte kann daher nur indirekt erfolgen, indem die zweidimensionalen Multi-Touch-Gesten auf eine dreidimensionale Objekttransformation abgebildet werden.

Schon lange vor dem kommerziellen Durchbruch der heutigen Multi-Touch-Technologie um das Jahr 2009 [Qui12] befasste sich die Wissenschaft mit der computergestützten räumlichen Erfassung von Hand- und Fingerbewegungen. Erste Prototypen für die Fingererkennung, wie etwa der Sayre Glove, wurden bereits in den späten siebziger Jahren entworfen [SZ94]. Viele der bis heute entwickelten Lösungen kamen und kommen überwiegend im Umfeld von Forschung und Entwicklung zum Einsatz [Pre14]. Die hohen Anschaffungskosten machten eine Nutzung durch Privatpersonen

aber bislang unrentabel. Oftmals mangelte es diesen Geräten zudem an der Alltagstauglichkeit [Sch11]. Das Anlegen von Geräten, komplizierte externe Aufbauten oder aufwändige Kalibrierungsprozeduren sind für die tägliche Nutzung am Schreibtisch zu umständlich.



Abbildung 1.1: Leap Motion Controller [Lea13a]

Der Leap Motion Controller (Abbildung 1.1) ist ebenfalls ein System, das die Erfassung von Hand- und Fingerbewegungen ermöglicht und besitzt zudem das Potential, die besagten Barrieren zu beseitigen. Das kompakte Gerät des gleichnamigen amerikanischen Unternehmens wird seit Juli 2013 vertrieben. Der geringe Kaufpreis von etwa 90 Euro (bei der Markteinführung) sowie die einfache und intuitive Funktionsweise machen die Hand- und Fingererkennung erstmals auch für den privaten Einsatz interessant.



Abbildung 1.2: Bedienung des Leap Motion Controllers [Lea13a]

Die Handhabung des Geräts gestaltet sich sehr intuitiv. Der Anwender muss lediglich seine Hände über das Gerät führen (Abbildung 1.2). Daraufhin werden diese unmittelbar erfasst und stehen dann in digitaler Form in den unterstützten Anwendungen zur Verfügung. Ein physischer Kontakt mit der Hardware findet nicht statt. Ebenso entfällt die Notwendigkeit spezielle Handschuhe oder Markierungspunkte anzulegen. Ein unnatürliches Gefühl bei der Nutzung entsteht daher nicht. In Fachtexten werden solche Geräte oft als *Bare-Hand-Controller* [HB01, RBJ⁺01, WP10] bezeichnet. Sie sind damit eine spezialisierte Form der sogenannten *In-Air-* oder *Mid-Air-Controller* [PIHo14, NKQK13, CSL⁺13], die zwar auch die räumliche Interaktion mit den Händen ermöglichen, dabei jedoch nicht zwangsläufig auf Hilfsmittel wie Handschuhe verzichten.

Die Anwendungsbereiche des Leap Motion Controllers sind vielfältig. Ob als neuartiger Spielecontroller, virtuelles Musikinstrument oder als Fernsteuerung von realen Gegenständen wie Roboter oder Dronen – die Entwicklergemeinde hat bereits zahlreiche Einsatzmöglichkeiten für den Controller gefunden.

Seit Beginn des Leap Motion Entwickler Programms wurde wiederholt die Idee aufgegriffen, kleine Multikopter mit Hilfe von Handgesten fernzusteuern. Einige dieser Fluggeräte verfügen werkseitig über eine WLAN-basierte Steuerung und können daher ohne zusätzliche Geräte mit Hilfe von Smartphones, Tablets oder Computern gelenkt werden. Der Gedanke, den Leap Motion Controller als gestenbasierte Fernsteuerung für diese Multikopter einzusetzen, lag daher nahe. Die Handbewegungen des Piloten werden vom Leap Motion Controller erfasst und durch die Software auf einem Computer in Steuerbefehle für die Drohne umgewandelt. Diese Befehle werden dann kabellos über ein Funknetzwerk an das Fluggerät übermittelt. Bereits leichte Neigebewegungen der Hände reichen aus, um einen Wechsel der Flugrichtung herbeizuführen (Abbildung 1.3). Ob diese Form der Drohnensteuerung einen zukunftsweisenden Mehrwert gegenüber bisherigen Steuerungen bietet oder lediglich den Unterhaltungswert steigert, soll an dieser Stelle nicht bewertet werden. Projekte wie diese verdeutlichen jedoch, dass der Leap Motion Controller weitaus mehr darstellt, als ein neuartiges Eingabegerät für den Computer.



Abbildung 1.3: Steuerung einer Drohne mit Hilfe von Handgesten [Ack13]

Die eigens von Leap Motion veröffentlichte Anwendung „Sculpting“ [Lea14a] ermöglicht das interaktive Modellieren von 3D-Objekten. Mit zwei Händen lassen sich so aus einer einfachen Geometrie detaillierte Figuren formen (Abbildung 1.4). Hierfür stehen dem Nutzer verschiedene Bearbeitungswerkzeuge zur Verfügung. Mit ihnen lässt sich die Oberfläche nach innen oder außen deformieren, abflachen oder glätten. Ähnlich wie bei einer Töpferscheibe lässt sich zudem die gesamte Figur in Drehung versetzen. Dies ermöglicht die Erzeugung von Rotationskörpern oder Verformungen ü-

ber den gesamten Umfang einer Figur. Das fertige Objekt kann anschließend mit Farben bemalt und optional in eine Datenbank für 3D-Druck-Modelle hochgeladen werden.



Abbildung 1.4: Abbild eines Kopfes, erstellt mit der Anwendung „Sculpting“ [Lea14a]

Die Anwendung ist in ihrem Funktionsumfang sehr rudimentär und wird daher eher dem Zweck einer Technologiedemonstration gerecht. Dessen ungeachtet veranschaulicht „Sculpting“ aber die Möglichkeiten, die der Leap Motion Controller bei der Interaktion mit virtuellen Objekten bietet. Eine vergleichbare Anwendung wurde von Vinayak et al. [VLRJ14] in Form der Anwendung „zPots“¹ vorgestellt. Diese Software ermöglicht die Erstellung virtueller Töpfererzeugnisse und stellt dem Nutzer hierfür realistisch anmutende Bearbeitungswerkzeuge zur Verfügung. Nach Angaben von Vinayak et al. ist die Bedienung der Anwendung „zPots“ ohne eine vorherige Übungsphase möglich.

Obwohl die Hauptzielgruppe aus Sicht von Leap Motion in der privaten Käuferschicht liegen dürfte, existieren derzeit auch einige Projekte, die für den professionellen Einsatz vorgesehen sind. Die Firma TedCas Medical Systems² entwickelt beispielsweise Systeme, die berührungslose Steuerungen für medizinische Bildsysteme ermöglichen [Ted14]. Die angebotenen Produkte basieren zum Großteil auf den Eingabegeräten von Drittanbietern wie Leap Motion. Eine solche Steuerung gestattet es, während chirurgischer Eingriffe durch die Aufnahmen der bildgebenden Verfahren zu navigieren (Abbildung 1.5). Da hierfür keine Eingabegeräte berührt werden müssen, kann der Operateur selbst den Computer mit den Aufnahmen bedienen. Er muss dazu weder den sterilen Bereich des Operationssaales verlassen, noch den Assistenzarzt mühsam anweisen, den benötigten Bildausschnitt für ihn auszuwählen. Kontaktinfektionen wird auf diese Weise wirkungsvoll vorgebeugt. Da der Arbeitsfluss des Operateurs kürzer unterbrochen wird, können Operationen insgesamt etwas schneller abgeschlossen werden.

¹ Quelle: <https://apps.leapmotion.com/apps/zpots> (Abruf: 02.02.2015)

² Quelle: <http://www.tedcas.com> (Abruf: 02.02.2015)



Abbildung 1.5: Berührungslose Navigation durch Patientenaufnahmen [Ted14]

Auch in anderen professionellen Bereichen könnten die Anwender von berührungslosen Bedienungskonzepten profitieren. Mechaniker in einer Autowerkstatt könnten beispielsweise trotz ölverschmierter Hände im digitalen Reparaturleitfaden des jeweiligen Fahrzeugherstellers blättern. Eingesetzt in Fahrkartenautomaten oder Kiosksystemen kann der Leap Motion Controller durch seine berührungslose Funktionsweise eine vandalismussichere und zugleich hygienische Bedienung gewährleisten.

Das US-Unternehmen *MirrorTraining*¹ forscht an Lösungen, die Soldaten das Entschärfen feindlicher Sprengsätze erleichtern sollen [Mir14]. Für die Bedienung der Bombenentschärfungsroboter werden bislang aufwendige Kontrollpulte mit Joysticks und zahlreichen Schaltern verwendet. Die Platzierung einer Detonationsladung für die kontrollierte Sprengung einer Bombe ist daher ein anspruchsvolles und zeitaufwendiges Unterfangen. Mit dem von MirrorTraining entwickelten Prototyp eines Greifarms (Abbildung 1.6) und der zugehörigen Software lässt sich diese Aufgabe intuitiver und schneller durchführen.



Abbildung 1.6: Steuerung eines Roboterarms mit Greifvorrichtung [Mir14]

¹ Quelle: <http://www.mirrortraininginc.com> (Abruf: 14.11.2015)

Der Greifarm wird mit Hilfe des Leap Motion Controllers bewegt. Dieser erfasst die Handbewegungen, die dann via Computer auf den Greifarm übertragen werden. Die an der Spitze des Arms angebrachte Zangenvorrichtung öffnet und schließt sich analog zu den Fingerbewegungen des Anwenders. Eine Kamera überträgt davon ein Livebild, welches am Computer durch ein virtuelles Handmodell ergänzt wird. Laut Angaben des Unternehmens ist die entwickelte Software auf die Verwendung mit bestehenden und zukünftigen Robotersystemen ausgelegt. Bereits vorhandene Systeme können daher preiswert nachgerüstet werden.

Die vorgestellten Projekte stellen nur einen kleinen Ausschnitt aus einer Vielzahl innovativer Ideen rund um den Leap Motion Controller dar. Sie verdeutlichen wie breitgefächert das Spektrum der Einsatzmöglichkeiten ist. Neben den Möglichkeiten bei der Interaktion mit virtuellen Objekten bietet der Controller offenbar einen großen Anreiz für die Steuerung realer Dinge wie beispielsweise Roboter oder Greifarme. Letzteres dient als Musterbeispiel für die Verdeutlichung eines elementaren Problems berührungsloser Eingabegeräte. Ein Merkmal können Geräte wie der Leap Motion Controller, bedingt durch die Bauart und Funktionsweise, nicht bieten – taktile Rückmeldungen. Bei der Interaktion mit Gegenständen in der realen Welt spielen taktile Rückmeldungen jedoch eine wichtige Rolle für den Menschen. Primär durch diese Reize nimmt er wahr, zu welchem Zeitpunkt Gegenstände berührt oder sicher gegriffen sind.



Abbildung 1.7: Kraft TeleRobotics mini-master Kontrollpult mit Krafrückkopplung [Kra14]

Der zuvor beschriebene Fall des Bombenentschärfungsroboters veranschaulicht das besagte Problem: Mit einem konventionellen Kontrollpult (Abbildung 1.7) lassen sich Krafrückmeldungen der Greifvorrichtung über die Steuerelemente an die Hände des Bedieners übertragen. Dieser kann dadurch spüren, ob die Detonationsladung sicher gegriffen ist oder ob die Greifkraft weiter erhöht werden muss. Dieses technische Prinzip nennt sich Krafrückkopplung. Bei einer berührungslosen Steuermethode, wie sie bei Bare-Hand Controllern vorliegt, ist die Krafrückkopplung nicht möglich, da hierfür ein physischer Kontakt zum Eingabegerät erforderlich ist.

Das genannte Problem beschränkt sich aber keineswegs auf die Steuerung realer Objekte. Taktile Rückmeldungen und Krafterückkopplung sind im gleichen Maße bei der Interaktion mit virtuellen Realitäten hilfreich. Insbesondere in der Domäne von immersiven virtuellen Umgebungen spielen diese Rückmeldungen eine wichtige Rolle. Sie intensivieren das Nutzererlebnis, indem beispielsweise die Konturen von computer-generierten Objekten für den Anwender fühlbar werden. Statt ins Leere zu greifen oder die eigenen Finger zu berühren, kann der Nutzer die reale Hand nur soweit schließen wie es die Geometrie des virtuellen Objektes gestattet.

1.2. Zielsetzung

Ein Alleinstellungsmerkmal des Leap Motion Controllers manifestiert sich in der hohen Genauigkeit, die in Kombination mit dem niedrigen Anschaffungspreis und der kompakten Bauart bislang einzigartig ist. In Presstexten wird dem Gerät stets eine Genauigkeit von bis zu 0,01 mm bescheinigt. Angaben dazu, ob sich dieser Wert auf die Position der einzelnen Fingerspitzen bezieht oder die Position der gesamten Hand gemeint ist, fehlen. Auch Informationen bezüglich der Winkelgenauigkeit enthält der Hersteller dem Kunden vor.

Diese Arbeit verfolgt jedoch nicht den Anspruch vom Hersteller beworbene Messwerte zu verifizieren. Vielmehr liegt der Fokus auf der Bewertung von praxisnahen Interaktionsszenarien. Hierzu zählt die Manipulation von virtuellen Gegenständen, wie es oftmals in Computerspielen oder Simulationssoftware erforderlich ist. Damit die hohe Genauigkeit des Leap Motion Controllers jedoch nicht außer Betracht gelassen wird, beschränkt sich die Untersuchung vornehmlich auf die Interaktion mit Gegenständen, deren Handhabung im realen Leben Präzisionsgriffe erfordert.

Ein Vergleich soll zeigen, wie gut sich die Interaktionen mit realen Objekten mit Hilfe des Leap Motion Controllers in einer virtuellen Umgebung reproduzieren lassen. Die Annahme hierzu lautet, dass die fehlenden taktilen Rückmeldungen in der virtuellen Umgebung Einbußen in Bezug auf die Nutzerleistung zur Folge haben. In diesem Zusammenhang soll auch untersucht werden, in welchem Umfang Faktoren wie etwa die Größe von virtuellen Objekten die Qualität der Interaktion beeinflussen. Mit den hieraus gewonnen Erkenntnissen ließen sich dann Empfehlungen für Mindestgrößen von Interaktionsobjekten aussprechen.

Einer weiteren Hypothese zufolge begünstigt Vorwissen im Bereich der 3D-Manipulation virtueller Objekte die Fähigkeit zum Umgang mit dem Leap Motion Controller. Es soll daher untersucht werden, ob auch Personen ohne entsprechende Vorkenntnisse dazu in der Lage sind Präzisionsgriffe mit Hilfe des Leap Motion Controllers auszuführen. Untersucht werden soll außerdem, ob sich ein Lerneffekt bei der Bedienung des Leap Motion Controllers nachweisen lässt.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass sich das angestrebte Ziel dieser Arbeit definiert, als die Beurteilung des Leap Motion Controllers in Hinsicht auf seine Tauglichkeit als Hand- und Fingertracker im Zusammenwirken mit Präzisionsgriffen.

1.3. Aufbau

Das der Einleitung folgende Kapitel 2 befasst sich zunächst mit dem derzeitigen Stand der Forschung. Betrachtet werden zum einen themennahe Forschungsarbeiten und die daraus hervorgegangenen Ergebnisse, zum anderen werden verschiedene Systeme zur fingerbasierten 3D-Interaktion beschrieben. Im Anschluss wird deren Relevanz für diese Arbeit verdeutlicht.

Darauf folgend behandeln Kapitel 3 und 4 die Grundlagen dieser Arbeit. Während sich das dritte Kapitel mit der menschlichen Hand und ihren Griffarten befasst und insbesondere den für diese Arbeit zentrale Begriff des Präzisionsgriffs erläutert, verschafft das vierte Kapitel einen Überblick über den Leap Motion Controller. Da das Gerät verhältnismäßig neu ist und sich das Funktionsprinzip für den Außenstehenden nicht unmittelbar erschließt, wird zunächst der grundlegende Aufbau und die technische Funktionsweise der Hardware beschrieben. Anschließend werden einige elementare Bestandteile der Programmierschnittstelle erläutert. Zum Ende des vierten Kapitels wird auf eine Reihe von funktionsbedingten Einschränkungen bei der Handhabung des Leap Motion Controllers eingegangen. Die in den Grundlagen behandelten Termini werden in späteren Kapiteln verwendet, ohne dass eine erneute Erläuterung dieser Begriffe stattfindet.

Kapitel 5 und 6 legen die Methodik dieser Arbeit dar. Kapitel 5 umfasst die Definition von Qualitätskriterien und beschreibt die inhaltliche Ausarbeitung und prototypische Implementierung von Testszenarien. Letztere bilden die Basis für die anknüpfenden praktischen Untersuchungen mit Probanden. Diese praktischen Untersuchungen werden dann in Kapitel 6 näher beschrieben.

Die während den Untersuchungen erhobenen Datensätze werden in Kapitel 7 zusammengetragen, statistisch ausgewertet und grafisch aufbereitet. Beruhend auf diesen Daten werden dann die Ergebnisse dieser Arbeit dargelegt.

Im abschließenden Kapitel 8 wird das Fazit zum Ergebnis dieser Arbeit gezogen. Die angewandte Methodik wird retrospektiv betrachtet und in Bezug auf mögliches Optimierungspotential überprüft. Ferner wird eine Übersicht auf abschließend nicht geklärte oder durch diese Arbeit neu entstandene Fragestellungen gegeben.

2. Kapitel

Stand der Forschung

2.1. Bedeutung des Tastsinns

Der Mensch verfügt zur Wahrnehmung seiner Umwelt über fünf Sinne. Durch sie kann er sehen, hören, schmecken, riechen und tasten. Im Normalfall funktionieren alle Sinne ordnungsgemäß und ermöglichen so eine multimodale Wahrnehmung der Umgebung. Durch Unfälle oder Fehlbildungen kann jedoch die Funktion eines Sinnes eingeschränkt werden oder vollständig entfallen. Durch eine intensivere Nutzung der verbleibenden Sinne lassen sich die fehlenden Funktionen teilweise kompensieren. Es ist allgemein bekannt, dass Menschen mit fehlendem oder vermindertem Augenlicht ihre Umwelt intensiviert durch den Gehör- und Tastsinn wahrnehmen. Gehörlose Menschen stärken hingegen die Verarbeitung von optischen und haptischen Reizen.

Das Fehlen des Tastsinns hat hingegen gravierendere Folgen. Robles-De-La-Torre [Rob06] erklärt, dass der Verlust des Tastsinns nur unzureichend durch das Sehen kompensiert werden kann. Die Folge seien unter anderem starke Einschränkungen der Hand- und Fingerfertigkeiten, der Tastfähigkeit, des Ganges sowie der Wahrnehmung der eigenen Extremitäten. Ähnliche Einschränkungen können seiner Meinung nach auch in virtuellen Umgebungen auftreten, sofern diese keine angemessenen taktilen Rückmeldungen erzeugen. Robles-De-La-Torre betont, dass für eine schnelle und genaue Interaktion mit der Umwelt die Tastinformationen von großer Wichtigkeit sind. Aufgaben, die ein hohes Maß an Fingerfertigkeiten erfordern, seien ohne taktile Rückmeldungen schwierig oder unmöglich zu bewältigen. Er kritisiert, dass taktilen Rückmeldungen in virtuellen Umgebungen und in der HCI (Human-Computer-Interaction) oftmals nur eine untergeordnete Rolle beigemessen wird. Ferner sei es die allgemeine Annahme, dass in multimodalen Anwendungen der Tastsinn von der visuellen Wahrnehmung dominiert wird. Die Ausführungen von Gabriel Robles-De-La-Torre verdeutlichen die Bedeutsamkeit von taktilen Rückmeldungen sowohl im realen als auch im virtuellen Umfeld.

2.2. Taktile Rückmeldungen bei In-Air Controllern

Fehlende taktile Rückmeldungen bei berührungslosen Eingabegeräten sind nach wie vor der Gegenstand zahlreicher Forschungsarbeiten aus dem Gebiet der HCI. Auch der Leap Motion Controller veranlasste einige Wissenschaftler sich dieser Thematik anzunehmen. Nachfolgend sollen daher einige Lösungsansätze vorgestellt werden.

2.2.1. Glas

Eine Studie von Silva et al. [SdAdA⁺13] an der Universidade Federal de Pernambuco in Brasilien beschäftigte sich mit der Bewertung des Leap Motion Controllers in Bezug auf dessen Eignung als digitales Musikinstrument. Im Verlauf dieser Studie wurde ein virtuelles Piano entwickelt, welches auf die vom Leap Motion Controller erfassten Fingereingaben reagiert. Es stellte sich heraus, dass die Nutzer trotz einer visuellen Rückmeldung am Monitor die Positionen der Pianotasten verloren. Eine über dem Sensor positionierten Glasscheibe mit aufgezeichneter Klaviatur löste dieses Problem (Abbildung 2.1). Durch die Glasscheibe waren die Nutzer in der Lage den Auslösebereich der Tasten zu fühlen, was sehr wichtig für das Nutzungserlebnis des virtuellen Pianos war.



Abbildung 2.1: Glasscheibe mit aufgemalten Tasten über dem Leap Motion Controller [SdAdA⁺13]

2.2.2. HapticGlove

Eine Studie von Nguyen [Ngu14] an der University of Eastern Finland setzte sich zum Ziel, die Machbarkeit eines haptischen Handschuhs in Verbindung mit dem Leap Motion Controller zu untersuchen. Hierfür wurde ein Handschuh mit sechzehn Vibrationsmotoren ausgestattet (Abbildung 2.2), die sich einzeln über den Computer ansteuern lassen und dem Nutzer vibrotaktile Rückmeldungen geben. Für den Test des haptischen Handschuhs wurde ein prototypischer Dateibrowser entwickelt, der sich durch Handgesten steuern lässt. Eine Gruppe von Testpersonen sollte dann einige typische Aktionen mit dem Dateibrowser durchführen. In zwei Durchgängen wurde jeweils die Leistung mit und ohne den haptischen Handschuh analysiert.

Die Auswertung der Tests ergab, dass einige Personen durch die taktilen Rückmeldungen irritiert wurden. Dadurch sank die Aufmerksamkeit für die Anwendung und der Frustrationsgrad stieg. Anderen Teilnehmern war bereits der Handschuh selbst unangenehm. In einigen Fällen wurden die Gesten für die verschiedenen Aktionen vergessen. Die Teilnehmer versuchten daraufhin diese zu erraten, wodurch die Fehlerquote bei der Gestenerkennung stieg. Insgesamt zeigte sich keine signifikante Leistungssteigerung durch den haptischen Handschuh. Nguyen merkt jedoch an, dass auch eine mangelnde Qualität des berührungslosen Eingabegerätes die positiven Effekte der taktilen

Rückmeldungen unwirksam machen kann. Die Schlussfolgerung seiner Studie ist, dass taktile Rückmeldungen im Umfeld von berührungslosen Eingabegeräten grundsätzlich machbar sind. Die Qualität des verwendeten Eingabegerätes sollte aber möglichst hoch sein, da eine mangelnde Qualität weder durch taktile Rückmeldung noch durch die Benutzerschnittstelle ausgeglichen werden kann. Die Gesten für die Interaktion müssten sorgfältig durchdacht werden. Taktile Rückmeldungen sollten zudem nicht übermäßig viel eingesetzt werden, um den Anwender nicht zu überfordern und so die Aufmerksamkeit von der Anwendung zu lenken.



Abbildung 2.2: Haptischer Handschuh mit Vibrationsmotoren [Ngu14]

2.2.3. UltraHaptics

Carter et al. [CSL⁺13] beschreiben eine Technik bei der mit Ultraschall taktile Rückmeldungen erzeugt werden können. Das System besteht aus einem Projektor, einer schalldurchlässigen Projektionsfläche, 320 Ultraschallerzeugern (Abbildung 2.3) und dem Leap Motion Controller als Eingabegerät. Mit Hilfe der Ultraschallerzeuger werden akustische Wellen erzeugt, die bei der Reflexion an Objekten wie beispielsweise einer menschlichen Hand in mechanische Kräfte umgewandelt und dadurch wahrgenommen werden.

Als Einsatzgebiete für diese Technologie werden beispielsweise Bildschirme in Autos genannt. Der Fahrer müsste damit nicht länger den Blick von der Straße abwenden, während er den Bildschirm bedient, da die grafische Benutzeroberfläche (GUI) fühlbar wäre. Gegenüber dem haptischen Handschuh aus dem vorherigen Beispiel besteht der Vorteil darin, dass der Anwender keinen Handschuh anlegen muss, was eine spontane Nutzung des Systems begünstigt.

Das Funktionsprinzip von UltraHaptics erfordert allerdings, dass die Handfläche in Richtung der Ultraschallerzeuger zeigt. Dies stellt zwar für zweidimensionale Oberflächen keine Einschränkung dar, für taktile Rückmeldungen bei der dreidimensionalen Interaktion eignet sich das System dadurch aber nur bedingt, da hierbei die Handflächen des Nutzers nicht zwangsläufig nach unten gerichtet sind. Ein weiterer Nachteil liegt in der verhältnismäßig kurzen Reichweite von etwa 40 cm.

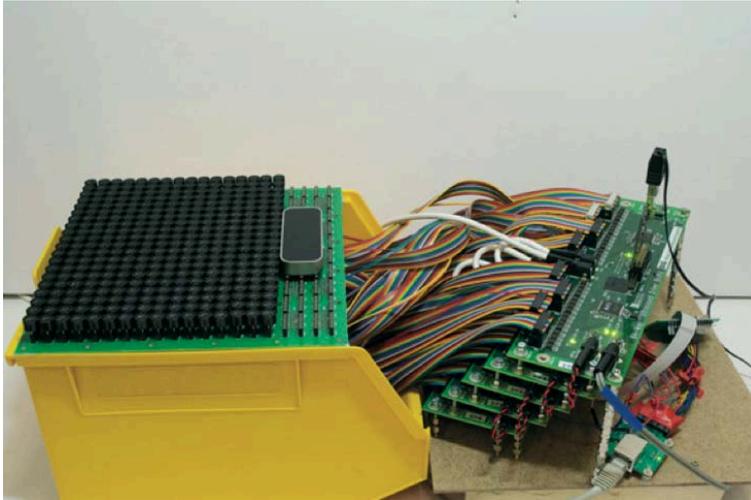


Abbildung 2.3: UltraHaptics Ultraschall-Feld [CSL⁺13]

2.2.4. Areal

Eine Methode zur Erzeugung von taktilen Rückmeldung mit Hilfe von Luftwirbeln haben Sodhi et al. [SPGI13] von DisneyResearch unter der Bezeichnung AIREAL vorgestellt. Das Funktionsprinzip basiert darauf, dass Stöße von komprimierter Luft auf der menschlichen Haut wahrgenommen werden. Mit Hilfe von fünf Tieftonlautsprechern, einer elektronisch ausrichtbaren Ausströmöffnung sowie einer 3D-Tiefenkamera können Luftwirbel exakt auf die Hände des Anwenders gerichtet werden. Die runde Ausströmöffnung sorgt dafür, dass ein torusförmiger Wirbel erzeugt wird, der sich bis zu 1,5 m weit geradlinig durch den Raum bewegt (Abbildung 2.4).

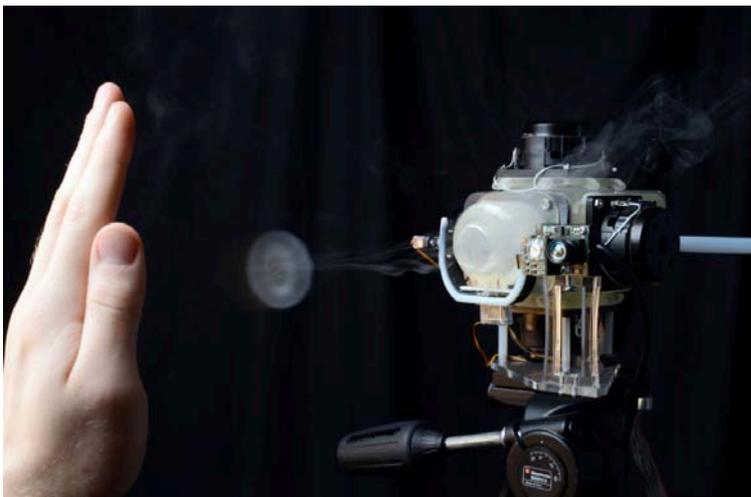


Abbildung 2.4: Das AIREAL System schießt einen Luftwirbel durch den Raum [SPGI13]

Durch eine integrierte Steuerelektronik können die Intensität und Frequenz der Wirbel variiert werden. Hierdurch lassen sich unterschiedliche Oberflächenstrukturen simulieren. Es besteht zudem die Möglichkeit mehrere AIREAL-Geräte im Verbund zu betreiben, wodurch sich ein dreidimensionaler

Interaktionsraum theoretisch vollständig abdecken ließe. In einem Testaufbau konnten die Anwender den Flügelschlag eines auf die Hand projizierten Schmetterlings spüren (Abbildung 2.5).

Ein Nachteil von AIREAL ist die vergleichsweise grobe Auflösung der taktilen Rückmeldungen. Eine schmalere Durchmesser des Wirbels könnte diese zwar verfeinern, gleichzeitig würde dadurch aber auch die Reichweite sinken. Ein weiteres Problem ist die Geräusentwicklung des AIREAL Systems, da durch die mechanische Bewegung der Tieftonlautsprecher störende Geräusche entstehen.



Abbildung 2.5: Anwender kann den Flügelschlag eines virtuellen Schmetterlings spüren. [SPGI13]

2.3. Fingerbasierte direkte 3D-Interaktion

Ein häufig diskutiertes Problem bei der gestenbasierten Interaktion ist der Umstand, dass Anwendungen oftmals ein vordefiniertes Gestenvokabular vorgeben. Der Nutzer muss sich hierbei die einzelnen Gesten merken und sie kognitiv mit den zugehörigen Funktionen verknüpfen. Anwendungen dieser Art werden häufig dem Anspruch der intuitiven Bedienbarkeit nicht gerecht, denn „für eine intuitive Bedienbarkeit eines Systems ist es erforderlich, dass ein neuer Anwender ohne oder mit nur minimalem Lernaufwand mit der Interaktion starten kann“ [Mal09]. Anwendungen die dem Nutzer ermöglichen eigene Gesten zu konfigurieren, können den Lernaufwand für selbige deutlich verringern. Untersuchungen von Nacenta et al. [NKQK13] haben ergeben, dass die von Nutzern definierten Gesten bis zu 44 % besser behalten werden. Mit steigender Komplexität einer Anwendung verlängert sich jedoch auch die Dauer für die Erstellung der benutzerdefinierten Gesten. Dies stellt kein Problem dar, wenn die erstellten Gesten gespeichert werden und beim nächsten Aufruf der Anwendung wieder zur Verfügung stehen. Kaum jemand würde jedoch ein öffentliches Informationssystem bedienen, wenn diesem zunächst die eigenen Gesten beigebracht werden müssten.

Für die Interaktion mit virtuellen dreidimensionalen Gegenständen existiert das Paradigma der fingerbasierten direkten 3D-Interaktion. Hierbei werden virtuelle Objekte nicht indirekt über Gesten manipuliert. Stattdessen werden die Objekte wie im realen Leben mit den Fingern berührt oder gegriffen. Der Vorteil gegenüber Anwendungssteuerungen, die auf Gestenvokabularen basieren, liegt

darin, dass der Anwender keine besonderen Gesten verinnerlichen muss. Damit eignet sich die fingerbasierte direkte 3D-Interaktion insbesondere für Anwendungsbereiche in denen der Nutzer naiv, also ohne besonderes Vorwissen, an eine für ihn unbekannte Anwendung herantritt.

2.4. Systeme zur fingerbasierten direkten 3D-Interaktion

Es existieren zahlreiche kommerzielle und prototypische Eingabesysteme, die sich für die fingerbasierte direkte 3D Manipulation in interaktiven virtuellen Umgebungen eignen. Der folgende Abschnitt soll einen Überblick über die grundlegenden Unterschiede solcher Systeme verschaffen und deren Vor- und Nachteile aufzeigen. Der Leap Motion Controller wird in diesem Abschnitt nicht behandelt, da er in Kapitel 4 ausführlich beschrieben wird. Er wird jedoch in einer abschließenden Vergleichstabelle aufgelistet. Aus technischer Sicht lassen sich die vorgestellten Geräte und der Leap Motion Controller klassifizieren als Verfahren zur „[...] Bestimmung der vollständigen kinematischen Pose der menschlichen Hand mit 15 Gelenken“ [Mal09]. Betrachtet werden die kommerziellen Produkte *CyberGlove*, *ARTTrack Fingertracking* und *DepthSense*, sowie die prototypischen Konzepte *Kinect 3D Hand Tracking* und *Color Glove*.



Abbildung 2.6: v.l.n.r. CyberGlove II, CyberTouch, CyberGrasp [Cyb14]

2.4.1. CyberGlove

Beim CyberGlove (Abbildung 2.6, links) handelt es sich um ein Eingabegerät in Form eines Datenhandschuhs. Dieser wird im Grunde wie ein gewöhnlicher Handschuh getragen, ist jedoch mit zahlreichen elektronischen Sensoren ausgestattet. Diese Sensoren ermitteln die Beugung und Abspreizung der einzelnen Finger, die Oppositionstellung des Daumens, die Krümmung der Handfläche und die Drehung des Handgelenks. Die Informationen der Sensoren laufen in einer kleinen Box zusammen, die am Unterarm des Nutzers befestigt wird. Von hier aus werden die erfassten Daten kabellos (bei älteren Modellen kabelgebunden) an einen Computer übertragen. Die Vorteile beim CyberGlove System liegen zum einen in der hohen Genauigkeit von weniger als einem Grad, zum anderen ist das System sehr robust, da es unanfällig gegenüber äußeren Störeinflüssen ist. Auch das Problem der Selbstverdeckung (siehe: Selbstverdeckung 4.5.3) existiert beim CyberGlove System nicht. Mit den zusätzlichen Produkten CyberTouch (Abbildung 2.6, Mitte) und CyberGrasp (Abbildung 2.6, rechts) erhält der Nutzer zudem Tast- und Krafterückmeldungen. Damit lässt sich nicht nur die Form eines virtuellen Objekts beurteilen, sondern auch dessen Steifigkeit. Die Nachteile liegen in den Anschaffungskosten von über 10.000 € pro Hand für das Einstiegsmodell. Für die

Bedienung des CyberGlove muss der Handschuh zunächst angelegt werden. Dies verhindert die spontane Nutzung des Systems. Durch das Gewicht und den Handschuh selbst kann die Bedienung möglicherweise als unkomfortabel empfunden werden, was die Nutzerakzeptanz des Systems sinken lässt [RA12].

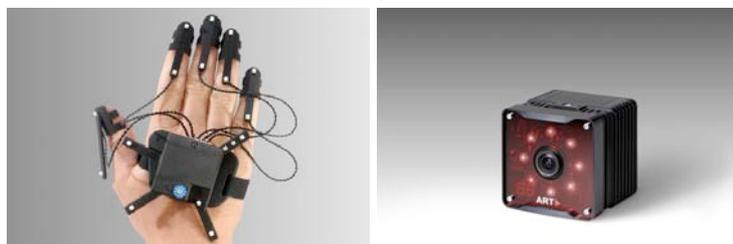


Abbildung 2.7: Fingertracking und ARTTrack5 Kamera

2.4.2. ARTTrack Fingertracking

Die Fingertracking Lösung ARTTrack der Firma ART basiert auf einem optischen Motion Capture Verfahren. Bei diesem Verfahren werden zwei oder mehr Kameras eingesetzt, um mehrere an einer Person angebrachten Markierungspunkte zu erfassen. Ein Computer errechnet in Echtzeit die räumlichen Positionen dieser Markierungspunkte und überträgt sie auf ein virtuelles Abbild eines menschlichen Körpers. Motion Capture wird oftmals eingesetzt, um computergenerierten Charakteren in Filmen oder Videospielen die natürlichen und flüssigen Bewegungen einer realen Person zu verleihen. Mit dem Gerät Fingertracking (Abbildung 2.7, links) kann das Motion Capture Verfahren auch für die Erfassung von einzelnen Fingerbewegungen genutzt werden. Der Nutzer trägt hierbei ein Konstrukt aus aktiven, also selbstleuchtenden Markierungspunkten an der Hand (vgl. [RA12]). Auch hier werden die Markierungspunkte von den Kameras (Abbildung 2.7, rechts) erfasst und von einem Computer auf das virtuelle Modell einer menschlichen Hand übertragen. Das Produkt Fingertracking gibt es in zwei Versionen für die Erkennung von drei oder fünf Fingern. Die Vorteile von ARTTrack Fingertracking liegen vor allem im großen Interaktionsvolumen. Im Gegenzug ist jedoch ein komplexer Aufbau aus mehreren kalibrierten Kameras notwendig. Ein weiterer Nachteil ist die niedrige Bildrate, die das System liefert. Zwar werden die Bewegungen der Hände mit 60 Bildern pro Sekunde (fps) erfasst, doch die einzelnen Finger werden nur mit 20 fps (3 Finger Version) beziehungsweise 12 fps (5 Finger Version) registriert. Damit erfüllt die Produktvariante mit der Unterstützung von fünf Fingern nicht mehr die Anforderung von einer Echtzeit-Interaktion. Angaben zu der Genauigkeit des Systems hat der Hersteller nicht veröffentlicht. Preislich dürfte ein funktionsfähiges System die Kosten des CyberGlove Einstiegsmodells übersteigen, auch wenn der Hersteller hierzu ebenfalls keine genauen Angaben auf der Website macht. Für Aufgaben bei denen ausschließlich die Hand- und Fingerbewegungen einer Person erfasst werden müssen, dürften Motion Capture Systeme in den meisten Fällen sowohl platztechnisch überdimensioniert als auch finanziell unrentabel sein.

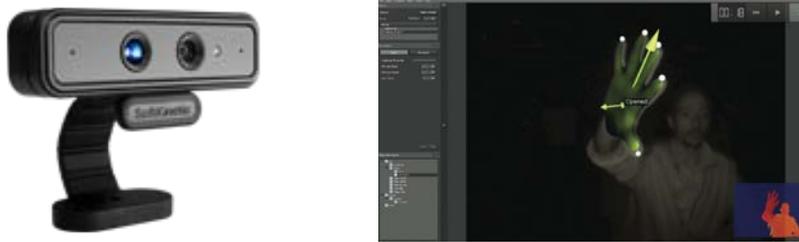


Abbildung 2.8: DS325 Time-Of-Flight Kamera (links), Hand- und Fingererkennung (rechts) [Sof14]

2.4.3. DepthSense

Das Produkt DS325 der Firma SoftKinetic ist ein Tiefensensor in der Größe einer Webcam (Abbildung 2.8, links). Das Funktionsprinzip basiert auf der vergleichsweise neuen Time-of-Flight¹ Technologie. Die Kamera sendet hierbei Infrarotimpulse aus, die von den Objekten vor der Kamera reflektiert werden. Der Bildsensor des DepthSense ist in der Lage, die unterschiedlichen Laufzeiten eines Impulses für jeden einzelnen Pixel zu registrieren. Auf dem Computer werden die von der Kamera aufgenommenen Hände und Finger mit Hilfe der Middleware **iisu**² in ein dreidimensionales Modell umgewandelt. Die Firma Intel nutzt die Technologie von SoftKinetic für die Hand- und Fingererkennung der eigenen RealSense Produkte. Auch der Hersteller Creative vertreibt mit Senz3D eine Kamera, die auf der Technologie von SoftKinetic basiert. Die Vorteile von DepthSense liegen ähnlich wie beim Leap Motion Controller in der sehr kompakten Bauweise. Zudem werden für die Bedienung keine technischen Hilfsmittel wie Handschuhe oder Markierungspunkte benötigt. Die Genauigkeit des DS325 gibt SoftKinetic im Datenblatt lediglich mit „Detailed sensitivity“ an. Nach Untersuchungen von Cree et al. [CSC⁺13] lässt sich mit dem Gerät eine Genauigkeit von etwa 1 cm erzielen. Mit einem Verkaufspreis von rund 220 Euro dürften die Endverbraucher die Hauptzielgruppe des Geräts darstellen.

2.4.4. Kinect 3D Hand Tracking

Seit Ende 2010 existiert der von Microsoft und PrimeSense entwickelte Kinect Sensor auf dem Markt. Entwickelt als Controller für Microsofts Spielekonsole X-Box, ermöglicht er den Nutzern die Steuerung des Spielcharakters mit Hilfe der eigenen Körperbewegungen. Die zugrundeliegende Technologie des Kinect-Sensors basiert auf strukturiertem Licht. Hierbei wird mit Hilfe eines Infrarot-Lasers ein vordefiniertes Punktmuster in den Interaktionsraum vor dem Gerät projiziert. Objekte innerhalb des Interaktionsraums führen einer Verzerrung dieses Musters. Das vom Raum und den Objekten reflektierte Punktmuster wird von einem Infrarot-Sensor innerhalb des Geräts erfasst. Anschließend werden mit speziellen Softwarealgorithmen die Abweichungen im Punktmuster in Tiefeninformationen umgewandelt. Befinden sich Personen im Interaktionsbereich, so wird diesen automatisch ein virtuelles Skelett zugewiesen, das mit dem Skelett des Spielcharakter verknüpft wird. Da der Kinect-Sensor ursprünglich als Ganzkörper-Tracker konzipiert wurde, war die Erken-

¹ Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/TOF-Kamera> (Abruf: 12.02.2015)

² Quelle: <http://www.softkinetic.com/products/iisumiddleware.aspx> (Abruf: 12.02.2015)

nung einzelner Finger nicht vorgesehen. Mit der Veröffentlichung von Gerätetreibern für gewöhnliche Computersysteme, hat sich dies jedoch geändert. Entwickler waren nunmehr in der Lage eigene Softwarelösungen für den Kinect-Sensor zu entwerfen.



Abbildung 2.9: Microsoft Kinect (zweite Generation) [Ms15]

Ende 2012 stellten Kyriazis et al. [KOA12] die „Kinect 3D Hand Tracking Library“ vor, die es ermöglicht den Kinect-Sensor für die Erkennung von Hand- und Fingerbewegungen zu benutzen. Nach eigenen Angaben erreicht die Software dabei eine Genauigkeit von bis zu 5 mm bei einer Bildrate von 20 fps. Um diese Bildrate zu erreichen ist jedoch eine leistungsstarke Computerhardware notwendig. Das lässt vermuten, dass die zugrundeliegenden Softwarealgorithmen äußerst komplex sind. Wie auch beim Leap Motion Controller und der DepthSense Technologie, muss der Nutzer keine Geräte oder Handschuhe anlegen. Die Kosten für den Microsoft Kinect Sensor belaufen sich auf etwa 150 Euro.

2.4.5. ColorGlove

Wang und Popović [WP10] haben ein Lösungskonzept zur Fingererkennung veröffentlicht, das auf einem Handschuh mit farbigen Segmenten sowie einer handelsüblichen Webcam basiert. Mit Hilfe von Mustererkennung werden die einzelnen Kamerabilder mit einer umfangreichen Datenbank von Handposen verglichen. Die Hand- und Fingerbewegungen werden dann zur Erhöhung der Genauigkeit auf ein Handmodell mit einer inversen Kinematik übertragen.



Abbildung 2.10: 3D-Fingertracking mit dem Color Glove [WP10]

Die Vorteile dieser Lösung liegen in den niedrigen Materialkosten und der Einfachheit des Systems. Die Genauigkeit erreicht jedoch, laut Angaben von Wang und Popović, nicht das Niveau von professionellen Motion Capture Systemen. Der ColorGlove wurde zwar nie als kommerzielles Produkt vertrieben, die benötigten Komponenten sollten jedoch schon für unter 50 Euro erhältlich sein.

In den vorangegangenen Abschnitten wurden einige kommerzielle Produkte sowie prototypisches Konzepte für die fingerbasierte direkte 3D-Manipulation vorgestellt. Die Preisspanne der unterschiedlichen Systeme ist beträchtlich. Sie reicht von etwa 50 Euro bis weit über 10000 Euro. Auch die technischen Funktionsweisen der Geräte unterscheiden sich stark. Von den genannten Produkten arbeitet nur der CyberGlove rein elektronisch. Gleichzeitig ist es das einzige System, das optional taktile Rückmeldungen an die Hände des Anwenders überträgt. Die anderen Geräte sind optische Fingertracker, doch auch hier gibt es Unterschiede in der Funktionsweise. So basiert ColorGlove allein auf der Mustererkennung eines farblich segmentierten Handschuhs, während das ARTTrack Fingerttracking System aktive Markierungspunkte und mehrere kalibrierte Kameras voraussetzt. Bei der DepthSense Technologie werden die Laufzeitunterschiede des Lichts ausgewertet und die Kinect Hardware basiert auf strukturiertem Licht. Von den vorgestellten Systemen funktionieren lediglich DepthSense und die prototypische Software „Kinect 3D Hand Tracking“ ohne weitere Hilfsmittel und lassen sich daher, wie der Leap Motion Controller, in die Kategorie der Bare-Hand-Controller einordnen.

	Funktionsweise	Rückmeldung	Interaktion	max. Wiederholrate	Preis
CyberGlove	elektronisch	Tast / Kraft (optional)	gerätebasiert	n/a	> 10000 €
ARTTrack Fingertracking	optisch (Marker)	keine	gerätebasiert	60 fps / 20 fps / 12 fps*	n/a
DepthSense	optisch (Time-of-Flight)	keine	bare-hand (gerätelos)	60 fps	ca. 220 €
Kinect	optisch (Structured light)	keine	bare-hand (gerätelos)	20 fps	< 150 €
ColorGlove	optisch (Mustererkennung)	keine	gerätebasiert	n/a [†]	< 50 €
Leap Motion	optisch (Stereoskopie)	keine	bare-hand (gerätelos)	214 fps / 295 fps [‡]	ca. 89 €

* 60 fps für Handerkennung, 20 fps beziehungsweise 12 fps für Fingererkennung

† abhängig von der verwendeten Webcam

‡ 295 fps bei Anschluss über USB 3.0

Tabelle 2.1: Übersicht der vorgestellten Fingertracking Systeme

Tabelle 2.1 verdeutlicht warum der Leap Motion Controller derzeit das wohl interessanteste Gerät seiner Kategorie ist und damit ein vielversprechendes Forschungsobjekt darstellt. Neben der Tatsache, dass die Hand- und Fingererkennung ohne zusätzliche Hilfsmittel funktioniert, bietet er derzeit mit maximal 295 fps eine fast fünfmal höhere Bildrate als vergleichbare Systeme. Auch mit der angegebenen Genauigkeit von 0,01 mm hebt er sich von den anderen Lösungen ab. Trotz der genannten Vorteile gegenüber den anderen Systemen, siedeln die Anschaffungskosten für den Leap Motion Controller eher im unteren Preissegment an.

2.5. Reale und virtuelle Interaktion

Die in dieser Arbeit angestellten Untersuchungen vergleichen die Qualität von Präzisionsgesten bei der Interaktion mit realen Gegenständen sowie der Interaktion mit virtuellen Gegenständen im Zusammenwirken mit dem Leap Motion Controller. In diesem Abschnitt sollen daher Unterschiede zwischen den beiden Interaktionsformen betrachtet werden.

2.5.1. Kinästhetische figurale Nachwirkung

Figurale Nachwirkungen sind ein von James J. Gibson [Gib50, Gib54, GB63] beschriebenes Phänomen, bei denen die Formen von Figuren verkleinert, vergrößert oder verschoben wahrgenommen werden, nachdem zuvor eine ähnliche Figur für längere Zeit betrachtet wurde. Kohler und Dinnersstein [KD49] zeigten, dass sich dieses Phänomen auch kinästhetisch nachweisen lässt.

In einem Versuch schätzten Testpersonen die Breite eines Pappstreifens zu schmal ein, wenn sie zuvor für einige Minuten einen schmaleren Pappstreifen berührten. Ebenso schätzten sie den Streifen zu breit ein, sofern zuvor ein breiterer Pappstreifen berührt wurde. Keine Fehleinschätzungen traten hingegen auf, wenn die Testpersonen zuvor keinen anderen Pappstreifen berührten. Diese kinästhetische figurale Nachwirkung beeinflusst demnach die Wahrnehmung von Objekten. Alzayat et al. [AHN14] untersuchten, ob sich die kinästhetischen figuralen Nachwirkungen auch bei einer virtuellen Interaktion nachweisen lassen. Hierzu bildeten sie den Versuch von Kohler und Dinnersstein nach und ergänzten diesen um einen Touchscreen. Auf diesem wurde ein virtueller Holzblock dargestellt. Die Testpersonen sollten mit den Fingern an den Konturen des virtuellen Holzblocks entlangfahren und im Anschluss dessen Breite mit Hilfe eines realen Messblocks einschätzen. Die Auswertung der Untersuchung zeigte, dass es hierbei zu keinen signifikanten Fehleinschätzungen der Breite kam. Kinästhetische figurale Nachwirkungen konnten somit bei virtueller Interaktion, zumindest unter den Rahmenbedingungen der durchgeführten Studie, nicht nachgewiesen werden.

Die Arbeit lieferte einen Beweis für die Existenz eines fundamentalen Unterschieds zwischen realer und virtueller Interaktion [AHN14]. Für Bereiche der HCI, in der die präzise Wahrnehmung von virtuellen dreidimensionalen Objekten eine Rolle spielt, könnte die Abwesenheit der kinästhetischen figuralen Nachwirkung einen Vorteil darstellen, da Fehleinschätzungen der Dimensionen seltener auftreten.

2.5.2. Räumliches Sehen

Der Mensch ist durch die Physiologie seiner Augen zur stereoskopischen Tiefenwahrnehmung fähig. Dies bedeutet, dass er durch das Sehen mit beiden Augen die Entfernungen zu oder zwischen Objekten beurteilen kann. Auch das zielsichere Greifen ist im hohen Maße von der stereoskopischen Tiefenwahrnehmung abhängig. Dies wird deutlich bei dem Versuch, mit nur einem Auge nach Gegenständen zu greifen. Die Zielgenauigkeit mit einem Auge ist merklich schlechter als bei zweiäugiger Sicht. Ist die stereoskopische Sicht nicht gegeben, so lassen sich unterschiedliche räumliche Tiefen nur noch anhand monokularer Tiefenreize erkennen. Hierzu zählen unter anderem Schatten, Verdeckung oder die perspektivische Konvergenz bei der Linien in der Ferne zusammen zu laufen scheinen. Monokulare Tiefenreize zeichnen sich also dadurch aus, dass sie auch mit nur einem Auge wahrgenommen werden können.

Ganz ähnlich verhält es sich bei der Ausgabe von virtuellen Umgebungen auf konventionellen Computerbildschirmen. Aus dreidimensionalen Szenen werden vor der Ausgabe zweidimensionale Bilder errechnet, damit sie dann auf der ebenfalls zweidimensionalen Bildschirmenebene dargestellt werden können. Das linke und rechte Auge des Nutzers sehen das identische Bild, daher stehen dem

Nutzer keine stereoskopischen Tiefeninformationen zur Verfügung. Insbesondere bei der Interaktion mit virtuellen 3D-Umgebungen sollten daher stereoskopische Ausgabeverfahren eingesetzt werden. Hierbei werden für das linke und rechte Auge zwei separate sogenannte Halbbilder mit einem horizontalen Versatz erzeugt, die mit Hilfe von optischen Filtern nur für das jeweilige Auge sichtbar gemacht werden. Auf diese Weise stehen dem Betrachter trotz der zweidimensionalen Bildschirmenebene stereoskopische Tiefeninformationen zur Verfügung.

Eine solches Verfahren kommt auch bei den für diese Arbeit durchgeführten Untersuchungen zum Einsatz. Dies ist zwingend notwendig, da ansonsten eine potentielle schlechte Leistung des Leap Motion Controllers bezüglich der Präzisionsgriffe, auch auf die Abwesenheit räumlicher Tiefeninformationen zurückzuführen wäre. Damit dieser Faktor eliminiert wird, stehen den Testpersonen bei den Untersuchungen grundsätzlich Tiefeninformationen zur Verfügung (siehe: 5.4.3 Stereoskopische Ausgabe).

2.6. Genauigkeit des Leap Motion Controllers

Bei der Veröffentlichung neuer Produkte aus dem Gebiet der Mensch-Maschine-Interaktion steht oftmals die Frage im Raum, wie gut die Leistung des neuen Produkts tatsächlich ist. Häufig werben die Hersteller aktiv mit einer bestimmten Eigenschaft der Neuvorstellung. Die beworbenen Eigenschaften werden vom Endverbraucher häufig als ein direktes Qualitätsmerkmal aufgefasst. Doch insbesondere bei der Vermarktung einer bestimmten Produkteigenschaft sollte selbige kritisch hinterfragt werden. Für den Endverbraucher ist in der Regel nicht nachvollziehbar, welche Testmethoden angewandt wurden, um etwa die Genauigkeit eines Produktes zu bestimmen. Auch fehlt in den meisten Fällen das Engagement oder das technische Equipment um die Herstellerangaben zu verifizieren.

Im Fall des Leap Motion Controllers sind Weichert et al. [WBRF13] den Aussagen des Herstellers nachgegangen. Mit Hilfe eines Industrieroboters wurde eine Laborstudie zur Untersuchung der translatorischen Genauigkeit durchgeführt (Abbildung 2.11). Der Roboter positionierte hierzu einen Referenzstift an vorgegebenen Koordinaten im Interaktionsraum des Leap Motion Controllers. Während der verschiedenen Testläufe wurden dann die vom Roboter angesteuerten Positionen mit den vom Leap Motion Controller ermittelten Koordinaten verglichen. Die Testläufe wurden sowohl statisch als auch dynamisch durchgeführt. Bei der Untersuchung der statischen Genauigkeit, wurde der Referenzstift zunächst an die vorbestimmte bestimmte Zielposition im Interaktionsraum gefahren und dann gestoppt. Erst nach dem Stoppen erfolgte die Messung der Abweichung. Für die Messung der Genauigkeit während einer Bewegung, wurde der Referenzstift auf einem vorgegebenen Pfad bewegt. Während der Bewegung auf dem vordefinierten Pfad wurden kontinuierlich Messungen vorgenommen. Durch den Vergleich zwischen den vorgegebenen Soll-Werten und den vom Leap Motion Controller ermittelten Ist-Werten konnte dann ein Urteil zur Genauigkeit des Controllers abgegeben werden.

Die Ergebnisse der Untersuchung bescheinigen dem Leap Motion Controller eine durchschnittliche translatorische Genauigkeit von 0,2 mm in den statischen Testfällen, sowie eine Genauigkeit von

1,2 mm in dynamischen Testfällen. Die vom Hersteller angegebene Genauigkeit von 0,01 mm konnte damit also nicht verifiziert werden. Hierfür war jedoch auch die Toleranz des verwendeten Industrieroboters mit 0,2 mm zu hoch. Weichert et al. führen jedoch an, dass die menschliche Hand, bedingt durch den physiologischen Tremor, im bestmöglichen Fall auch nur eine Genauigkeit von eben diesen 0,2 mm aufweist [WBRF13].

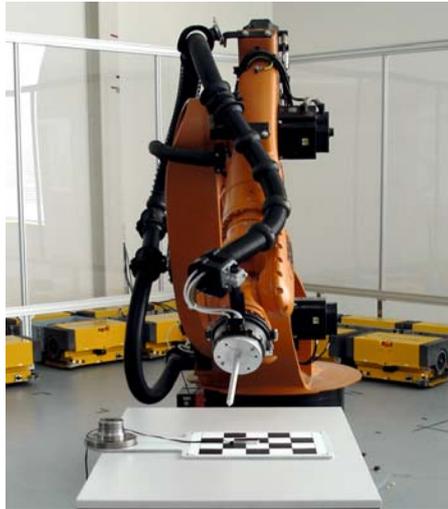


Abbildung 2.11: Industrieroboter untersucht die Genauigkeit des Leap Motion Controller [WBRF13]

Die Ergebnisse der durchgeführten Untersuchung sind darüber hinaus nicht für alle erdenklichen Interaktionsformen gültig. Da der Roboter mit einem Referenzstift ausgestattet war, erlauben die Ergebnisse der Untersuchung in erster Linie Rückschlüsse auf die zu erwartende Genauigkeit bei Zeigegesten, die mit einem einzelnen Finger oder einem Werkzeug durchgeführt werden. Aussagen bezüglich einer Genauigkeit bei der Erfassung von Greifbewegungen oder Präzisionsgriffen, lässt die durchgeführte Untersuchung hingegen nicht zu.

2.7. Leap Motion versus Computermaus

Die Computermaus ist mittlerweile mehr als 45 Jahre alt. Trotz der rasanten Weiterentwicklung im Softwaresektor hat sich an ihrem grundlegenden Konzept kaum etwas verändert. Nicht zuletzt dürfte dieser Umstand zum großen Erfolg der Maus beigetragen haben, denn es gibt kaum einen Computernutzer der nicht im Umgang mit der Maus vertraut ist. Durch diese Popularität haben alternative Eingabegeräte Schwierigkeiten sich auf dem Markt zu etablieren. Selbst im Bereich der 3D-Computergrafik setzt man heute nach wie vor auf dieses probate Zeigegerät, obwohl es ursprünglich für 2D-Umgebungen konzipiert wurde und daher nur über zwei Freiheitsgrade verfügt. Rautaray und Agrawal [RA12] erklären, dass die zwei Freiheitsgrade der Maus die drei räumlichen Dimensionen nicht nachbilden können. Vor diesem Hintergrund erscheint die Bewertung neuer 3D-Eingabegeräte generell sinnvoll.

Coelho und Verbeek [CoVe14] verglichen den Leap Motion Controller mit der Computermaus in Hinsicht auf die Leistung bei räumlichen Zeigaufgaben. Hierbei sollten die Testkandidaten zunächst eine Kugel an eine vorgegebene Position verschieben. Im zweiten Durchgang musste die Kugel dann nacheinander an zwei unterschiedliche Positionen geführt werden. Die erste Gruppe führte die Aufgaben mit einer gewöhnlichen Computermaus durch, während die zweite Gruppe den Leap Motion Controller verwendete.

Bei der Auswertung der Ergebnisse wurde zunächst die Lernkurve beider Eingabegeräte miteinander verglichen. Hierbei zeigte sich, dass die Lernkurve des Leap Motion Controllers steiler verläuft. Dies wurde auf die bereits vorhandenen Erfahrungen im Umgang mit der Computermaus zurückgeführt, wohingegen der Leap Motion Controller den Testkandidaten weitestgehend unbekannt war. Bei der Auswertung der Zeigaufgaben beider Testgruppen wurde ersichtlich, dass ein einzelner räumlicher Punkt im Durchschnitt schneller mit dem Leap Motion Controller erreicht wird. Müssen jedoch unmittelbar nacheinander zwei Punkte erreicht werden, wird diese Aufgabe im Mittel schneller mit der Maus durchgeführt. Eine Erklärung hierfür wird in der Ansteuerung der z-Achse mit Hilfe des Mousrads gesehen. Diese sei genauer als das Tracking mit dem Leap Motion Controller. Dies erscheint insbesondere dadurch schlüssig, da sich das Mousrad unabhängig von x- und y-Achse bewegen lässt und dadurch eine Bewegung auf der z-Achse die anderen beiden Achsen nicht beeinflusst.

2.8. Zusammenfassung

Die Abwesenheit taktiler Rückmeldungen stellt grundsätzlich ein Problem bei der Interaktion mit realen und virtuellen Gegenständen dar. Dies wurde bereits durch Robles-De-La-Torre [Rob06] erkannt. Seine Aussage, der fehlende Tastsinn sei nur unzureichend durch das Sehen kompensierbar, wird bestärkt durch die Forschungsarbeit von Silva et al. [SdAdA⁺13]. Das zuverlässige Betätigen der virtuellen Pianotasten war bei der dortigen Untersuchung trotz einer visuellen Rückmeldung nicht möglich. Erst durch die provisorische Konstruktion mit einer Glasplatte, die den Nutzern eine taktile Rückmeldung bot, stellte sich ein zufriedenstellendes Nutzungserlebnis ein. Die Lösung mit der Glasplatte ist jedoch nicht universell einsetzbar, da sie lediglich Rückmeldungen auf einer räumlichen Ebene ermöglicht. Für einen praktischen Einsatz wäre zudem abzuwägen, ob ein Touchscreen der Kombination aus Leap Motion Controller und Glasscheibe vorzuziehen wäre. Dieser vermittelt die gleichen passiven Rückmeldungen und ist zudem technologisch ausgereift und erprobt.

Der von Nguyen entwickelte Prototyp des vibrotaktilen Handschuhs entgegnet dem Problem etwas universeller. Im Unterschied zu dem Lösungskonzept mit der Glasplatte sind hier die Rückmeldungen nicht auf eine bestimmte räumliche Ebene begrenzt. Die praktische Untersuchung des Prototyps zeigten, dass der Handschuh zusammen mit dem Leap Motion Controller grundsätzlich funktioniert. Es stellte sich jedoch auch heraus, dass der Handschuh die Nutzerleistung insgesamt nicht verbessern konnte. Nguyen führte dies auf die Leistungen des Leap Motion Controllers und seiner entwickelten Testanwendung zurück.

Einen technologisch interessanten Ansatz liefern Carter et al. [CSL⁺13] mit UltraHaptics, einem System für taktile Rückmeldung auf der Basis von Ultraschall. Der entwickelte Prototyp erzeugt für den Nutzer wahrnehmbare taktile Rückmeldungen, ohne dass dieser dafür Geräte anlegen muss oder in seiner Bewegungsfreiheit eingeschränkt wird. Um dreidimensionale virtuelle Objekte ertastbar zu machen, müsste das System jedoch erweitert werden.

Das von Sodhi et al. [SPGI13] entwickelte Aired System basiert auf gerichteten Luftwirbeln und ist in der Lage, räumliche, taktile Rückmeldungen zu generieren. Bedingt durch den Durchmesser der Luftwirbel ist die Lösung jedoch weniger genau als UltraHaptics. Zudem verursacht die Erzeugung der Luftwirbel störende Geräusche.

Die vorgestellten Arbeiten verdeutlichen, dass taktile Rückmeldung im Umfeld der kontaktlosen 3D-Interaktion ein fortlaufendes Forschungsthema sind. Kommerzielle Produkte für Rückmeldungen bei Bare-Hand-Controllern existieren nach Kenntnis des Autors nicht. Anwender solcher Geräte sehen sich daher bislang gezwungen auf taktile Rückmeldungen zu verzichten. Die in dieser Masterarbeit durchgeführten Untersuchungen mit dem Leap Motion Controller konzentrieren sich daher auf das vom Hersteller vorgesehene Bedienungskonzept, also die Interaktion unter Abwesenheit taktiler Rückmeldungen.

Der Vergleich einiger Systeme für die fingerbasierte direkte 3D-Interaktion offenbarte, dass es grundlegende Unterschiede in den technischen Verfahren gibt. Während der CyberGlove elektronische Sensoren einsetzt, basiert der überwiegende Teil der betrachteten Geräte auf optischen Verfahren zur Erfassung der Hand- und Fingerpositionen. Optische Verfahren haben den Vorteil, dass sie sich kostengünstig und platzsparend realisieren lassen. Zudem sind optische Verfahren prädestiniert für die kontaktlose 3D-Interaktion.

Bei den Recherchen zu dieser Arbeit zeigte sich, dass sich viele Studien und Untersuchungen zum Leap Motion Controller mit der Leistungsanalyse in Bezug auf Zeigeaufgaben oder vergleichbaren Gesten befassen [vgl. CoVe14, GJP⁺14, WBRF13]. Nach Kenntnisstand des Autors wurde die Leistung des Leap Motion Controller in Hinsicht auf Greifgesten im Allgemeinen und Präzisionsgriffen im Speziellen bislang noch nicht hinreichend wissenschaftlich untersucht.

3. Kapitel

Griffe der menschlichen Hand

Wie in der Einleitung erwähnt ermöglicht die menschliche Hand durch ihren komplexen anatomischen Aufbau eine große Anzahl von Griffen. Der folgende Abschnitt soll daher eine Übersicht über die verschiedenen Griffarten verschaffen.

3.1. Griffarten

In vielen Bereichen unseres Lebens verwenden wir Griffe als Mittel um mit unserer Umwelt zu interagieren. Allein im Bereich des Sports existieren zahlreiche Bezeichnungen für Griffe. Eine einheitliche Nomenklatur existiert aber nicht, da viele Sportarten ihre eigenen Bezeichnungen etabliert haben. Dabei stellen viele Griffe in der Regel nur Abwandlungen einiger weniger Basisgriffe dar.

In der Wissenschaft klassifiziert man die Griffe der menschlichen Hand sehr detailliert anhand unterschiedlicher Gesichtspunkte. Geht es primär um die Anzahl der an einem Griff beteiligten Finger, so wird zwischen bidigitalen Griffen und plurdigitalen Griffen unterschieden. Bei bidigitalen Griffen sind immer genau zwei Finger involviert, von denen einer meistens, aber nicht notwendigerweise immer, der Daumen ist. Sofern der Daumen nicht an einem bidigitalen Griff beteiligt ist, spricht man auch von einem interdigitalen Griff. Das klassische Beispiel hierfür ist das Halten einer Zigarette. Plurdigitale Griffe erfordern hingegen den Einsatz von drei, vier oder fünf Fingern. Sie werden auch tri-, tetra- und pentadigitale Griffe genannt und beziehen stets den Daumen mit ein [AAB10].

Wird hingegen die Bewegungsfähigkeit der Hand während des Greifens betrachtet, differenziert man in statische und dynamische Griffe [Kap09]. Dynamische Griffe gestatten zum Zeitpunkt des Griffs die Ausführung weiterer Bewegungsabläufe mit der Hand. Eine Schere kann gegriffen werden, gleichzeitig lässt sie sich öffnen und schließen. Bei statischen Griffen ist dies nicht möglich. Eine etwas pragmatischere Sichtweise unterscheidet hingegen zwischen Kraftgriffen und Präzisionsgriffen [Gros04].

3.1.1. Kraftgriffe

Wie der Name bereits vermuten lässt zielt der Kraftgriff darauf ab, eine möglichst robuste Verbindung zwischen der Hand und dem gegriffenen Gegenstand herzustellen. „Beim Kraftgriff sind die Finger gebeugt, sodass sie zusammen mit der Handfläche eine Art Klammer bilden. Der Daumen

steht dabei den anderen Fingern nicht unbedingt gegenüber“ [Gros04]. Zur Festigung des Griffes kann der Daumen auf die übrigen Finger gedrückt werden. Diese Griffart wird auch als Faustschluss mit oder ohne Beteiligung des Daumens bezeichnet [HeLo14].



Abbildung 3.1: Kraftgriff am Lenkrad eines PKW © Dagmar Zechel / pixelio.de

Zahlreiche Beispiele für diese Griffart finden sich in unserem Alltag. Um etwa ein Fahrzeug sicher zu lenken, umfasst der Fahrer das Lenkrad mit einem Kraftgriff (Abbildung 3.1). Auch beim Öffnen und Schließen von Türen oder Fenstern wird in der Regel der Kraftgriff eingesetzt. Vereinfacht ausgedrückt hilft diese Griffart bei der Ausführung von groben Tätigkeiten, bei denen die Präzision unerheblich oder zweitrangig ist.

3.1.2. Präzisionsgriffe

Für Aufgaben die ein erhöhtes Maß an Genauigkeit erfordern, wie etwa dem Führen eines Kugelschreibers, setzt der Mensch den Präzisionsgriff ein. Bei dieser Griffart werden, anders als beim Kraftgriff, primär die Fingerspitzen und Fingerbeeren als Kontaktfläche genutzt. Charakteristisch für den Präzisionsgriff ist zudem der Einsatz des Daumens als Gegenlager zu den übrigen Fingern [KMR⁺09, Gros04]. In Abhängigkeit der verwendeten Finger und Kontaktflächen lässt sich der Präzisionsgriff weiter unterteilen in den Fingerspitzen-, Pinzetten-, Dreipunkt- und Schlüsselgriff (Abbildung 3.2). In der Fachliteratur werden mitunter alternative Bezeichnungen für diese Griffe verwendet, die nachfolgend jeweils in Klammern aufgeführt werden.

- Beim *Fingerspitzengriff* (Zangenriff; Spitzgriff) wird ein Gegenstand zwischen den Fingerspitzen von Daumen und Zeigefinger gehalten. Die Berührungspunkte zwischen den Fingern und dem Objekt sind minimal. „Der Fingerspitzengriff ist der feinste und präziseste. Er ermöglicht das Halten sehr kleiner Gegenstände und das Aufnehmen z.B. eines Streichholzes oder einer Nadel“ [Kap09].
- Auch beim *Pinzettengriff* (Fingerbeerengriff) wird der Gegenstand zwischen Daumen und Zeigefinger gegriffen. Allerdings bilden beim Pinzettengriff die Fingerbeeren den Kontaktpunkt zum gegriffenen Objekt, dementsprechend größer ist die Kontaktfläche.
- Der *Dreipunktgriff* (tridigitaler Griff) ähnelt dem Pinzettengriff, jedoch ist ein zusätzlicher dritter Finger involviert. Meistens handelt es sich dabei um den Mittelfinger, seltener um den Ringfinger oder den kleinen Finger. Insbesondere bei runden Objekten gewährleistet dieser Griff einen sichereren Halt als ein bidigitaler Griff. Mit Hilfe des Dreipunktgriffes können gehaltene Objekte zudem ohne Ablegen und unabhängig von Handgelenk und Unterarm gedreht und gewendet werden. Es handelt sich dabei also um einen dynamischen Griff. Eine erweiterte Form des Dreipunktgriffes ist der pentadigitale Griff, bei dem alle fünf Finger genutzt werden.
- Beim *Schlüsselgriff* (Fingerbeeren-Fingerseitengriff; lateraler Spitzgriff) kreuzt der Daumen den Zeigefinger [KMR⁺09]. Die Fingerbeere des Daumen und der seitliche Zeigefinger bilden die Kontaktflächen für diesen Griff. Der Zeigefinger bildet auf diese Weise eine Art Hebel, der das Drehen erleichtert.



Abbildung 3.2: v.l.n.r.: Fingerspitzengriff, Pinzettengriff, Dreipunktgriff, Schlüsselgriff

Die Entscheidung, in welchen Fällen eine bestimmte Griffart eingesetzt wird, trifft der Mensch maßgeblich in Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit, der Form und Größe sowie der Masse des zu greifenden Objektes. In unserem Alltag verwenden wir Kraft- und Präzisionsgriffe jedoch auch in Kombination miteinander. Beim Öffnen eines Schraubglases werden das Gefäß und der Deckel zunächst mit einem Kraftgriff festgehalten und in entgegengesetzte Richtungen gedreht. Ein festsitzender Deckel kann so einfacher gelöst werden. Sobald sich der Deckel leichter drehen lässt, wechselt die Hand am Deckel zu einem tri- oder pentadigitalen Griff, während die Hand am Gefäß den Kraftgriff beibehält. Auf diese Weise lässt sich der Deckel schnell und gerade vom Gewinde abdrehen. Obwohl es sich also um das identische Objekt handelt, werden zwei unterschiedliche Griffe angewandt. „Das Greifmuster wird demnach nicht nur durch die Form und die Größe eines Gegenstandes bestimmt, sondern auch durch die beabsichtigte Aktivität“ [Gros04].

4. Kapitel

Leap Motion Controller

Der Leap Motion Controller ist ein Peripheriegerät zur Echtzeiterfassung von Hand- und Fingerpositionen. Die Erstausslieferung des Controllers fand im Juli 2013 statt, doch schon im Vorfeld machte der Hersteller Leap Motion Inc. durch ein umfassendes Online-Marketing auf sein neuartiges Produkt aufmerksam. Wie üblich bei Innovationen aus dem Elektronikbereich, stellt sich auch beim Leap Motion Controller die Frage nach der technischen Funktionsweise. Der Hersteller hat hierzu, vermutlich aus patentrechtlichen Gründen, nur wenige Informationen veröffentlicht.

4.1. Aufbau

Die Elektronik des Leap Motion Controllers befindet sich im Inneren eines Aluminiumgehäuses mit den Maßen $80\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 11\text{ mm}$. Die Verbindung mit dem Computer wird über USB 2.0 oder USB 3.0 hergestellt. An der Vorderseite des Gerätes befindet sich eine grüne Leuchtdiode (LED). Diese leuchtet sobald das Gerät mit Strom versorgt wird. Die Oberseite des Leap Motion Controllers besteht aus einem optischen Filtermaterial, welches für Infrarotstrahlung durchlässig ist. Unter dieser Abdeckung befindet sich die eigentliche Elektronik. Sie besteht aus zwei übereinander liegenden Platinen. Auf der unteren Platine befinden sich zwei nach oben gerichtete CMOS-Kameras. Die Bausteine der oberen Platine setzen sich im Wesentlichen zusammen aus dem USB-Anschluss, einem USB 3.0 Controller Chip sowie drei Infrarot LEDs mit einer Wellenlänge von 850 nm [Col14]. Sie sind so angeordnet, dass die mittlere LED nach oben strahlt, während die beiden Äußeren ihre Infrarotstrahlung schräg zur Seite abgeben [Hor13].



Abbildung 4.1: Explosionsgrafik des Leap Motion Controllers [Col14]

4.2. Funktionsprinzip

Die verbauten elektronischen Komponenten verdeutlichen, dass der Leap Motion Controller als ein optisches Tracking-Verfahren einzuordnen ist [WBRF13]. Auch die grundlegende Funktionsweise lässt sich durch den inneren Aufbau erkennen.

Die drei eingebauten LEDs sondern für das menschliche Auge nicht sichtbare Infrarotstrahlung mit einer Wellenlänge von 850nm ab. Objekte oberhalb des Controllers reflektieren die Strahlung, sodass diese von den zwei Kameras stereoskopisch erfasst werden können. Das Prinzip der Stereoskopie ist für das Tracking mit dem Leap Motion Controller obligatorisch. Wird eine der beiden Kameras verdeckt, werden vom Controller keine Hände mehr erkannt.



Abbildung 4.2: Rohdaten des Leap Motion Controllers – Das Bildpaar besteht aus dem linken Kamerabild (links) und dem rechten Kamerabild (rechts). Die Bilder weisen einen horizontalen Versatz zueinander auf, dessen Ausprägung von der Distanz zur Kamera abhängig ist.

Die Rohdaten (Abbildung 4.2) werden im Anschluss über die USB-Schnittstelle an die Leap Motion Software transferiert. Diese analysiert jedes Bildpaar mit speziellen mathematischen Algorithmen und erzeugt so eine 3D-Repräsentation der Hände und Finger. Genaue Informationen zu den eingesetzten Algorithmen werden vom Hersteller nicht veröffentlicht.

Die bekannten Informationen lassen jedoch darauf schließen, dass durch die fixe Anordnung der beiden Kameras ein kalibriertes Stereosystem vorliegt und die dreidimensionale Rekonstruktion der Nutzerhände mit Hilfe von bildverarbeitenden Verfahren erfolgt. Die Generierung einer Tiefenkarte ist jedoch nicht Teil dieser Verfahren.

„Despite popular misconceptions, the Leap Motion Controller doesn’t generate a depth map – instead it applies advanced algorithms to the raw sensor data“ [Col14].

Über ein Transportprotokoll werden die Tracking-Daten den verschiedenen Programmibliotheken zur Verfügung gestellt. Diese wandeln die Daten in eine objektorientierte Struktur um, in der sie über die Programmierschnittstelle von den Programmierern genutzt werden können.

4.3. Technische Daten

Geräteigenschaften wie die Bildrate oder die Reaktionszeiten sind neuralgische Punkte bei Eingabegeräten, die für Echtzeitanwendungen vorgesehen sind. Eine Unzulänglichkeit in bereits einer der Eigenschaften kann dazu führen, dass die Arbeit mit dem Eingabegerät als unnatürlich empfunden wird. Ist dies der Fall, kann die Akzeptanz beim Anwender sinken. Nachfolgend soll daher ein Überblick auf die grundlegenden technischen Daten des Leap Motion Controllers gegeben werden.

4.3.1. Bildwiederholrate

Bei Ausgabegeräten wie beispielsweise einem Monitor gibt die Bildwiederholrate (Bildrate) Auskunft über die Anzahl der Einzelbilder, die pro Zeiteinheit dargestellt werden können. Auch bei Eingabegeräten ist der Begriff der Bildrate nicht unüblich. Sie sagt in diesem Zusammenhang aus, wie oft pro Zeiteinheit die aktuelle Eingabesituation erfasst und an den Computer übermittelt wird. Auch wenn die Bildraten von Ein- und Ausgabegeräten in der Regel technisch nicht aneinander gekoppelt sind, kann eine geringe Bildrate beim Eingabegerät dazu führen, dass eine Bewegung auf dem Ausgabegerät nicht flüssig und damit unnatürlich dargestellt wird. Interpolationsverfahren können den niedrigen Bildraten bei einem Eingabegerät in gewissem Maße entgegenwirken. Hierdurch erhöht sich allerdings auch die Latenz des Systems. Tracking-Systeme müssen in der Lage sein die einzelnen Bilder in einer Hohen Bildrate zu verarbeiten [RA12]. Erst Bildraten von zwanzig und mehr Bildern pro Sekunde werden vom Menschen als flüssig wahrgenommen [Mal09]. Der Leap Motion Controller lässt sich in den drei regulären Betriebsmodi High-Speed, Balanced und Precision betreiben. Diese Modi haben einen großen Einfluss auf die Bildraten des Controllers und sollen daher nachfolgend erläutert werden.

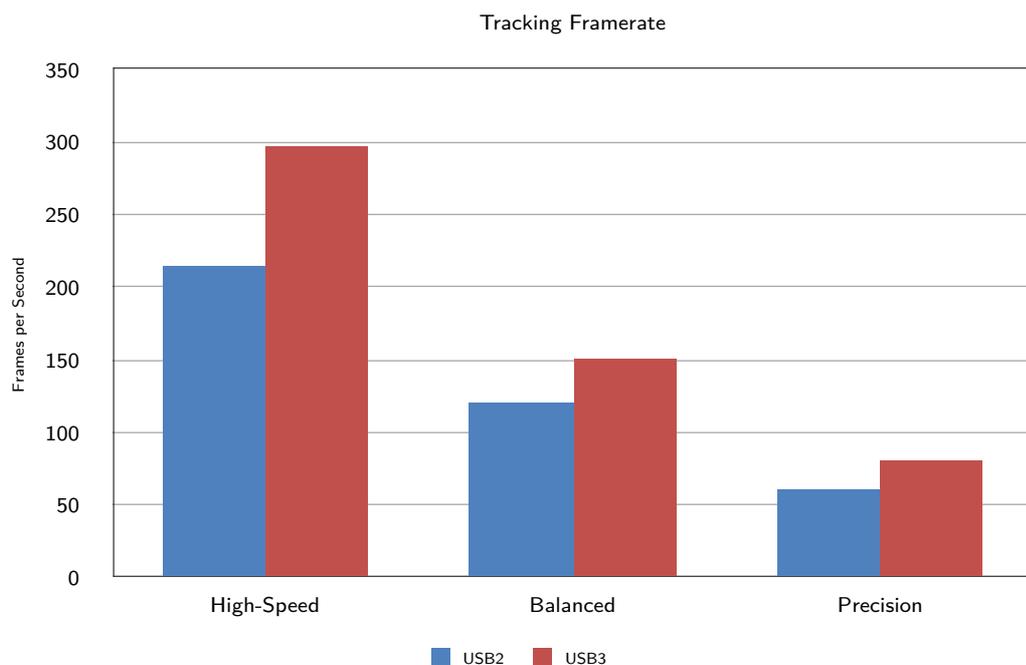


Abbildung 4.3: Vergleich der Bildraten in den unterschiedlichen Betriebsmodi [Bed13]

- Im Modus *High-Speed* liegt die Priorität auf der schnellen Erkennung von Hand-, Finger-, und Werkzeugpositionen. Maximal 214 fps werden bei einer Verbindung über USB 2.0 verarbeitet. Wird der Controller per USB 3.0 betrieben, steigt der Wert auf 295 fps [Lea13]. Dies ist insbesondere bei Computerspielen mit hohen Bildraten von Vorteil. Die hohe Geschwindigkeit wird erzielt, indem nur ein Viertel der verfügbaren Sensorauflösung genutzt wird. Es müssen folglich vier Mal weniger Daten verarbeitet werden, wodurch sich die Bildrate vervierfachen kann. Die höhere Geschwindigkeit geht jedoch zu Lasten der Genauigkeit [Lea13].
- Der Modus *Precision* arbeitet hingegen mit der vollen Auflösung beider Bildsensoren und ermöglicht eine höhere Genauigkeit als im High-Speed Modus. Die Bildraten liegen bei 60 fps (USB 2.0) und 80 fps (USB 3.0) [Lea13].
- Beim Modus *Balanced* werden Genauigkeit und Geschwindigkeit dynamisch aufeinander abgestimmt um eine ausgewogene Tracking-Leistung zu erreichen. Die Bildraten in diesem Modus liegen in einem Bereich zwischen 120 fps (USB 2.0) und 150 fps (USB 3.0) [Lea13].

Abbildung 4.3 stellt die Bildraten der regulären Modi gegenüber. Neben den regulären Betriebsmodi existieren zudem noch die zwei gesonderten Betriebsmodi Low-Resource und Robust.

- Im Modus *Low-Resource* wird die Leistung des Controllers um 62 % reduziert. Dies ist notwendig, wenn ein angeschlossenes System nicht die erforderliche Strom- oder Rechenleistung aufbringen kann [Lea13].
- Der Modus *Robust* wird hingegen automatisch aktiviert, sobald äußere Lichteinflüsse den Controller stören (siehe: Externe Lichtquellen 4.5.2). Die Bildraten sinken dann auf 100 fps (USB 2.0) und 140 fps (USB 3.0) [Lea13].

4.3.2. Latenz

Die Latenz ist in der Mensch-Maschine-Interaktion definiert als die zeitliche Verzögerung zwischen der eigentlichen Nutzereingabe und der zugehörigen Reaktion auf dem Ausgabemedium. Eine alternative Bezeichnung für die Latenz ist daher die Reaktionszeit. Latenzzeiten von mehr als 200 ms werden vom Menschen allgemein als unnatürlich empfunden [Mal09]. Unterschiede ergeben sich beispielsweise durch die Verwendung voneinander abweichender Computerhardware. Ein leistungsstarker Grafikprozessor verursacht im Allgemeinen eine geringere Latenz als ein Grafikprozessor mit niedriger Leistung. Aber auch die Peripheriegeräte und die Softwareimplementierung können die Latenz beeinflussen. In einem Test von Bedikian [Bed13] ergaben sich Latenzzeiten für den Leap Motion Controller, die folgender Darstellung entnommen werden können.

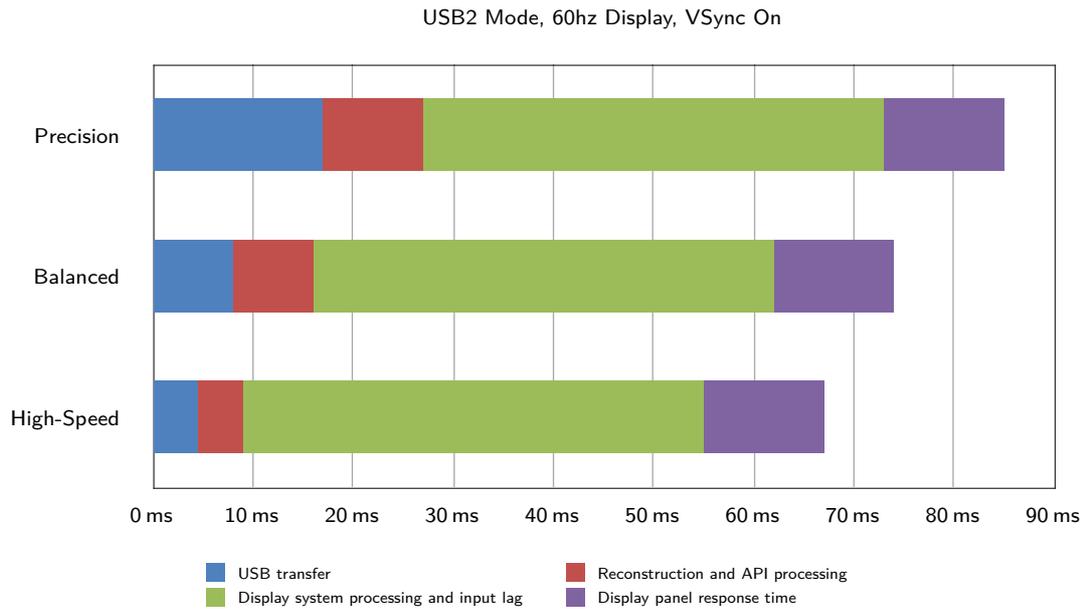


Abbildung 4.4: Vergleich der Latenzzeiten in den unterschiedlichen Betriebsmodi [Bed13]

Die Grafik veranschaulicht die abweichenden Latenzzeiten in den einzelnen Betriebsmodi. Deutlich erkennbar ist die vierfache Dauer für den USB-Transfer im Modus *Precision*. Doch auch die Dauer für die Verarbeitung der Rohdaten steigt im Vergleich zum Modus *High-Speed* stark an. Unbeeinflusst vom gewählten Betriebsmodus bleiben hingegen die Dauer für die Grafikverarbeitung sowie die Reaktionszeit des Monitors. Die ermittelten Zeiten sind jedoch nur für das verwendete Testsystem gültig. Bereits ein anderer USB-Controller kann die Werte signifikant verändern [Bed13].

4.3.3. Physikalischer Interaktionsraum

Die zwei nach oben gerichteten CMOS-Kameras erfassen die Hände des Nutzers in einem Interaktionsraum, der der groben Form einer Hemisphäre entspricht. Dieser Interaktionsraum besitzt ein Volumen von 8 Kubikfuß [Lea13a], was umgerechnet in das metrische System etwa 226 dm^3 entspricht. Er umfasst von den Seiten des Controllers einen Winkel von 150° und von vorne nach hinten einen Winkel von 120° (Abbildung 4.5). Etwa 60 cm Bewegungsfreiheit stehen somit auf jeder Achse zur Verfügung. In Nähe der Randbereiche des Interaktionsraums nimmt die Bewegungsfreiheit jedoch merklich ab. Insbesondere am oberen Grenzbereich sind bereits kleine Bewegungen ausreichend, um den Interaktionsraum zu verlassen.

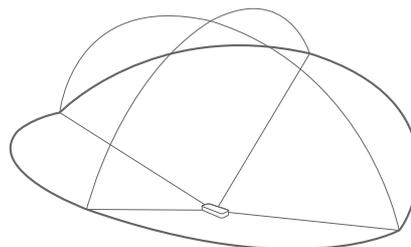


Abbildung 4.5: Interaktionsraum des Leap Motion Controllers [Lea13a]

Die Form des physikalischen Interaktionsraums entspricht häufig nicht der Form des gewünschten virtuellen Interaktionsraums. Hier sind in der Regel quaderförmige Volumen notwendig. Dies ist bereits dadurch bedingt, dass Ausgabegeräte wie Monitore ein rechteckiges Sichtfenster in den virtuellen Raum bilden. Der physikalische Interaktionsraum lässt sich aus diesem Grund künstlich auf ein quaderförmiges Interaktionsvolumen begrenzen (siehe: `InteractionBox` 4.4.6).

4.4. LeapSDK

Das Bindeglied zwischen dem Leap Motion Controller und dem Programmierer ist das LeapSDK¹. Es enthält, neben einer Dokumentation und Beispielanwendungen auch die Programmbibliotheken für verschiedene Programmiersprachen. Offiziell unterstützt werden die Programmiersprachen C++, C# (C-Sharp), Objective-C, Java, JavaScript und Python. Darüber hinaus existieren sogenannte *Community Libraries*², welche die Unterstützung weiterer Programmiersprachen ermöglichen. Softwareentwickler können beim Entwickeln eigener Anwendungen auf eine umfangreiche Programmierschnittstelle zugreifen. Sie wird als *Tracking-API* bezeichnet und beinhaltet neben den Methoden zum Auslesen der Hand- und Fingerpositionen auch mathematische Hilfsfunktionen zur Berechnung von Matrizen und Vektoren. Nachfolgend sollen einige wichtige Klassen dieser Tracking-API erläutert werden.

4.4.1. Hand

Die vom Controller erfassten Hände werden in der Programmierschnittstelle durch die Klasse `Hand` abgebildet. Sie ermöglicht unter anderem das Auslesen von Translation und Rotation einer Hand. Jedes Objekt vom Typ `Hand` besitzt einen Normalenvektor und einen Richtungsvektor. Der Normalenvektor steht orthogonal zur Ebene der Handfläche und zeigt von dieser weg, während der Richtungsvektor in Richtung der Finger zeigt [Lea14]. Beide Vektoren treffen sich im lokalen Ursprung der Hand (Abbildung 4.6), welcher sich ebenfalls auf der Ebene der Handfläche befindet. Einem Objekt vom Typ `Hand` werden bis zu fünf Objekte der Klasse `Pointable` zugeordnet.

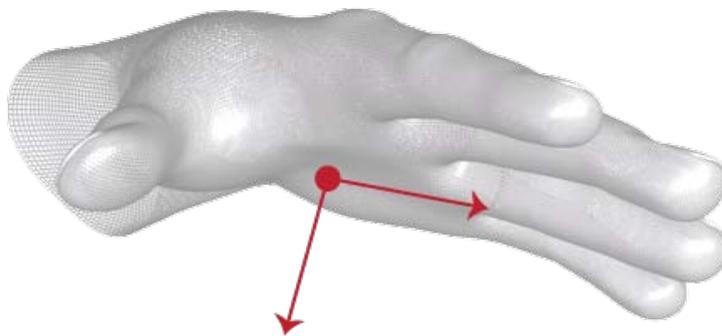


Abbildung 4.6: Normalenvektor, Richtungsvektor und lokaler Ursprung [Lea14]

¹ Software Development Kit (kurz: SDK, englisch für Software-Entwicklungs-Baukasten)

² Quelle: <https://developer.leapmotion.com/libraries> (Abruf: 18.10.2014)

4.4.2. Pointable, Finger und Tool

Mit dem Leap Motion Controller können sowohl Finger als auch Werkzeuge wie Stifte oder Pinsel erkannt werden. Ein Werkzeug unterscheidet sich von einem Finger dadurch, dass es dünner, gerader und länger als ein gewöhnlicher Finger ist [Lea14]. Finger und Werkzeuge werden in der Programmierschnittstelle durch die Klassen `Finger` und `Tool` abgebildet. Diese sind jeweils Ableitungen der Klasse `Pointable`.

Mit Hilfe der Klasse `Pointable` können Position und Geschwindigkeit der Finger- oder Werkzeugspitze ermittelt werden. Darüber hinaus lässt sich ein Richtungsvektor auslesen, der vom Ursprung der Hand über die Finger- oder die Werkzeugspitze verläuft. Jedes Objekt der Klasse `Pointable` ist exakt einem Objekt der Klasse `Hand` zugeordnet.

4.4.3. Bone

Mit Veröffentlichung der V2 Tracking Beta Version im Mai 2014 wurde erstmals die Klasse `Bone` eingeführt. Sie dient der Unterteilung der Finger in die jeweiligen Knochen. Jeweils vier `Bone`-Objekte bilden den Mittelhandknochen (Abbildung 4.7, gelb) sowie das erste bis dritte Fingerglied (Abbildung 4.7, grün, blau rot) der virtuellen Hand. Der Daumen einer menschlichen Hand besteht jedoch nur aus zwei Fingergliedern. Aus programmiertechnischen Gründen entschied sich Leap Motion dafür, dem Daumen die gleiche Anzahl an Fingergliedern zu geben, wie den restlichen Fingern. Hierdurch gestaltet sich zum Beispiel die Iteration über alle `Bone`-Objekte einer Hand deutlich einfacher. Damit die Bewegungen aber dennoch korrekt auf den virtuellen Daumen übertragen werden, wird dem Mittelhandknochen des Daumens stets eine Länge von 0mm zugewiesen (Abbildung 4.7).

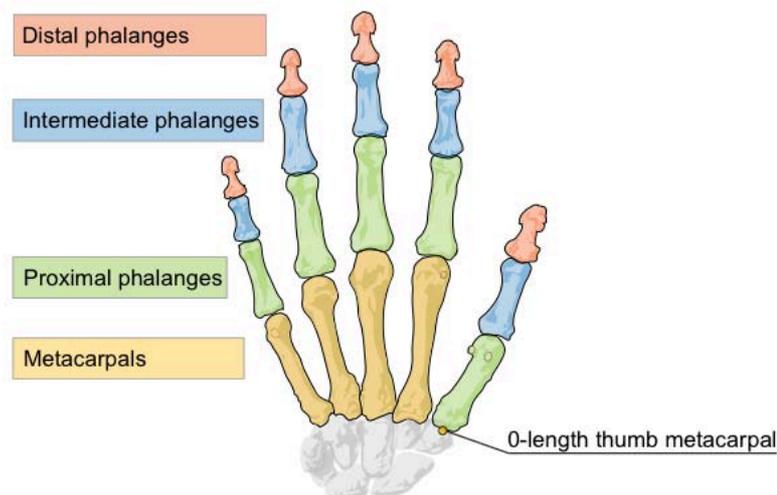


Abbildung 4.7: Handmodell der Leap Motion Skeletal API [Lea14]

Durch die Unterteilung der Finger in die einzelnen Knochen wird eine realistischere Darstellung der Nutzerhände gewährleistet. Das virtuelle Skelett sorgt zudem dafür, dass die Hand stets vollständig dargestellt wird, auch wenn einzelne Finger des Nutzers nicht korrekt erkannt werden.

Ein Objekt der Klasse `Bone` enthält alle Informationen, die dazu notwendig sind, ein Fingerglied korrekt im virtuellen Raum darzustellen. Hierzu lassen sich beispielsweise der Richtungsvektor, die Positionen der angrenzenden Gelenke und der Mittelpunkt des Knochens auslesen. Überdies lässt sich die reale Breite eines Fingerglieds einschließlich der Hautschicht aus dem `Bone`-Objekt auslesen.

4.4.4. Datenformat

Wie bereits beschrieben, liegt die virtuelle Repräsentation der Nutzerhände in einer objektorientierten Datenstruktur vor. Die in dieser Struktur enthaltenen Informationen wie Längenangaben, Positionen oder räumliche Orientierung einzelner Glieder, werden in einem allgemeinen Datenformat vorgehalten und können mit Hilfe entsprechender Objektmethoden ausgelesen werden. Alle Längen sind grundsätzlich als Millimeterangabe zu interpretieren. Aus programmertechnischer Sicht verwendet die Leap Motion API hierfür einen Datentyp für Gleitkommazahlen der verwendeten Programmiersprache. Angaben zur Position und Orientierung werden als Orts- und Richtungsvektoren ausgegeben. Als Datentyp werden hierbei dreidimensionale Vektoren verwendet. Aus den Richtungsvektoren lassen sich mit Hilfe der Methoden `pitch()`, `yaw()` und `roll()` auch die Drehwinkel zur Horizontalebene (zx -Ebene) ermitteln.

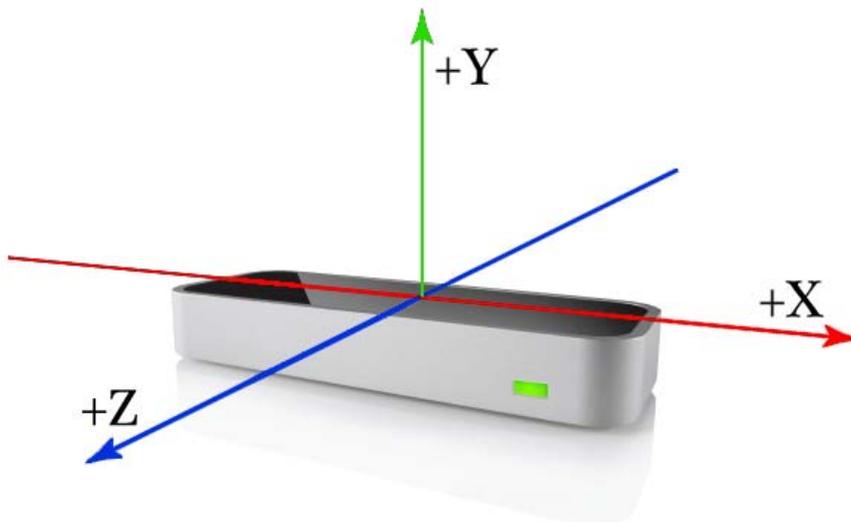


Abbildung 4.8: Ursprungspunkt des Leap Motion Controllers [Lea14]

Alle Positionswerte werden relativ zum Ursprungspunkt des Leap Motion Controllers berechnet. Dieser befindet sich mittig auf der Oberseite des Geräts (Abbildung 4.8) und kann beliebig in der virtuellen Szene platziert werden. Bei der Berechnung der Werte legt die Leap Motion API ein rechtshändiges Koordinatensystem zu Grunde [Lea14]. Dies bedeutet beispielsweise, dass sich ein vom Controller errechneter Punkt $P_1(0; 0; 100)$ 20 cm weiter vom Bildschirm entfernt befindet als ein Punkt $P_2(0; 0; -100)$. Die positiven z -Werte liegen folglich zwischen dem Benutzer und dem Controller, die negativen z -Werte liegen dagegen zwischen dem Controller und dem Bildschirm.

4.4.5. Gesture

Das Leap Motion SDK unterstützt die Erkennung von vier verschiedenen Gesten (Stand v.2.2.4).

- CircleGesture (Kreis Geste)
- SwipeGesture (Wischgeste)
- KeyTapGesture (Tippen in xz-Ebene)
- ScreenTapGesture (Tippen in xy-Ebene)

Für jede dieser Gesten überprüft die Leap Motion Software die Handbewegung des Nutzers hinsichtlich eines bestimmten Bewegungsmusters. Über die Klasse `Gesture`, erhalten die Entwickler Zugriff auf die erkannten Gesten. Jede Geste, die erkannt werden soll, muss zuvor explizit aktiviert werden. Die Leap Motion API unterscheidet zwischen diskreten und kontinuierlichen Gesten. `KeyTapGesture` und `ScreenTapGesture` zählen zu den diskreten Gesten, da sie jeweils genau ein Ereignis auslösen. Diskrete Gesten können die Zustände `start` und `stop` annehmen. Ein zugehöriges Ereignis wird nach Beendigung der Geste ausgelöst. `CircleGesture` und `SwipeGesture` zählen dagegen zu den kontinuierlichen Gesten, da sie neben den Zuständen `start` und `stop` den Zustand `update` annehmen [Lea14]. In diesem Zustand werden kontinuierlich Ereignisse ausgelöst, bis die Geste schließlich beendet wird.

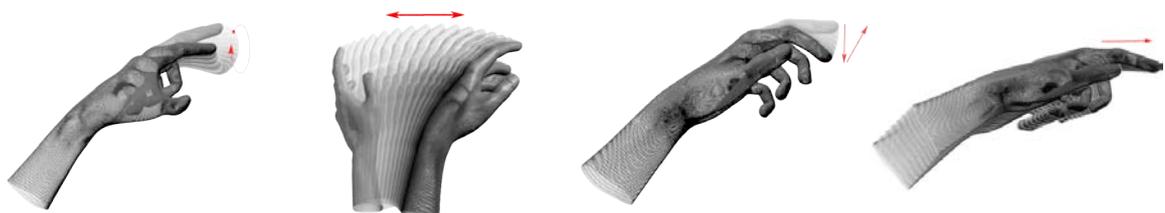


Abbildung 4.9: Illustration der Leap Motion Gesten - v.l.n.r CircleGesture, SwipeGesture, KeyTapGesture, ScreenTapGesture [Lea14]

Im Großen und Ganzen ist die Gestenerkennung innerhalb des Leap Motion SDK nur sehr rudimentär umgesetzt. Es können lediglich vier Standardgesten erkannt werden, die allesamt auf der Bewegung des Zeigefingers basieren. Eine Möglichkeit zur Erkennung von statischen Handposen fehlt gänzlich. Auch eine programmiertechnische Erweiterung des Gestensystems durch benutzerdefinierte Gesten ist zumindest bis zum angegebenen Versionsstand nicht vorgesehen. Programmierer sehen sich daher gezwungen eigene Methoden zur Gestenerkennung zu entwickeln.

4.4.6. InteractionBox

Wie eingangs erwähnt, besitzt der Interaktionsraum des Leap Motion Controllers ein hemisphärenähnliches Volumen. Bildschirme hingegen haben im Allgemeinen eine rechteckige Form. Dieser Umstand führt zu Problemen, wenn Koordinaten des Leap Motion Controllers auf das Koordinatensystem des Bildschirms übertragen werden sollen. Eine mögliche Folge hiervon ist, dass die unteren Ecken des Bildschirms nicht erreicht werden können.

Abhilfe schafft hier die Klasse `InteractionBox`. Mit ihr lässt sich der Interaktionsraum künstlich auf ein quaderförmiges Volumen reduzieren (Abbildung 4.10). Optional ist eine Ausgabe von normalisierten Koordinaten möglich. Statt in absoluten Werten erfolgt die Rückgabe der Positionen dann mit relativen Werten im Bereich zwischen 0.0 und 1.0. Die beiden Extrema 0.0 und 1.0 stellen hierbei die äußeren Punkte des quaderförmigen Interaktionsraums auf einer der Achsen da.

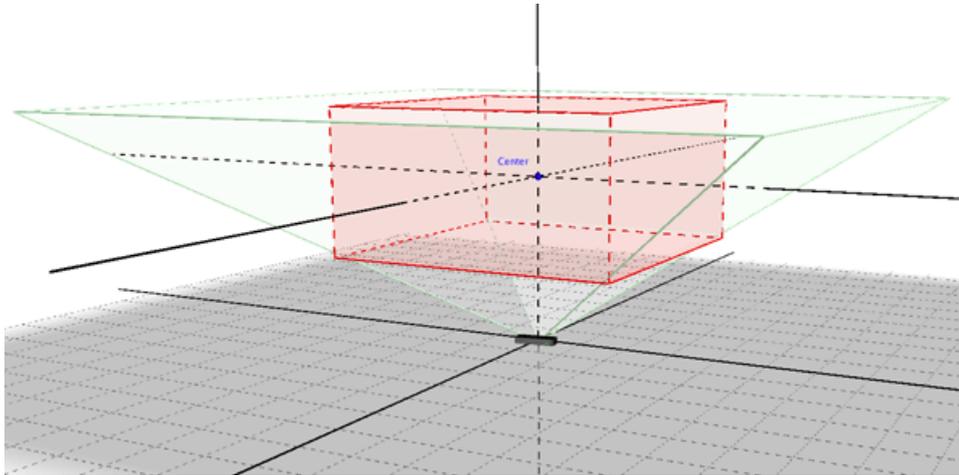


Abbildung 4.10: Quaderförmiger Interaktionsraum durch `LeapInteraktionBox` [Lea14]

4.4.7. Config

Globale Konfigurationen können mit der Klasse `Config` ausgelesen oder verändert werden. Jede Anwendung, die ein Objekt der Klasse `LeapController` instanziiert und damit eine Resource des Leap Motion Controllers belegt, hat die Möglichkeit, ihre eigene Konfiguration zu definieren. Von großer Bedeutung sind hierbei die Feineinstellungen der Gesten. Für die unterschiedlichen Gestentypen können spezifische Schwellenwerte gesetzt werden. Diese definieren wann eine Geste als solche erkannt wird [Leap14]. Das Ändern von Konfigurationswerten während der Laufzeit ist möglich.

4.4.8. Klassendiagramm der Tracking API

Das Zusammenwirken der oben beschriebenen Klassen und ihre hierarchische Struktur lassen sich durch ein Klassendiagramm veranschaulichen (Abbildung 4.11). An der Spitze der Hierarchie steht die Klasse `Frame`. Wie der Name bereits vermuten lässt, repräsentiert diese Klasse einen vom Controller erfassten Frame. Ihr untergeordnet sind dann alle weiteren Klassen, die sämtliche Informationen der Hände, Finger, Knochen, Werkzeuge und Gesten enthalten.

Assoziationen zwischen den verschiedenen Klassen werden mit den Assoziationsklasse `HandList`, `FingerList`, `PointableList`, `ToolList` und `GestureList` abgebildet. Bei den Klassen `FingerList`, `PointableList` und `ToolList` bestimmt der Kontext zur Laufzeit, welche Referenzen enthalten sind. So enthält beispielsweise das dem `Frame` zugeordnete `FingerList`-Objekt die Referenzen auf alle Finger, während das dem `Hand`-Objekt zugeordnete `FingerList`-Objekt lediglich Referenzen auf die Finger der jeweiligen Hand enthält.

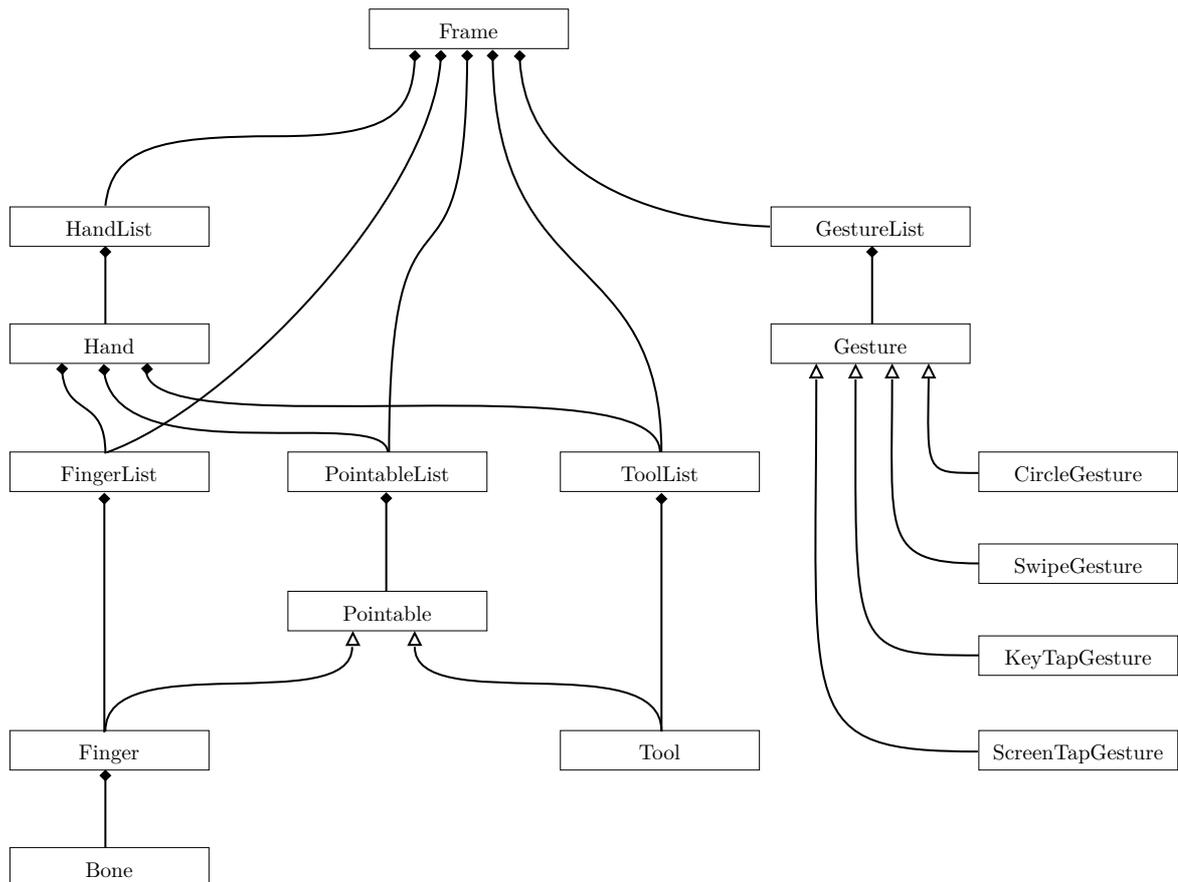


Abbildung 4.11: Klassendiagramm der Tracking-API [Lea14b]

4.4.9. Zusammenfassung LeapSDK

Das LeapSDK ist die Schnittstelle zwischen dem Programmierer und der Leap Motion Hardware. Es stellt die vom Controller erfassten Tracking-Daten in einer objektorientierten hierarchischen Datenstruktur zur Verfügung. Mit Hilfe dieser Daten kann ein vollständiges virtuelles Abbild der Nutzerhände erzeugt werden. Je nach Bedarf und Komplexität der Anwendung, können den Tracking-Daten aber auch nur die wirklich benötigten Informationen entnommen werden. Für die Steuerung eines Mauszeigers würde es zum Beispiel ausreichen, die Fingerspitzenposition des rechten Zeigefingers auszulesen. In welchem Umfang die vom Leap Motion Controller gelieferten Informationen genutzt werden, obliegt also letztlich dem Programmierer.

4.5. Funktionsbedingte Begrenzungen und Einschränkungen

Praktisch jedes technische Gerät weist, bedingt durch die Bauart und/oder das Funktionsprinzip, einige Begrenzungen oder Einschränkungen auf. Vor der Benutzung eines Geräts ist es sinnvoll, sich der funktionellen Grenzbereiche bewusst zu sein. Dies mindert das Potential unerwarteter Fehlfunktionen. Nachfolgend wird eine Übersicht über die grundlegenden Grenzen des Leap Motion Controllers gegeben.

4.5.1. Interaktionsraum

Das Interaktionsvolumen des Leap Motion Controllers beträgt in etwa 226 dm³. Auf jeder der drei Koordinatenachsen stehen maximal 60 cm Bewegungsspielraum zur Verfügung. Alle Bewegungen, die vom Sensor erfasst werden sollen, müssen innerhalb dieses Interaktionsraums stattfinden. Jenseits dieser Begrenzungen ist keine Erkennung von Hand- oder Fingerbewegungen möglich. Für das vorgesehene Einsatzgebiet, also das Tracking von Händen und Fingern bei dem sich die Position des Anwenders nicht verändert, ist der Interaktionsraum ausreichend groß bemessen. Auch für die vorgesehene Platzierung auf der Schreibtischebene zwischen Nutzer und dem Computerbildschirm sind die Begrenzungen des Interaktionsraums vor, hinter und seitlich des Controllers gut gewählt.

4.5.2. Externe Lichtquellen

Äußere Lichteinflüsse können die Leistung des Leap Motion Controllers mindern. Der optische Filter auf der Oberseite des Gehäuses verhindert, dass sichtbares Licht auf die Bildsensoren der zwei Kameras trifft. Lichtquellen mit einem hohen Anteil an Infrarotstrahlung können jedoch die Erkennungsleistung reduzieren. Hierzu zählen neben direktem Sonnenlicht auch Infrarot-Fernbedienungen und Glühlampen wie beispielsweise Halogenstrahler (Abbildung 4.12, links). Störende externe Lichtquellen werden von der Software automatisch registriert und durch das Umschalten in den Modus *Robust* (siehe: Bildwiederholrate 4.3.1) kompensiert. Da dies mit einer Reduzierung der Bildrate einhergeht, sollten entsprechende Lichtquellen vom Leap Motion Controller ferngehalten oder ausgeschaltet werden. Lichtquellen ohne Infrarotanteil stören den Controller hingegen nicht (Abbildung 4.12, rechts).

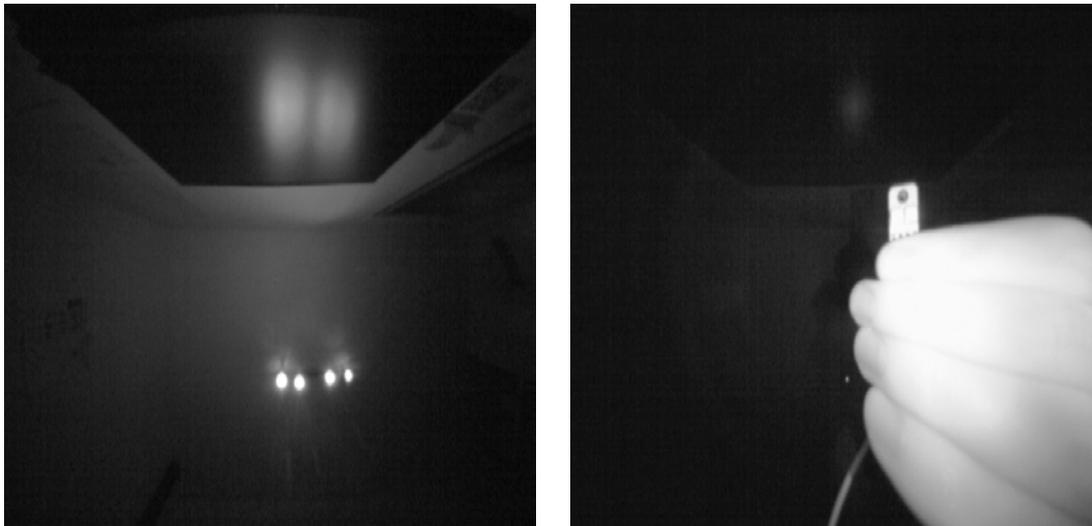


Abbildung 4.12: Störeinfluss durch Glühlampen – Infrarotstrahlung aus den Halogenstrahlern der Deckenbeleuchtung wird vom Controller erfasst und verursacht Störungen (links); weißes LED-Licht ohne störenden Infrarotanteil im Farbspektrum (rechts).

4.5.3. Selbstverdeckung

Der Leap Motion Controller fällt durch seine technische Funktionsweise in die Kategorie der optischen Tracking-Verfahren. Ein grundsätzliches Problem beim optischen Tracking besteht in der teilweisen oder vollständigen Verdeckung des zu erfassenden Körperteils [RA12]. Beim optischen Motion Capture¹ für Computerspiele und Filme erfassen deshalb mehrere Kameras die Markierungspunkte aus unterschiedlichen Blickwinkeln. Hierdurch entsteht eine Redundanz an Bilddaten. Verliert eine der Kameras einen bestimmten Markierungspunkt, wird dieser im Idealfall von den benachbarten Kameras weiterhin aufgenommen. Wird ein Markierungspunkt allerdings so verdeckt, dass ihn keine der Kameras noch erfasst, muss er durch das sogenannte *Cleaning* manuell rekonstruiert werden. Im Anwendungsbereich von Echtzeitanwendungen ist dies jedoch nicht möglich.

Beim Leap Motion Controller kommen zwei Kameras zum Einsatz. Sie sind obligatorisch für die Stereoskopie und dienen nicht dem Zweck der Redundanz. Die beiden Kameras sind auf einer annähernd gleichen räumlichen Ebene angeordnet und erfassen den Raum oberhalb des Leap Motion Controllers. Probleme entstehen, sobald zwei Hände übereinander auf der y-Achse angeordnet sind. Die Kameras können dann die obere Hand nicht korrekt erfassen, da sie von der unteren Hand verdeckt wird. Das gleiche Problem verhindert die genaue Fingererkennung, sobald eine Hand so rotiert wird, dass die Finger übereinander auf der y-Achse angeordnet sind. Je nachdem welche Tracking-API verwendet wird, hat dies unterschiedliche Auswirkungen auf das erzeugte Handmodell. Die V1 Tracking-API lässt es zu, dass für den Controller nicht sichtbare Finger im virtuellen Handmodell fehlen.

Das Handmodell der V2 Tracking-API besteht dagegen immer aus fünf Fingern. Die Positionsdaten von verdeckten Fingern werden bis zu einem bestimmten Grad auf der Basis des virtuellen Skeletts errechnet. Die V2 Tracking-API entgegnet dem Problem der Selbstverdeckung zudem mit dem sogenannten *Hand Confidence Level* (dt. Sicherheitswahrscheinlichkeit der Hand). Dieser Wert im Bereich von 0.0 bis 1.0 gibt Aufschluss über die Verlässlichkeit der vom Controller gelieferten Daten. Nähert sich eine Hand dem Rand des Interaktionsraums oder wird sie teilweise von der anderen Hand verdeckt, so sinkt der *Hand Confidence Level* bis zu einem Wert von 0.0. Anwendungen können damit so gestaltet werden, dass sie auf unzuverlässige Positionsdaten reagieren, indem sie den Nutzer beispielsweise darauf hinweisen, dass er sich zu nah am Rand des Interaktionsraums befindet.

Bei der Problematik der Selbstverdeckung handelt sich um eine durch das optische Erkennungsverfahren bedingte Einschränkung. Eine Verbesserung könnte durch eine redundante Erfassung des Interaktionsraums durch mehrere Leap Motion Controller erreicht werden. Die V2 Tracking-API sieht eine solche Funktion jedoch nicht vor. Mit dem derzeitigen Stand der Technik lassen sich daher nicht alle Gesten oder Handposen, die im realen Leben möglich sind, mit dem Leap Motion Controller erfassen. Dies gilt es bei der Anwendungsentwicklung zu beachten.

¹ Motion Capture (englisch für Bewegungs-Erfassung)

4.5.4. Taktile Rückmeldungen

Im Unterschied zu konventionellen Eingabemethoden wie der Maus oder der Tastatur erfordert die Nutzung des Leap Motion Controllers keinen physischen Kontakt zum Eingabegerät. Diese Eigenschaft macht den Leap Motion Controller besonders interessant für den Einsatz an sterilen Arbeitsplätzen wie Laboren oder Operationssälen. Aber auch in anderen Arbeitsumfeldern wie Küchen oder Werkstätten können die Nutzer von einer berührungslosen Bedienung des Computers profitieren.

„Ein Eingabegerät muss eine angemessene Rückmeldung vermitteln“ [ISO9241-410].

Die berührungslose Eingabe hat jedoch einen entscheidenden Nachteil, denn der Nutzer erhält keine taktilen Rückmeldungen von der Hardware. Hierbei handelt es sich um Rückmeldungen, die dem Nutzer zum Beispiel das erfolgreiche Betätigen einer Taste signalisieren. Die Taste einer Computermaus gibt bei einer bestimmten Krafteinwirkung des Fingers nach und schließt zeitgleich den Stromkreis der letztlich den Mausklick auslöst. Die Taste befindet sich zu diesem Zeitpunkt am Anschlag und kann nicht tiefer gedrückt werden. Das Nachgeben der Taste und der anschließende Widerstand werden über die Tasterezeptoren an der Fingerkuppe sowie den kinästhetischen Rezeptoren im Finger wahrgenommen.

Warum aber stellt das Fehlen dieser Rückmeldungen so ein großes Problem dar? Der Mensch ist durch seinen Alltag daran gewöhnt, taktile Rückmeldungen von den Gegenständen zu erhalten, mit denen er physisch interagiert. Diese Informationen werden genutzt, um etwa zu beurteilen mit welcher Kraft ein Gegenstand gegriffen werden muss, damit er nicht aus der Hand rutscht. Dieses Prinzip nennt sich Sensomotorik. Um beispielsweise einen Tischtennisball zwischen Daumen und Zeigefinger zu halten, ist eine minimale Kraft notwendig, damit dieser nicht auf den Boden fällt. Gleichzeitig darf aber eine maximale Kraft nicht überschritten werden, da sich der Tischtennisball ansonsten plastisch verformt. Der Betrag der ausgeübten Kraft muss also innerhalb eines bestimmten Bereichs liegen. Würden nun die Informationen aus den taktilen Rückmeldungen fehlen, gäbe es keinen Hinweis auf die ausgeübte Kraft. Folglich könnte nicht gewährleistet werden, dass der Tischtennisball sicher und zugleich zerstörungsfrei gehalten wird (vgl. [Rob06], S. 26).

Bei der Nutzung des Leap Motion Controllers greifen die Finger buchstäblich ins Leere. Während der Interaktion existiert kein reales Objekt, welches den Kräften der Finger entgegenwirkt. Folglich können sich die Finger des Nutzers über die geometrischen Begrenzungen eines virtuellen Gegenstandes hinaus bewegen, was unter möglicherweise als störend oder unnatürlich empfunden wird.

„Einige Eingabegeräte wie Gestik sensitive Kameras bieten keine Rückmeldung außer der durch das System. Somit ist die Angemessenheit der Rückmeldung in hohem Maße abhängig von der Software“ [ISO9241-410].

Da der Leap Motion Controller von sich aus keine taktilen Rückmeldungen vermittelt, können Nutzeraktionen nur über alternative Kanäle, beispielsweise visuell oder akustisch, bestätigt werden. So könnte ein virtuelles Objekt beim Greifen farblich hervorgehoben werden.

4.5.5. Ergonomie

Ein wichtiger Aspekt der Mensch-Maschine-Interaktion ist die Ergonomie der Hardware. „Die Gestaltung des physikalischen Eingabegerätes muss die biomechanische Belastung des Benutzers minimieren“ [ISO9241-410]. Gleichzeitig muss es „bei der vorgesehenen Nutzung ohne übermäßige Abweichung von der neutralen Körperhaltung bedienbar sein“ [ISO9241-410]. Beide Anforderungen werden vom Leap Motion Controller im Wesentlichen erfüllt. Die Hardware sollte jedoch auch so konzipiert sein, dass längeres Arbeiten ermüdungsfrei möglich ist. „Ein Eingabegerät, das für eine effiziente Nutzung gestaltet worden ist, muss bei der vorgesehenen Nutzung ohne übermäßige Anstrengung bedienbar sein“ [ISO9241-410]. Das Bedienungskonzept des Leap Motion Controllers sieht jedoch vor, dass der Nutzer seine Hände frei vor sich hält. Diese Körperhaltung begünstigt Ermüdungserscheinungen in den Oberarmen und im Schulterbereich. Zwar können die Hände jederzeit aus dem Interaktionsraum genommen und abgelegt werden, jedoch findet dann keine Dateneingabe statt. Bei einer Tastatur oder Computermaus hingegen können die Handballen während der Benutzung auf der Arbeitsfläche ruhen, wodurch die Arm- und Schulterpartien nur marginal belastet werden.

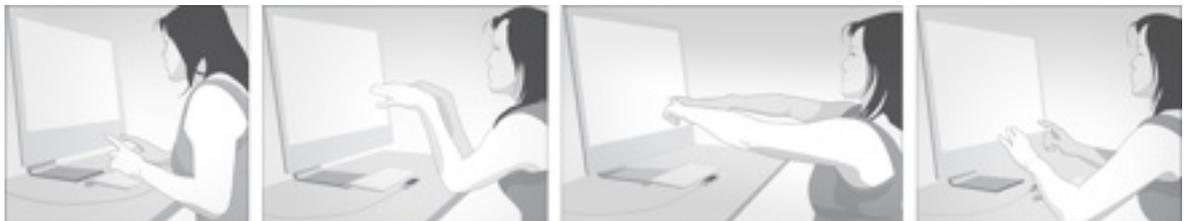


Abbildung 4.13: Zu vermeidende Haltung der Arme [Edw14]

Der Hersteller gibt den Nutzern einige Ratschläge zur ergonomischen Bedienung des Leap Motion Controllers. Die Nutzer werden darauf hingewiesen, sich nicht mit dem Oberkörper über das Gerät zu beugen. Neben einer falschen Körperhaltung soll so verhindert werden, dass andere Körperteile als die Hände in den Sichtbereich des Controllers ragen (Abbildung 4.13, links). Dies könnte unter Umständen zu Problemen bei der Erkennung der Hände führen.

Befinden sich beide Arme sehr nah beieinander, sollten die Ellenbogen und Handgelenke nicht zusammengeführt werden (Abbildung 4.13, Mitte-links). Das Ausstrecken der Arme (Abbildung 4.13, Mitte-rechts), sowie das seitliche Auflegen der Ellenbogen (Abbildung 4.13, rechts) sollte ebenfalls vermieden werden [Edw14].

Stattdessen wird dem Nutzer empfohlen, den Controller so zu platzieren, dass eine komfortable Nutzung möglich ist. Findet die Bedienung im Stehen oder in einer erhöhten Sitzposition statt, so sollten die Ellenbogen nah am Körper und die Unterarme parallel zum Boden gehalten werden (Abbildung 4.14, links). Bei einer gewöhnlichen Sitzhöhe dürfen die Ellenbogen und Unterarme abgelegt werden, jedoch sollte es vermieden werden dies an der Tischkante zu tun. Die Hände sollten genau über das Gerät gehalten werden. Handgelenk und Hände sollten dabei nach Möglichkeit eine gerade Linie bilden (Abbildung 4.14, rechts). [Edw14]



Abbildung 4.14: Empfohlene Haltung der Arme [Edw14]

Die Hinweise zur ergonomischen Bedienung sind mitunter sinnvoll, um einer fehlerhaften Haltung des Körpers und der Arme vorzubeugen. Eine ermüdungsarme Bedienung des Controllers wird durch sie jedoch nicht ermöglicht.

Die genannte Schwäche im Bereich der Ergonomie ist keinesfalls eine spezifische Eigenheit des Leap Motion Controllers. Vielmehr geht sie einher mit dem Konzept der Hand- und Fingererkennung. Die Hände müssen frei im Raum gehalten werden, sofern Translationen und Rotationen in allen sechs Freiheitsgraden registriert werden sollen.

5. Kapitel

Entwicklung der Versuchsumgebung

5.1. Vorüberlegungen

Wie im einleitenden Kapitel erläutert wurde, besteht das Ziel dieser Arbeit in der Untersuchung des Leap Motion Controllers in Bezug auf dessen Leistung bei Präzisionsgriffen. Eine Untersuchung mit Probanden soll zeigen, wie gut sich reale Präzisionsgriffe mit Hilfe des Leap Motion Controllers in einer virtuellen Umgebung reproduzieren lassen. Um eine Bewertung des Geräts zu ermöglichen, sollen zunächst Kriterien definiert werden, mit denen sich die Qualität der Präzisionsgriffe messen lässt. Es müssen zudem Referenzwerte generiert werden, anhand derer sich die Leistung des Leap Motion Controllers vergleichen lässt.

Reale Präzisionsgriffe sollen die Grundlage für die Generierung von Referenzwerten bilden. Für die praktische Durchführung der Untersuchungen muss daher eine entsprechende Versuchsumgebung geschaffen werden. In dieser Versuchsumgebung sollen die Probanden Testszenarien bearbeiten, bei denen sie sowohl virtuelle als auch reale Präzisionsgriffe durchführen, die dann anhand von objektiven Qualitätskriterien bewertet werden können.

Neben den objektiven Qualitätskriterien soll aber auch ein subjektives Meinungsbild der Probanden eingeholt werden. Dies ist erforderlich, da beispielsweise die in Abschnitt 4.5.5 beschriebenen ergonomischen Defizite des Leap Motion Controllers nicht zwangsläufig von allen Personen im gleichen Ausmaß wahrgenommen werden. Die subjektive Bewertung erfolgt in Form eines Fragebogens, der von den Probanden nach Abschluss der Untersuchungen auszufüllen ist.

Im Verlauf der praktischen Untersuchungen sollen die Nutzerleistungen für den Pinzettengriff, den Dreipunktgriff sowie den Schlüsselgriff gemessen werden. Da der Fingerspitzengriff dem Pinzettengriff sehr ähnlich ist, wird dieser nicht gesondert untersucht. Das Gleiche gilt für den pentadigitalen Griff, der von seiner Ausführung dem Dreipunktgriff ähnelt.

Eine Prämisse für die Probandentests lautet, dass alle Testpersonen naiv an die Untersuchung herantreten. Dies bedeutet zum einen, dass die Testpersonen keine Vorkenntnisse im Umgang mit dem Leap Motion Controller haben sollen und zum anderen, dass die Testpersonen während der Untersuchung keine Trainingsphase durchlaufen. Stattdessen wird jedes Testszenario von den Probanden dreimal wiederholt. Durch eine vergleichende Betrachtung der Messwerte bei den Versuchen eines einzelnen Testszenarios lassen sich auf diese Weise mögliche Lerneffekte erkennen. Die nach-

folgenden Abschnitte beschreiben die für die Untersuchung notwendigen Qualitätskriterien und die Ausarbeitung von konkreten Interaktionsszenarien und -zielen. Darüber hinaus widmet sich dieses Kapitel der Umsetzung der Versuchsanordnung für die Probandentests.

5.2. Definition von Qualitätskriterien

Die Deutsche Industrie Norm 9241-9 definiert einige Leitsätze, die für die Beurteilung der Qualität von Eingabegeräten, mit der Ausnahme von Tastaturen¹, herangezogen werden können. So äußert sich etwa die Angemessenheit eines Eingabegeräts darin, dass es „[...] effektiv, effizient und zufriedenstellend im Hinblick auf die zu erfüllenden Arbeitsaufgaben und die vorgesehene Arbeitsumgebung“ ist. Effizienz und Effektivität bedeuten in diesem Zusammenhang, dass das Gerät „[...] unter geringstem Aufwand an Zeit und Anstrengung funktioniert“ und dass „[...] seine Ausführung Faktoren berücksichtigt, die durch Genauigkeit und Vollständigkeit zu einer erhöhten oder optimierten Benutzerleistung führen“. Zufriedenstellend ist das Eingabegerät, sofern [...] seine Ausführung Faktoren einschließt, die zu Beeinträchtigungsfreiheit führen und positive Einstellungen der Benutzer steigern“ [ISO9241-9]. Hieraus lassen sich objektive Qualitätskriterien für die Testszenarios ableiten:

- *Anzahl der Versuche* – Das Ziel eines Interaktionsszenarios ist immer die Erfüllung einer vorgegebenen Arbeitsaufgabe. Ein Interaktionsszenario gilt als abgeschlossen, sobald dessen Ziel erreicht wurde. Treten Schwierigkeiten bei der Interaktion auf, die die Erfüllung des Ziels verhindern, so wird die Ausgangssituation der Arbeitsaufgabe auf Wunsch des Probanden wiederhergestellt und ein Fehlversuch gezählt. Die Anzahl der benötigten Versuche kann indirekt als antiproportionales Maß für die Zufriedenstellung des Nutzers angesehen werden, da allgemein anzunehmen ist, dass eine hohe Anzahl von Fehlversuchen einen Nutzer weniger zufrieden stellt, als die Erfüllung einer Arbeitsaufgabe beim ersten Versuch.
- *Griffsicherheit* – Ein weiterer Indikator für die Qualität der Präzisionsgriffe ist die Sicherheit des ausgeführten Griffs. Kann ein Objekt nicht sicher gegriffen werden und muss daher mehrfach wieder aufgenommen werden, mindert dies ebenfalls die Zufriedenstellung des Nutzers.
- *Interaktionsdauer* – Die Zeit, die für die Erfüllung der Arbeitsaufgabe benötigt wird, ist ebenfalls ein objektiv messbares Qualitätskriterium. Eine möglichst geringe Interaktionsdauer bei einem erfolgreichen Versuch signalisiert eine effiziente Erfüllung der Arbeitsaufgabe.
- *Genauigkeit* – Die Genauigkeit stellt ein weiteres wichtiges Qualitätskriterium dar. Besteht das Ziel einer Arbeitsaufgabe beispielsweise darin, ein Objekt möglichst genau an einer bestimmten Stelle zu positionieren, so lässt sich im Nachhinein die Abweichung zur Zielposition ermitteln. Je höher die ermittelte Abweichung ist, desto schlechter wurde das Ziel der Arbeitsaufgabe erfüllt.

Es existieren jedoch auch Qualitätskriterien, die sich nicht objektiv erfassen lassen, da sie abhängig vom persönlich empfundenen Nutzererlebnis sind. Hierzu zählen etwa die körperlichen Ermüdungs-

¹ Das Eingabegerät Tastatur wird bereits in anderen Teilen der DIN9241 behandelt.

erscheinungen, die bei der Bedienung des Leap Motion Controllers auftreten können. Aber auch die Zufriedenheit oder die empfundene Anstrengung lassen sich objektiv nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand erfassen. Für die Erfassung von subjektiven Meinungsbildern werden daher oftmals einfache Fragebögen eingesetzt. ISO9241-9 definiert einen solchen Fragebogen für die subjektive Einzelbewertung von Eingabegeräten. Der Fragebogen besteht aus insgesamt zwölf zu bewertenden Kriterien. Diese unterteilen sich in allgemeine Kriterien (1-7) sowie Kriterien, welche die Ermüdungserscheinungen des Nutzers betreffen (8-12):

1. Erforderliche Betätigungskraft
2. Gleichmäßigkeit der Nutzung
3. Erforderliche Anstrengung bei der Nutzung
4. Genauigkeit
5. Benutzungsgeschwindigkeit
6. Allgemeine Zufriedenheit
7. Nutzung des Eingabegeräts insgesamt
8. Ermüdung der Finger
9. Ermüdung des Handgelenks
10. Ermüdung des Arms
11. Ermüdung der Schulter
12. Ermüdung des Nackens

Jedes Kriterium ist anhand einer numerischen Rating-Skala von 1-7 zu bewerten, wobei 1 jeweils die schlechteste Bewertung darstellt und 7 die beste. Der Fragebogen wird den Probanden nach Abschluss des letzten Interaktionsszenarios dargeboten. Obwohl die Genauigkeit und die Interaktionsdauer bereits durch die objektiven Messungen erfasst werden, haben die Probanden die Möglichkeit diese Kriterien auch subjektiv zu beurteilen. Dies begründet sich dadurch, dass das subjektive Empfinden der Probanden und die objektiven Messungen voneinander abweichen können.

5.3. Gestaltung von Interaktionsszenarien

Die Ausgestaltung von Interaktionsszenarien, also die von den Probanden zu bearbeitenden Aufgaben, ist ein wichtiger Schritt bei der Erstellung der Probandentests und geht der Umsetzung der Versuchsanordnungen voraus. Die Interaktionsszenarien müssen so gestaltet sein, dass sie die zur Beantwortung der Fragestellung notwendigen Messwerte liefern. In den nachfolgenden Abschnitten findet zunächst eine allgemeine Beschreibung der Interaktionsszenarien statt. Die Details zur Umsetzung der Testsznarien und zur Messung der Qualitätskriterien folgen dann in den Abschnitten 5.4 und 5.5.

5.3.1. Würfel-Platzieren

Das Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren* wird genutzt, um die Leistung des Leap Motion Controllers beim Pinzettengriff zu untersuchen. Es sieht vor, dass der Proband ein würfelförmiges

Interaktionsobjekt zwischen Daumen und Zeigefinger greift und dieses dann möglichst präzise auf einer markierten Zielposition ablegt (Abbildung 5.1). Die Interaktion mit dem Würfel lässt sich in drei Phasen unterteilen:

1. *Greifen* – In der ersten Phase ist es wichtig, den Zeitpunkt des erfolgreichen Griffs zu erkennen. Dies stellt insofern eine Herausforderung dar, als dass die Probanden keinerlei taktile Rückmeldungen des Würfels erhalten und auch keine visuelle Rückmeldung stattfindet. Einzig die Bewegung des Würfels gestatten einen Rückschluss auf den erfolgreichen Griff.
2. *Bewegen* – In der zweiten Phase muss der Würfel in Richtung der markierten Zielfläche bewegt werden. Hierbei ist entscheidend, dass der Würfel weiterhin sicher gegriffen wird. Gleitet dem Probanden der Würfel aus der Hand, so kann dieser von der aktuellen Position erneut aufgenommen werden.
3. *Ablegen* – In der dritten und letzten Phase muss der Würfel dann möglichst genau auf der markierten Zielfläche abgelegt werden. Wichtig ist hierbei, dass der Griff sauber gelöst und die Hand dabei möglichst ruhig gehalten wird. Letzteres verhindert, dass ein bereits platzierte Würfel versehentlich verschoben wird. Analog zu Phase 1 können die Probanden nur anhand der Eigenbewegung des Würfels einschätzen, zu welchem Zeitpunkt dieser erfolgreich abgelegt wurde. Dies ist erst dann der Fall, wenn der Würfel nicht mehr den Bewegungen der Hand folgt.

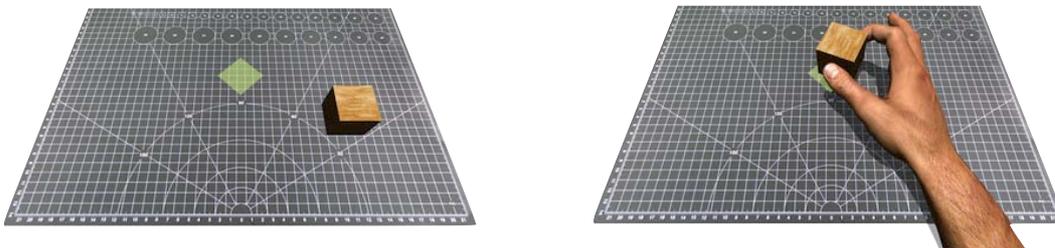


Abbildung 5.1: Interaktionsszenario „Würfel-Platzieren“. Das Ziel besteht darin den Würfel möglichst schnell und genau auf der farblich markierte Zielposition abzulegen.

Das Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren* wird in drei Durchgängen mit jeweils drei Versuchen durchgeführt. Die Würfelgröße variiert bei den Durchgängen zwischen Kantenlängen von 4 cm, 2 cm und 1 cm. Die Variation der Würfelgrößen soll zeigen ob und in welchem Umfang die Größe des Interaktionsobjekts die Griffsicherheit, aber auch die Interaktionsdauer sowie die Genauigkeit beeinflusst.

Die Arbeitsanweisung für die Probanden lautet: „Platziere den Würfel möglichst genau auf der markierten Fläche.“ Wird der Würfel für eine Dauer von zehn Sekunden nicht berührt, wird der Versuch gewertet. Der Ablauf dieser Zeitschwelle wird den Probanden mit Hilfe eines Fortschrittsbalkens visuell angezeigt.

5.3.2. Scheibe-Drehen

Für die Untersuchung des Dreipunktgriffs wurde ein Testszenario entworfen, bei dem die Probanden eine runde Scheibe mit Daumen, Zeige- und Mittelfinger drehen müssen (Abbildung 5.2). Auf der Kreisfläche der Scheibe befindet sich ein Pfeil, den es präzise auf eine vorgegebene Markierung zu drehen gilt. Auch hier setzt sich die Interaktion aus drei Phasen zusammen.

1. *Greifen* – Die Scheibe muss mit Daumen, Zeige- und Mittelfinger berührt werden, damit sie sich drehen lässt. Eine visuelle Bestätigung des Griffs findet nicht statt. Auch hier lässt nur die Eigenbewegung der Scheibe einen Rückschluss auf den erfolgreichen Griff zu.
2. *Drehen* – Damit der Pfeil auf die Markierung ausgerichtet wird, muss das Handgelenk bei gehaltenem Griff in die gewünschte Richtung rotiert werden. Es ist möglich den Drehvorgang zu unterbrechen, um mit der Hand umzugreifen. Dies ist beispielsweise dann erforderlich, wenn die Sicht auf den Pfeil oder die Zielmarkierung durch die Hand verdeckt wird oder wenn sich das Handgelenk durch die physiologischen Grenzen nicht weiter drehen lässt. Die Bewegung der Scheibe ist auf einen Freiheitsgrad begrenzt, sodass sie sich lediglich um die eigene Achse rotieren lässt.
3. *Griff lösen* – Auch bei diesem Interaktionsszenario hat das Lösen des Griffs einen Einfluss auf die finale Abweichung der Pfeils zur Zielmarkierung. Beim Lösen des Griffs ist darauf zu achten, dass sich die eingestellte Position der Scheibe nicht verstellt.

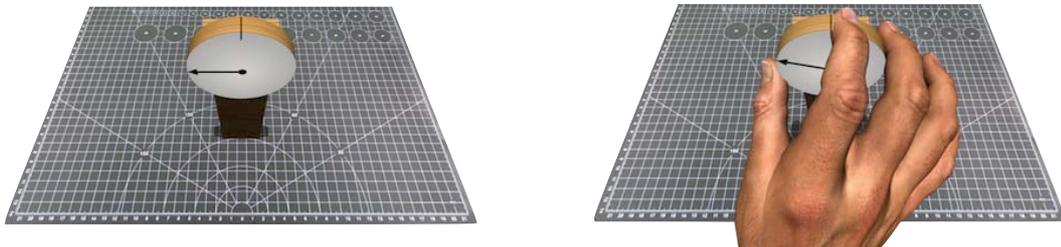


Abbildung 5.2: Interaktionsszenario „Scheibe-Drehen“. Das Ziel besteht darin, den Pfeil möglichst genau von einer vorgegebenen Startstellung auf die obere Markierung zu drehen.

Die für die Interaktion vorgesehene Scheibe besitzt einen Durchmesser von 6.4 cm, eine Tiefe von 1.7 cm und ist in einer Höhe von 14 cm positioniert. Das Interaktionsszenario *Scheibe-Drehen* wird in drei Durchgängen mit jeweils drei Versuchen durchgeführt. Während sich die Zielmarkierung in jedem Durchgang auf der 0°-Position (oben) befindet, variieren die Startpositionen des Pfeils. Dieser zeigt je nach Durchgang nach *links*, *unten* oder *rechts*.

Die Arbeitsanweisung für die Probanden lautet: „Greife die Scheibe mit Daumen, Zeige- und Mittelfinger und drehe sie so, dass der Pfeil genau auf die Markierung zeigt.“ Die Wertung des Versuchs geschieht automatisch, sobald die Scheibe nach der Pfeilpositionierung zehn Sekunden lang nicht berührt wurde. Analog zum Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren*, signalisiert ein Fortschrittsbalken den Ablauf der Zeitschwelle.

5.3.3. Schlüssel-Umdrehen

Für die Untersuchung des Schlüsselgriffs liegt es nahe, das Drehen eines Schlüssels in einem Schließzylinder zu simulieren. Die Probanden müssen hierbei einen Schlüssel, wie in Kapitel 3 beschrieben, zwischen Daumen und dem seitlichen Zeigefinger greifen und um 180° drehen. Der Schlüssel steckt hierbei fest im Schließzylinder. Das Abziehen oder Einstecken des Schlüssels ist nicht Bestandteil der Untersuchung. Das Interaktionsszenario *Schlüssel-Umdrehen* lässt sich in die folgenden Interaktionsphasen einteilen:

1. *Greifen* – Damit sich der Schlüssel drehen lässt, muss dieser zunächst gegriffen werden. Die Schwierigkeit bei der Aufgabe ergibt sich durch die Geometrie des Schlüssels. Eine visuelle Rückmeldung des erfolgreichen Griffs findet nicht statt.
2. *Drehen* – Die Bewegung des Schlüssels ist auf einen Freiheitsgrad begrenzt, sodass dieser sich lediglich um die Längsachse rotieren lässt.

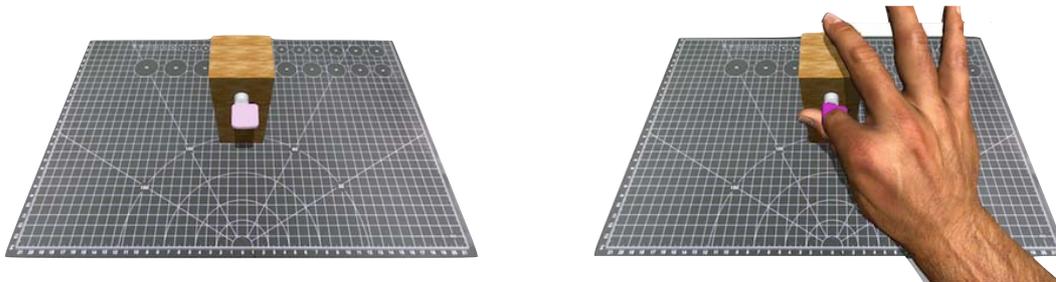


Abbildung 5.3: Interaktionsszenario „Schlüssel-Umdrehen“. Das Ziel besteht darin, den Schlüssel um 180° nach rechts zu drehen.

Im Unterschied zu den vorhergehenden Interaktionsszenarien entfällt eine dritte Phase. Dies begründet sich dadurch, dass bei diesem Interaktionsszenario lediglich die Griffsicherheit und die Interaktionsdauer beurteilt werden. Das Ziel ist erreicht, sobald der Schlüssel um 180° rotiert wurde. Dieses Ereignis wird den Probanden durch einen Farbwechsel des Schließzylinders signalisiert.

Die Arbeitsanweisung für die Probanden lautet: „Drehe den Schlüssel um 180° nach rechts.“ beziehungsweise „Drehe den Schlüssel um 180° nach links.“ für die linkshändigen Probanden.

5.4. Implementierung der virtuellen Interaktionsszenarien

5.4.1. Entwicklungsumgebung

Vor der eigentlichen Implementierung der virtuellen Interaktionsszenarien muss zunächst eine passende Entwicklungsumgebung gefunden werden. Eine grundlegende Anforderung an die Entwicklungsumgebung ist die Kompatibilität zu den Programmibliotheken des Leap Motion Controllers. Der Hersteller des Controllers stellt Programmibliotheken für die Programmiersprachen C++, C# (C-Sharp), Objective-C, Java, JavaScript und Python zur Verfügung (siehe: 4.4 LeapSDK). Eine weitere Anforderung ist die Integration einer Physik-Engine, um realistische Bewegungsabläufe

der Interaktionsobjekte zu erzielen. Beide Anforderungen werden von der Unity¹ Entwicklungs- und Laufzeitumgebung (Abbildung 5.4) erfüllt. Unity unterstützt sowohl die Programmiersprache C-Sharp, als auch die Programmiersprache JavaScript. Da die Entwicklungsumgebung primär für die Umsetzung von 3D-Computerspielen konzipiert ist, verfügt sie über eine integrierte Physik-Engine. Zum Einsatz kommt hierbei die PhysX-Engine² der Firma Nvidia.

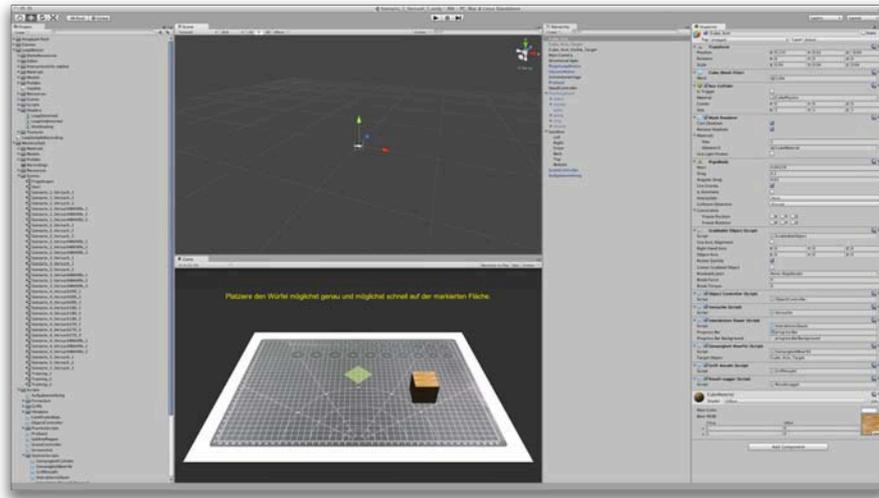


Abbildung 5.4: Editor der Unity Entwicklungsumgebung.

Die Entscheidung Unity als Entwicklungsumgebung für die virtuellen Interaktionsszenarien zu verwenden, wird überdies durch die gute Integration des Leap Motion Controllers bestärkt. So stellt Leap Motion zusätzlich zu den benötigten Programmibliotheken die „Leap Motion V2 Skeletal Assets“ als Download zur Verfügung. Hierbei handelt es sich um ein Erweiterungspaket für Unity, welches den Entwicklern die Integration von virtuellen Handmodellen in die eigenen 3D-Projekte ermöglicht. Der Detaillierungsgrad der enthaltenen Handmodelle reicht von einer rudimentären Hand aus einfachen geometrischen Formen, über mechanische Roboterhände, bis hin zum realistischen Abbild einer menschlichen Hand (Abbildung 5.5). Für letzteres Modell werden zudem verschiedene Texturen mitgeliefert, mit denen sich die virtuelle Hand an das Geschlecht und den Hauttyp des Benutzers anpassen lässt.



Abbildung 5.5: Handmodelle aus dem V2 Skeletal Assets Erweiterungspaket³

¹ Quelle: <http://unity3d.com> (Abruf: 15.02.2015)

² Quelle: <http://de.wikipedia.org/wiki/PhysX> (Abruf: 15.02.2015)

³ Quelle: <https://www.assetstore.unity3d.com/en/#!/content/17770> (Abruf: 15.02.2015)

5.4.2. Implementierung

Nach der Definition von Qualitätskriterien, der Gestaltung von Interaktionsszenarien und der Wahl der Entwicklungsumgebung folgt die softwaretechnische Implementierung der virtuellen Interaktionsszenarien in einer prototypischen Softwareanwendung. Die wesentlichen Aufgaben der Anwendung sind die Bereitstellung der virtuellen Interaktionsszenarien, die automatisierte Erfassung und Speicherung aller für die Untersuchung relevanten Messwerte sowie wie die Zuordnung der Messwerte zu einer bestimmten Testperson. Die hierfür erforderlichen Entwicklungsschritte werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

5.4.2.1. Proband

Damit sich die von der Anwendung erhobenen Messwerte einem bestimmten Probanden zuordnen lassen, mussten diese durch die Software erfasst werden. Aus diesem Grund werden die Probanden zu Beginn der Untersuchung darum gebeten, ein Formular mit Fragen nach einigen persönlichen Informationen auszufüllen. Hierbei handelt es sich unter anderem um Fragen nach Alter, Geschlecht und Händigkeit. Die Angaben werden einerseits für die statistische Auswertung benötigt, andererseits werden sie unmittelbar in der Anwendung verwendet. So wird beispielsweise, basierend auf dem Geschlecht, eine passende Hauttextur auf das virtuelle Handmodell gelegt, um den Probanden ein realistischeres Gefühl zu vermitteln (Abbildung 5.6). Auch die Angaben zur Händigkeit werden von der Anwendung benötigt, da jedes Interaktionsszenario gleichermaßen für rechts- als auch linkshändige Personen ausgelegt wird. Basierend auf der Händigkeit der Probanden werden beispielsweise die Start- und Zielpositionen der Interaktionsobjekte auf der x-Achse verschoben um so gleiche Ausgangsbedingungen zu schaffen. Ergänzend zu den persönlichen Angaben wird jedem Probanden eine zufällige vierstellige Ziffernfolge zugewiesen, um eine Zuordnung der Messwerte bei der Auswertung zu ermöglichen.



Abbildung 5.6: Unterschiedlich texturierte Handmodelle für weibliche und männliche Probanden

Die von den Probanden gemachten Angaben werden in einem dafür entworfenem Unity GameObject abgelegt, sodass zu jedem Zeitpunkt der Zugriff auf diese Daten möglich ist. Zusätzlich werden die Angaben in einer Textdatei für die statistische Auswertung gespeichert.

5.4.2.2. Interaktionsobjekte

Elementare Bestandteile der Interaktionsszenarien sind die Interaktionsobjekte, an denen die Probanden die Präzisionsgriffe durchführen. Beim Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren* handelt es sich bei den Interaktionsobjekten um einfache Würfel in unterschiedlichen Größen. Diese lassen sich direkt in Unity über ein Menü als primitive Körper erzeugen.

Die Scheibe für das Interaktionsszenario *Scheibe-Drehen* basiert ebenfalls auf einem primitiven Körper (Abbildung 5.7, Mitte). Es handelt sich dabei um einen geometrischen Zylinder. Dieser Zylinder wird so ausgerichtet, dass seine Achse parallel zur z-Achse des virtuellen Raums verläuft und somit die Fläche des Zylinders zum Nutzer zeigt. Auf der vorderen Fläche des Zylinders wird mit Hilfe einer Textur ein Pfeil abgebildet, der die aktuelle Stellung der Scheibe angibt.



Abbildung 5.7: Virtuelle Interaktionsobjekte für die drei Interaktionsszenarien „Würfel-Platzieren“ (links), „Scheibe Drehen“ (Mitte) und „Schlüssel-Umdrehen“ (rechts).

Der Schlüssel und der Schließzylinder für das Interaktionsszenario *Schlüssel-Umdrehen* können nicht durch primitive geometrische Körper abgebildet werden. Beide Objekte werden daher mit Hilfe der Software Autodesk Maya modelliert (Abbildung 5.8). Das erstellte 3D-Modell wird daraufhin als FBX-Format exportiert, sodass es sich im Anschluss in das Unity Projekt importieren lässt.

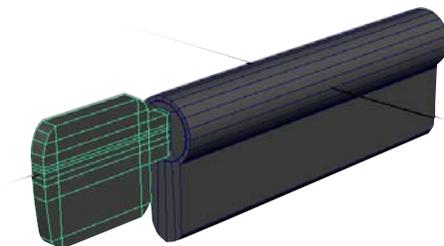


Abbildung 5.8: Schlüssel und Schließzylinder, modelliert mit der Software Autodesk Maya.

Damit die direkte Manipulation der Interaktionsobjekte möglich ist, muss diesen in Unity eine Rigidbody- sowie eine Collider-Komponente angehängt werden. Die Rigidbody-Komponente sorgt dafür, dass sich das Interaktionsobjekt durch physikalische Kräfte in der Szene transformieren lässt

und von der Gravitation beeinflusst wird. Die Collider-Komponente registriert hingegen Kollisionen mit anderen Objekten und sorgt dafür, dass die angreifenden Kräfte am Interaktionsobjekt in einer entsprechenden Bewegung resultieren.

5.4.2.3. Griffe

Allein durch das Anfügen von Rigidbody- und Collider-Komponenten an das Interaktionsobjekt lässt sich selbiges noch nicht greifen. Das Zusammenspiel zwischen angreifenden Kräften, verschiedenen Reibungswerten, Trägheitsmomenten des Objekts und weiteren Faktoren ist zu komplex, als dass die PhysX-Engine ein zufriedenstellendes Greiferlebnis ermöglichen würde. Leap Motion liefert daher im Umfang der „Leap Motion V2 Skeletal Assets“ Skripte mit, die dennoch das adäquate Greifen von Objekten ermöglichen. Bei den erwähnten Skripten handelt es sich um das Grabbale-Object-Skript sowie das GrabbingHand-Skript. Während die erstgenannte Skriptdatei an Objekte angehängt wird, die sich greifen lassen sollen, wird das zweite Skript dem Handmodell zugewiesen. In Kombination ermöglichen die Skripte das Aufnehmen, Positionieren, Rotieren und Ablegen von Objekten. Die wesentlichen Berechnungen finden hierbei im GrabbingHand-Skript statt.

In diesem Skript wird berechnet zu welchem Zeitpunkt ein Objekt als gegriffen oder als losgelassen gilt. Die zugrundeliegende Logik hierfür basiert aus dem oben genannten Grund *nicht* auf der Kollisionserkennung zwischen Fingern und Objekt. Stattdessen wird zunächst mit Hilfe der Unity `OverlapSphere` ermittelt, welche Objekte sich in der unmittelbaren Nähe der Griffposition befinden und somit als potentielle Greifobjekte in Frage kommen.

```
Collider[] close_things = Physics.OverlapSphere(pinch_position,
                                                grabObjectDistance,
                                                grabbableLayers);
```

Aus dieser Liste wird dann das räumlich nächste Objekt ermittelt. Gleichzeitig wird der kleinste Abstand der Daumenspitze zu den übrigen Fingern ermittelt. Unterschreitet dieser Abstand einen festgelegten Schwellenwert, wird das zuvor ermittelte Objekt gegriffen. In diesem Zuge wird die Kollisionserkennung zwischen der Hand und dem gegriffenen Objekt deaktiviert.

```
Leap.Utils.IgnoreCollisions(gameObject, active_object_.gameObject, true);
```

Die Transformation des gegriffenen Objekts wird nun nicht mehr durch die Physik-Engine von Unity berechnet. Stattdessen folgt das Objekt unmittelbar den Bewegungen der Hand. Bedingt durch die Deaktivierung der Kollisionserkennung während des Griffs ergibt sich der Effekt, dass das virtuelle Handmodell durch das Objekt hindurch greifen kann (Abbildung 5.9). Durch dieses Verhalten weicht der virtuelle Greifvorgang von der Realität ab.

Dies ist jedoch nicht zwangsläufig als negativ zu bewerten. Ein Vorteil ergibt sich nämlich dadurch, dass die Finger des virtuellen Handmodells den Fingerbewegungen der realen Hand weiterhin eins-zu-eins folgen. Es entsteht also keine Divergenz zwischen den realen Fingerbewegungen und den Fingerbewegungen des virtuellen Handmodells. Bei der von Leap Motion umgesetzten Griffenerkennung bleibt es dem Nutzer überlassen, ob er seine Finger soweit schließt bis diese sich

berühren oder ob er die Finger nur soweit schließt bis diese in Kontakt mit der Oberfläche des virtuellen Interaktionsobjekts sind.

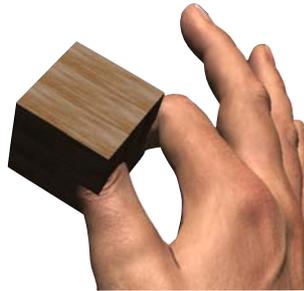


Abbildung 5.9: Deaktivierte Kollisionserkennung führt dazu, dass die virtuelle Hand durch das Interaktionsobjekt hindurch greifen kann.

Das GrabbingHand-Skript kann nicht als Universallösung für jegliche Griffarten verwendet werden, da es lediglich das Greifen mit den Fingerspitzen von Daumen und Zeigefinger gestattet. Für die Untersuchung des Fingerspitzengriffs im Interaktionsszenario *Würfel-Patzen* lässt sich das Skript damit zwar uneingeschränkt nutzen, bei der Untersuchung des Dreipunkt- und des Schlüsselgriffs eignet es sich hingegen nicht. Das wesentliche Problem besteht dabei in der Berechnung der Griffposition innerhalb der Funktion `UpdatePinchPosition()`. In der unveränderten Funktion befindet sich die Griffposition standardmäßig auf der halben Strecke zwischen den Fingerspitzen von Daumen und Zeigefinger (Abbildung 5.10). Die übrigen drei Finger werden demnach nicht am Griff beteiligt.

```
protected void UpdatePinchPosition() {
    HandModel hand_model = GetComponent<HandModel>();
    current_pinch_position_ = 0.5f * (hand_model.fingers[0].GetTipPosition() +
                                     hand_model.fingers[1].GetTipPosition());
    Vector3 delta_pinch = current_pinch_position_ - filtered_pinch_position_;
    filtered_pinch_position_ += (1.0f - positionFiltering) * delta_pinch;
}
```

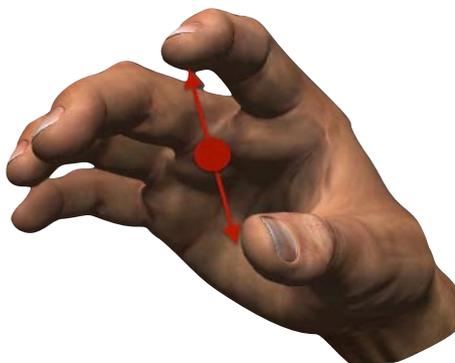


Abbildung 5.10: Berechnete Griffposition beim Fingerspitzengriff

Durch eine Modifikation der Funktion `UpdatePinchPosition()` kann das `GrabbingHand`-Skript jedoch auch für den Dreipunktgriff eingesetzt werden. Hierzu wird, statt der halben Strecke zwischen Daumen und Zeigefinger, der Schwerpunkt des zwischen den Fingerspitzen von Daumen, Zeige- und Mittelfinger aufgespannten Dreiecks berechnet (Abbildung 5.11). Der Mittelpunkt des Griffs liegt anschließend stets zwischen den Fingerspitzen der drei Finger.

```
protected void UpdatePinchPosition() {
    HandModel hand_model = GetComponent<HandModel>();
    current_pinch_position_ = (1.0f/3.0f) * (hand_model.fingers[0].GetTipPosition() +
                                           hand_model.fingers[1].GetTipPosition() +
                                           hand_model.fingers[2].GetTipPosition());
    Vector3 delta_pinch = current_pinch_position_ - filtered_pinch_position_;
    filtered_pinch_position_ += (1.0f - positionFiltering) * delta_pinch;
}
```

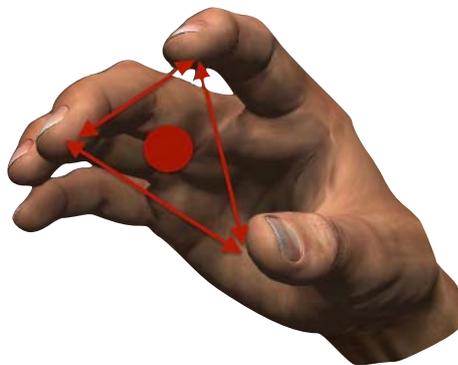


Abbildung 5.11: Berechnete Griffposition beim Dreipunktgriff

Das auf diese Weise modifizierte Skript wird als Datei `DreipunktGriff.cs` im Unity Projektordner abgelegt. Soll statt dem Pinzettengriff der Dreipunktgriff eingesetzt werden, muss lediglich das ursprüngliche Skript gegen die modifizierte Version ausgetauscht werden.

Die Griffposition beim Schlüsselgriff liegt hingegen auf der halben Strecke zwischen dem äußeren Daumenglied und dem mittleren Glied des Zeigefingers (Abbildung 5.12). Im Unterschied zum Fingerspitzengriff bilden also nicht die Fingerspitzen die Kontaktflächen zum Interaktionsobjekt, sondern die Fingerbeere des Daumens und das mittlere Areal des Zeigefingers. Für die Berechnung dieser Positionen wird die Methode `GetBoneCenter()` genutzt. Diese erwartet einen Parameter vom Typ `BoneType`. Die im modifizierten Skript verwendeten Typen `BoneType.TYPE_DISTAL` sowie `BoneType.TYPE_INTERMEDIATE` sind die programmiertechnischen Bezeichner für das äußere und mittlere Fingerglied.

```
protected void UpdatePinchPosition() {
    HandModel hand_model = GetComponent<HandModel>();
    current_pinch_position_ = 0.5f *
        (hand_model.fingers[0].GetBoneCenter((int)Leap.Bone.BoneType.TYPE_DISTAL) +
         hand_model.fingers[1].GetBoneCenter((int)Leap.Bone.BoneType.TYPE_INTERMEDIATE));
    Vector3 delta_pinch = current_pinch_position_ - filtered_pinch_position_;
    filtered_pinch_position_ += (1.0f - positionFiltering) * delta_pinch;
}
```



Abbildung 5.12: Berechnete Griffposition beim Schlüsselgriff

5.4.2.4. Skalierung

Damit sich virtuelle Objekte in einer Unity Szene annähernd physikalisch korrekt verhalten, ist es erforderlich, dass der Skalierungsfaktor dieser Objekte korrekt gewählt ist. Im Regelfall wird die Skalierung in Unity als einheitslos angesehen. Eine Längeneinheit könnte demnach als ein Kilometer, eine Meile oder ein Zoll festgelegt werden. Diese Sichtweise ist jedoch nur zulässig, solange die in der Unity Szene befindlichen Objekte nicht von physikalischen Effekten beeinflusst werden. Bereits das aktivieren der Schwerkraft für ein Objekt lässt die Sichtweise der einheitslosen Skalierung hinfällig werden. Die Längeneinheiten in Unity sind dann metrisch und eine Einheit entspricht exakt einem Meter. Ein Würfel mit einer Skalierung von 1.0 muss dann als Würfel mit einer Seitenlänge von 1 m angesehen werden. Ein virtueller Würfel mit einer Seitenlänge von 4 cm muss daher einen Skalierungsfaktor von 0.04 besitzen.

5.4.2.5. Kamera & Bildschirm

Eine korrekte räumliche Positionierung der Kamera in der virtuellen Szene ist wichtig, denn durch sie blicken die Probanden in die Szene und auf die virtuellen Interaktionsobjekte. Auch wenn eine identische Nachbildung der bei den realen Interaktionsszenarien vorherrschenden Sichtbedingungen wünschenswert wäre, so lässt sich dies ohne eine hierfür geeignete Hardware nicht realisieren. So müssten beispielsweise die von den Probanden ausgeführten Kopfbewegungen elektronisch erfasst und auf die virtuelle Kamera übertragen werden. Auf diese Weise wäre es möglich, durch die eigenen Kopfbewegungen um ein Objekt herum zu sehen. Produkte wie das „Oculus Rift Virtual Reality Headset“ ermöglichen dies zwar, allerdings stand ein solches Gerät im Rahmen dieser Arbeit nicht zur Verfügung.

Ungeachtet dessen soll die virtuelle Kamera trotz der statischen Einstellung so positioniert werden, dass Sie den Sichtbedingungen bei den realen Interaktionsszenarien möglichst nahe kommt. Die relevanten Parameter sind hierbei die räumliche Position, der Neigungswinkel um die x-Achse sowie das horizontale Sichtfeld der Kamera. Vorab durchgeführte Tests zeigten, dass eine Höhe von 40 cm sowie ein frontaler Abstand von 40 cm relativ zum Ursprungspunkt des Interaktionsvolumens eine realistische Position der Kamera bedeutet. Damit die Probanden durch die Kamera direkt auf den Ursprung blicken, muss der Neigungswinkel der Kamera entsprechend angepasst werden.

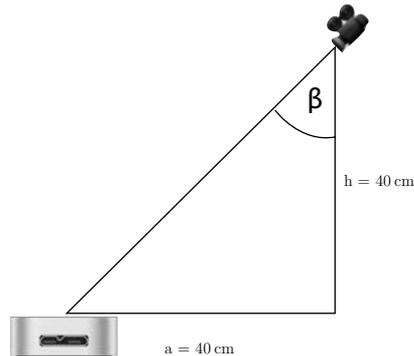


Abbildung 5.13: Blickwinkel der virtuellen Kamera auf den Ursprung des Interaktionsvolumens

Dieser Winkel errechnet sich aus dem Arkustangens des Quotienten aus Höhe h und dem frontalen Abstand a .

$$\begin{aligned}\beta &= \tan^{-1}\left(\frac{h}{a}\right) \\ \beta &= \tan^{-1}\left(\frac{40\text{cm}}{40\text{cm}}\right) \\ \beta &= 45^\circ\end{aligned}$$

Bedingt durch die räumliche Position der Kamera ergibt sich somit ein Neigungswinkel von 45° . Für die Berechnung des horizontalen Sichtfelds der Kamera (Abbildung 5.14) müssen sowohl die Breite des verwendeten Monitors, als auch die Entfernung des Nutzers zum Monitor bekannt sein.

Bei dem für die Untersuchung eingesetzten Ausgabegerät handelt es sich um einen Dell UltraSharp U2715H Monitor, der über eine Bildschirmbreite von 60 cm verfügt. Der Abstand zum Nutzer beträgt während den Untersuchungen etwa 80 cm. Das horizontale Sichtfeld der Kamera errechnet sich anhand der Formel

$$\begin{aligned}\alpha &= 2 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{b}{2 \cdot d}\right) \\ \alpha &= 2 \cdot \tan^{-1}\left(\frac{60\text{cm}}{2 \cdot 80\text{cm}}\right) \\ \alpha &\approx 41,11^\circ\end{aligned}$$

Somit ergibt sich für das Sichtfeld, bei einer gegebenen Bildschirmbreite von $b = 60$ cm und einem Abstand zum Bildschirm $d = 80$ cm, ein Winkel von circa $41,11^\circ$.



Abbildung 5.14: Der Winkel des horizontalen Sichtfelds ist abhängig von der Bildschirmbreite und dem Abstand zum Computerbildschirm.

5.4.2.6. Messwerterfassung

Die Erfassung der für die Auswertung erforderlichen Messwerte erfolgt durch jeweils eigenständige Skripte. Dies ist notwendig, da sich nicht bei jedem Interaktionsszenario alle Qualitätskriterien sinnvoll überprüfen lassen. Beispielsweise ist es beim Interaktionsszenario *Scheibe-Drehen* nicht notwendig eine translatorische Abweichung zu errechnen, da sich die Position der Scheibe nicht verändert. Durch die Aufteilung in separate Skripte lassen sich für jedes Interaktionsszenario nur die wirklich benötigten Qualitätskriterien auswerten.

Nach dem Erreichen des vorgegebenen Interaktionsziels wird ein Ereignis mit der Bezeichnung `OnFinish` ausgelöst. Die Klasse `ResultLogger` hat einen Eventhandler für dieses Ereignis registriert, der beim Abschluss eines Interaktionsszenarios ausgeführt wird. Die Aufgabe dieses Eventhandlers besteht sowohl in der Aggregation der verschiedenen Messergebnisse als auch in der anschließenden Sicherung der Ergebnisse in Form von Textdateien (Abbildung 5.15). Für jedes Interaktionsszenario wird eine separate Textdatei erzeugt, die sich anhand ihres Dateinamens einem bestimmten Probanden und dem zugehörigen Interaktionsszenario eindeutig zuordnen lässt.

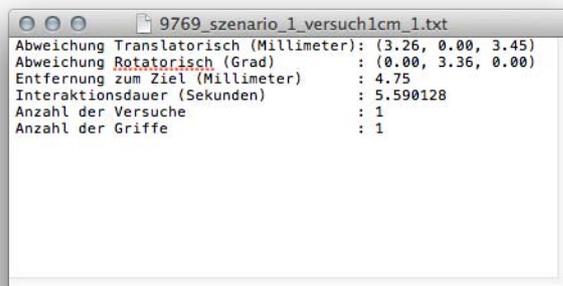


Abbildung 5.15: Exemplarische Messergebnisse des Interaktionsszenarios „Würfel-Platzieren“. Zusammengefasst und gespeichert in einer unformatierten Textdatei.

5.4.2.7. Fragebogen

Für die Erfassung eines subjektiven Meinungsbildes, bezogen auf die 3D-Interaktion mit Hilfe des Leap Motion Controllers, wird den Probanden nach der Bearbeitung des letzten Interaktionsszenarios ein Bewertungsformular angezeigt (Abbildung 5.16). Die enthaltenen Fragen setzen sich aus den im Abschnitt 5.2 beschriebenen Bewertungskriterien der ISO9241-9 Norm zusammen.

Abbildung 5.16: Fragebogen zur Erfassung der subjektiven Meinungen der Probanden.

Das Bewertungsformular wird programmieretechnisch mit Hilfe des sogenannten GUILayouts in Unity umgesetzt. Es handelt sich dabei um eine Methode, die dem Nutzer zweidimensionale, grafische Bedienelemente anzeigt, welche bezogen auf ihre Darstellung, stets vor allen anderen Inhalten der Szene liegen. Durch den Mausklick auf die Schaltfläche „Übernehmen“, wird die Bewertung der subjektiven Qualitätskriterien in einer Textdatei abgelegt, sodass sie für die spätere Auswertung zur Verfügung stehen.

5.4.3. Stereoskopische Ausgabe

Für die stereoskopische Darstellung der virtuellen Interaktionsszenarien wird die kostenfreie Unity-Erweiterung *Anaglyph-izer*¹ der italienischen Firma Esimple Studios eingesetzt. Es handelt sich hierbei um eine Software, mit der sich jede beliebige Szene in Unity im Anaglyph-3D Verfahren darstellen lässt. Die Verwendung der Erweiterung gestaltet sich unkompliziert. Es muss lediglich eines der beiden mitgelieferten Skripte an das Kameraobjekt gehängt werden (Abbildung 5.17). Im

¹ Quelle: <http://blog.esimple.it/unity3d-anaglyph-construction-kit> (Abruf: 10.02.2015)

Anschluss muss dem Skript dann eines der fünf mitgelieferten Anaglyphen-Materialien zugewiesen werden. Zur Auswahl stehen die folgenden Modi:

- Color Anaglyphs
- Gray Anaglyph
- Half Color Anaglyphs
- Optimized Anaglyphs
- True Anaglyphs

Jeder der fünf genannten Modi basiert auf dem Rot-Cyan-Verfahren und erfordert dementsprechend das Tragen einer Brille mit rot- und cyanfarbenen Filtern. Die Unterschiede zwischen den Modi äußern sich insbesondere im Verhalten bei der Farbproduktion, der Stärke von Geisterbildern und dem Auftreten binokularer Rivalität. Bei der binokularen Rivalität handelt es sich um einen Effekt, bei dem die beiden Halbbilder nicht vollständig zu einem gemeinsamen Bild verschmelzen. Hierdurch springt das Gehirn zwischen dem linken und rechtem Halbbild hin und her. Gute Ergebnisse lassen sich mit dem Modus *Optimized Anaglyphs* erzielen. Dieser Modus reproduziert Farben zwar schlechter als der Modus *Color Anaglyphs*, dafür treten weniger Geisterbilder und fast keine binokulare Rivalität auf.



Abbildung 5.17: Konfiguration des Anaglyph-izer Skripts.

Für die Ausgabe einer beliebigen Unity-Szene im Anaglyph-3D-Verfahren erzeugt das oben genannte Skript zwei zusätzliche Kameras, die einen horizontalen Versatz zueinander aufweisen und der Hauptkamera untergeordnet sind. Die zusätzlichen Kameras rendern die Halbbilder für das linke, beziehungsweise rechte Auge des Betrachters. Die Halbbilder werden dann jeweils auf eine Unity Rendertextur übertragen. Im letzten Schritt wird der ausgewählte Anaglyphenmodus in die Halb-

bilder eingerechnet. Die beiden Halbbilder werden dann simultan dargestellt (Abbildung 5.18). Die 3D-Brille sorgt mit den eingelassenen Farbfiltern dafür, dass den Augen des Betrachters nur das jeweils korrespondierende Halbbild zugeführt wird. Auf diese Weise ermöglicht das Anaglyph-3D-Verfahren eine räumliche Tiefenwahrnehmung auf einem zweidimensionalen Bildschirm.

Zwar entspricht das Anaglyph-3D-Verfahren nicht mehr dem heutigen Stand der Technik, dennoch lässt sich damit eine brauchbare Tiefenwirkung erzeugen. Das Verfahren lässt sich zudem sehr kostengünstig implementieren, da keine speziellen Ausgabegeräte benötigt werden. Nachteilig anzumerken ist die schlechte Reproduktion von Farben. Für die Untersuchungen dieser Arbeit ist eine korrekte Farbwiedergabe jedoch nicht von übergeordneter Relevanz und stellt damit keine Einschränkung dar. Ein Faktor, den es jedoch bei der stereoskopischen Ausgabe zu beachten gilt, ist der höhere Rechenaufwand, da bei der stereoskopischen Ausgabe pro Zeitabschnitt doppelt so viele Bilder berechnet werden müssen, als bei einer gewöhnlichen zweidimensionalen Ausgabe ohne Tiefenwirkung.

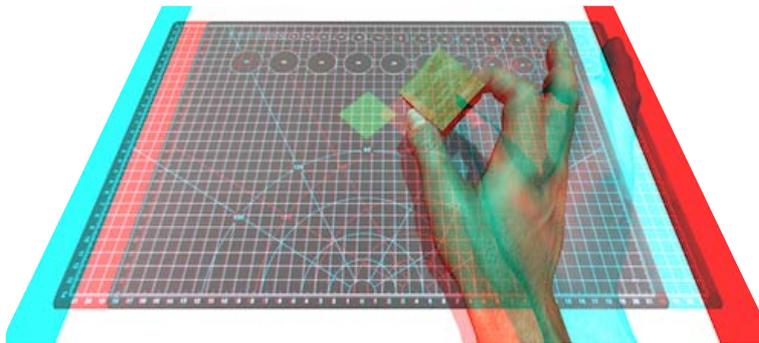


Abbildung 5.18: Stereoskopische Ausgabe durch Verwendung des Unity-Pakets Anaglyph-izer.

5.5. Umsetzung der realen Testszenarios

Während die Erfassung der für die objektiven Qualitätskriterien maßgeblichen Messwerte bei den virtuellen Testszenarios unmittelbar durch die Software erfolgt, werden die Messwerte bei den realen Testszenarios durch direkte Messungen erhoben [vgl. ISO9241-9]. Dies erfordert die Umsetzung eines hierfür geeigneten Versuchsaufbaus, der in den folgenden Abschnitten beschrieben wird.

5.5.1. Messung der Interaktionsdauer

Die Messung der Interaktionsdauer erfolgt bei den virtuellen Tests direkt durch die Software. Diese erfasst die Zeit zwischen der ersten und letzten Berührung des virtuellen Interaktionsobjekts. Für die Zeitmessung bei den realen Tests muss jedoch auf eine andere Methode zurückgegriffen werden. Eine einfache Möglichkeit für die Zeitmessung wäre das manuelle Stoppen der Zeit mit Hilfe einer Stoppuhr. Bei dieser Methode ist eine genaue Zeitmessung jedoch nicht gewährleistet, da die menschliche Reaktionszeit bei der Betätigung der Stoppuhr bei jeder Messung leicht variiert. Aus diesem Grund soll die Zeitmessung bei den realen Tests unabhängig von der menschlichen Reaktionszeit erfolgen.

Eine über dem Interaktionsbereich angebrachte GoPro-Kamera zeichnet daher die Handbewegungen der Probanden bei den Interaktionsszenarien mit den realen Objekten mit 120 Bildern pro Sekunde auf (Abbildung 5.19). Durch eine nachträgliche bildgenaue Auswertung der Aufzeichnungen lässt sich so die Dauer der Nutzerinteraktion auf bis zu $\frac{1}{120}$ Sekunde genau bestimmen.



Abbildung 5.19: Eine GoPro HD HERO2 Kamera erfasst den Interaktionsbereich mit 120 Bildern pro Sekunde.

Speziell für das Testszenario *Würfel-Platzieren* wurde zudem eine einfache elektronische Schaltung realisiert (Abbildung 5.20). Mit Hilfe dieser Schaltung lassen sich die Start- und Endzeitpunkte der Nutzerinteraktionen bei der Auswertung der Einzelbilder besser erkennen. Die Schaltung besteht aus einer 5 V Gleichstromquelle sowie einer Leuchtdiode (LED) mit integriertem Vorwiderstand. Diese bilden über elektrische Leitungen einen Stromkreis. Dieser Stromkreis verläuft über die vorgesehenen Start- und Zielflächen. An diesen Flächen ist der Stromkreis unterbrochen. Erst durch das Aufliegen des Würfels wird der Stromkreis geschlossen, sodass die LED leuchtet. Bewegt der Proband den Würfel von der Startfläche zur Zielfläche, erlischt die LED für die Dauer der Interaktion.

Für die Berechnung der Interaktionsdauer auf Basis der Videoaufnahmen werden die Einzelbilder von der ersten bis zur letzten Berührung des Interaktionsobjekts gezählt. Die Berechnung der Interaktionsdauer auf Basis der Einzelbilder erfolgt dann mit der Formel

$$t = \frac{z}{r}$$

Die Interaktionsdauer t ergibt sich aus dem Quotienten von Bildanzahl z und der Bildrate r . Findet eine Interaktion also beispielsweise während 180 Einzelbildern statt, so ergibt sich hieraus bei einer festen Bildrate der Kamera von 120 Bildern pro Sekunde eine Interaktionsdauer von 1,5 Sekunden.

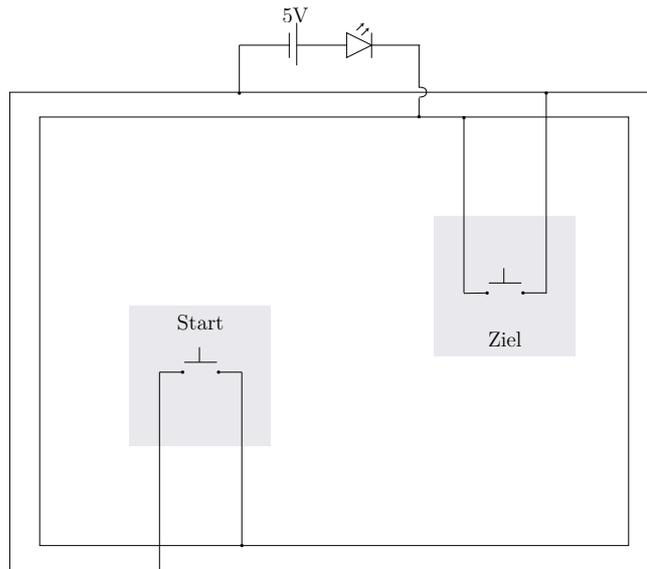


Abbildung 5.20: Elektronische Schaltung (vereinfacht) als visuelles Hilfsmittel für die Zeitmessung beim Interaktionsszenario „Würfel-Platzieren“.

5.5.2. Messung der Genauigkeit

Die Bewertung der Genauigkeit beim realen Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren* erfolgt durch die Auswertung der translatorischen und rotatorischen Abweichung zur vorgegebenen Zielfläche (Abbildung 5.21). Hierzu werden die Koordinaten zweier gegenüberliegender Eckpunkte der Würfelgrundfläche mit einem digitalen Messschieber vermessen.

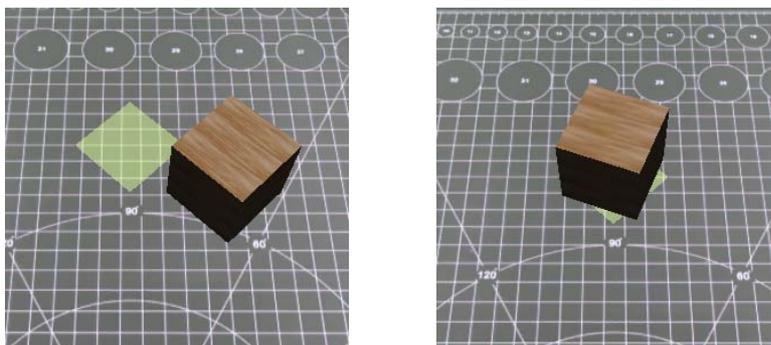


Abbildung 5.21: Veranschaulichung einer translatorischen Abweichung (links) sowie einer rotatorischen Abweichung (rechts) zur vorgegebenen Zielfläche.

Anhand der gemessenen Eckpunkte lässt sich mit Hilfe der nachfolgenden Formel der geometrische Mittelpunkt M der Würfelgrundfläche berechnen.

$$M\left(\frac{x_1 + x_2}{2}; \frac{y_1 + y_2}{2}\right)$$

Maßgeblich für die translatorische Abweichung des Würfels zum vorgegebenen Ziel ist die Distanz d zwischen Mittelpunkt M der Würfelgrundfläche und dem vorgegebenen Mittelpunkt T der Zielfläche. Sie errechnet sich mit folgender Formel

$$d = \sqrt{(xm - xt)^2 + (ym - yt)^2}$$

Die rotatorische Abweichung α zwischen der Würfelgrundfläche und der Zielfläche errechnet sich aus dem Arkustanges der Punktsteigungsform der beiden gemessenen Punkte. Aufgrund der geometrischen Form des Würfels beträgt die maximale Abweichung zur Zielfläche 45° . Von Relevanz ist zudem nur der Betrag der Abweichung.

$$\alpha = \left| \tan^{-1} \left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right) \right|$$

Auch beim Interaktionsszenario *Scheibe-Drehen* erfolgt die Messung der Genauigkeit. Allerdings wird hierbei lediglich die rotatorische Abweichung auf der Drehachse der Scheibe betrachtet, da die Scheibe, bedingt durch die Aufgabenstellung des Interaktionsszenarios, nur über einen Freiheitsgrad verfügt. Für die Messung befindet sich auf der Vorderseite der Scheibe eine Winkelskala (Abbildung 5.22). Nachdem der Proband den Pfeil auf die Markierung dreht, lässt sich die Abweichung auf $0,5^\circ$ genau ablesen.

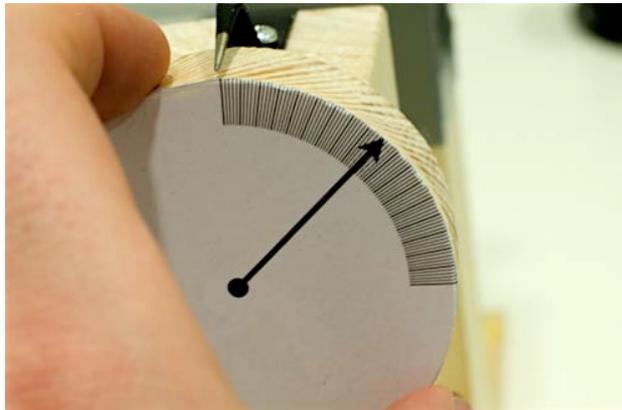


Abbildung 5.22: Winkelskala für das Ablesen der rotatorischen Abweichung.

5.5.3. Messung von Versuchsanzahl und Griffsicherheit

Die benötigte Anzahl der Versuche und der Griffe werden sowohl für die virtuellen- als auch für die realen Interaktionsszenarien protokolliert. Hierzu dient bei den realen Tests eine durch den Testleiter geführte Strichliste. Bei den virtuellen Tests wird die Anzahl durch die Software erfasst. Lässt der Proband das Interaktionsobjekt beabsichtigt oder unbeabsichtigt los, um es danach erneut zu greifen, so wird dies als zwei Griffe gewertet. Ein fehlerhafter Versuch liegt hingegen vor, wenn das Ziel eines Testszenarios aus der vorliegenden Situation heraus nicht mehr erreicht werden kann. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn sich das Interaktionsobjekt außerhalb der Reichweite des Probanden befindet und damit nicht mehr gegriffen werden kann.

6. Kapitel

Untersuchungen

6.1. Probanden

Nicht jeder Mensch verfügt über die Voraussetzungen, die für die Teilnahme an den Probandentests gewünscht oder erforderlich sind. Aus diesem Grund wurde vor der Auswahl der Testpersonen ein Probandenprofil erstellt, welches die grundlegenden Anforderungen an die Testpersonen beschreibt und als Auswahlinstrument diente. Dieses Probandenprofil umfasste die nachfolgenden Punkte:

1. *Sensomotorik* – Die sensomotorischen Fähigkeiten der Testpersonen müssen uneingeschränkt gegeben sein. Personen mit akuten Verletzungen im Schulter-, Arm und Handbereich sind keine geeigneten Kandidaten für die Untersuchung. Ebenfalls ungeeignet sind Personen mit einem alters- oder krankheitsbedingtem Tremor. Verletzungen oder ein Tremor schränken die Leistungsfähigkeiten der Testpersonen ein und könnten daher die Ergebnisse der Untersuchung beeinflussen.
2. *Wahrnehmung* – Zum Zeitpunkt der Untersuchung sollen alle Probanden über eine volle Sehkraft verfügen. Werden hierzu Sehhilfen wie Brillen oder Kontaktlinsen benötigt, müssen diese während der Untersuchung angelegt werden. Die Probanden dürfen bei der Durchführung der Tests nicht unter dem Einfluss bewusstseins- oder wahrnehmungsverändernder Substanzen stehen. Dies umfasst sowohl Alkohol als auch Medikamente sowie andere psychoaktive Stoffe mit vergleichbarer Wirkung. Wie allgemein bekannt ist, beeinflussen die genannten Substanzen die körperliche Leistungsfähigkeit des Menschen.
3. *Händigkeit* – Die Probanden werden angewiesen, die jeweiligen Arbeitsaufgaben mit ihrer dominanten Hand zu bearbeiten. Je nach Testperson kann dies entweder die rechte oder die linke Hand sein. Alle Interaktionsszenarien sind darauf ausgelegt, sowohl mit der rechten als auch mit der linken Hand durchführbar zu sein, daher ist die Händigkeit für die Auswahl der Probanden unerheblich.
4. *Geschlecht* – Für die Durchführung der Interaktionsszenarien gilt die Annahme, dass es unerheblich ist, ob ein Proband männlich oder weiblich ist. Beide Geschlechter werden daher grundsätzlich als mögliche Testpersonen in Betracht gezogen.
5. *Alter* – Eine Beschränkung auf eine bestimmte Altersgruppe ist nicht vorgesehen. Sofern die übrigen Voraussetzungen erfüllt sind und davon auszugehen ist, dass eine Person die Aufgaben bearbeiten kann, wird sie als geeigneter Testkandidat angesehen.

6. *Vorkenntnisse* – Die Probanden sollen den Leap Motion Controller zuvor noch nicht bedient haben. Dies stellt sicher, dass alle Probanden auf dem gleichen Erfahrungslevel an die Untersuchung herantreten.

Eine eingehende Überprüfung der physiologischen Anforderung findet nicht statt, da hierfür einerseits das notwendige medizinische Fachwissen fehlt und zum anderen den Probanden eine solche Untersuchung nicht zugemutet werden soll.

Für die Überprüfung der These, dass Personen mit Vorkenntnissen im Bereich der 3D-Manipulation von virtuellen Objekten besser bei der Bedienung des Leap Motion Controllers abschneiden, mussten zudem auch unversierte Personen mit wenigen bis keinen Computerkenntnissen an der Untersuchung teilnehmen. Sie bildeten die Kontrollgruppe bei der Untersuchung. Akquiriert wurden die Probanden zum einen aus einer Gruppe von Bachelor Studenten der Medieninformatik an der Technischen Hochschule Mittelhessen, zum anderen aus einer Gruppe von hochschulexternen Personen mit geringen Computerkenntnissen. Beide Testgruppen waren gleich groß und setzten sich aus je acht Personen zusammen, sodass die Untersuchungen mit einer Population von insgesamt sechzehn Probanden durchgeführt wurden. Der zeitliche Rahmen der Untersuchung betrug in etwa zwanzig Stunden, verteilt auf einen Zeitraum von vier Tagen. Die Untersuchungsdauer belief sich für jeden Probanden auf etwa 35 bis 40 Minuten. Von dieser Zeit vielen etwa etwa 20 bis 25 Minuten die Bearbeitung der virtuellen Interaktionsszenarien mit Hilfe des Leap Motion Controllers.

6.2. Versuchsanordnung

Für die Durchführung der Untersuchung wurde eine Testumgebung ausgewählt, die eine Ablenkung der Probanden durch optische oder akustische Reize der Umwelt weitestgehend verhinderte. Die Umgebung gewährleistete zudem gleichbleibende Rahmenbedingungen zwischen den verschiedenen Probanden. Eine Maßnahme hierfür war der Einsatz von künstlichen Lichtquellen zur Ausleuchtung des Testaufbaus. Dies ermöglichte eine von der Tageszeit unabhängige, gleichbleibende Lichtsituation. Da Glühlampen und die darin enthaltene Infrarotstrahlung die Erkennungsleistung des Leap Motion Controllers negativ beeinflussen (siehe: Externe Lichtquellen 4.5.2), wurden für die Untersuchung Lichtquellen auf der Basis von LEDs eingesetzt.

Aus organisatorischen Gründen mussten die Untersuchungen der zwei Testgruppen an unterschiedlichen Standorten stattfinden. Während die Untersuchung mit den studentischen Probanden in einem kleinen Versuchsraum am Campus Friedberg der Technischen Hochschule Mittelhessen stattfand, wurde die Untersuchung mit den weniger computerversierten Testpersonen in einem privaten Bürozimmer durchgeführt. Da die grundlegende Versuchsanordnung sowie das technische Versuchsequipment unverändert blieben und auch die äußeren Rahmenbedingungen der Untersuchungsstandorte nahezu identisch waren, sind hierdurch jedoch keine Einflüsse auf die Nutzerleistung oder die Messergebnisse zu erwarten.

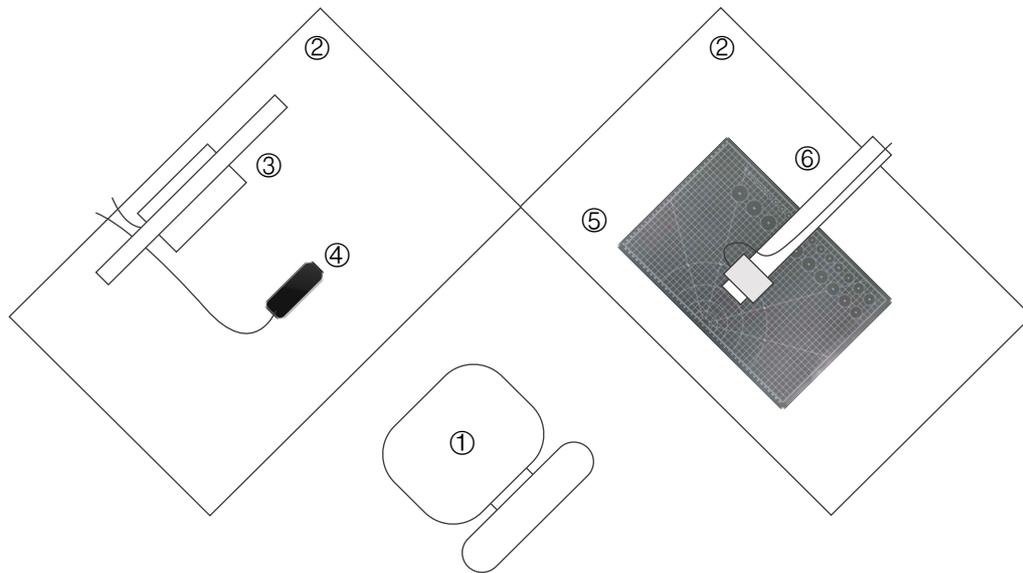


Abbildung 6.1: Versuchsanordnung bestehend aus einem Stuhl für den Probanden (1), zwei Tischen (2), einem Computermonitor (3) und dem Leap Motion Controller (4) für die virtuellen Interaktionsszenarien sowie eine Interaktionsfläche (5), Licht und eine Kamera (6) für die realen Interaktionsszenarien.

Die Versuchsanordnung (Abbildung 6.1) bestand aus zwei senkrecht zu einander stehenden, rechteckigen Tischen. Im durch die langen Seiten der Tische aufgespannten Bereich wurde ein Stuhl für den Probanden positioniert. Diese Tischanordnung ermöglichte einen unkomplizierten Wechsel zwischen den realen und virtuellen Interaktionsszenarien, ohne dass der Proband hierfür seinen Platz wechseln musste. Gleichzeitig gewährte sie eine gute Übersicht auf die Aktionen der Probanden.

Der aus der Sicht des Probanden rechte Tisch (Abbildung 6.2) diente zur Bearbeitung der Interaktionsszenarien mit den realen Objekten. Auf dem Tisch lag eine als Interaktionsfläche umfunktionierte Schneideunterlage. Diese wurde so positioniert, dass der Abstand zwischen ihrem Mittelpunkt und der vorderen Tischkante genau 24 cm betrug. Klebeband an den Ecken sorgte dafür, dass die Interaktionsfläche nicht versehentlich verrutschen konnte.

Auf der Interaktionsfläche selbst wurden die Bereiche für Start- und Zielpositionen eingemessen und farblich markiert. Zusätzlich befand sich auf der Interaktionsfläche eine elektrische Schaltung, die als Hilfsmittel für die Messung der Interaktionsdauer beim Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren* diente (siehe: 5.5.1 Messung der Interaktionsdauer). Am Tisch wurde zudem eine hölzerne Konstruktion befestigt, mit der eine Kamera sowie eine Lichtquelle oberhalb der Interaktionsfläche positioniert wurde. Die Kamera wurde so ausgerichtet, dass sie die Handbewegungen der Probanden aus der Aufsicht filmte. Sie diente in Verbindung mit der elektrischen Schaltung als Instrument zur Messung der Interaktionsdauer.

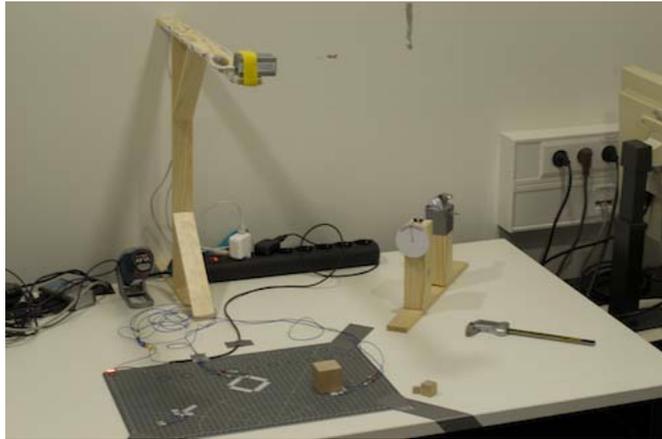


Abbildung 6.2: Versuchsanordnung für die realen Interaktionsszenarien

Der aus der Sicht des Probanden links stehende Tisch bildete den Arbeitsbereich für die virtuellen Interaktionsszenarien (Abbildung 6.3). Auf dem Tisch befanden sich lediglich ein Computermonitor als Ausgabegerät sowie der Leap Motion Controller zur Erfassung der Hände. Der Leap Motion Controller wurde so positioniert, dass der Abstand seines Ursprungspunkts zur vorderen Tischkante 24 cm betrug. Hierdurch wurde gewährleistet, dass die Probanden zum Erreichen korrespondierender Punkte in den realen- und virtuellen Interaktionsszenarien die gleichen Entfernungen mit ihren Händen zurücklegen. Auch hier wurde mit Hilfe von Klebeband dem versehentlichen Verrutschen des Controllers vorgebeugt. Sowohl der Computermonitor als auch der Leap Motion Controller waren mit einem Laptop verbunden. Auf dem Laptop lief die mit Unity erstellte prototypische Testsoftware, mit der die virtuellen Interaktionsszenarien umgesetzt wurden.

Bei dem eingesetzten Laptop handelte es sich um ein MacBook Pro mit einem 2,4 GHz Intel Core i5 Prozessor, 16 GB Arbeitsspeicher und einer Intel HD 3000 Grafikkarte. Als Betriebssystem kam Mac OS 10.9.5 zum Einsatz und als Laufzeitumgebung wurde die Unity Spiel-Engine in Version 4.5 genutzt.

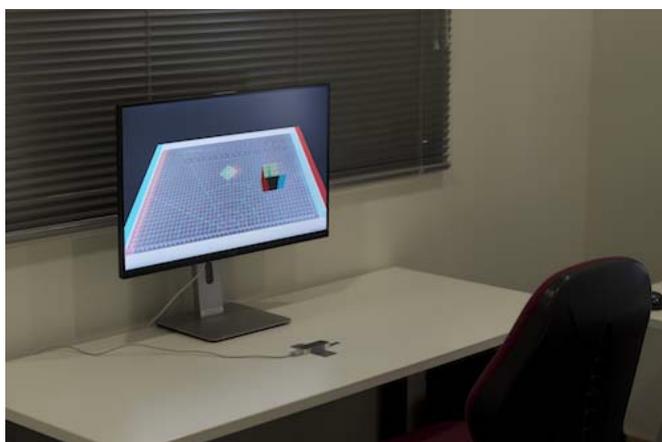


Abbildung 6.3: Versuchsanordnung für die virtuellen Interaktionsszenarien.

6.3. Ablauf

Zu Beginn der Untersuchung betrat der Proband den Untersuchungsraum geholt. Nach einer kurzen Begrüßung wurde er gebeten, auf dem für ihn vorgesehenen Stuhl Platz zu nehmen. Das Raumlicht wurde ausgeschaltet. Für die Beleuchtung wurden nun ausschließlich zwei LED-Strahler eingesetzt. Es folgte eine kurze Unterweisung, die in groben Zügen das Ziel der Untersuchung erklärte und die zwei Phasen des Versuchsablaufs beschrieb. Der Proband wurde dann vor dem rechten Tisch positioniert und nach seiner Händigkeit gefragt. Im Falle eines linkshändigen Probanden wäre nun die Versuchsanordnung angepasst worden. Hierdurch wurde sichergestellt, dass für Linkshänder die gleichen Ausgangsbedingungen vorlagen wie für die Rechtshänder.

Nun wurde die über der Interaktionsfläche positionierte Kamera aktiviert. Der Proband erhielt die Aufgabenbeschreibung für das Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren*. Die erste Aufgabe bestand darin einen realen Würfel mit einer Seitenlänge von 4 cm von der Startposition anzuheben und so schnell und genau wie möglich in einem farblich markiertem Zielbereich auf der Schneitunterlage abzulegen (Abbildung 6.4). Der Proband wurde angewiesen hierfür nur den Daumen und Zeigefinger zu verwenden. Trotz dieser Anweisung führten einige Probanden den Griff mit drei Fingern aus. In diesem Fall wurde die Ausgangssituation des Durchgangs wiederhergestellt und der Proband wurde gebeten den Würfel erneut und mit dem korrekten Griff in der Zielfläche abzulegen. Nachdem sich der Würfel in seiner Endposition befand, wurde protokolliert wie häufig die Testperson den Würfel neu gegriffen hat. Darüber hinaus erfolgte die Messung der Genauigkeit mit Hilfe eines digitalen Messschiebers. Nach dem Protokollieren der Messwerte durchlief der Proband zwei weitere Testdurchgänge mit Würfeln der Seitenlänge 2 cm und 1 cm.

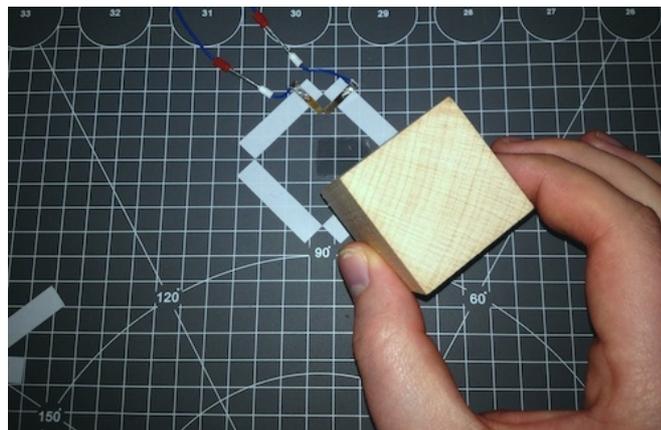


Abbildung 6.4: Proband bearbeitet das Interaktionsszenario „Würfel-Platzieren“

Nach den Durchgängen mit den drei verschiedenen Würfeln bearbeitete der Proband das Interaktionsszenario *Scheibe-Drehen*. Hierzu wurde in die Mitte der Interaktionsfläche eine Holzkonstruktion gestellt, an der eine kugelgelagerte Holzscheibe befestigt war (Abbildung 6.5). Diese Holzscheibe besaß einen Durchmesser von 6,4 cm und hatte eine Dicke von 1,7 cm. Die Drehachse der Scheibe befand sich in einer Höhe von 14 cm. Dem Probanden wurde zunächst wieder die Aufgabe erläutert.

Sie bestand darin, den auf der Scheibe sichtbaren Pfeil möglichst genau in die Null-Stellung zu drehen. Die Null-Stellung wurde durch eine feine Metallspitze markiert. Die Anweisung für den Probanden lautete, für die Greifbewegung nur den Daumen, Zeige- und Mittelfinger zu benutzen. Hiermit sollte sicher gestellt werden, dass für die Interaktion mit der Scheibe der Dreipunktgriff eingesetzt wurde.

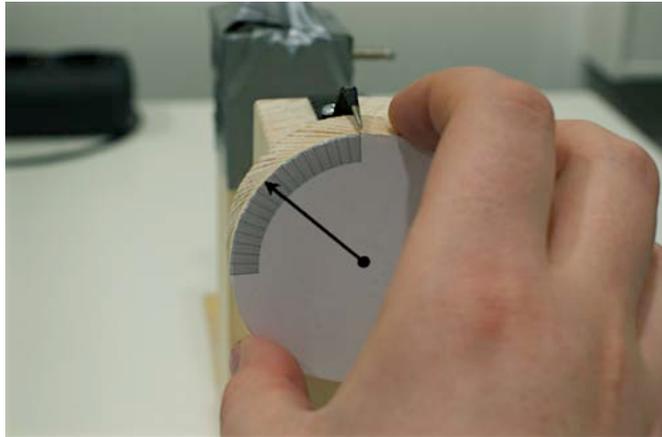


Abbildung 6.5: Proband bearbeitet das Interaktionsszenario „Scheibe-Drehen“

Nachdem der Proband den Pfeil in die Null-Stellung gedreht hatte, wurde protokolliert wie häufig die Finger von der Scheibe gelöst wurden um neu zu greifen. Des Weiteren wurde die rotatorische Abweichung der Scheibe in ihrer Endposition abgelesen. Eine angebrachte Winkelskala ermöglichte hierbei das Ablesen bis zu einer Genauigkeit von $0,5^\circ$. Die Abweichungen wurden jeweils schriftlich protokolliert. Das Interaktionsszenario wurde von jedem Probanden insgesamt dreimal bearbeitet, wobei die Startpositionen des Pfeils zwischen *links*, *unten* und *rechts* variierten.

Für das letzte Interaktionsszenario *Schlüssel-Umdrehen* wurde die erwähnte Holzkonstruktion gewendet. In der Mitte der Interaktionsfläche befand sich nun ein Schließzylinder mit eingestecktem Schlüssel (Abbildung 6.6). Die Drehachse des Schlüssels befand sich in einer Höhe von 14 cm. Dem Probanden wurde seine Aufgabe mitgeteilt, die darin bestand den Schlüssel um 180° nach rechts zu drehen, bis dieser den Anschlag erreicht. Der Proband wurde angewiesen den Schlüssel zwischen dem Daumen und dem seitlichen Zeigefinger zu greifen. Hiermit sollte verhindert werden, dass fälschlicherweise der Fingerspitzengriff eingesetzt wird, um den Schlüssel zu drehen.

Nach dem Abschluss des letzten Interaktionsszenarios mit realen Objekten wurde die Kamera über der Interaktionsfläche deaktiviert und der Proband wechselte an den linken Tisch. Die Testperson wurde zunächst angewiesen, das auf dem Computerbildschirm angezeigte Formular auszufüllen. Hierfür war lediglich eine Computermaus erforderlich, die sich auf dem Tisch befand. Das Formular enthielt Fragen nach Alter, Geschlecht und der Händigkeit, sowie Fragen bezogen auf die körperliche Verfassung. Der Proband bestätigte hier unter anderem, eine Sehhilfe anzulegen, sofern diese für die Computerarbeit erforderlich sei. Nach dem Bestätigen des Formulars erhielt der Proband die Anweisung, die auf dem Tisch liegende 3D-Brille anzulegen. Bei Personen, die für die Ar-

beit am Computer eine Brille benötigen, wurde die 3D-Brille vor die Sehhilfe gelegt und mit Isolierband fixiert, damit sie nicht verrutschen konnte.



Abbildung 6.6: Proband bearbeitet das Interaktionsszenario „Schlüssel-Umdrehen“

Nun begann die zweite Phase der Untersuchung. Die Reihenfolge der virtuellen Interaktionsszenarien war die gleiche wie bei der ersten Untersuchungsphase. Auch die Aufgabenstellungen bei den virtuellen Interaktionsszenarien blieben unverändert. Der Proband startete mit dem Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren*. Wie bereits in der ersten Phase der Untersuchung, bestand die Aufgabe darin einen Würfel möglichst schnell und genau auf einen farblich markierten Bereich abzulegen (Abbildung 6.7). Ebenso blieb die Anweisung erhalten, dass der Proband nur den Daumen und Zeigefinger für die Interaktion verwenden soll. Darüber hinaus erhielten die Probanden keine einführenden Instruktionen in Bezug auf die Handhabung und die Bedienung des Leap Motion Controllers. Hierdurch sollte in Erfahrung gebracht werden, ob und welche Probleme bei der erstmaligen Bedienung des für die Probanden unbekanntem Geräts auftraten.

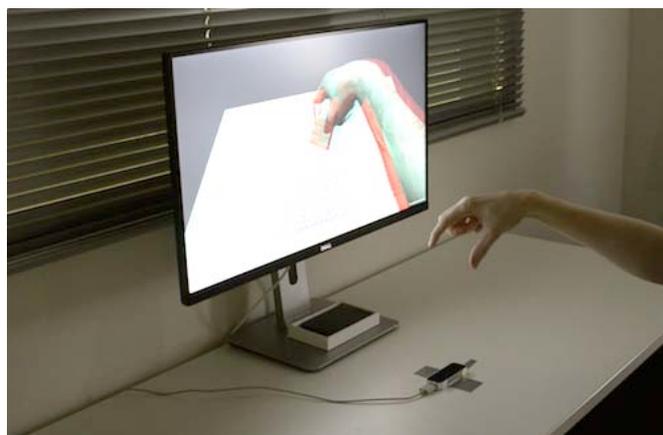


Abbildung 6.7: Proband platziert den virtuellen Würfel in die vorgegebene Zielfläche.

Im Unterschied zu den Tests mit den realen Interaktionsobjekten standen dem Proband für jeden Durchgang insgesamt drei Versuche zur Verfügung. Für das Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren* mit den drei Würfelgrößen bedeutete dies, dass es insgesamt neun Würfel zu platzieren galt. Die jeweils zusammengehörigen Versuche waren hierbei absolut identisch aufgebaut. Sobald keine Interaktion mehr mit den Würfeln stattfand, startete automatisch ein Countdown mit einem Zeitintervall von 10 Sekunden. Nach Ablauf dieser Zeitschwelle wurde der Versuch gewertet und die Ergebnisse von der Anwendung gespeichert. Mit der Platzierung des neunten Würfels wurde das virtuelle Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren* abgeschlossen.

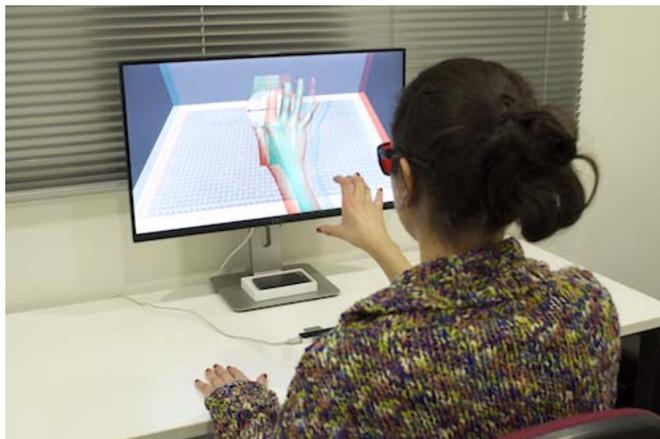


Abbildung 6.8: Probandin greift nach der virtuellen Scheibe beim Interaktionsszenario „Scheibe-Drehen“.

Entsprechend der Reihenfolge bei der ersten Phase der Untersuchung wurde nun das Interaktionsszenario *Scheibe-Drehen* bearbeitet. Analog zur Interaktion mit den realen Objekten bestand das Ziel darin, den Pfeil der Scheibe möglichst genau mit Hilfe des Dreipunktgriffs in die Null-Stellung zu bringen (Abbildung 6.8). Auch hier standen dem Proband pro Anfangsposition des Pfeils jeweils drei Versuche zur Verfügung, sodass insgesamt neun Drehungen der Scheibe vollzogen werden mussten.

Das letzte Interaktionsszenario der zweiten Untersuchungsphase bestand aus der Drehung des virtuellen Schlüssels (Abbildung 6.9). Auch hier bestand das Ziel darin, den Schlüssel um eine halbe Umdrehung nach rechts zu drehen. Der Proband wurde angewiesen, den aus der Interaktion mit dem realen Schlüssel bekannten Schlüsselgriff anzuwenden. Eine Variation der Größe oder der Startposition gab es bei diesem Interaktionsszenario nicht. Lediglich die Interaktionsdauer, sowie die Anzahl der benötigten Griffe wurden für dieses Interaktionsszenario untersucht.

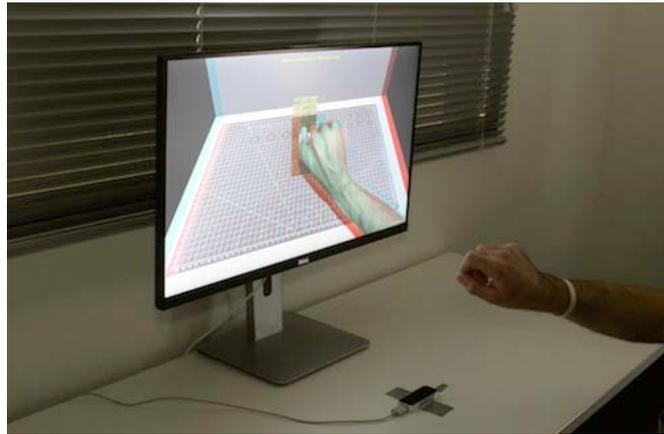


Abbildung 6.9: Proband bearbeitet das Interaktionsszenario „Schlüssel-Umdrehen“

Nach Abschluss aller Tests mit dem Leap Motion Controller erfolgte die subjektive Bewertung des Controllers. Hierfür wurde das elektronische Bewertungsfomular angezeigt (Abbildung 6.10). Mit der Bestätigung des Bewertungsbogens endete die etwa vierzigminütige Untersuchung. Als kleines Dankeschön durfte sich der Teilnehmer an den für ihn bereit gestellten Lebensmitteln bedienen. Es folgte die Verabschiedung des Probanden. Im letzten Schritt wurde die 3D-Brille desinfiziert und die Versuchsanordnung für den nächsten Probanden vorbereitet.



Abbildung 6.10: Proband bewertet seine Erfahrung mit dem Leap Motion Controller.

7. Kapitel

Ergebnisse

7.1. Probanden

An der praktischen Untersuchungsphase dieser Masterarbeit nahmen insgesamt sechzehn Personen teil. Das Probandenkollektiv setzte sich aus zehn männlichen und sechs weiblichen Testpersonen zusammen, die allesamt Rechtshänder waren. Das Probandenkollektiv unterteilte sich in eine Experimental- und eine Kontrollgruppe.

Bei der Experimentalgruppe handelte es sich um studentische Teilnehmer mit Erfahrung im Bereich der 3D-Objektmanipulation. Die Kontrollgruppe bildeten Testpersonen ohne vergleichbare Kompetenzen.

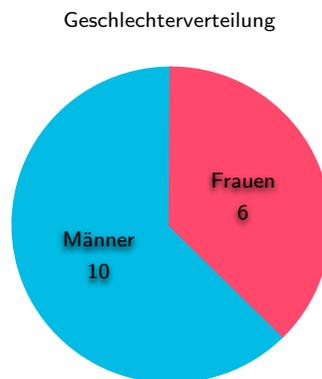


Abbildung 7.1: Geschlechterverteilung im Probandenkollektiv

Die zehn männlichen Teilnehmer der Untersuchung verteilten sich zu sechs Personen auf die Experimentalgruppe und zu vier Personen auf die Kontrollgruppe. Von den sechs weiblichen Teilnehmerinnen befanden sich zwei Personen in der Experimentalgruppe und vier Personen in der Kontrollgruppe (Abbildung 7.2).

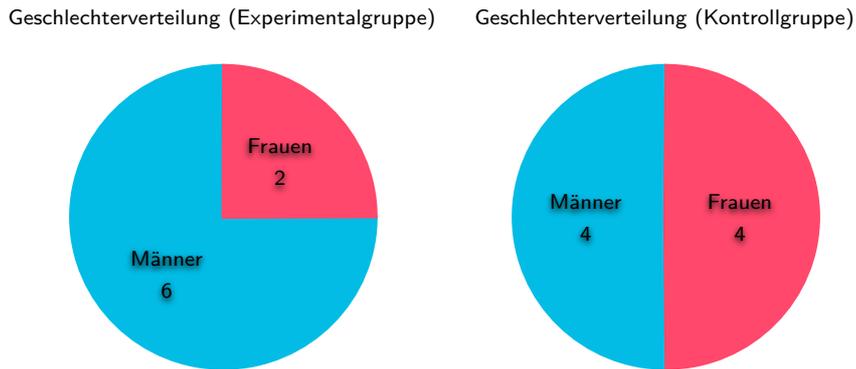


Abbildung 7.2: Geschlechterverteilung in den Untersuchungsgruppen – Zwei Frauen und sechs Männer in der Experimentalgruppe (links) sowie vier Frauen und vier Männer in der Kontrollgruppe (rechts).

Während die jüngste Testperson 22 Jahre alt war, betrug das Alter der ältesten Testperson 62 Jahre. Das durchschnittliche Alter aller Testpersonen lag bei 33 Jahren. Bezogen auf die beiden Testgruppen, lag das durchschnittliche Alter in der Experimentalgruppe bei 27 Jahren, während die Personen aus der Kontrollgruppe im Durchschnitt 39 Jahre alt waren. Abbildung 7.3 veranschaulicht die Altersverteilung der Testpersonen, gruppiert nach Altersbereichen. Demnach war der größte Teil der Testpersonen zwischen 31 und 35 Jahren alt.

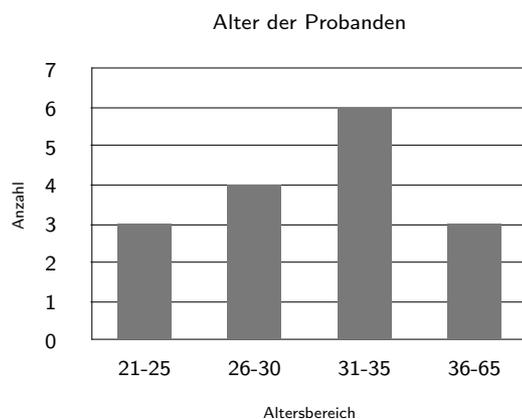


Abbildung 7.3: Altersverteilung im Probandenkollektiv

Alle Probanden sicherten zu, dass zum Zeitpunkt der Untersuchungen keine Verletzungen im Hand-, Arm- oder Schulterbereich vorlagen und dass sie nicht unter dem Einfluss von Medikamenten, Alkohol oder Drogen standen. Probanden, die für die Arbeit am Computer eine Brille oder Kontaktlinsen benötigten, hatten diese während den Untersuchungen auf- oder eingesetzt.

7.2. Beobachtungen

Um das Verhalten der Probanden bei der erstmaligen Bedienung des Leap Motion Controllers zu dokumentieren, wurden während der Durchführung der virtuellen Interaktionsszenarien Videoaufnahmen angefertigt. Anhand dieser Aufnahmen sollten etwaige Schwierigkeiten beim Umgang mit dem für die Probanden unbekanntem Eingabegerät aufgezeigt werden. Zusätzlich sollten die Aufnahmen Aufschluss darüber geben, welche Verhaltensweisen im Umgang mit dem Controller zu erwarten sind. Die aus den Videoaufnahmen gewonnenen Informationen werden in den nachfolgenden Abschnitten eräutert.

7.2.1. Erstkontakt

Ein Aspekt, der durch die Videoaufzeichnungen betrachtet werden sollte, war der erste Kontakt der Probanden mit dem Leap Motion Controller. Hierdurch sollte sich zeigen, ob bestimmte Probleme oder Verhaltensweisen erkennbar sind, wenn eine Person zum ersten Mal mit dem Leap Motion Controller interagiert.

Ein Problem, welches bei dreien der Probanden zu beobachten war, äußerte sich darin, dass der virtuelle Würfel unmittelbar beim Eintritt der Hand in das Interaktionsvolumen unbeabsichtigt verschoben wurde (Abbildung 7.4). Die Ursache hierfür lag augenscheinlich in einer ungünstigen Kombination aus Eintrittsposition, Eintrittsgeschwindigkeit und der Haltung der Hand beim Eintritt. Der virtuelle Würfel wurde hierbei entweder durch die ungewollte Berührung mit den Fingerspitzen oder durch den irrtümlichen Kontakt mit dem Handrücken von seiner Startposition verschoben.

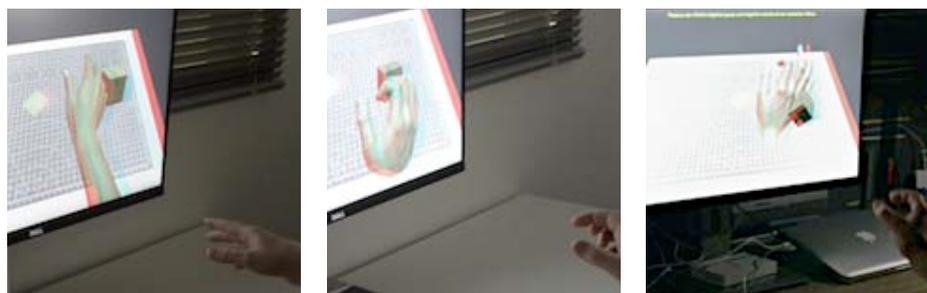


Abbildung 7.4: Frontaler Eintritt in das Interaktionsvolumen – Der frontale Eintritt in das Interaktionsvolumen des Leap Motion Controllers führte bei drei Testpersonen zum unbeabsichtigten Verschieben des virtuellen Würfels.

Der überwiegende Teil der Probanden führte die Hand eher zaghaf und mit einer langsamen Bewegung in das Interaktionsvolumen des Leap Motion Controllers ein. Darüber hinaus wählten die meisten Probanden intuitiv eine Eintrittsposition oberhalb des virtuellen Würfels (Abbildung 7.5). Die Gefahr, den Würfel unbeabsichtigt von der Startposition zu verrücken, war hierbei augenscheinlich geringer, als bei einer frontalen Eintrittsposition. Eine mögliche Erklärung hierfür liegt in der Tatsache, dass die Distanz vom oberen Rand des Interaktionsvolumens zum virtuellen Würfel bei

etwa 60 cm lag, während der Abstand vom vorderen Randbereich des Interaktionsvolumens zum virtuellen Würfel nur 30 cm betrug.



Abbildung 7.5: Eintrittsposition oberhalb des Interaktionsobjekts – Der überwiegende Teil der Probanden griff intuitiv von oben in das Interaktionsvolumen des Leap Motion Controllers. Die Gefahr, das Interaktionsobjekt hierbei unabsichtlich zu verschieben ist geringer als beim frontalen Eintritt in das Interaktionsvolumen.

Nach einer kurzen Orientierungszeit waren fast alle Probanden in der Lage, die virtuelle Hand in die Nähe des Würfels zu bringen. Lediglich bei einer Testperson aus der Kontrollgruppe verlief der Erstkontakt mit dem Leap Motion Controller nicht so reibungslos. Die Testperson versuchte den auf dem Bildschirm angezeigten virtuellen Würfel direkt mit der realen Hand zu greifen, statt hierzu die virtuelle Hand zu verwenden (Abbildung 7.6). Eine anschließende Befragung der Testperson ergab, dass die Funktionsweise des Leap Motion Controllers zunächst falsch interpretiert wurde.

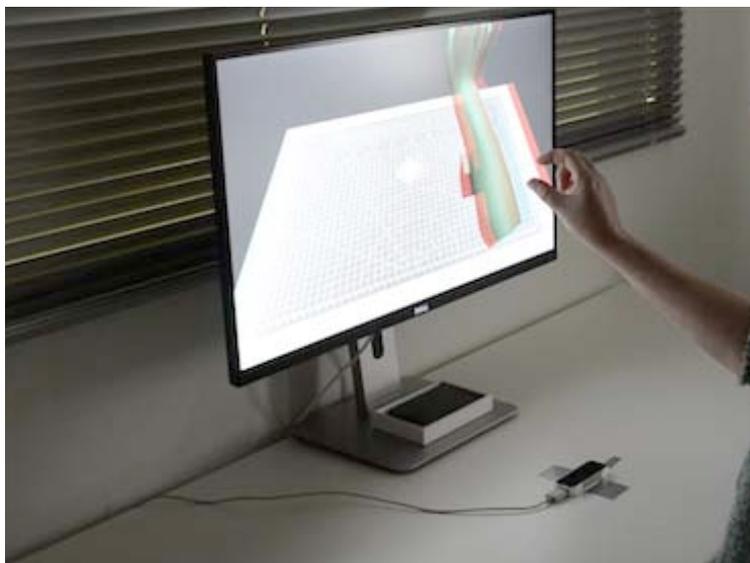


Abbildung 7.6: Fehlinterpretation der Funktionsweise – Eine Testperson versuchte irrtümlicherweise den auf dem Bildschirm dargestellten Würfel mit der realen Hand zu greifen.

7.2.2. Greiftechniken

In Kapitel 5 wurde beschrieben, dass es bei den virtuellen Interaktionsszenarien prinzipiell möglich ist, durch die Geometrie des Interaktionsobjekt zu greifen. Dies war jedoch nicht zwingend erforderlich um das Interaktionsobjekt sicher festzuhalten. Auch ohne die Finger vollständig zusammenzuführen konnte das Interaktionsobjekt gegriffen werden. Während den praktischen Untersuchungen oblag es den Testpersonen, welche Greiftechnik angewendet wurde. Sie erhielten diesbezüglich keine Vorgaben oder Anweisungen.

Die Betrachtung der Greiftechniken beim größten der drei Würfel ergab, dass der überwiegende Teil der Testpersonen beim Greifvorgang den Daumen und Zeigefinger nicht vollständig schloss (Abbildung 7.7). Die Testpersonen orientierten sich beim Greifen also an den geometrischen Grenzen des virtuellen Würfels. Lediglich zwei der sechzehn Probanden schlossen die beiden Finger so weit, dass diese sich beim Greifen berührten. Ein ganz ähnliches Bild zeigte sich auch bei den beiden anderen Würfelgrößen. Während beim Würfel der mittleren Größe zwei Probanden die Finger vollständig schlossen, waren es beim kleinsten Würfel drei Personen, die Daumen und Zeigefinger vollständig zusammenführten.

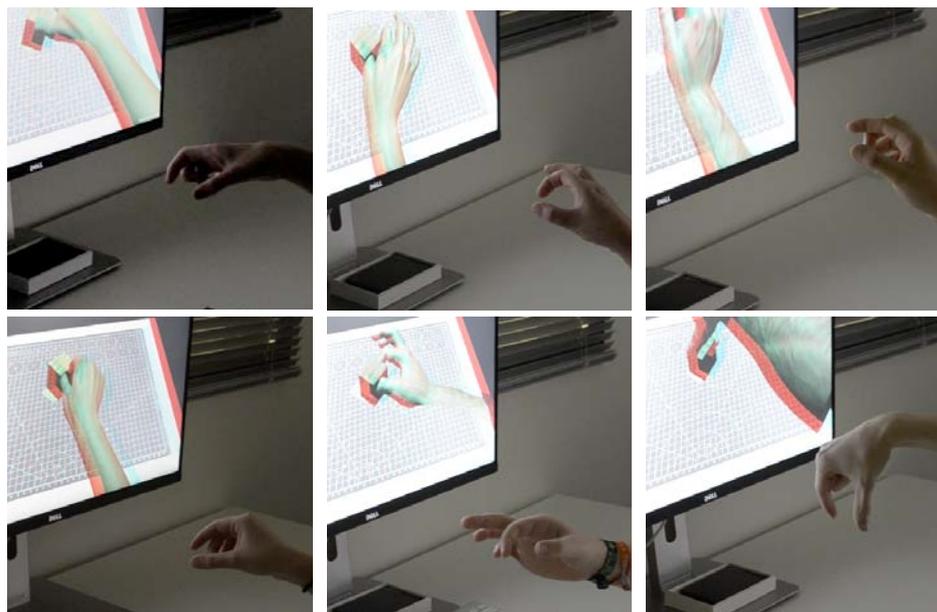


Abbildung 7.7: Greiftechniken der Probanden beim Interaktionsszenario „Würfel-Platzieren“. Der überwiegende Teil der Probanden ließ die Finger während dem Griff geöffnet.

Insgesamt verliefen die Greifvorgänge beim Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren* unproblematisch. Lediglich zwei Probleme konnten identifiziert werden: so führte beispielsweise das Anwinkeln von Mittel-, Ring- und kleinem Finger in einigen Situationen dazu, dass der Leap Motion Controller die Bewegungen von Daumen und Zeigefinger während dem Greifvorgang nicht richtig erfassen konnte. Begünstigt wurde das Problem durch eine Ausrichtung der Hand, bei der dem Leap Motion Controller die Erfassung von Daumen und Zeigefinger durch die angewinkelten Finger erschwert

wurde (Abbildung 7.8). Es handelte es sich hierbei um das bereits erläuterte Problem der Selbstverdeckung bei optischen Tracking-Verfahren (siehe: 4.5.3 Selbstverdeckung).

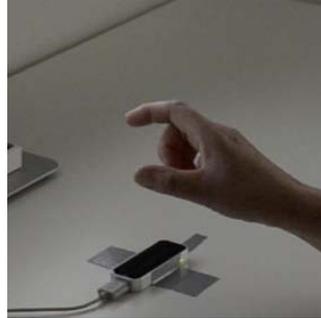


Abbildung 7.8: Angewinkelte Finger – Eine Testperson winkelt beim Greifvorgang Mittel-, Ring- und kleinen Finger an. Dies führte mitunter zu einer fehlerhaften Erkennung der Hand.

Ein weiteres Problem betraf die Interaktion mit dem kleinsten Würfel. Mit einer Seitenlänge von nur 1 cm besaß dieser ein kleineres Volumen als die Fingerspitzen der virtuellen Hand. Bedingt durch die Tatsache, dass die virtuellen Hände in die Geometrie der virtuellen Interaktionsobjekte eindringen konnten, war es den Testpersonen in einigen Fällen nicht mehr möglich, den Würfel zu sehen. Durch das Fehlen taktiler Rückmeldungen waren die Probanden auch nicht in der Lage zu fühlen, ob sich der Würfel noch in ihrem Griff befindet. Dies führte teilweise dazu, dass ein fehlerhaftes Greifen zunächst unbemerkt blieb. Erst beim Öffnen stellten die Testpersonen dann fest, dass sich der Würfel nicht mehr zwischen Daumen und Zeigefinger befand.

Ein ähnliches Problem erschwerte auch das präzise Ablegen des kleinen Würfels auf der vorgesehenen Zielfläche. Den Testpersonen wurde durch die Finger der virtuellen Hand die Sicht auf die Zielfläche versperrt. Im Unterschied zu den realen Interaktionsszenarien konnten die Probanden während den virtuellen Interaktionsszenarien den Blickwinkel auf die Zielfläche nicht durch eine Bewegung ihres Kopfes variieren. In Folge dessen ließen einige Testpersonen den virtuellen Würfel auf die Zielfläche fallen, statt ihn darauf abzulegen.

Hieraus folgt die Erkenntnis, dass die Abmessungen der virtuellen Interaktionsobjekte, bei einer direkten Manipulation mit Hilfe des Leap Motion Controllers, größer sein sollten als die Fingerspitzen des verwendeten Handmodells. Hierdurch würde vermieden, dass den Nutzern die Sicht auf das Interaktionsobjekt verwehrt wird und damit die einzige Rückmeldung des Objekts verloren geht.

Das Ziel des Interaktionsszenarios *Scheibe-Drehen* bestand darin, eine virtuelle Scheibe um ihre Drehachse zu rotieren, bis ein Pfeil auf der Scheibe möglichst genau auf eine vorgegebene Markierung zeigte. Die Videoaufzeichnungen ließen erkennen, dass viele Probanden Schwierigkeiten damit hatten, die Scheibe gleich beim ersten Versuch zu greifen. Dies lag unter anderem daran, dass die Freiheitsgrade der Scheibe stark eingeschränkt waren, sodass diese nicht den Bewegungen der Hand folgte, sondern in einer festen räumlichen Position verharrte. Gleichzeitig begünstigte die

kreisrunde, symmetrische Form der Scheibe, dass ein erfolgreiches Greifen nur anhand der Drehbewegung des Pfeils erkannt werden konnte. Hierin bestand also bereits ein großer Unterschied zu den virtuellen Würfeln aus dem vorherigen Interaktionsszenario. Diese waren in den Freiheitsgraden uneingeschränkt und gaben somit gut erkennbare Rückmeldungen durch die translatorischen und rotatorischen Bewegungen auf allen Achsen.

Eine weitere Ursache, die das sichere Greifen der Scheibe erschwerte, waren auch bei diesem Interaktionsszenario die fehlenden taktilen Rückmeldungen der Scheibe. Die Scheibe ließ sich erst durch den gleichzeitigen Kontakt mit Daumen, Zeige- und Mittelfinger drehen. Dadurch, dass die Testpersonen nicht fühlen konnten, zu welchem Zeitpunkt der Kontakt zur Scheibe bestand, mussten sie beim Greifen kontinuierlich die Position des Pfeils beobachten, da nur dieser einen Rückschluss auf den erfolgten Griff zuließ.

Sobald der Griff zur Scheibe erfolgreich hergestellt wurde, konnte beobachtet werden, dass die Scheibe grundsätzlich sehr präzise der Drehung des Handgelenks folgte. Bei der Drehung der Scheibe konnte eine allgemeine Herangehensweise der Testpersonen ausgemacht werden: obwohl sie zuvor darüber in Kenntnis gesetzt wurden, dass ein Umgreifen bei der Aufgabe erlaubt ist, wurde stets versucht den, Pfeil schon mit dem ersten Griff auf die Zielmarkierung zu drehen. Hierdurch führten sie unbewusst eine Situation herbei, bei der es vermehrt zur Selbstverdeckung der Finger durch den Handrücken kam (Abbildung 7.9). Dies führte dazu, dass sich der Pfeil zwar auf der Zielmarkierung befand, das Lösen des Griffs aber unter Umständen nicht korrekt erkannt werden konnte. Einige der Testpersonen entgegnetem diesem Problem, indem sie ihre Hand ruckartig aus dem Interaktionsvolumen zogen, wobei sich jedoch häufig der Pfeil wieder von der Zielmarkierung wegdrehte.

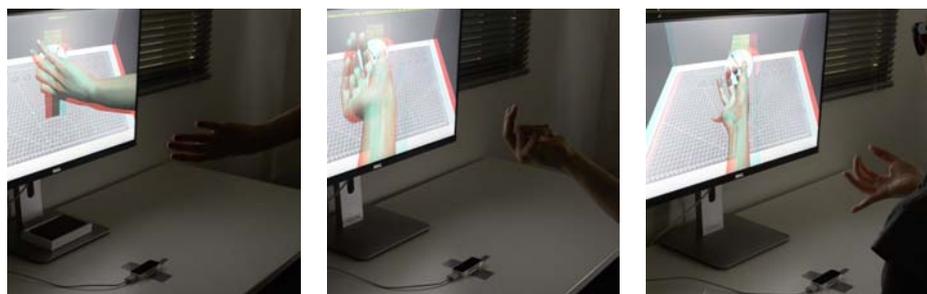


Abbildung 7.9: Nach oben gerichtete Finger – Durch die Drehung des Handrückens zum Leap Motion Controller verschlechtert sich die Erkennung der Finger.

Durch das Drehen der Scheibe um kleinere Winkel und das mehrmalige Umgreifen mit der Hand, gelang es dann den Testpersonen eine akzeptable Genauigkeit beim Positionieren des Pfeils zu erreichen. Da hier nun die Handfläche zum Leap Motion Controller zeigte, konnte dieser die Finger und das Lösen des Griffs besser erkennen.

Beim Interaktionsszenario *Schlüssel-Umdrehen* konnten kaum Unterschiede im Verhalten der Testpersonen festgestellt werden. Lediglich eine der Testpersonen hatte beim Ausführen des Schlüsselgriffs die reale Hand bereits so gedreht, dass sich diese aus anatomischen Gründen nicht mehr um 180° nach rechts drehen konnte (Abbildung 7.10).

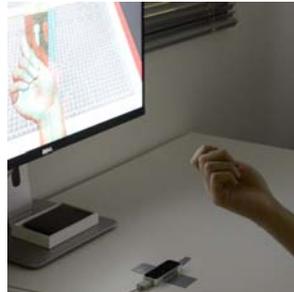


Abbildung 7.10: Falsch angesetzte Hand – Eine Testperson setzte beim Greifen nach dem virtuellen Schlüssel die Hand falsch an. Dies führte dazu, dass die Hand nicht um 180° nach rechts gedreht werden konnte.

Unabhängig von der Art des Testszenarios kam es vereinzelt zu Situationen, bei denen das virtuelle Handmodell nicht korrekt dargestellt wurde (Abbildung 7.11). Dies trat insbesondere dann auf, wenn die Hand nicht in einer „neutralen“ Stellung in das Interaktionsvolumen geführt wurde. Dies bedeutet, dass die Handfläche zum Leap Motion Controller gedreht ist, und die Finger weitestgehend ausgestreckt sind. Bei beiden Untersuchungsgruppen konnte beobachtet werden, dass die Testpersonen in solch einem Fall intuitiv die Hand aus dem Interaktionsvolumen nahmen. Teilweise ging diese Handlung mit einem Ausschütteln selbiger einher. Beim erneuten Einführen der Hand in das Interaktionsvolumen, wurde diese dann in den meisten Fällen korrekt erkannt.

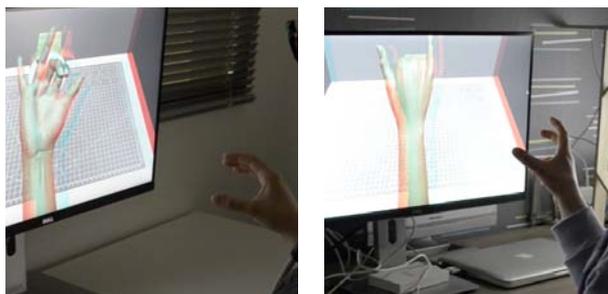


Abbildung 7.11: Fehlerhaft erkannte Hände – Beim Einführen der Hand in das Interaktionsvolumen wurde das virtuelle Handmodell nicht korrekt berechnet.

7.3. Messergebnisse

Nachdem in den drei vorausgehenden Abschnitten die Beobachtungen während der Untersuchung dargelegt wurden, sollen die nachfolgenden Abschnitte nun eine Übersicht auf die Messergebnisse liefern. Betrachtet werden die Messergebnisse aus den realen- und virtuellen Interaktionsszenarien, jeweils unterteilt in Experimental- und Kontrollgruppe.

7.3.1. Genauigkeit

Bei der Betrachtung der translatorischen Abweichungen beim Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren* fällt zunächst auf, dass die Abweichungen beim Positionieren der realen Objekte deutlich geringer ausfällt, als beim Positionieren der virtuellen Würfel. So bewegten sich die mittleren translatorische Abweichungen bei den realen Würfeln in einem Bereich von 1,03 mm 2,14 mm, während die mittleren translatorischen Abweichungen bei der Positionierung der virtuellen Würfel in einem Bereich zwischen 2,21 mm und 22,63 mm lagen.

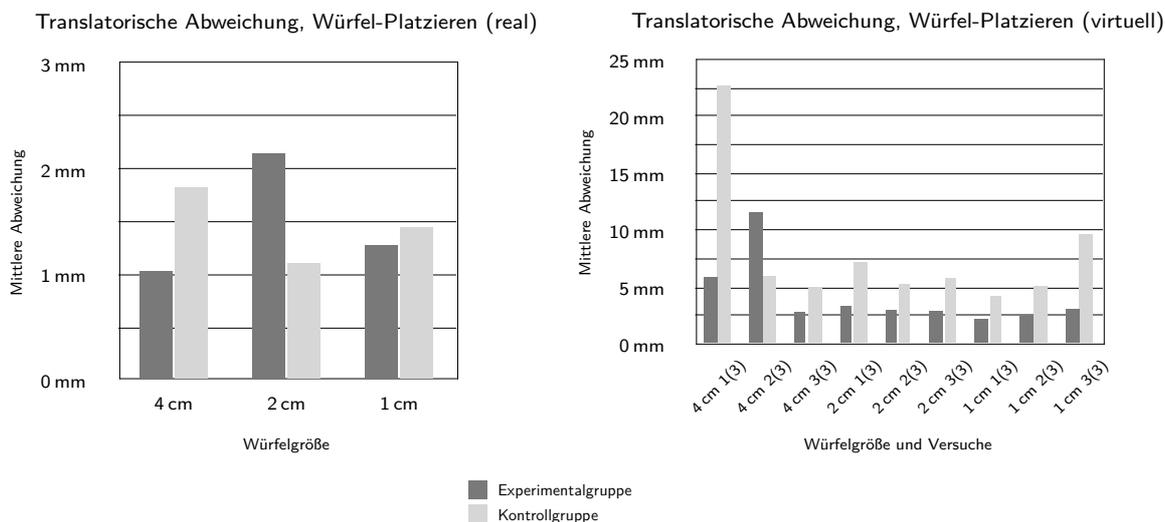


Abbildung 7.12: Translatorische Abweichung beim „Würfel-Platzieren“ – Durchschnittliche translatorische Abweichungen bei den realen Würfeln (links) und bei den virtuellen Würfeln (rechts).

Im rechten Diagramm von Abbildung 7.12 lässt sich bei beiden Versuchsgruppen im ersten und zweiten Versuch eine deutlich höhere Abweichung im Verhältnis zu den restlichen Versuchen erkennen. Dies erklärt sich durch den Erstkontakt mit dem Leap Motion Controller. Die Experimentalgruppe erreichte hierbei mit 5,88 mm eine fast vierfach geringere translatorische Abweichung, als die Testpersonen der Kontrollgruppe. Beim zweiten Versuch mit dem großen Würfel (4cm Seitenlänge) erreichte die Experimentalgruppe dagegen nur eine mittlere Abweichung von 11,51 mm, während die Kontrollgruppe mit 5,95 mm besser abschnitt. In den restlichen Versuchen lagen die mittleren translatorischen Abweichungen der Experimentalgruppe meist in einem Bereich um 2,5 mm, während sich die mittleren Abweichungen der Kontrollgruppe, bis auf den letzten Versuch, bei etwa 5 mm befanden.

Augenscheinlich schnitt also die Experimentalgruppe in Bezug auf die translatorische Abweichung besser ab, als die Kontrollgruppe. Eine Überprüfung dieser Vermutung mit Hilfe von Zweistichproben-t-Tests ergab jedoch, dass grundsätzlich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Gruppen aufgezeigt werden konnten.

Lediglich für den Durchgang mit der mittleren Würfelgröße (2 cm Seitenlänge) konnte nachgewiesen werden, dass die Experimentalgruppe signifikant geringere Abweichungen erzielte, als die Kontrollgruppe. Hierbei wurden die translatorischen Abweichungen aus den Versuchen 1, 2 und 3 der jeweiligen Versuchsgruppen zusammengefasst und gegeneinander getestet. Tabelle 7.1 zeigt, dass die Nullhypothese mit einem Signifikanzwert von $P = 0,0036$ verworfen werden konnte. Der nebenstehende Plot veranschaulicht die Unterschiede zwischen den beiden Gruppen.

	Würfel-Platzieren, 2cm, translatorische Abweichung
\bar{x}	3,0420
\bar{y}	6,0383
σ_x	1,8907
σ_y	4,4076
H_0	$\mu_x = \mu_y$
H_1	$\mu_x \neq \mu_y$
α	0,05
d_f	46
T_{krit}	2,0128
T	3,0605
P	0,0036

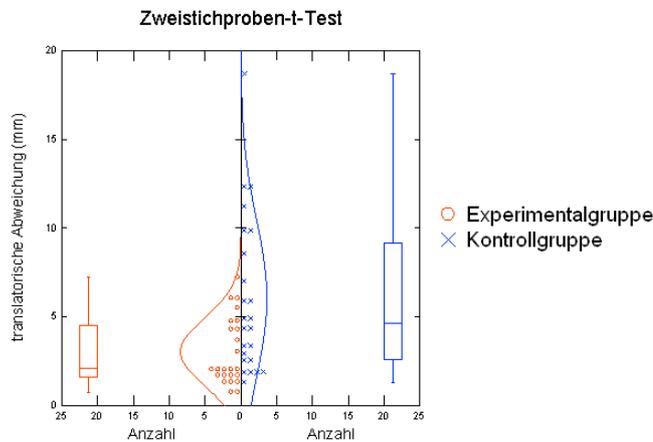


Tabelle 7.1: Ergebnis des Zweistichproben-t-Tests für die translatorische Abweichung beim Interaktionsszenario „Würfel-Platzieren“ mit der mittleren Würfelgröße. Die Nullhypothese wurde mit einem Signifikanzwert von $P = 0,0036$ verworfen. Es konnte somit ein hoch signifikanter Unterschied zwischen der Experimentalgruppe (\bar{x}) und der Kontrollgruppe (\bar{y}) aufgezeigt werden.

Gemessen wurden auch die rotatorischen Abweichungen zwischen der Zielfläche und der Grundfläche der Würfel. Bei den Durchgängen mit den realen Würfeln, ergaben sich in Abhängigkeit von der Würfelgröße, Abweichungen in einem Bereich zwischen $0,84^\circ$ und $3,87^\circ$ (Abbildung 7.13, links). Deutlich erkennbar sind die steigenden rotatorischen Abweichungen in Abhängigkeit von der Würfelgröße. Beide Versuchsgruppen erzielten hierbei im Durchschnitt annähernd die gleichen Ergebnisse. Auch beim Positionieren der virtuellen Würfel ist erkennbar, dass mit abnehmender Größe des Interaktionsobjekts, die rotatorischen Abweichungen zur Zielfläche steigen (Abbildung 7.13, rechts). Dies ist insofern eine interessante Erkenntnis, da die zuvor betrachteten translatorischen Abweichungen trotz der kleiner werdenden Würfelgrößen, annähernd auf einem gleichbleibenden Niveau verharrten. Die Vermutung liegt hierdurch nahe, dass es für die Testpersonen grundsätzlich leichter war die translatorische Position der Zielfläche zu treffen, als eine korrekte Ausrichtung des Würfels auf selbiger zu erreichen. Ein signifikanter Unterschied zwischen der Experimentalgruppe und der Kontrollgruppe konnte beim virtuellen Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren* nicht nachgewiesen werden.

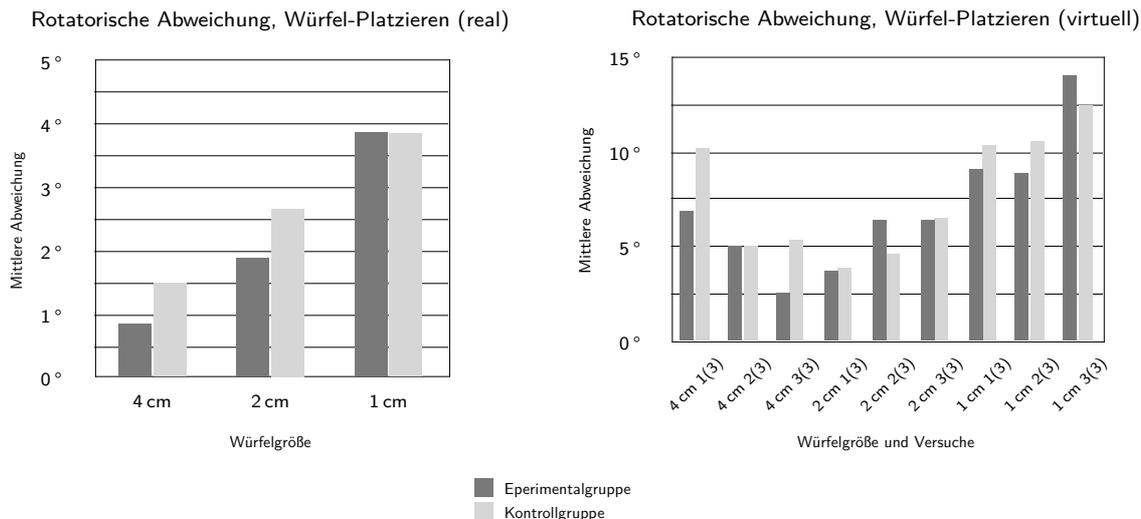


Abbildung 7.13: Rotatorische Abweichungen beim „Würfel-Platzieren“ – Durchschnittliche rotatorische Abweichungen bei den realen Würfeln (links) und bei den virtuellen Würfeln (rechts).

Für das Interaktionsszenario *Scheibe-Drehen* wurde die Genauigkeit gemessen, mit der die Testpersonen den Pfeil auf die vorgegebene Markierung drehten. Abbildung 7.14 veranschaulicht die erhobenen Messwerte, die aus den Untersuchungen mit der realen und virtuellen Scheibe hervorgingen.

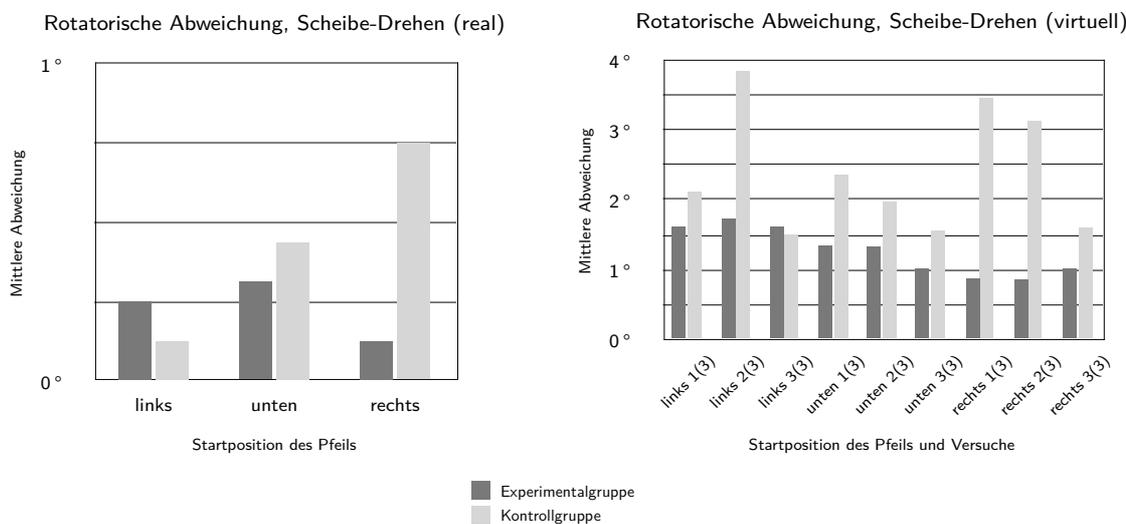


Abbildung 7.14: Rotatorische Abweichungen beim „Scheibe-Drehen“ – Durchschnittliche rotatorische Abweichungen bei der realen Scheibe (links) und der virtuellen Scheibe (rechts).

Im Falle der realen Scheibe erreichten die Testpersonen beider Gruppen im Mittel eine Genauigkeit von unter 0,5°. Bei der Startposition des Pfeils von rechts, erreichte die Kontrollgruppe jedoch nur eine Genauigkeit von durchschnittlich 0,75°. Im Vergleich dazu wurde beim Drehen der virtuellen Scheibe nur in zwei Versuchen eine mittlere Genauigkeit von unter 1° erreicht. Beim Vergleich der zwei Versuchsgruppen ist zu erkennen, dass die Experimentalgruppe durchschnittlich geringere Ab-

weichungen erzielte, also die Scheibe insgesamt genauer auf die Zielmarkierung drehte. Nach Durchführung dreier t-Tests für die rotatorischen Abweichungen bei jeder Startposition, konnte allerdings nicht nachgewiesen werden, dass die Experimentalgruppe signifikant bessere Werte erzielte.

7.3.2. Interaktionsdauer

Mit dem Qualitätskriterium *Interaktionsdauer* wurde gemessen, wie viel Zeit die Testpersonen bis zum Abschluss eines Interaktionsszenarios benötigten. Die Interaktionsdauer wurde als Maß für die Effizienz des Leap Motion Controllers in Bezug auf die Durchführung von Präzisionsgesten gewählt.

Für das Positionieren der realen Würfel benötigten beide Versuchsgruppen im Schnitt zwischen 2,0 und 3,0 s. Den Messwerten konnte entnommen werden, dass die Kontrollgruppe hierbei im Durchschnitt 0,4 s langsamer war.

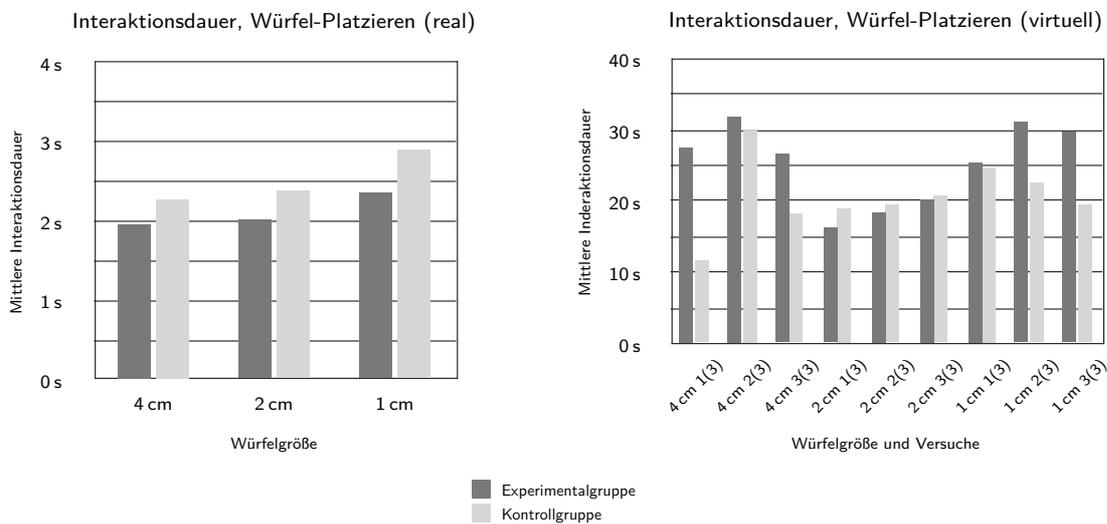


Abbildung 7.15: Interaktionsdauer beim „Würfel-Platzieren“ – Durchschnittliche Interaktionsdauer beim Platzieren der realen Würfel (links) und der virtuellen Würfel (rechts).

Für die Positionierung der virtuellen Würfel benötigten die Testpersonen im Durchschnitt etwa 10,0 bis 30,0 s. Interessant ist die Betrachtung der Interaktionsdauer bei Erstkontakt mit dem Leap Motion Controller: während die Kontrollgruppe im Durchschnitt 11,7 s benötigte, um den virtuellen Würfel auf der Zielfläche zu positionieren, dauerte dies bei der Experimentalgruppe mit 27,6 s mehr als doppelt so lange. Ein Blick auf die zuvor betrachtete Genauigkeit zeigt jedoch, dass die kürzere Interaktionsdauer der Kontrollgruppe zu Lasten der Präzision ging. Eine mögliche Erklärung hierfür liegt in der allgemeinen Annahme, dass sich die Abweichung beim Positionieren des Würfels antiproportional zu der dafür benötigten Dauer verhält. Ähnliches lässt sich auch bei der Betrachtung des dritten Versuchs mit dem großen Würfel (4 cm Seitenlänge) und dem dritten Versuch mit dem kleinen Würfel (1 cm Seitenlänge) feststellen. Auch hier benötigte die Kontrollgruppe im Durchschnitt weniger Zeit, verursachte dafür jedoch die höheren Abweichungen. Bei den übrigen Versuchen gab es hingegen nur geringe Unterschiede bei der Interaktionsdauer, sodass kein signifi-

kanter Unterschied zwischen den beiden Versuchsgruppen zu erwarten war. Letzteres wurde dann auch durch die durchgeführten t-Tests für die drei Würfelgrößen verifiziert.

Auch für das Interaktionsszenario *Schlüssel-Umdrehen* wurde die Interaktionsdauer erfasst. Das Ziel dieses Interaktionsszenarios bestand darin, einen im Schließzylinder steckenden Schlüssel um 180° zu drehen. Gemessen wurde jeweils die Zeit zwischen dem ersten Greifen des Schlüssels und dem Erreichen der 180° Stellung. Die Messwerte ergaben, dass die die Experimentalgruppe und die Kontrollgruppe mit 1,59 s und 1,84 s annähernd gleich viel Zeit benötigten, um den realen Schlüssel umzudrehen.

Ein anderes Bild zeigte sich beim Drehen des virtuellen Schlüssels. Hier benötigten die Testpersonen der Kontrollgruppe im Schnitt etwa doppelt solange, wie die Teilnehmer der Experimentalgruppe (Abbildung 7.16, rechts). Den Messwerten konnte zudem entnommen werden, dass beide Versuchsgruppen im dritten Versuch nur etwa halb so lang für das Umdrehen des Schlüssels benötigten, als für den ersten Versuch. Obwohl das Schaubild zunächst einen signifikanten Unterschied zwischen den beiden Versuchsgruppen vermuten lässt, konnte Aufgrund einer hohen Streuung in den Messwerten kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden.

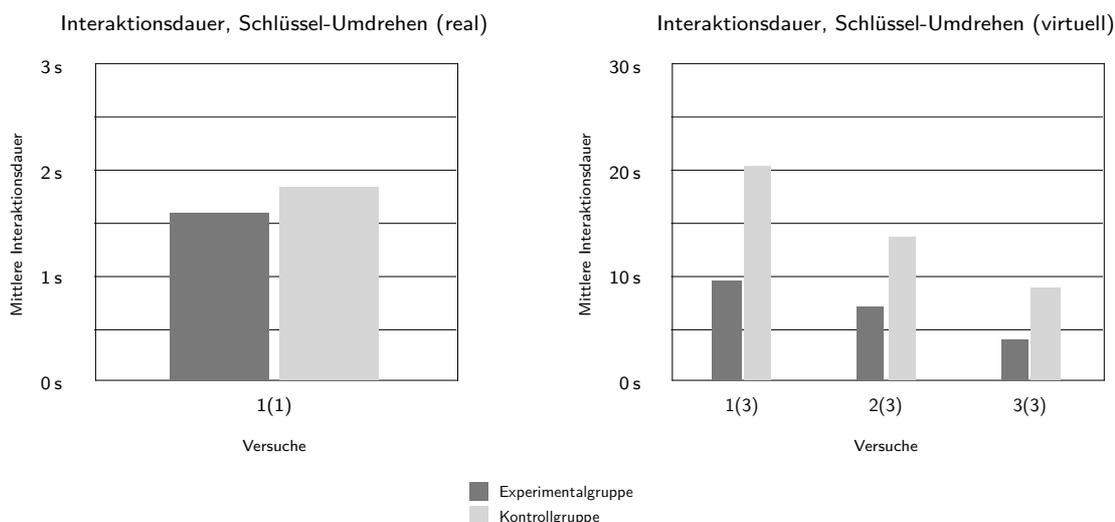


Abbildung 7.16: Interaktionsdauer beim „Schlüssel-Umdrehen“ – Durchschnittliche Interaktionsdauer beim Umdrehen des realen Schlüssels (links) und des virtuellen Schlüssels (rechts).

Die Interaktionsdauer wurde auch für das Interaktionsszenario *Scheibe-Drehen* gezeigt gemessen. Es zeigte sich, dass für das Drehen der realen Scheibe im Schnitt etwa 3,0 bis 6,0 s benötigt wurden, und die Experimentalgruppe hierbei tendenziell schneller war (Abbildung 7.17, links). Ein gegensätzliches Bild zeigte sich bei der Interaktion mit der virtuellen Scheibe: hier benötigten die Teilnehmer aus der Experimentalgruppe im Schnitt länger für das Ausrichten des Pfeils auf der Zielmarkierung, als die Kontrollgruppe (Abbildung 7.17, rechts).

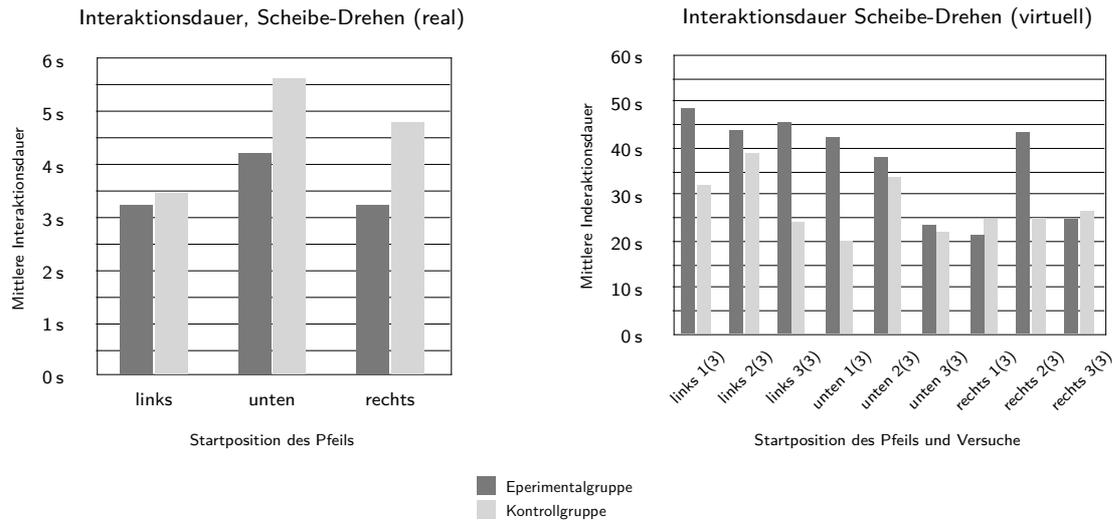


Abbildung 7.17: Interaktionsdauer beim „Scheibe-Drehen“ – Durchschnittliche Interaktionsdauer beim Drehen der realen Scheibe (links) und der virtuellen Scheibe (rechts).

7.3.3. Griffsicherheit

Mit dem Qualitätskriterium *Griffsicherheit* sollte untersucht werden, wie oft die Testpersonen ein Interaktionsobjekt greifen mussten, bis ein Testszenario abgeschlossen wurde.

Die Messwerte beim Positionieren der realen Würfel zeigten, dass alle Testpersonen in der Lage waren, den großen und mittleren Würfel mit nur einem Griff in der Zielfläche abzulegen (Abbildung 7.18, links). Lediglich den kleinsten Würfel mussten zwei Probanden aus der Experimentalgruppe zweimal greifen. Dem einen Probanden entglitt der Würfel aus der Hand, sodass dieser erneut aufgenommen werden musste. Der andere Proband benötigte zwei Griffe, um nach dem Positionieren des Würfels eine starke Abweichung von der Zielfläche zu korrigieren.

Im Gegensatz zu der Interaktion mit den realen Würfeln, benötigten die Testpersonen im Schnitt mindestens zwei Griffe für die Platzierung der virtuellen Würfel (Abbildung 7.18, rechts). Die Messwerte lassen zudem erkennen, dass für den kleinen virtuellen Würfel (1 cm Seitenlänge) im Schnitt mehr Griffe benötigt wurden, als für den großen virtuellen Würfel. Erwartungsgemäß besteht als ein Unterschied zur Interaktion mit dem realen Würfel, bei dem die Größe des Würfels keinen erkennbaren Einfluss auf die Anzahl der benötigten Griffe hatte. Eine weitere Erkenntnis aus den Messwerten ist, dass die Experimentalgruppe im Schnitt mehr Griffe benötigte als die Kontrollgruppe. Die Unterschiede waren jedoch insgesamt zu gering, sodass die t-Tests für die drei Würfelgrößen keine Signifikanz aufzeigen konnten.

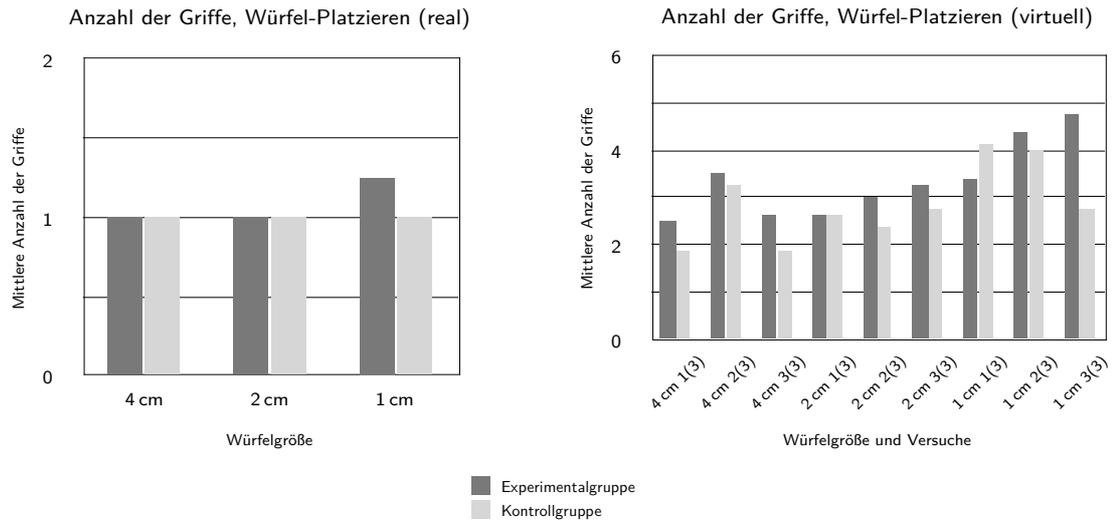


Abbildung 7.18: Anzahl der Griffe beim „Würfel-Platzieren“ – Durchschnittliche Anzahl der benötigten Griffe beim Platzieren der realen Würfel (links) und der virtuellen Würfel (rechts).

Die beim Interaktionsszenario *Scheibe-Drehen* erhobenen Messwerte lassen sowohl bei der realen, als auch bei der virtuellen Interaktion mit der Scheibe, Unterschiede zwischen den beiden Versuchsgruppen erkennen. Für das Einstellen der realen Scheibe auf die Zielmarkierung, benötigten die Testpersonen aus der Kontrollgruppe, unabhängig von der Startposition des Pfeils, einen Griff. Die Testpersonen der Experimentalgruppe benötigten hierfür im Schnitt mehr Griffe. Eine ähnliche Tendenz konnte auch für die Interaktion mit der virtuellen Scheibe beobachtet werden. Auch hier benötigten die Teilnehmer aus der Experimentalgruppe durchschnittlich eine höhere Anzahl von Griffen als die Kontrollgruppe. Trotz teilweise großer Unterschiede zwischen den beiden Versuchsgruppen, konnten insgesamt keine signifikanten Unterschiede aufgezeigt werden.

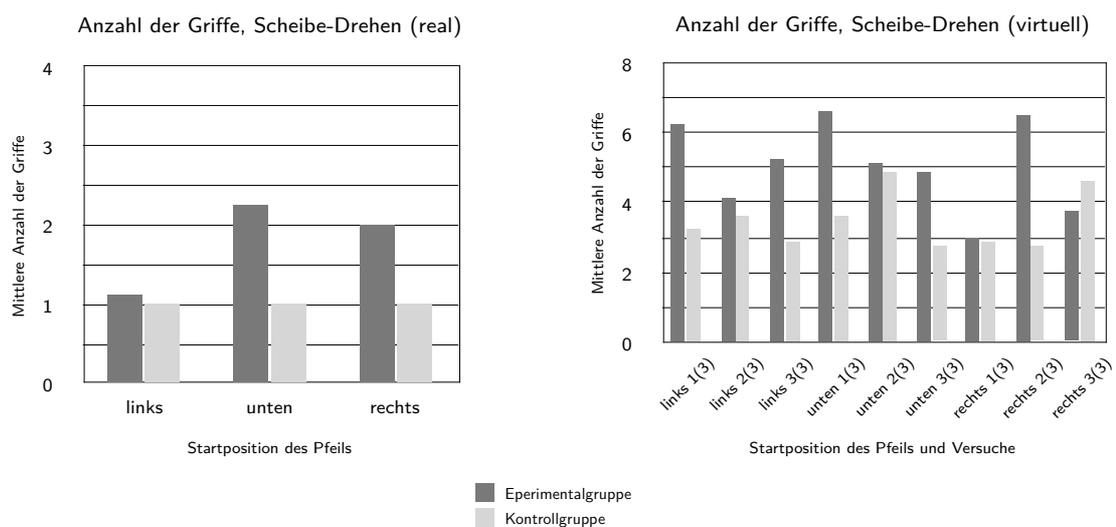


Abbildung 7.19: Anzahl der Griffe beim „Scheibe-Drehen“ – Durchschnittliche Anzahl der benötigten Griffe beim Drehen der realen Scheibe (links) und der virtuellen Scheibe (rechts).

Die Anzahl der benötigten Griffe wurden auch für das Interaktionsszenario *Schlüssel-Umdrehen* gemessen. Erwartungsgemäß konnten alle Probanden den realen Schlüssel mit nur einem Griff umdrehen. Für das Umdrehen des virtuellen Schlüssels, mussten die Testpersonen bei den ersten beiden Versuchen im Durchschnitt etwa zwei mal nach dem Schlüssel greifen.

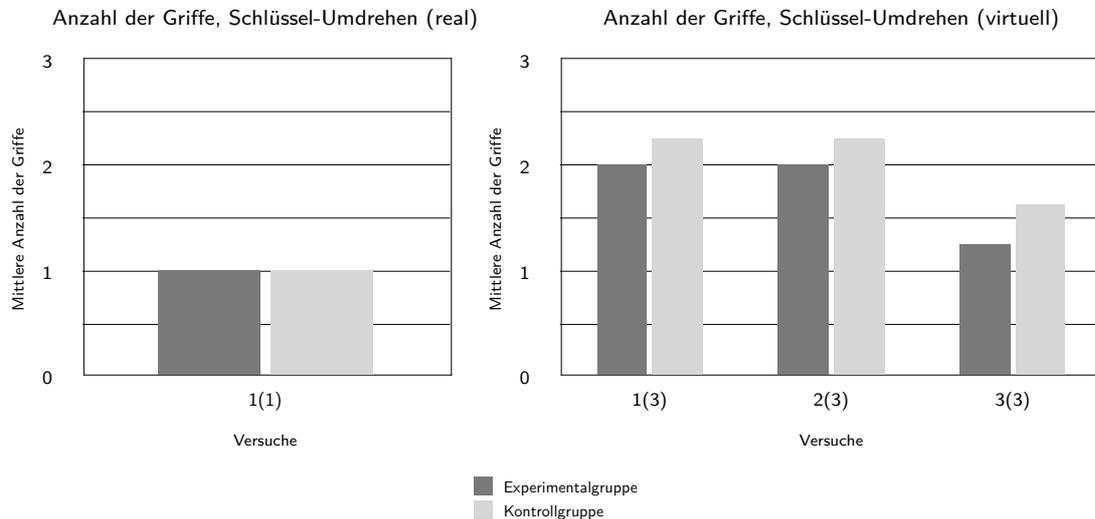


Abbildung 7.20: Anzahl der Griffe beim „Schlüssel-Umdrehen“ – Durchschnittliche Anzahl der benötigten Griffe beim Umdrehen des realen Schlüssels (links) und des virtuellen Schlüssels (rechts).

Von den insgesamt 23 durchgeführten t-Tests wies nur einer einen signifikanten Leistungsunterschied zwischen den beiden Versuchsgruppen auf. Daher lautet die Erkenntnis, dass zumindest unter den Rahmenbedingungen der in dieser Masterarbeit durchgeführten Untersuchung, insgesamt keine signifikanten Leistungsunterschiede zwischen der Experimentalgruppe und der Kontrollgruppe bei der Ausführung von Präzisionsgriffen mit dem Leap Motion Controller, aufgezeigt werden konnten.

7.3.4. Anzahl der Versuche

Während der Untersuchung zeigte sich, dass die Testpersonen in den wenigsten Fällen mehr als einen Versuch zur Erreichung der Zielvorgabe benötigten. Die Bearbeitung der Interaktionsszenarien mit den realen Objekten schafften erwartungsgemäß alle Testpersonen beim ersten Versuch. Doch auch für die Bearbeitung der virtuellen Interaktionsszenarien benötigten die Testpersonen nur in Einzelfällen mehr als einen Versuch. Lediglich beim Erstkontakt mit dem Leap Motion Controller kam es zu Situationen, in denen die Ausgangssituation eines Szenarios wiederhergestellt werden musste. Dies war zum Beispiel dann der Fall, wenn ein Proband den Würfel unbeabsichtigt mit dem Handrücken von der Startfläche verschob. Abbildung 7.21 veranschaulicht die durchschnittliche Anzahl der benötigten Versuche beim Interaktionsszenario *Würfel-Platzieren*. Die Grafik verdeutlicht, dass die Testpersonen selbst beim Erstkontakt, im Durchschnitt kaum mehr als einen Versuch zur Erreichung des Aufgabenziels benötigten. Basierend auf dieser Erkenntnis wurde daher entschieden,

das Qualitätskriterium *Anzahl der Versuche*, mangels Aussagekraft, für die Auswertung Probandentests zu verwerfen.

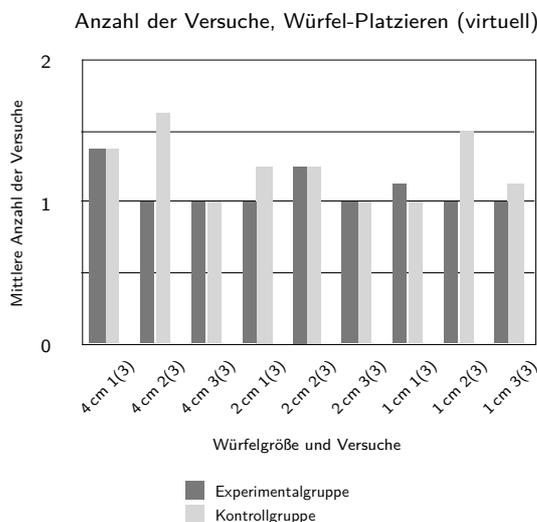


Abbildung 7.21: Anzahl der Versuche beim „Würfel-Platzieren“ – Durchschnittliche Anzahl der benötigten Versuche beim Platzieren der virtuellen Würfel.

7.4. Lerneffekt

Für den Nachweis möglicher Lerneffekte bei der Bearbeitung der virtuellen Interaktionsszenarien mit dem Leap Motion Controller wurden jeweils die Messwerte aus dem ersten und dritten Versuch eines Durchgangs miteinander verglichen. Für jedes Messkriterium (ausgenommen *Anzahl der Versuche*) wurde ein Zweistichproben-t-Test für abhängige Stichproben (Paired t-Test) durchgeführt. Hierbei galt die Prämisse, dass beide Versuchsgruppen einen vergleichbaren Lerneffekt aufzeigen müssten, da sowohl die Probanden aus der Experimentalgruppe als auch die Probanden aus der Kontrollgruppe den Leap Motion Controller zum ersten Mal bedienen.

	Würfel-Platzieren, 1cm, rotatorische Abweichung	Scheibe-Drehen, unten, Anzahl der Griffe	Scheibe-Drehen, rechts, Anzahl der Griffe
\bar{x}	9,7075	5,1250	2,9375
\bar{y}	13,2463	3,8125	4,1875
σ_x	9,3306	3,0741	1,2366
σ_y	8,7254	2,6133	2,1046
H_0	$\mu_x = \mu_y$	$\mu_x = \mu_y$	$\mu_x = \mu_y$
H_1	$\mu_x \neq \mu_y$	$\mu_x \neq \mu_y$	$\mu_x \neq \mu_y$
α	0,05	0,05	0,05
d_f	30	30	30
T_{krit}	2,0422	2,0422	2,0422
T	-2,0645	2,0599	-2,0526
P	0,0567	0,0572	0,0579

Tabelle 7.2: Fast signifikante Ergebnisse der durchgeführten Paired t-Tests – Verglichen wurden jeweils der erste Versuch (\bar{x}) und dritte Versuch (\bar{y}) des jeweiligen Durchgangs.

Von den insgesamt 23 durchgeführten t-Tests konnten lediglich drei einen fast signifikanten Unterschied zwischen Messwerten aus dem ersten Versuch und den Messwerten aus dem dritten Versuch aufzeigen (Abbildung 7.2). Im Speziellen handelte es sich dabei um die rotatorische Abweichung beim Positionieren des kleinen Würfels (1 cm Seitenlänge) und um die Anzahl der Griffe beim Drehen der Scheibe aus der unteren und rechten Startposition. Eine Verbesserung vom ersten zum dritten Versuch lag jedoch nur beim *Scheibe-Drehen* aus der unteren Starposition vor. Die andern beiden Ergebnisse zeigten sogar eine Verschlechterung der Messwerte vom ersten zum dritten Versuch. Die Ergebnisse waren zudem nur fast signifikant, da der Signifikanzwert P das Signifikanzniveau α geringfügig überschritt. Die maximale Überschreitung des Signifikanzniveaus lag bei 0,79 Prozentpunkten. Bei den übrigen zwanzig t-Tests konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen dem ersten und dritten Versuch aufgezeigt werden.

Aufgrund der hohen Anzahl *nicht* signifikanter Unterschiede zwischen den Messwerten aus den ersten und dritten Versuchen, lautet die Erkenntnis, dass zumindest unter den Rahmenbedingungen der in dieser Masterarbeit durchgeführten Untersuchungen keine signifikanten Lerneffekte bei der Ausführung von Präzisionsgriffen mit Hilfe des Leap Motion Controllers, aufgezeigt werden konnten.

7.5. Subjektives Meinungsbild

Die subjektive Meinung zum Leap Motion Controller wurde nach Abschluss jeder Untersuchung mit Hilfe eines elektronischen Fragebogens erfasst. Der Fragebogen beinhaltet die in ISO9241-9 definierten Kriterien für die subjektive Einzelbewertung von Eingabegeräten. Jedes Kriterium konnte mit einer Zahl von 1 bis 7 bewertet werden. Hierbei bedeutete eine 1 stets die schlechteste und eine 7 die beste Bewertung des entsprechenden Kriteriums. Die Auswertung des Fragebogens ermöglicht einen Blick auf die aus Nutzersicht wahrgenommene Qualität des Leap Motion Controllers bei der Durchführung von Präzisionsgesten. Abbildung 7.22 veranschaulicht die Bewertung des Leap Motion Controllers, unterteilt nach Versuchsgruppen. Hierbei wurde für jedes Kriterium jeweils der empirische Mittelwert beider Gruppen berechnet.

Beim ersten Kriterium bewerteten die Testpersonen, ob sie die *erforderliche Betätigungskraft* bei der Bedienung des Leap Motion Controllers als sehr unangenehm (1 Punkt) oder sehr angenehm (7 Punkte) empfanden. Beide Versuchsgruppen gaben durchschnittlich an, dass die erforderliche Betätigungskraft noch als angenehm empfunden wurde. Die Bewertung beider Gruppen lag hierbei mit 5,5 und 5,4 Punkten in etwa auf einem gleichem Niveau.

Beim zweiten Kriterium bewerteten die Testpersonen die *Gleichmäßigkeit bei der Nutzung*, also in wieweit gleiche Nutzereingaben zu gleichen Ergebnissen in der virtuellen Szene führten. Die Testpersonen der Experimentalgruppe bewerteten dieses Kriterium im Schnitt neutral mit 4,0 Punkten, während die Bewertung von den Probanden aus der Kontrollgruppe mit 4,4 Punkten geringfügig besser ausfiel.

Auch bei der Bewertung der *Genauigkeit* gab es unterschiedliche Wahrnehmungen zwischen den beiden Gruppen. Während die Experimentalgruppe den Leap Motion Controller als eher ungenau einstufte, empfanden die Teilnehmer aus der Kontrollgruppe das Eingabegerät als eher genau.

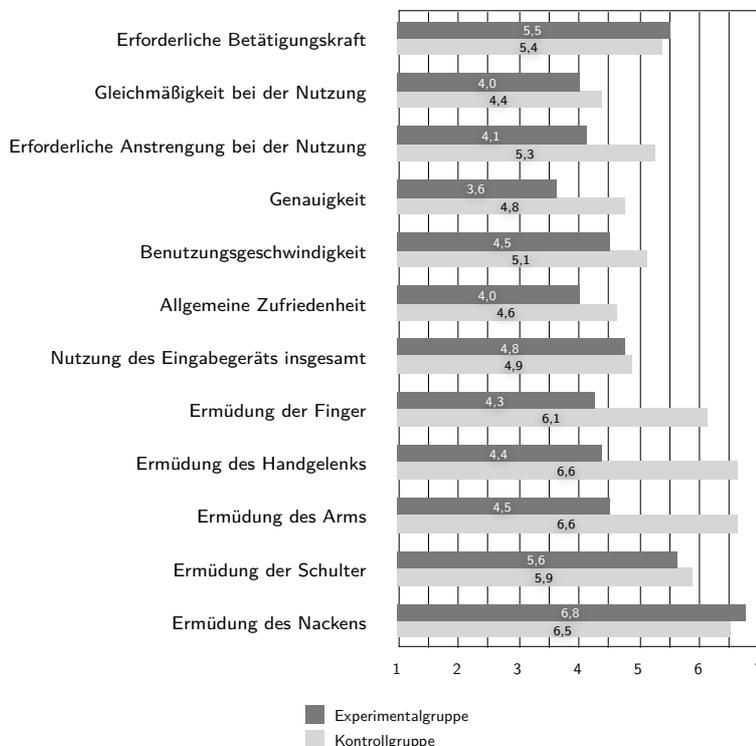


Abbildung 7.22: Subjektive Beurteilung des Leap Motion Controllers – Die Grafik zeigt für jedes Kriterium die mittlere Bewertung durch jeweilige Versuchsgruppe. Eine höhere Punktzahl ist besser, und bedeutet zum Beispiel eine *höhere* Genauigkeit oder aber eine *geringere* Anstrengung/Ermüdungserscheinung.

Mit dem vierten Kriterium gaben die Testpersonen an, wie akzeptabel sie die *Benutzungsgeschwindigkeit* empfanden, also wie schnell mit dem Eingabegerät das Ziel der Aufgabenstellungen erreicht werden konnte. Mit durchschnittlichen 4,5 und 5,1 Punkten wurde die Benutzergeschwindigkeit von beiden Gruppen als noch akzeptabel wahrgenommen.

Die Bewertung der *allgemeinen Zufriedenheit* sollte zeigen, inwiefern der Leap Motion Controller im Zusammenspiel mit Präzisionsgesten von den Testpersonen als zufriedenstellendes Eingabegerät empfunden wurde. Während die Personen aus der Experimentalgruppe hierfür im Mittel eine neutrale Punktzahl von 4,0 vergaben, lag die durchschnittliche Bewertung der Kontrollgruppe bei 4,6.

Mit dem siebten Bewertungskriterium *Nutzung des Eingabegeräts insgesamt* sollte in Erfahrung gebracht werden, ob der Leap Motion Controller insgesamt sehr schwierig (1 Punkt) oder sehr leicht (7 Punkte) zu benutzen war. Beide Versuchsgruppen empfanden die Nutzung Leap Motion Controllers insgesamt eher leicht.

Nachdem die Teilnehmer der Untersuchung mit dem dritten Kriterium bereits die allgemeine Anstrengung bei der Benutzung des Leap Motion Controllers bewerteten, folgte nun eine etwas spe-

zifischere Beurteilung der Ermüdungserscheinungen bestimmter Körperregionen. Die beiden Extrema bei der Bewertung lauteten hierbei *sehr hohe* Ermüdungserscheinungen (1 Punkt) und *keine* Ermüdungserscheinungen (7 Punkte).

Die Ermüdung der Finger wurde von beiden Versuchsgruppen sehr unterschiedlich empfunden. Während die Experimentalgruppe eine deutlich wahrnehmbare Anstrengung der Finger bekundete, verspürten die Teilnehmer der Kontrollgruppe kaum Ermüdungserscheinungen in den Fingern.

Ein ähnliches Bild zeigte sich bei der wahrgenommenen Belastung des Handgelenks und des Arms. Auch hier gaben die Teilnehmer der Experimentalgruppe an, dass eine Anstrengung zu verspüren war, während die Personen aus der Kontrollgruppe so gut wie keine eine Ermüdung in den genannten Körperregionen feststellten.

In Bezug auf die Ermüdungserscheinungen in den Bereichen der Schulter und des Nackens, näherten sich die Beurteilung der beiden Versuchsgruppen wieder an. In beiden Gruppen wurden kaum Ermüdungserscheinungen in der Schulterpartie wahrgenommen und der Nackenbereich der Testpersonen wurde nach Empfinden der Testpersonen fast gar nicht beansprucht.

8. Kapitel

Zusammenfassung und Ausblick

8.1. Zusammenfassung

Diese Masterarbeit befasste sich mit dem Leap Motion Controller, einem neuartigen Eingabegerät für Computer, welches die dreidimensionale Erfassung von Händen und Fingern in Echtzeit ermöglicht. Das Ziel der Arbeit bestand in der Beurteilung dieses neuen Eingabegeräts hinsichtlich dessen Qualitäten bei Präzisionsgriffen.

Im einleitenden Kapitel wurde der Leap Motion Controller vorgestellt. Anhand verschiedener Anwendungsbeispiele wurde das breit gefächerte Einsatzspektrum der Hardware aufgezeigt. Es zeigte sich, dass sich die Einsatzmöglichkeiten des Leap Motion Controllers nicht nur auf die Nutzung im privaten Umfeld beschränken, sondern dass sich das Eingabegerät durchaus auch in Gebieten wie der Medizin- und Militärtechnik sinnvoll einsetzen lässt.

Im weiteren Verlauf dieser Masterarbeit wurden dann die für das Thema relevanten Grundlagen behandelt. Es wurde erläutert warum der Tastsinn für den Menschen so wichtig ist und an welchen Technologien derzeit geforscht wird, um taktile Rückmeldung bei der Bedienung sogenannter In-Air Controller zu ermöglichen. Es wurden vier grundverschiedene technische Lösungsansätze vorgestellt, die allesamt in der Lage waren, dem Nutzer taktile Rückmeldungen zu vermitteln. Für jede der technischen Lösungen wurden die Vor- und Nachteile aufgezeigt. Die darauf folgende Einschätzung zu den vorgestellten Lösungen lautete, dass derzeit kein zufriedenstellendes Konzept existiert, um künstliche taktile Rückmeldungen bei In-Air Eingabegeräten zu ermöglichen. Ein maßgebender Faktor bei dieser Einschätzung war der Umstand, dass es sich bei den vorgestellten Lösungen in erster Linie um Prototypen handelte.

Die Grundlagen befassten sich überdies mit Systemen zur fingerbasierten direkten 3D-Interaktion. Es wurden fünf technische Systeme beschrieben, die ähnlich wie der Leap Motion Controller die Erkennung von Hand- und Fingerbewegungen ermöglichen. Auch bei diesen Geräten wurden jeweils die Vor- und Nachteile dargelegt. Ein abschließender Vergleich der Systeme zeigte auf, dass der Leap Motion Controller sowohl in Bezug auf die technischen Daten als auch auf die Anschaffungskosten heraussticht und damit ein vielversprechendes Forschungsobjekt darstellt.

Darüber hinaus wurden in den Grundlagen die Griffarten der menschlichen Hand erläutert. Es wurde erklärt, in wiefern sich die Kraftgriffe von den Präzisionsgriffen unterscheiden. Außerdem wurde dargelegt, was Fingerspitzen-, Pinzetten-, Dreipunkt- und Schlüsselgriffe sind, wofür diese eingesetzt werden und wie sie ausgeführt werden.

Das letzte Grundlagenkapitel befasste sich mit Leap Motion Controller. Neben dem Aufbau und den technischen Daten wurde das Funktionsprinzip des Geräts erläutert. Hierbei zeigte sich, dass der Leap Motion Controller ein optisches Tracking-Verfahren darstellt, welches auf dem Prinzip der Stereoskopie basiert. Neben der Hardware wurde auch die Software des Controllers betrachtet. Im Zuge dessen wurden die wichtigsten Bestandteile der Programmierschnittstelle erläutert und veranschaulicht in welcher Datenstruktur das virtuelle Handmodell vorliegt. Darüber hinaus wurden die technischen Einschränkungen der Hardware erläutert. Neben den bauartbedingten Grenzen des Interaktionsraums wurde insbesondere auf die Einschränkungen durch äußere Störeinflüsse, Selbstverdeckung und fehlende taktile Rückmeldungen eingegangen. Abschließend wurden die ergonomischen Aspekte des Leap Motion Controllers betrachtet.

Im weiteren Verlauf befasste sich diese Masterarbeit dann mit der Entwicklung einer Versuchsumgebung für die qualitative Untersuchung von Präzisionsgesten bei der Nutzung des Leap Motion Controllers. Basierend auf der DIN 9241-9 wurden Qualitätskriterien definiert, die dann mit Hilfe von realen und virtuellen Interaktionsszenarien im Rahmen von Probandentests zu untersuchen galt. Die Grundlage für die virtuellen Interaktionsszenarien bildete ein prototypische Software, deren Konzeption und Implementierung erläutert wurden. Ebenfalls beschrieben wurde die Umsetzung der realen Interaktionsszenarien.

Ein wichtiger inhaltlicher Teil dieser Masterarbeit waren die Probandentests und deren Durchführung. In diesem Zusammenhang wurde erläutert, anhand welcher Kriterien die Auswahl der Probanden erfolgte und welche grundsätzlichen Anforderung hierbei erfüllt werden mussten. Für die Untersuchungsphase wurden sechzehn Probanden akquiriert. Diese Probanden unterteilten sich in je acht Personen mit Erfahrungen bei der 3D-Manipulation virtueller Objekte und acht Personen ohne diese Erfahrungen. Alle Probanden mussten mit Hilfe des Leap Motion Controllers sogenannte Interaktionsszenarien bearbeiten, bei denen Fingerspitzen-, Dreipunkt- und Schlüsselgriffe ausgeführt wurden. Während der Bearbeitung der Interaktionsszenarien wurden die auf den Qualitätskriterien basierenden Messwerte erhoben.

Zum Ende dieser Masterarbeit wurden dann die erhobenen Daten ausgewertet. Dies bildete die Grundlage für die Formulierung der durch die Untersuchungen gewonnen Erkenntnisse. Es zeigte sich, dass grundsätzlich alle Probanden in der Lage waren die drei unterschiedlichen Präzisionsgriffe mit Hilfe des Leap Motion Controllers durchzuführen. Erwartungsgemäß konnten mit dem Leap Motion Controller aber weder die Effizienz noch die Effektivität realer Präzisionsgriffe erreicht werden.

Es zeigte sich zudem, dass im Rahmen der durchgeführten Untersuchung keine signifikanten Leistungsunterschiede zwischen den beiden Versuchsgruppen aufgezeigt werden konnten, obgleich

bei der Betrachtung einzelner Interaktionsszenarien derartige Tendenzen erkennbar waren. Ebenso konnte keine signifikanten Lerneffekte zwischen den jeweils ersten und dritten Versuchen eines Durchgangs nachgewiesen werden. Ein mögliche Erklärung hierfür könnte die verhältnismäßig kurze Nutzungsdauer des Leap Motion Controllers sein, die bei etwa 20 bis 25 Minuten pro Testperson lag. Es ist vorstellbar, dass sich ein deutlich erkennbarer Lerneffekt erst nach einer längeren Nutzungsperiode einstellt.

Weitere Erkenntnisse konnten durch die Beobachtung der Probanden während der Bedienung des Leap Motion Controllers gewonnen werden. So zeigte sich, dass insbesondere die rotatorische Manipulation von Interaktionsobjekten zu Situationen führen kann, in denen die Finger, aufgrund der Selbstverdeckung durch die Hand, nicht mehr ordnungsgemäß erkannt werden. Auch die Stellung der am Griff unbeteiligten Finger beeinflusst die Erkennungsleistung des Controllers. Die Beobachtung der Probanden verdeutlichte auch das Verhalten in Bezug auf die Abwesenheit taktiler Rückmeldungen. Der überwiegende Teil der Testpersonen orientierte sich beim Schließen des Griffs an der Geometrie der virtuellen Interaktionsobjekte, statt durch diese hindurch zugreifen und die Finger vollständig zu schließen. Durch die Beobachtungen zeigte sich aber auch, dass die virtuellen Interaktionsobjekte nicht beliebig klein sein dürfen. So wurde zum Beispiel die Interaktion mit dem kleinen Würfel durch den Umstand erschwert, dass die Fingerspitzen das Objekt in einigen Fällen vollständig verdeckten. Die Größe von Interaktionsobjekten sollte also so gewählt werden, dass deren Volumen stets größer ist als das Volumen der Fingerspitzen des verwendeten Handmodells. Interessant war auch die Beobachtung, dass die Größe eines Interaktionsobjekts augenscheinlich einen höheren Einfluss auf die rotatorischen-, als auf die translatorischen Abweichungen hat.

Das subjektive Meinungsbild der Probanden bezüglich des Leap Motion Controllers fiel grundsätzlich sehr neutral aus. Insbesondere die vom Hersteller beworbene hohe Genauigkeit des Geräts wurde im Schnitt nur als mittelmäßig empfunden. In Bezug auf dieses Kriterium zeigten sich die studentischen Testpersonen insgesamt weniger zufriedengestellt, als die unversierten Testpersonen. Unterschiedlich wahrgenommen wurden aber allem die körperlichen Ermüdungserscheinungen in den Fingern, im Handgelenk und im Arm.

8.2. Ausblick

Die im Rahmen dieser Masterarbeit durchgeführten Untersuchungen konnten erste Erkenntnisse für die Eignung des Leap Motion Controllers in Bezug auf die Erfassung von Präzisionsgriffen liefern. Es zeigte sich, dass selbst Nutzer ohne Vorkenntnisse in der Lage waren, Präzisionsgriffe mit Hilfe des Leap Motion Controllers durchzuführen. Die Effizienz und Effektivität real durchgeführter Präzisionsgriffe konnten jedoch erwartungsgemäß nicht erreicht werden. Es sollte hierbei aber berücksichtigt werden, dass für die Untersuchungen bewusst auf gängige Hilfsmittel, wie visuelle oder akustische Rückmeldungen verzichtet wurden, um eine bessere Übereinstimmung zwischen den realen und virtuellen Interaktionsobjekten zu schaffen. Nach dem gezeigt wurde, dass selbst wenig versierte Personen in der Lage waren Präzisionsgriffe mit dem Leap Motion Controller durchzuführen, könnte als nächster Schritt eine Untersuchung der Nutzerleistung von Leap Motion „Routiniers“

durchgeführt werden. Hiermit sind Leute gemeint, die durch regelmäßige Nutzung im Umgang mit dem Controller geübt sind.

Während den Untersuchungen zeigten sich auch die zuvor nur theoretisch beschriebenen grundlegende Probleme der Hardware. Die Finger werden schlecht erkannt, wenn sie stark gekrümmt werden oder gar zur Faust geballt werden. Aber auch das Drehen des Handrückens zum Leap Motion Controller kann schnell zu Situationen führen, bei denen die Finger nicht mehr korrekt erkannt werden. Insbesondere bei der direkten 3D-Manipulation von virtuellen Objekten, stellt die Selbstverdeckung also ein nicht zu unterschätzendes Problem da. Abhilfe könnte ein Verbund aus mehreren Leap Motion Controllern schaffen, welche die Nutzerhände aus verschiedenen Blickwinkeln simultan und redundant erfassen. Hierbei müsste jedoch gewährleistet werden, dass sich die Controller nicht gegenseitig stören.

Die Fragestellungen bezüglich der Nachweisbarkeit eines Lerneffekts oder Leistungsunterschieden zwischen zwei Versuchsgruppen mit unterschiedlichen fachbezogenen Kompetenzen, konnten im Rahmen der angestellten Untersuchungen nicht hinreichend beantwortet werden. Ein Grund hierfür war die unerwartet große Streuung der Messwerte. Eine anknüpfende Untersuchung mit einem deutlich größeren Stichprobenumfang könnte möglicherweise zu den gewünschten Antworten führen.

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
API	Application Programming Interface (dt. Programmierschnittstelle)
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor (dt. sich ergänzender Metalloxid-Halbleiter)
FPS	Frames Per Second (dt. Bilder pro Sekunde)
GUI	Graphical User Interface (dt. grafische Benutzerschnittstelle)
HCI	Human-Computer-Interaction (dt. Mensch-Maschine-Interaktion)
LED	Light-Emitting Diode (dt. Licht-emittierende Diode)
NUI	Natural User Interface (dt. natürliche Benutzerschnittstelle)
SDK	Software Development Kit (dt. Software-Entwicklungs-Baukasten)
USB	Universal-Serial-Bus (dt. universelle serielle Datenleitung)
VR	Virtual Reality (dt. Virtuelle Realität)
WLAN	Wireless Local Area Network (dt. drahtloses lokales Netzwerk)

LITERATURVERZEICHNIS

- [AAB10] T. Amshoff, D. von Aufschnaiter, C. Bader-Johansson. *Physiolexikon. Physiotherapie von A-Z*, Auflage 1, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, September 2010.
- [Ack13] E. Ackermann. Autonomous Balloon Destruction Wins Stanford Drone Games. <http://spectrum.ieee.org/automaton/robotics/diy/autonomous-balloon-destruction-wins-stanford-drone-games>, April 2013.
Abruf: 12.10.2014
- [AHN14] A. Alzayat, M. Hancock, M. A. Nacenta. Quantitative Measurement of Virtual vs. Physical Object Embodiment through Kinesthetic Figural After Effects. In *CHI 2014 One of a CHInd*, S. 2903-2912, Toronto, Kanada, Mai 2014.
- [Bed13] R. Bedikian. *Understanding Latency: Part 1+2*.
<http://blog.leapmotion.com/understanding-latency-part-1/>, Juli 2013.
Abruf: 11.10.2014
- [Col14] Colgan, Alex. *How does the Leap Motion Controller Work?*
<https://blog.leapmotion.com/hardware-to-software-how-does-the-leap-motion-controller-work>, August 2014.
Abruf: 09.10.2014
- [CSC⁺13] M. J. Cree, L. V. Streeter, R. M. Conroy, A. A. Dorrington. *Analysis of the SoftKinetic DepthSense for Range Imaging*. Technical Report, University of Waikato, Hamilton, New Zealand, 2013.
- [CSL⁺13] T. Carter, S. A. Seah, B. Long, B. Drinkwater, S. Subramanian. UltraHaptics: Multi-Point Mid-Air Haptic Feedback for Touch Surfaces. In *UIST'13*, S. 505-514, Saint Andrews, Vereinigtes Königreich, Oktober 2013.
- [CoVe14] J. C. Coelho, F. J. Verbeek. Pointing Task Evaluation of Leap Motion Controller in 3D Virtual Environment. In *CHI Sparks 2014 Creating the Difference*, Den Haag, Niederlande, April 2014.
- [Cyb14] CyberGlove Systems LLC. Photo/Video Gallery
<http://www.cyberglovesystems.com/products/photovideo-gallery>, 2014.
Abruf: 14.10.2014

- [Edw14] Edwin. *Comfortable use of your Leap Motion Controller*.
<https://leapmotion.zendesk.com/entries/39801876-Comfortable-use-of-your-Leap-Motion-Controller>, 2014.
Abruf: 14.10.2014
- [Gib50] J. J. Gibson. The perception of visual surfaces. In *American Journal of Psychology*, Auflage 63, Nr. 3, S. 367-384, 1950.
- [Gib54] J. J. Gibson. The visual perception of objective motion and subjective movement. In *Psychological Review*, Auflage 61, Nr. 5, S. 304-314, 1954.
- [GJP⁺14] J. Guna, G. Jakus, M. Pogačnik, S. Tomažič, J. Sodnik. *An Analysis of the Precision and Reliability of the Leap Motion Sensor and Its Suitability for Static and Dynamic Tracking*. 2014.
- [GB63] J. J. Gibson, F. A. Backlund. An aftereffect in haptic space perception. In *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, Auflage 15, Nr. 3, S. 145-154, 1963.
- [Gros04] A. Grosskopf. *Kinematische Analyse von Ziel- und Greifbewegungen der dominanten und non-dominanten Hand bei beiden Geschlechtern*. PhD thesis, Christian-Albrecht-Universität zu Kiel, Dezember 2004.
- [HB01] C. v. Hardenberg, F. Bérard. *Bare-hand human-computer interaction*. Technical Report, Technische Universität, Berlin, 2001.
- [HeLo14] W. R. Hepp, H. A. Locher. *Orthopädisches Diagnostikum*. 8. Auflage, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, April 2014.
- [Hor13] M. Horde. *Leap Motion Teardown*.
<https://learn.sparkfun.com/tutorials/leap-motion-teardown/all>, Juni 2013.
Abruf: 18.01.2014
- [ISO9241-9] Ergonomische Anforderungen für Bürotätigkeiten mit Bildschirmgeräten – Teil 9: Anforderungen an Eingabemittel – ausgenommen Tastaturen (ISO 9241-9:2000), DIN EN ISO 9241-9, Ausgabe: 2002-03.
- [ISO9241-410] Ergonomie der Mensch-System-Interaktion – Teil 410: Gestaltungskriterien für physikalische Eingabegeräte (ISO 9241-410:2008 + Amd.1:2012), DIN EN ISO 9241-410, Ausgabe: 2012-12.
- [Kap09] I. A. Kapandji. *Funktionelle Anatomie der Gelenke. Schematisierte und kommentierte Zeichnungen zur menschlichen Biomechanik*. Auflage 5, Georg Thieme Verlag, Stuttgart, August 2009.

- [KD49] W. Köhler, D. Dinnerstein. Figural after-effects in kinaesthesia. In *Miscellanea psychologica Albert Michotte*. Louvain: Editions de l'Institut Supérieur de Philosophie, S. 196-220, 1949.
- [KMR⁺09] T. A. Kern, M. Matysek, O. Meckel, J. Rausch, A. Rettig, A. Röse, S. Sindlinger. *Entwicklung haptischer Geräte*. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg, 2009.
- [Kra14] Kraft TeleRobotics, Inc. *Predator Remotely Operated Force Feedback Manipulator Arm System*. <http://krafttelerobotics.com/products/predator.htm>, 2014.
Abruf: 12.11.2014
- [KOA12] N. Kyriazis, I. Oikonomidis, A. Argyros. *Giving a Hand to Kinect*. Technical Report, University of Crete, Kreta, Griechenland, November 2012.
- [Lea13] Leap Motion Inc. Modes Of Operation.
<https://support.leapmotion.com/entries/39433157-Modes-of-Operation>, 2013.
Abruf: 27.07.2014
- [Lea13a] Leap Motion Inc. *Leap Motion Media Book*.
https://www.leapmotion.com/press_releases, 2013.
Abruf: 11.10.2014
- [Lea14] Leap Motion Inc. API Reference.
https://developer.leapmotion.com/documentation/skeletal/csharp/api/Leap_Classes.html, 2014.
Abruf: 11.10.2014
- [Lea14a] Leap Motion Inc. Leap Motion App Store | Sculpting.
<https://apps.leapmotion.com/apps/sculpting/>, 2014.
Abruf: 12.10.2014
- [Lea14b] Leap Motion Inc. *Tracking Model*.
https://developer.leapmotion.com/documentation/skeletal/csharp/devguide/Leap_Tracking.html, 2014.
Abruf: 12.10.2014
- [Mal09] C. Malerczyk. *Intuitive Interaktion durch videobasierte Gestenerkennung*. PhD thesis, Universität Rostock, August 2009.
- [Mie07] A. Miehle. *Entwicklung eines Motion Tracking-Systems zur Positionssteuerung per Handbewegung*. Master's thesis, Fachhochschule für Technik und Wirtschaft, Berlin, September 2007.

- [Mir14] Mirror Training Inc. *Using Robotic Arms to Save Human Lives*.
<http://www.mirrortraininginc.com>, 2014.
Abruf: 12.10.2014
- [Ms15] Purchase the Kinect for Windows sensor
<http://www.microsoft.com/en-us/kinectforwindows/purchase/default.aspx>
Abruf: 24.03.2015
- [Ngu14] V. T. Nguyen. *Enhancing Touchless Interaction with the Leap Motion using a Haptic Glove*. Master's thesis, University of Eastern Finland, Joensuu, Finnland, Mai 2014.
- [NKQK13] M. A. Nacenta, Y. Kamber, Y. Qiang, P. O. Kristensson. Memorability of Pre-designed & User-defined Gesture Sets. In *CHI 2013 Changing Perspectives*, S. 1099-1108, Paris, Frankreich, Mai 2013.
- [PlHo14] D. Plemmons, D. Holz. *Creating Next-Gen 3D Interactive Apps with Motion Control and Unity3D*. Siggraph 2014 Workshop, Vancouver, Kanada, August 2014.
- [Pre14] P. Premaratne. *Human Computer Interaction Using Hand Gesture*. Springer-Verlag, Auflage 1, Singapur, Singapur, 2014.
- [Qui12] G. A. Quirk. *Die Zukunft berühren*. Embedded Design VI 2012.
<http://www.embedded-design.net/?fachartikeleinzeln&id=70653>, November 2012.
Abruf: 07.11.2014
- [RA12] S. S. Rautaray, A. Agrawal. *Vision based hand gesture recognition for human computer interaction: a survey*. Technical Report, Indian Institute of Information Technology, Allahabad, India, Springer-Verlag, Dordrecht, November 2012.
- [RBJ+01] M. Ringel, H. Berg, Y. Jin, T. Winograd. *Barehands: implement-free interaction with a wallmounted display*. Technical Report, Stanford University, Stanford, Vereinigte Staaten, 2001.
- [Rob06] G. Robles-De-La -Torre. The Importance of the Sense of Touch in Virtual and Real Environments. In *MultiMedia IEEE*, Nr. 13, S. 24-30, 2006.
- [Sch11] T. Schröder. Computer mit Gesten steuern. In *weiter.vorn 1.2011*, Nr. 1, S. 36-37, 2011.
- [SdAdA+13] E. S. Silva, J. A. O. de Abreu, J. H. P. de Almeida, V. Teichrieb, G. L. Ramalho. *A Preliminary Evaluation of the Leap Motion Sensor as Controller of New Digital Musical Instruments*. Technical Report, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasilien, 2013.

- [Sof14] SoftKinetic: *DepthSense Cameras 325*.
<http://www.softkinetic.com/Products/DepthSenseCameras>, 2014.
Abruf: 16.10.2014
- [SZ94] D. J. Sturman, D. Zeltzer. A Survey of Glove-based Input. In *IEEE Computer Graphics and Applications*, Auflage 14, Nr. 1, S. 30-39, 1994.
- [SPGI13] R. Sodhi, I. Poupyrev, M. Glisson, A. Isar. AIREAL: Interactive Tactile Experiences in Free Air. In *ACM Transactions on Graphics*, Auflage 32, Nr. 4, Juli 2013.
- [Ted14] TedCas Medical Systems. *Products*.
<http://www.tedcas.com/en/products>, 2014.
Abruf: 12.10.2014
- [WBRF13] F. Weichert, D. Bachmann, B. Rudak, D. Fisseler. *Analysis of the Accuracy and Robustness of the Leap Motion Controller*. Technical Report, Technische Universität, Dortmund, Mai 2013.
- [WP10] R. Y. Wang, J. Popović. *Real-Time Hand-Tracking with a Color Glove*. Technical Report, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, Vereinigte Staaten, 2010.
- [VLRJ14] F. Vinayak, K. Lee Jr., K. Ramani, R. Jasti. zPots : A Virtual Pottery Experience Through Spatial Interactions Using the Leap Motion Device. In *CHI 2014 One of a CHIInd*, S. 371-374, Toronto, Kanada, Mai 2014.

SELBSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG

Ich erkläre, dass ich die eingereichte Masterarbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Friedberg (Hessen), 08. April 2015

Kai Julian Krause

