

Visualisierungsinstitut der Universität Stuttgart (VISUS)

Bachelorarbeit

**Der Einfluss von unterschiedlichem
haptischen Feedback auf
VR-Chirurgietraining**

Leon Boppert

Studiengang:	Informatik
Prüfer/in:	Prof. Dr. Michael Sedlmair
Betreuer/in:	M. Sc. Xingyao Yu, Prof. Dr. Liang Zhou
Beginn am:	22. September 2021
Beendet am:	22. März 2022

Kurzfassung

Digitale Lehre wird nicht zuletzt durch die Corona-Pandemie ein global an Relevanz gewinnendes Thema. In diesem Rahmen wird zunehmend Forschung im Bereich der Virtual Reality (VR) betrieben, da diese als alternative und interaktive Lehrform genutzt werden kann. Hierbei kann VR unter anderem hilfreich sein, um abstrakte Fähigkeiten wie einen bestimmten Operationsablauf zu erlernen. Des Weiteren stellen haptische Geräte eine aufsteigende Technologie dar, um Lernprozesse in VR und die Nutzer-Erfahrung durch Immersion zu verbessern.

Diese Arbeit gibt einen Einblick in die aktuellen Erkenntnisse von VR, kombiniert mit der Anwendung haptischer Geräte im Bereich der Chirurgie. Hierfür wurde ein VR-Trainingssystem für orthopädische Operationen im Knöchelbereich entwickelt, welches die Möglichkeit bietet Schneidebereiche für diesen Zweck zu erstellen und anschließend zu speichern. Dieses System ermöglicht das Operations-Training mit gängigen Controllern, sowie mit Exoskelett-artigen haptischen Handschuhen.

Nach der Entwicklung wurden die diversen Geräte im Trainingssystem in Hinblick auf ihre Auswirkungen durch eine Nutzerstudie analysiert. Das Potenzial des Systems für die reale Anwendung konnte durch eine medizinische Expertin festgestellt werden, sowie die Erhöhung der Immersion durch die haptischen Handschuhe bei der Nutzerstudie. Die Controller hingegen wiesen eine höhere Usability und eine signifikant niedrigere Arbeitsbelastung auf. Die Verbesserung der Handschuhe kann im Rahmen weiterer Forschung zu einem immensen Nutzen für zukünftige Trainingssysteme in VR beitragen.

Danksagung

Mit diesem Abschnitt möchte ich allen Personen Danken, die mich auf den Weg zu und während dieser Bachelorarbeit geholfen haben. Ohne die folgenden Personen wäre die Bachelorarbeit gegebenenfalls nicht in ihrer letztendlichen Form möglich gewesen.

Zunächst möchte ich mich bei allen Professoren, welche Vorlesungen im Bezug zum Visualisierungsinstitut gehalten und dadurch mein Interesse an den Thematiken, die an diesem Institut behandelt werden, geweckt haben. Hierdurch bin ich zu der Abschlussarbeit an diesem Institut gekommen.

Des Weiteren gebührt meinen Betreuern ein großer Dank. Xingyao Yu hat mich vor Ort immer unterstützt und meine Ideen in Bezug der Bachelorarbeit hinterfragt, Verbesserungsvorschläge eingebracht und mich mit formalen Informationen versorgt. Prof. Dr. Liang Zhou hat mich ebenfalls unterstützt und das Expertenfeedback mit der Expertin in Peking ermöglicht. Zudem möchte ich mich hiermit bei der medizinischen Expertin Mengjie Fan für das Feedback bedanken. Ohne sie hätte ich keine wissenschaftliche Meinung zu dem chirurgischen Potenzial des Trainingssystems erhalten.

Außerdem möchte ich mich bei allen Probanden der Nutzerstudie bedanken. Durch diese Nutzerstudie wurde es mir ermöglicht die eigentliche Forschungsfrage in Bezug auf die Haptik zu ergründen. Zusätzlich bedanke ich mich bei meiner Freundin Nancy, die mich immer mental unterstützt hat und die Arbeit Korrektur gelesen hat.

Des Weiteren danke ich meinen Eltern für den gezollten Stolz und die Unterstützung.

Als letztes möchte ich mich bei meinen Kommilitonen Jurek und Alp bedanken mit welchen ich mich während des Studiums austauschen und Lerngruppen bilden konnte. Dazu bedanke ich mich ebenfalls bei allen weiteren Kommilitonen, die mir den Studentenalltag versüßt haben oder mit denen ich mein Wissen austauschen konnte.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	17
1.1. Motivation	17
1.2. Ziel der Arbeit	18
1.3. Methodik	18
1.4. Gliederung der Arbeit	19
2. Verwandte Arbeiten	21
2.1. Chirurgische Orientierungshilfe	21
2.2. VR-basiertes Training	24
2.3. Haptik und ihr Einfluss auf VR	27
3. Prototyp des Trainingssystems	33
3.1. Design	33
3.2. Implementierung	46
3.3. Zusammenfassung des Designs und der Implementierung	55
4. Nutzerstudie	57
4.1. Design der Studie	57
4.2. Durchführung	60
5. Evaluation und Diskussion	61
5.1. Evaluation der Studie	61
5.2. Expertenfeedback	68
5.3. Diskussion	69
5.4. Limitation	72
6. Fazit und Ausblick	75
Literaturverzeichnis	77
A. Programmspezifischer Anhang	85
B. Studienspezifischer Anhang	87

Abbildungsverzeichnis

2.1.	Proband verwendet Da-Vinci-Roboter und haptische Geräte am Handgelenk [BFCK17]	22
2.2.	Haptisches Gerät an verschiedenen Positionen um das Auge befestigt (für Vibrations-Feedback). [ZWYZ19]	28
2.3.	„Selbst-Haptik“ am Beispiel eines virtuellen Smartphones. Links berührt der Nutzer seine Hand nicht, rechts schon. [FH21]	28
3.1.	Architektur des Trainingssystems. Bestehend aus den drei Szenen der Anwendung.	34
3.2.	Greifen und Operieren mit der Säge in VR. Hier sieht man die Controller-Version. Auf der nächsten Seite wird die Abbildung fortgesetzt.	35
3.2.	Greifen und Operieren mit der Säge in VR. Hier sieht man die Handschuh-Version. Diese Abbildung ist eine Fortsetzung von der vorherigen Seite.	36
3.3.	Sicht auf den Operationstisch und das Whiteboard, welches die Genauigkeit des Sägens und den Namen des aktuellen Schneidebereichs anzeigt.	36
3.4.	Holographische Säge als visuelle Hilfestellung.	38
3.5.	„Schneide-Kugeln“ als visuelle Hilfestellung	39
3.6.	Sicht auf das Menü zum Laden von Schneidebereichen und de-/aktivieren von visuellen Hilfestellungen. Rechts sieht man die geöffnete Lade-Scroll-Ansicht	39
3.7.	Sicht auf die Bereiche zum Verlassen der VR-Szene und Interaktion mit diesen	41
3.8.	Sicht auf den Operationsraum von oben.	41
3.9.	Ansicht der Szene für die Schneidebereich-Erstellung	42
3.10.	Erstellen eines neuen Schneidebereichs	43
3.11.	Speichern eines Schneidebereichs.	44
3.12.	Menü zum Laden und Löschen von Schneidebereichen.	44
3.13.	Einstellungen für das System mit den Standard-Werten	45
3.14.	Wireframe-Ansicht eines generierten Schneidebereichs. In beiden Bilder sind die drei Ausgangspunkte, zum Berechnen des Bereichs, rot gefärbt.	47
3.15.	Visualisierung zweier Iterationen aus Algorithmus 3.2 – die erste in schwarz und zweite Iteration in weiß. Zur Vereinfachung mit wenigen Punkten.	50
3.16.	Achsen-spezifische Ausrichtung von Schneidebereichen	52
3.17.	Funktion für die Genauigkeitsberechnung.	53
5.1.	Box-Plot zur Gesamtgenauigkeit des Sägens	62
5.2.	Box-Plot über die System Usability Scale (SUS)-Wertung	63
5.3.	Mittelwerte der Unterskalen vom NASA Task Load Index (NasaTLX) je Eingabegerät	65
5.4.	Box-Plot zu den Mittelwerten der Gesamtbewertung des NasaTLX	65
5.5.	Mittelwerte der Likert-Skala-basierten Fragen des Interviews	66
A.1.	Seitliche Ansicht auf den Operationsraum	85
A.2.	Visualisierung des Feedbacks bei betätigen eines Knopfes in VR	85

A.3. Ursprüngliche, verworfene Implementierung des Schneidebereichs bei welcher lediglich zwei Gitter zur Kollisionserkennung verwendet wurden.	86
A.4. Komplettansicht der angezogenen SenseGlove DK1	86
B.1. Visualisierung der SUS-Werte beider Versionen des Trainingssystems pro Proband.	89
B.2. Visualisierung der NasaTLX-Werte beider Versionen des Trainingssystems prozentual pro Proband.	89
B.3. Verwendeter NasaTLX Fragebogen.	90

Tabellenverzeichnis

5.1. Deskriptive statistische Größen der verglichenen Genauigkeitspaare. Hierbei ist N die Stichprobengröße.	62
5.2. Deskriptive statistische Größen der SUS. Hierbei ist N die Stichprobengröße. . .	64
B.1. Tabelle der ausgewerteten t-Tests für die Genauigkeit.	87
B.2. Tabelle des ausgewerteten t-Tests für die SUS-Werte.	87
B.3. Tabelle der ausgewerteten t-Tests für die NasaTLX-Werte.	88
B.4. Deskriptive Statistik für die t-Tests des NasaTLX.	88

Verzeichnis der Algorithmen

3.1. Generierung des Schneidebereichs	48
3.2. Sortieren der Eckpunkte für die Gittererzeugung des Schneidebereichs	49
3.3. Platzieren der Kugeln für den Schneidebereich (außer für zu tiefes Schneiden) . .	51
A.1. Versetzen der Kurve des Schneidebereichs um die Positionen der Punkte für zu tiefes Schneiden zu erhalten	86

Abkürzungsverzeichnis

- AI** Artificial Intelligence. 22
- AR** Augmented Reality. 17
- CNN** Convolutional Neural Network. 22
- HMD** Head Mounted Display. 18
- JSON** JavaScript Object Notation. 55
- MCI** Mensch-Computer-Interaktion. 29
- MIC** Minimal Invasive Chirurgie. 23
- MR** Mixed Reality. 21
- MRT** Magnetresonanztomographie. 21
- NasaTLX** NASA Task Load Index. 9
- SUS** System Usability Scale. 9
- UI** User Interface. 43
- VR** Virtual Reality. 3
- XR** Extended Reality. 30

1. Einleitung

Dieses Kapitel erklärt das Thema dieser Arbeit und gewährt Einblicke in dessen Relevanz. Es spricht an was aktuelle Probleme der Chirurgie sind und welche Möglichkeiten ein VR Trainingssystem mit haptischen Controllern in Bezug auf diese Probleme bietet. Außerdem wird das Ziel dieser Arbeit formuliert, ein Einblick in ihre Methodik gegeben und eine Gliederung bereitgestellt.

1.1. Motivation

Die Digitalisierung unterstützt seit einigen Jahrzehnten eine Vielzahl an Menschen in ihren täglichen Aktivitäten. Die Kommunikation im privaten, aber auch im beruflichen Bereich findet zunehmend digital statt.

Nicht zuletzt durch die Corona-Pandemie ist die zwischenmenschliche Kommunikation in digitaler Form unentbehrlich geworden, um dem täglichen Geschehen in diversen Bereichen nachgehen zu können. Auch im Bereich der Ausbildung von Chirurgen sind regelmäßige Trainings trotz Kontaktbeschränkungen für das Gesundheitswesen fundamental, was während der Pandemie ein großes Problem war [FMR+21]. Dies drücken Munro et al. [MBAM21] bereits mit dem Titel ihrer Arbeit „Covid-19 leaves surgical training in crisis“ aus. Virtuelles Training kann hierbei als Lösung fungieren, da man hierfür nicht mit anderen Personen in einem (realen) Raum sein muss. Aber auch unabhängig von der Pandemie scheint Training in VR in verschiedensten Bereichen an Relevanz zu gewinnen oder ist bereits relevant, darunter auch im Medizintechnik-Sektor [Le13].

Auch unter ökonomischen Gesichtspunkten ist Training in VR, unter der Voraussetzung, dass vergleichbare Lernerfolge wie im Training vor Ort erzielt werden, sehr attraktiv, da diverse Kosten eingespart werden können [Pot19; RMH+21; TFR+21].

Darüber hinaus ermöglicht virtuelles Training eine präzise Messung der Leistung des Nutzers und die Wiederholung einzelner Trainingsszenarien. Es kann gezielt an den Defiziten des Trainierenden gearbeitet werden und Lernerfolge können stetig überprüft werden.

Es liegen bereits empirische Kenntnisse im Bereich der Chirurgie mit Augmented Reality (AR) Trainingssystemen vor. In VR existieren vor allem Arbeiten rund um Assistenzsysteme für reale Operationen. Der Einsatz von VR im Trainingsbereich der Chirurgie hingegen ist bislang geringfügig erforscht. Tiefgehende Erkenntnisse würden weitere Forschungsmöglichkeiten bieten und den Fortschritt chirurgischer Trainingsmaßnahmen fördern. Des Weiteren stellen haptische Geräte eine aufsteigende Technologie im VR-Bereich dar, zu welcher eine Vielzahl wissenschaftlicher Arbeiten im Allgemeinen existieren, allerdings nur wenige im Bereich der Medizin bzw. Chirurgie. Im Fall einer positiven Auswirkung haptischer Einflüsse auf chirurgische VR-Trainings könnten sich diese auch auf andere Fachbereiche übertragen lassen, da Operationen generell hohe Präzision und komplexe Abläufe erfordern.

Insgesamt lässt sich sagen, dass VR-Training in Kombination mit haptischem Feedback in der Chirurgie ein bislang geringfügig erforschtes Gebiet ist, welches potenziell die Lösung diverser Probleme sein kann.

1.2. Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es festzustellen ob und in welcher Form verschiedenes haptisches Feedback Einfluss auf das Chirurgie-Training in VR hat. Die Geräte anhand welcher der Mehrwert haptischer Rückmeldung erforscht werden soll werden im nächsten Abschnitt beschrieben. Das Training wird hierbei auf Operationen im Knöchelbereich beschränkt. Hierfür soll eine VR-Anwendung gebaut und von Nutzern getestet werden, dessen Kernfunktion darin besteht, dass ein Nutzer die Aufgabe hat einen bestimmten Bereich beim Knöchel auszusägen und dabei Informationen über die Genauigkeit des Säge-Prozesses angezeigt bzw. gespeichert werden. Diese Kernfunktion soll mit verschiedenen Arten haptischen Feedbacks funktionieren um einen Vergleich dieser Arten durchführen zu können. Abseits dieser Kernfunktion soll das Programm möglichst nutzerfreundlich sein und einen realen Nutzen mit sich bringen, da dies die Integrität der Erkenntnisse über haptisches Feedback erhöht.

1.3. Methodik

Dieser Abschnitt erläutert wie die Vorgehensweise dieser Arbeit aussieht, wie das haptische Feedback letztlich verglichen wird und welche Controller hierfür in VR verwendet wurden.

Zunächst wurde über Design-Möglichkeiten nachgedacht, wie man den Schneidebereich des Knochens visualisieren kann und darauf aufbauend Informationen über die Genauigkeit des Sägens eines Nutzers sammeln kann. Danach wurde die eigentliche VR-Anwendung programmiert und das Design erweitert bzw. verbessert.

Zum Testen wurde Als Head Mounted Display (HMD) die HTC VIVE Pro ¹ verwendet. Die dazugehörigen Controller bieten haptisches Feedback in Form von Vibration – diese kann in Hinblick auf Verzögerung, Dauer, Frequenz und Amplitude frei programmiert werden. Als ein Gerät, das weitere Möglichkeiten haptischen Feedbacks mit sich bringt, wurden die SenseGlove DK1² verwendet. Diese kann man als haptischen Handschuh bezeichnen. Man zieht sie ähnlich zu normalen Handschuhen an, befestigt jedoch jeden Finger an eine dafür vorgesehene Schiene (per Klettverschluss). Jede Schiene kann einzeln angesprochen werden, bietet jeweils die Möglichkeit Vibration zu erzeugen und jeweils einen Motor, der eine Zugkraft auf einen Finger wirken lassen kann, indem ein Motor eine Schiene zu sich zieht. Dies geschieht mit einer Schnur die vom Motor festgezogen werden kann. Dadurch kann das virtuelle Greifen von Objekten immersiver gestaltet werden indem das Fühlen der Oberfläche von Objekten simuliert wird.

Die Anwendung wurde dann an eine chirurgische Expertin in Peking gesendet und von diesen mit den VIVE Controllern getestet um Feedback zur Usability und der fachlichen Korrektheit zu erhalten. Zusätzlich wurde um den haptischen Aspekt zu vergleichen eine Nutzerstudie vor Ort im Visualisierungsinstitut der Universität Stuttgart durchgeführt, da die Expertin nicht die verwendeten, haptischen Controller zu Verfügung hatten.

Um zu entscheiden, ob die erweiterten haptischen Funktionen der Handschuhe einen Mehrwert für das Chirurgie-Training mit sich bringen, wurden für die Nutzerstudie verschiedene Größen rund um die Genauigkeit des Sägens im Knöchelbereich herangezogen, die für die Controller- und Handschuhversion gespeichert und verglichen wurden.

¹<https://www.vive.com/de/product/#pro%20series> Website der HTC VIVE Pro Serie

²<https://www.senseglove.com/> SenseGlove website

Zuletzt wurden diese gesammelten Daten und weitere Aspekte statistisch analysiert. Diese Aspekte, zu denen die Probanden befragt wurden, waren beispielsweise die Usability, die Arbeitsbelastung und die Immersion.

1.4. Gliederung der Arbeit

Die Arbeit ist in folgender Weise inhaltlich unterteilt:

In Kapitel 2 wird verwandte Literatur, welche Grundlagen für diese Arbeit, relevante Ergebnisse oder Forschungsausblicke gewährt, behandelt. Diese unterteilt sich in allgemeine chirurgische Orientierungshilfen, VR-basiertem Training und den Einfluss haptischer Geräte auf VR-Systeme. Darauf folgend wird in Kapitel 3 der im Rahmen dieser Arbeit entstandene Prototyp eines Trainingssystems für chirurgische Eingriffe im Knöchelbereich vorgestellt. Hierbei wird auf Design-Entscheidungen und die wichtigsten Implementierungsdetails eingegangen.

Im Anschluss wird in Kapitel 4 ein Überblick zur Nutzerstudie gegeben, welche dem Vergleich der verwendeten Eingabegeräte diente. Sie wird hierbei konzeptuell beschrieben.

Als Nächstes werden in Kapitel 5 die Ergebnisse der Nutzerstudie evaluiert, das Feedback einer Expertin zu dem Trainingssystem gegeben und das Gesamtpaket diskutiert. Außerdem werden die Limitationen dieser Arbeit beschrieben.

Abschließend fasst Kapitel 6 die Ergebnisse der Arbeit zusammen und gibt einen Ausblick auf zukünftige Forschungs- und Weiterentwicklungsmöglichkeiten in Bezug zum entwickelten Trainingssystem.

2. Verwandte Arbeiten

In diesem Kapitel wird Literatur vorgestellt, die mit dieser Arbeit zusammenhängt oder verwandt ist. Diese Literatur wird grob in drei Themengebiete gegliedert: Chirurgische Orientierungshilfe, VR-basiertes Training und Haptik und ihr Einfluss auf VR. Da diese Bereiche sich überschneiden können, wurde in solchen Fällen entweder abgewägt in welchen Sektor die Literatur am besten passt oder für die einzelnen Sektoren das jeweils Relevante aus den Publikationen erläutert.

2.1. Chirurgische Orientierungshilfe

Hilfestellungen für die Chirurgie werden in diesem Abschnitt im Allgemeinen behandelt, um einen Überblick über die gängigsten Methoden zu erhalten und ein besseres Verständnis für diesen Bereich zu erlangen. Es werden sowohl Arbeiten betrachtet, welche Assistenzsysteme behandeln, die in realen Operationen eingesetzt werden können, als auch Arbeiten, welche Systeme für chirurgisches Training behandeln. Es werden weniger VR-Trainingssysteme angesprochen, da dies besser in den nächsten Abschnitt passt. Wenn man sich einen Überblick über Orientierungshilfen in der Chirurgie verschafft, kann man gut funktionierende Hilfsmittel in ein VR-System übertragen und versteht besser was ein System können muss, um einen realen Nutzen zu haben. Außerdem kann man dadurch leichter erkennen ob und woran es einem System mangelt, das man gerade betrachtet. Eine Arbeit von Seth et al. [SCBB11] beschäftigt sich genau mit dem medizinischen Bereich dieser Arbeit: Orthopädische Chirurgische Eingriffe. Es wurde eine Art Navigationssystem entwickelt, welches es ermöglicht sich durch 2D- und 3D-Visualisierungen von Körperteilen eines Patienten zu bewegen und als „VR-basiert“ bezeichnet wird. In dem Fall ist VR aber nicht das, was man sich heute darunter vorstellt (mit HMD etc.), sondern eine Anwendung, die auf einem typischen Monitor angezeigt wird. Bei der Anwendung werden chirurgische Instrumente getrackt, mit denen man durch die Visualisierungen navigieren kann. Die angesprochenen Visualisierungen werden z.B. durch Magnetresonanztomographie (MRT) generiert. Während des Navigierens kann man durch die Visualisierung sinnvolle Informationen über die Anatomie des Patienten erhalten und so leichter bzw. besser Entscheidungen treffen. Im Laufe der Arbeit wurde mit Experten kommuniziert, die Feedback zum System gaben, welches als sinnvolles Werkzeug für „anatomy education, training, surgical planning, diagnosis, and real-time intra-operative surgical navigation“ angesehen wurde. Dies lässt sich auf VR-Trainings übertragen: In diesen kann man im Endeffekt auch chirurgische Instrumente greifen, die getrackt werden. In Kombination mit hilfreichen Visualisierungen kann dies das Training unterstützen bzw. lehrreich sein.

Andere Arbeiten zeigen, dass AR bzw. Mixed Reality (MR) Technologien sind, welche sinnvoll für die Medizin eingesetzt werden können. In einer Publikation von Zhao et al. [ZXW+20] geht es um eine Hilfestellung für das Trainieren neonataler, endotrachealer Intubation (eine wichtige und komplexe Wiederbelebensmaßnahme für die Beatmung von Neugeborenen [FAN+15]). Auch wenn dies kein chirurgischer Eingriff ist, zeigt der Artikel das Potenzial von MR-Systemen in der

2. Verwandte Arbeiten

Medizin – im Vergleich zu anderen Trainingsmethoden konnten Trainierende die Fähigkeit deutlich schneller erlernen. Dies wurde durch Funktionen wie Echtzeit-Leistungsüberwachung, welche durch ein Convolutional Neural Network (CNN) implementiert wurde, Feedback durch Bereiche, die in bestimmten Farben angezeigt werden und Ansehen einer Wiederholung des Testdurchlaufs erreicht.

Darüber hinaus zeigt auch eine Publikation von Schott et al. [SSS+21] anhand eines Programms für die Lehre von Anatomie, dass MR sinnvolle Verwendung in der medizinischen Lehre findet. Anatomie ist ein wichtiger Wissens-Faktor für den Erfolg von Operationen [KM21] und somit auch relevant für diesen Abschnitt. Das Programm von Schott et al. erlaubt Lehre in kleinen Gruppen bis zu Klassenzimmer-Größen und jeder kann per VR, AR oder einer Desktop-Anwendung partizipieren. Nutzer können hierbei z.B. Organe greifen, was sich in einer Studie als nutzerfreundlich herausstellte. Es sei des Weiteren sinnvoll Informationen über die Interaktion im System anzuzeigen, da dort teilweise direkt und teilweise indirekt interagiert werden konnte, was zur Verwirrung bei den Nutzern führte.

Zusätzlich meinen Autoren einer Arbeit, dass aufsteigende Technologien wie Artificial Intelligence (AI), und VR wahrscheinlich essentielle Bestandteile in zukünftiger medizinischer Lehre nach der Corona-Pandemie sein werden [GS20]. In einem anderen Artikel unterscheidet Goh [Goh21] zwischen drei Szenarien von der Lehre in der Medizin, welche in der Zukunft nach der Corona-Pandemie eintreten könnten. Alle Arten beinhalten unter anderem VR und AR.

Des Weiteren zeigen Arbeiten, dass haptische Geräte immer häufiger in der Chirurgie verwendet werden. Eine Publikation, welche ein System zum Trainieren von Laparoskopie (Operation im Bauchbereich) evaluiert, kam zu dem Entschluss, dass haptische Controller mit ihrer Krafteinwirkung eine sinnvolle Hilfestellung in der Navigation durch den Bauchbereich darstellen [HR16]. Eine andere Arbeit zeigt, dass haptische Führung die Effektivität, Präzision und Sicherheit endovaskulärer Eingriffe verbessern kann [MDL+19]. Hierbei ging es konkret um Roboter-unterstützte, vaskuläre Operationen, welche hohe Fertigkeiten des Chirurgen benötigen. Hierbei hilft der Roboter Präzision und Stabilität der verwendeten Instrumente zu verbessern. Das entwickelte haptische Feedback erlaubt dem Chirurgen das Gefäßsystem zu spüren, während der Katheter mit Unterstützung des Roboters kontrolliert wird. Das Ganze wurde mit einem Chirurgie-Simulator getestet, wobei Operationsgeräte verfolgt und visualisiert wurden.

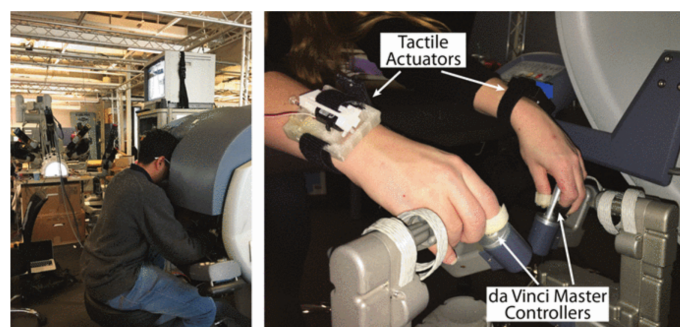


Abbildung 2.1.: Proband verwendet Da-Vinci-Roboter und haptische Geräte am Handgelenk [BFCK17]

Eine weitere Arbeit besagt, dass es allen am Markt erhältlichen Robotern für die Chirurgie an haptischem Feedback mangelt [BFCK17]. Das fehlende haptische Feedback schränke die Verfahren, die mit Robotern durchgeführt werden können, etwas ein, da Chirurgen nicht spüren können, wie stark sie an einer Naht ziehen oder Verstopfungen im Gewebe nicht taktil lokalisieren können. Es wurde ein Experiment mit einem Da-Vinci-Roboter¹ und haptischen Geräten am Handgelenk durchgeführt – siehe Abbildung 2.1. Das taktile Echtzeit-Feedback reduzierte das Integral der von den da-Vinci-Werkzeugen auf die Arbeitsmaterialien ausgeübten Kraft signifikant. Dieses Ergebnis blieb auch erhalten, wenn die haptische Rückmeldung entfernt wurde. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die Rückmeldung in Form von Kraftereinwirkung am Handgelenk eine wichtige Rolle dabei spielen kann, die Kraft, die Nutzer mit einem Operationsroboter ausüben, zu minimieren.

Eine andere Publikation, welche ebenfalls eine Erweiterung eines Da-Vinci-Roboters behandelt, beschäftigt sich mit auditiver Hilfestellung [ISE+19]. Die Anwendung, die entwickelt wurde, soll dem Nutzer hilfreiche Informationen zur Operation geben, die gerade durchgeführt wird. Hierbei geht es um Minimal Invasive Chirurgie (MIC), also chirurgische Eingriffe, bei denen der Fokus darauf liegt, möglichst wenig Schaden am Gewebe des Patienten anzurichten. Das Programm wurde als hilfreich und sinnvoll erachtet und könne in Eingriffen in der MIC jeglicher Art verwendet werden.

Auch AI wird im Rahmen der Chirurgie in verschiedenen Forschungsarbeiten als sinnvolle Technik angesehen. Eine Studie von Caballas et al. [CBLT21] zeigt das Potenzial von Deep Learning, indem es für ein bewegungsbasiertes laparoskopisches Palpationssystem (Ein System zum Abtasten des Bauchbereichs) Echtzeit-Bildverarbeitung (welche auf Deep Learning beruht) verwendet – wir befinden uns hier also im Computer-Vision-Bereich. Dieses System soll dem Chirurgen helfen die Abtastung präziser durchzuführen, indem es ihm Pfade zum Abtasten anzeigt. Weitere Studien seien aber notwendig, um das System weiter in die Chirurgie integrieren zu können. Die Autoren einer anderen Arbeit meinen, dass AI eine große Anwendungsvielfalt in der Medizin mit sich bringt und gerade in der Chirurgie aktuell ein großes Thema ist [LT18]. Speziell durch Bildverarbeitung und als eine Art Navigationssystem habe AI großes Potenzial in der Chirurgie.

Zuletzt gibt es noch Arbeiten, die nicht direkt in informatische Teilgebiete passen: beispielsweise ein System zum Operieren von Brust-Tumoren, welches Ultraschall verwendet um 3D-Navigation in der Anwendung möglich zu machen und verwendete chirurgische Geräte verfolgt. In einer Studie wurde durch das System weniger Gewebe zerstört und gleichzeitig gab es vier Mal weniger noch vorhandene Tumorstellen [UGL+16]. Eine andere Forschungsarbeit präsentiert ein getracktes Hilfsgerät für Operationen, welches als Zeigergerät in der MIC verwendet wird. Mit einer Studie wurde eine signifikante Verbesserung der chirurgischen Anleitung und Führung in der MIC gezeigt [WTN+12].

In diesem Abschnitt hat man erfahren, dass es viele verschiedene Teilgebiete aus der Informatik gibt, die momentan in chirurgischer Anleitung verwendet und erforscht werden. Hierzu zählen vor allem AI, Computer Vision und AR, VR und MR. Arbeiten rund um VR werden jedoch erst im nächsten Abschnitt angesprochen und vertieft. Es wird viel mit Roboter-unterstützten chirurgischen Systemen, Navigationssystemen (welche oft AI verwenden) und Trainingssystemen (welche meistens die VR-Themen behandeln) geforscht. Es gibt jedoch auch einzelne Arbeiten aus anderen Gebieten.

¹<https://www.intuitive.com/en-us/products-and-services/da-vinci> Intuitive Website – die Firma hinter dem Da-Vinci-Roboter

2.2. VR-basiertes Training

Dieser Abschnitt zeigt verschiedene Arbeiten zu VR-basierten Trainings, welche den Effekt dieser Trainings erläutern und diesen Effekt mit gängigen Trainingsmethoden vergleichen. Außerdem wird erläutert wie Informationen in VR dargestellt werden sollten. An sich werden Arbeiten aus verschiedensten Wissenschaftsbereichen vorgestellt – es werden ebenfalls Arbeiten mit direktem Bezug zur Chirurgie behandelt.

Zunächst kann VR in vielen Bereichen für die Lehre eingesetzt werden, was vor allem an der Möglichkeit liegt gemeinsam und immersiv zu lernen bzw. zu trainieren. [Chr10; HAA14]. In den gerade referenzierten, sowie in anderen Artikeln werden des weiteren Beispiele genannt für welche Bereiche VR relevant sei und eventuell schon verwendet wird: Produktentwicklung, Produktherstellung, Gaming [CJN15], Visualisierung, Konstruktion (im Ingenieurwesen), Lehre [HAA14], sowie Medizin [RMH+21] und Chirurgie [HS06]. An den unterschiedlichen Veröffentlichungsdaten der Artikel kann man erkennen, dass VR schon länger erforscht wird und ein immer relevanteres Thema ist. Elmqaddem [Elm19] meint, dass VR die Bedürfnisse der modernen Gesellschaft besser abdeckt als herkömmliche Lernmethoden, da heutige Lernende „entertainment, interactivity, participation and manipulation of objects“ wollen würden. Allerdings müsse sich die Gesellschaft und Technik noch weiterentwickeln um das ganze Potenzial von VR auszuschöpfen. Zu dieser Weiterentwicklung kann diese Bachelor-Arbeit in Form von wissenschaftlichen Erkenntnissen beitragen.

Nun werden Arbeiten vorgestellt, welche zeigen, dass digitales und virtuelles Training für die Chirurgie ein immer relevanter werdendes Thema ist. In den Arbeiten wird die Notwendigkeit von dezentralem Training während der Corona-Pandemie, wie auch im Allgemeinen erläutert.

Literatur, die nicht explizit VR als Lernmethode anspricht, sondern digitales Lernen an sich, thematisiert, dass allgemein Tech-basierte Lernmethoden wichtiger werden, gerade in der derzeitigen Corona-Pandemie [PRT+21].

Das legen die Zahlen von Franklin et al. [FMR+21] ebenfalls nahe: Während der Corona-Pandemie sei im Gesundheitswesen vor allem der Chirurgie-Bereich von Lockdowns betroffen gewesen. Nur ein Drittel der Befragten waren mit ihrer E-Learning Plattform zufrieden. 96% gaben an, dass sie hauptsächlich virtuell Erfahrung in der Chirurgie machten. Auch wenn E-Learning als nützlich eingestuft wurde, wurde persönliches Lernen immer noch als beste Lernmethode angesehen. Nur virtuelles Lernen hätte nicht die Möglichkeit gegeben praktische und prozedurale Fähigkeiten gleich gut wie durch persönliches Training zu erlernen. Virtuelles Training in Kombination mit gelegentlichem Sammeln von Erfahrungen in Kliniken sei jedoch sehr hilfreich gewesen. In dem Artikel ist nie spezifisch von VR-Training die Rede, generell lässt sich jedoch sagen, dass Tech-basiertes Lernen immer wichtiger wird.

Andere wissenschaftliche Arbeiten zeigen außerdem, dass VR sich gut für chirurgische Bildung einsetzen lässt. In der Arbeit von [HS06] wurden 16 Studien über chirurgische Simulatoren in VR analysiert. Dabei ist man zu dem Entschluss gekommen, dass VR die Zeit des Erlernens und die Fehlerrate chirurgischer Eingriffe reduziert. Es sei aber ein Risiko gegeben, dass Trainierende sich ungeeignete Verhaltensweisen aneignen oder ihre eigenen Fähigkeiten überschätzen, was den Eingriff negativ beeinflussen könnte, auch wenn es diesbezüglich keine Daten gäbe, die dies belegen. Diese Risiken sollten gewichtet und bewertet werden, wenn solche Trainingssysteme häufiger verwendet werden.

In einem Artikel eines Gesundheitswesen-Magazins, welcher vier der besten VR-Durchbrüche in der Medizin beschreibt [Car19b], beziehen sich zwei Durchbrüche auf die Chirurgie. Einer der

Durchbrüche ist ein VR System, das es erlaubt Modelle der Anatomie eines Patienten anzufertigen, um Operationen zu planen und den Patienten durch sein eigenes anatomisches Modell zu führen. Dieses System ermöglicht eine bessere Planung von Operationen und Aufklärung der Patienten [Hos19]. Der andere Durchbruch ist ein VR-Trainingssystem für Operationen, welches realitätsnahe Operationen simuliert. Die Verfasser des Artikels meinen „The need for improved surgical training procedures is evident“ sei einer der Gründe weshalb das erhältliche Trainingssystem entwickelt wurde. In einem ausführlicheren Artikel werden weitere Gründe für die Notwendigkeit des Programms genannt und eine Nutzerstudie beschrieben, mit welcher der Nutzen des Programms belegt wird Carfagno [Car19a]. In der Studie wurden zehn mit üblichen Mitteln ausgebildete Chirurgen mit Chirurgen verglichen, die mit Osso VR² (dem besagten Programm) ausgebildet wurden. Hierbei schlossen die virtuell Trainierenden besser ab. Wenn die trainierenden Personen, während des VR-Trainings von einem Fachmann beobachtet wurden, schlossen diese um 230% besser ab als Trainierende, die es nicht wurden. Dabei wurden Werte wie Genauigkeit und Effizienz betrachtet. Das Programm funktioniert mit üblichen VR-Controllern. Dies motiviert den Aspekt dieser Bachelor-Arbeit – ob erweiterte haptische Geräte die Performanz der Nutzer verbessert. Wenn dies der Fall ist, würde das einen immensen Nutzen zur Forschung in diesem Bereich beitragen und neue Forschungsmöglichkeiten, wie beispielsweise einen Vergleich zwischen der Effizienz von Chirurgen, die mit üblichen Mitteln ausgebildet wurden und Chirurgen, die mit solchen haptischen Geräten und VR ausgebildet wurden.

Im weiteren Verlauf dieses Abschnitts werden Arbeiten vorgestellt, welche den Einfluss von VR auf verschiedene Trainings beschreiben. Hierbei wird nach einigen allgemeinen Arbeiten erneut Bezug zur Chirurgie genommen.

In einer Publikation von Trabysh et al. [TFR+21] wurde der Effekt von Training in VR auf das Aneignen von Wissen und Fähigkeiten erforscht. Hierbei wurde in einem Quasi-Experiment ein typischer Flugzeugverwaltungskurs (welcher Methoden wie Unterricht in Klassen verwendet) mit einem AR- bzw. VR-Kurs verglichen. Die Ergebnisse des Experiments zeigen, dass der Kurs in VR/AR in der Hälfte der Zeit vom anderen Kurs beendet wurde und dabei das Wissen und praktische Fähigkeiten der Probanden nur minimal schlechter waren. Trotz der ungleichen Performanz konnten die Teilnehmer in deutlich kürzerer Zeit die minimalen Voraussetzungen, welche zum Bestehen des Kurses nötig waren, erlangen. Es wird vermutet, dass weitere Entwicklung in VR und künstlicher Intelligenz nötig wäre, um das Trainingssystem in vollem Umfang zu integrieren. Es sei wichtig den Lernfortschritt von Nutzern zu überwachen und den Inhalt an den Wissensstand des Nutzers anzupassen. Die beschriebene Arbeit zeigt, dass in VR in signifikant kürzerer Zeit ähnliche Lernerfolge wie in gängigen Lernmethoden erzielt werden können.

Es existieren jedoch auch andere Arbeiten in denen klassische Lernmethoden wie Video-Training oder paarweises Training höheren Erfolg hatten. In dem Artikel von Winther et al. [WRSF20] wird beschrieben, dass ein entwickelter VR-Simulator zur Wartung einer Pumpe zwar gute Ergebnisse lieferte, aber schlechter abschnitt als die gerade beschriebenen Methoden. Dies könnte bei medizinischen bzw. chirurgischen Trainings anders sein, da ganz andere Fähigkeiten benötigt werden und beispielsweise das Video-Training keine Option für einen angehenden Chirurgen ist, da vor allem praktische bzw. motorische Fertigkeiten benötigt werden. Dies belegt der Artikel von Fritz et al. [FSB19]. Die Autoren meinen außerdem, dass E-Learning Methoden zwar noch nicht ausgereift sind, um einem angehenden Chirurgen alle Fähigkeiten beizubringen die er

²<https://www.ossovr.com/> Osso VR website

benötigt, aber speziell VR durchaus eine Trainingsmethode ist, welche das Lernen eines Chirurgen unterstützen kann und vor allem große Kosten einsparen kann. VR biete die Möglichkeit die gleichen Bewegungen immer wieder zu üben, was essenziell für einen Chirurgen sei.

In einer Publikation von Rettinger et al. [RMH+21] wird VR-Training zum Vorbereiten eines Dialysators mit anderen Trainingsmethoden wie Gruppen- und Video-Training verglichen. In der Auswertung kam heraus, dass das Training in VR zwar länger dauert, der Lerneffekt aber auch höher ist, die Kosten niedriger sind und das Training ständig wiederholt werden kann.

In einer anderen Arbeit von Pottle [Pot19] wird über den Nutzen von VR in der medizinischen Lehre diskutiert. Auch hier wird angesprochen, dass Simulation und Wiederholbarkeit der Aufgaben ein wichtiger Teil der medizinischen Lehre sind. VR würde viele Vorteile wie niedrige Kosten, standardisiertes Training und die eben angesprochene Simulation und Wiederholbarkeit bieten. Der Artikel gibt zu den Kosten auch konkrete Zahlen: Ein kompletter High-end VR-Apparatus würde 3000 Pfund (3600€) kosten. Die Kosten der Software können variieren, würden sich aber häufig auf weniger als ein Zehntel einer physikalischen Simulation belaufen. Um die Frage zu beantworten, ob VR-Simulationen sinnvoll sind, wird auf verschiedene andere Arbeiten verwiesen. Die von Piloten verursachten Unfälle, die von den 1960er bis Mitte der 1990er Jahre etwa zwei Drittel aller Unfälle ausmachten, seien von 1995 bis 2001 auf etwa die Hälfte aller Unfälle zurückgegangen [Lev04], wobei VR-Simulationen von der Luftfahrtindustrie eine wichtige Rolle zugeschrieben werde. Des Weiteren wird in zwei weiteren Studien der Mehrwert von VR im Gesundheitswesen belegt. Der Wissenszuwachs in immersiver VR sei signifikant höher als am Monitor-Bildschirm [GPV+07]. VR wird laut Pottle mittlerweile in vielen chirurgischen Programmen verwendet und liefere gute Ergebnisse – sie würde nachweislich die Zahl der Verletzungen verringern, die Geschwindigkeit von Operationen erhöhen und das Gesamtergebnis verbessern [BLFG16]. Für einen Vergleich zwischen physikalischer Simulation und VR in Bezug auf den Lerneffekt wird außerdem auf eine andere Arbeit verwiesen, im Rahmen welcher eine Studie mit 84 Medizin-Studenten durchgeführt wurde. [Hae18]. Hierbei wurde festgestellt, dass der Lerneffekt der gleiche war, aber VR deutlich niedrigerer Kosten mit sich brachte. Zuletzt meint Pottle, dass durch AI noch weitere Durchbrüche in VR-Trainings möglich seien.

Verfasser einer anderen Publikation diskutierten den Nutzen von VR-Simulatoren für das Trainieren von MIC und meinten, dass dies eine vielversprechende Alternative zu gängigen Trainingsmethoden wäre [BSHW07]. Dies wird mit Funktionen wie dem Anfassen, Fühlen und Manipulieren von virtuellem Gewebe begründet.

Aus den erwähnten Artikeln und verschiedenen Artikeln aus Abschnitt 2.1 lernt man, dass es immer auf den Anwendungsfall ankommt und eventuell am implementierten System liegt, ob VR eine geeignete Technologie als alternative Trainingsmethode darstellt und welche Vor- und Nachteile ein VR-System konkret bietet. Die meisten Arbeiten zeigen jedoch, dass VR sich gut für die Medizin und Chirurgie eignet. Dazu lässt sich allgemein sagen, dass VR meistens viele Kosten spart, die Möglichkeit bietet Szenarien mehrmals zu wiederholen, die Performanz des Nutzers zu überwachen und noch weitere Vorteile für die Lehre mit sich bringt.

Als Abschluss dieses Abschnitts gibt die Arbeit von Baceviciute et al. [BMTM20] Aufschluss über das ideale Einbeziehen und den Effekt von Text und Ton in VR-Trainingsystemen. Es wurde ein Experiment durchgeführt in welchem Informationen auf verschiedene Weisen dargestellt wurden: 1.) Text, der direkt auf das Bild überlagert wurde, 2.) Text, der innerhalb eines Buches dargestellt wurde und 3.) auditiv. Herausgefunden wurde, dass die Art und Weise von Informationen in VR den Lernerfolg beeinflusst. Eine Darstellung als Text wirke sich positiv auf das Erinnern von Fakten, die Selbstwirksamkeitserwartung und das Verstehen schwieriger Aufgaben aus, erhöhe

aber auch die Arbeitsbelastung des Gedächtnisses und die kognitive Belastung. Text solle generell in das VR-Umfeld eingebunden werden und wichtige Lerninformation enthalten. Ton hingegen sei besser geeignet für schwierige Themen und wenn die Aufmerksamkeit woanders als bei der dargestellten Information ist. Wenn die Aufmerksamkeit direkt in der Umgebung sein soll oder die Arbeitsbelastung minimiert werden soll, können Lerninformationen als Ton integriert werden. Sowohl textliche als auch auditive Informationen sind wichtig für Trainingssysteme im Allgemeinen, um dem Nutzer Informationen weiterzugeben und somit auch relevant für diese Forschungsarbeit.

2.3. Haptik und ihr Einfluss auf VR

Schon 1996 stellten Hollands und Trowbridge [HT96] fest, dass ein VR-Trainer mit haptischen Hilfsmitteln (in diesem Fall ein Modell vom Knie) eine gute, günstige und flexible Trainingsweise darstellt. Konkret wurde bei ihrer Arbeit ein VR-System entwickelt, das zum Training für arthroskopische Behandlungen von Fehlfunktionen im Knie dienen soll. Ein vereinfachtes Modell des Knies wurde als Controller für das System entwickelt. Dieses Modell bot haptisches Feedback durch die eigene Form und dadurch, dass realitätsnahe Instrumente für die Behandlung des Knies verwendet werden konnten. Das System wurde von Chirurgen getestet und letztlich als realistisch für bestimmte Aufgaben in der Arthroskopie angesehen. Durch den Ansatz eines VR-Systems mit haptischen Hilfsmitteln existieren Parallelen zu dieser Arbeit. Es geht jedoch nicht um Chirurgie, zudem wird ein anderer Ansatz verfolgt: Es wird ein Modell des Knies verwendet und kein Controller, der vielseitig in VR einsetzbar ist – nicht nur für ein spezielles System. Dies fördert zwar die Immersion für speziell dieses Gebiet, macht die verwendeten „Controller“ jedoch unbrauchbar für Systeme, die für andere Gebiete gedacht sind. Haptische Handschuhe, wie sie in dieser Arbeit verwendet werden, sind quantitativ besser einsetzbar.

Mehrere Arbeiten bestätigen, dass Haptik die Immersion in VR erhöht. Verfasser einer Publikation meinen beispielsweise, dass Feedback in VR typischerweise durch Bild und Ton gegeben wird und Haptik eine gute Ergänzung hierzu sei [RHJA06]. Die Verfasser entwickelten einen haptischen Handschuh, ähnlich zu den in dieser Bachelor-Arbeit verwendeten Handschuhen, nur, dass er keine Möglichkeit der Vibration bietet und nicht klar ist wie realistisch sich das Greifen damit anfühlt. Laut den Verfassern würden diese Handschuhe die Immersion erhöhen, da die Nutzer hierdurch virtuelle Objekte „anfassen“ und „greifen“ können. In der Arbeit wird Haptik in drei Kategorien unterteilt: 1.) Menschliche Haptik: Das haptische System des Menschen, 2.) Maschinelle Haptik: Hardware-Geräte, welche das menschliche Tasten ersetzen oder erweitern, 3.) Computer-Haptik: Techniken, durch welche der Nutzer Objekte berühren und fühlen kann (durch Kraft-Feedback). Laut dieser Definition sind die SenseGloves, die in dieser Bachelor-Arbeit verwendet werden maschinelle Haptik und in dem entwickelten Trainingsprogramm verwenden Nutzer Computer-Haptik. Außerdem bieten die SenseGloves zusätzliches Feedback und könnten dadurch die Immersion im Vergleich zu der eben beschriebenen Arbeit weiter erhöhen.

Weitere Arbeiten bestätigen ebenfalls den Immersionsgewinn durch haptische Geräte. Verfasser einer Publikation vergleichen verschiedene Simulatoren, die haptische Geräte für medizinisches Training verwenden [ENN+16]. Es wird gezeigt, dass die Haptik dieser Simulatoren die Immersion der Simulation erhöht. Darunter ist auch ein VR-Simulator, welcher diesen Immersionsgewinn für MIC zeigt [PMR10].

Darüber hinaus zeigt eine Arbeit von Liu et al. [LLD17], dass die Verwendung haptischer Geräte

2. Verwandte Arbeiten

die Immersion und Authentizität der Interaktion in VR für die Lehre erhöhen kann. Die Arbeit zeigt außerdem für verschiedene Lehrgebiete typische Anwendungsbereiche von Haptik. In der Medizin würde Haptik vor allem für das Trainieren chirurgischer Fähigkeiten verwendet werden.

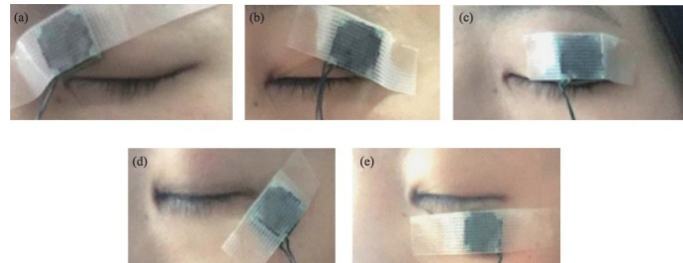


Abbildung 2.2.: Haptisches Gerät an verschiedenen Positionen um das Auge befestigt (für Vibrations-Feedback). [ZWYZ19]

Auch eine Arbeit von [ZWYZ19], welche sich mit taktilem haptischen Feedback im Augenbereich beschäftigt, zeigt, dass solches Vibrationsfeedback die Immersion in VR erhöhen kann, die visuelle Ermüdung während der Benutzung verringert werden kann und somit die Nutzungszeit verlängert werden kann und das Sehvermögen schützen kann. Hierfür wurde eine Studie durchgeführt, bei welcher die Probanden ein kleines Gerät, welches das Vibrationsfeedback gab, an verschiedenen Stellen rund um das Auge befestigt wurde – siehe Abbildung 2.2. Je nach Position hatte die Vibration unterschiedliche Einflüsse auf die Sicht und das subjektive Empfinden. Beispielsweise sei eine obere seitliche Position geeignet um einen Schütteleffekt (der Sicht) hervorzurufen.

Im Rahmen einer Arbeit, in welcher kein haptisches Feedback durch zusätzliche Geräte, sondern durch „Selbst-Haptik“ erforscht wurde, wie es in der Publikation genannt wird, fand man sogar heraus, dass diese Art der Haptik die Immersion in VR signifikant erhöhen kann [FH21]. Hierfür wurde eine Studie durchgeführt in welcher Probanden verschiedene Interaktionen in VR ausführen sollten. Beispielsweise sollten sie auf einem virtuellem Handy tippen, wobei mit einer flachen Hand die Haptik des Handys simuliert werden sollte und mit der anderen auf diese getippt werden sollte – siehe Abbildung 2.3 für ein besseres Verständnis. Benutzer empfanden die Kombination aus visuellen, auditiven und haptischen Reizen in den durchlaufenen Szenarien insgesamt belustigend und immersiv.

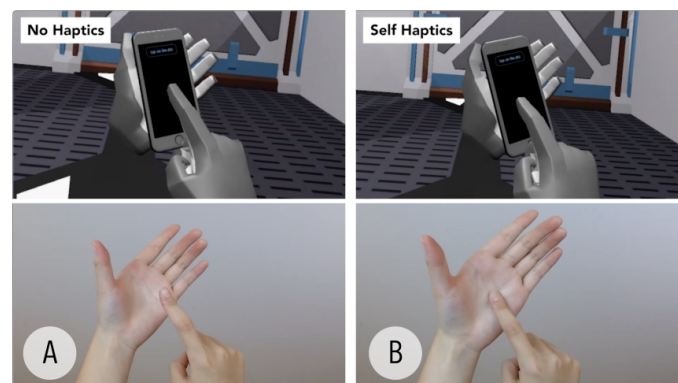


Abbildung 2.3.: „Selbst-Haptik“ am Beispiel eines virtuellen Smartphones. Links berührt der Nutzer seine Hand nicht, rechts schon. [FH21]

Haptik hat aber auch viele andere Auswirkungen auf VR. Beispielsweise kann haptische Unterstützung das Lernen von motorischen Fähigkeiten erhöhen [MTB+07]. Laut der Arbeit wird haptisches Feedback oft eingesetzt um reale Kräfte zu replizieren (wie z.B. das Greifen mit den SenseGloves), es würde jedoch die Möglichkeit bieten andere Hilfestellungen durch Kräfte zu geben, die man in realen Situationen nicht spürt. Um dies zu erforschen, sollten Probanden einer Studie sich auf einem bestimmten Pfad bewegen und eine Abfolge von (ein-dimensionalen) Kräften lernen. Dies sei unter anderem für die Chirurgie eine sinnvolle Fähigkeit. Es gab drei Bedingungen: nur haptisches Training, nur visuelles Training und eine Kombination aus beidem. Letztlich waren die Ergebnisse bei der Kombination am besten und die Ergebnisse von nur haptischem Training waren signifikant schlechter als die von rein visuellem Training. Somit könnte die Kombination aus VR und haptischen Geräten eine wichtige Rolle für das Trainieren von Fähigkeiten wie dem Operieren spielen.

Des Weiteren kann sich Haptik positiv auf die Usability und die Motivation in VR auswirken [EBPC19]. In der dazugehörigen Arbeit wurde ein VR-Programm zum Zusammenbauen von Molekülen mit haptischen Handschuhen entwickelt. Die Handschuhe, mit welchen die Atome im System gegriffen werden konnten, gaben lediglich Feedback in Form von Vibration, welches für jeden Finger einzeln ansteuerbar war. Das System motivierte Probanden und förderte deren Engagement in der Interaktion mit der Anwendung. Außerdem fanden sie das Design der Anwendung beeindruckend, interessant und lehrreich.

Zusätzlich zeigt eine Arbeit, dass haptische Rückmeldung sich positiv auf die Performanz eines Nutzers in einer bestimmten Aufgabe in VR auswirken kann [FJ18]. Die Arbeit vergleicht die Genauigkeit beim Golfen (explizit beim Putten) in der Realität mit einem VR-System mit „normalen“ Controllern und dem gleichen VR-System nur mit einem Golf-Schläger als Controller, an welchem ein Tracker befestigt wurde. Dabei kam heraus, dass die Probanden zwar in der Realität die höchste Genauigkeit erzielten, sie in dem VR-System mit dem Golfschläger aber eine höhere Genauigkeit als mit dem Controller erzielten und die Golfschläger-Version auch bevorzugten. Dies sei in neueren Gaming-, Sport- und medizinischen Studien ebenfalls der Fall, dass Probanden die haptischen Versionen bevorzugen würden.

Eine andere Arbeit bestätigt ebenfalls, dass haptisches Feedback die Leistung während einer Aufgabenausführung in VR erhöhen kann [AGL+09]. In dieser Arbeit geht es konkret um den Einfluss haptischer Rückmeldung auf eine Art Trainingsprogramm für Wartungsaufgaben in der Luft- und Raumfahrtindustrie. Dabei wurden haptische Handschuhe für eine Studie verwendet, in welcher die Probanden Wartungsarbeiten durchführen sollten. Hierbei meinen die Autoren, dass die Haptik nicht der einzige Faktor für die Performanz sei, man müsste auch andere typische Faktoren der Mensch-Computer-Interaktion (MCI) beachten, wie beispielsweise die Art der Interaktion mit der virtuellen Umgebung und ergonomische Aspekte. Insgesamt sei die Interaktion in dem System der Autoren jedoch realistisch und die Usability und Nützlichkeit seien zufriedenstellend gewesen.

Bis hierhin hat man die Effekte haptischen Feedbacks auf VR-Anwendungen gesehen, nun wird der aktuelle Forschungsstand der Diversität haptischer Geräte (ebenfalls auf VR bezogen) vorgestellt. Auch wenn die meisten Geräte für den Handbereich gedacht sind, gibt es auch für andere Körperregionen haptische Hilfsmittel, wie man es beispielsweise schon in der vorher angesprochenen Arbeit von ZENG et al. [ZWYZ19] gesehen hat – hierbei war es ein Vibrationsfeedback für den Augenbereich. Auch für den Fuß-Bereich existieren wissenschaftliche Arbeiten zur Haptik, wie beispielsweise die von Otaran und Farkhatdinov [OF21], in welcher ein Knöchel-basiertes Gerät zur Simulation vom Laufen in VR entwickelt wurde. Durch das Bewegen der Füße konnte sich auch in VR bewegt (Rotation mit inbegriffen) werden. Außerdem wurde das

Fühlen des Untergrunds durch taktilen Feedback an der Fußsohle simuliert.

Für den Handbereich gibt es verschiedenste Arten von haptischen Geräten. Beispielsweise welche für die Fingerspitzen, wie es in den Arbeiten von Bortone et al. [BLM+18] und Schorr und Okamura [SO17] der Fall ist. Die Arbeit von Schorr und Okamura [SO17] zeigt vor allem, dass mit einem Gerät, das die Haut der Fingerspitzen je nach Interaktion mit einem Objekt in VR deformiert, sehr realistische Empfindungen ausgelöst werden können. Objekteigenschaften wie Masse, Reibung und Härte können durch das Gerät einfach geändert und wahrgenommen werden. Die Arbeit von Bortone et al. [BLM+18] hingegen zeigt vor allem, dass ein haptisches Gerät für die Fingerspitzen gut an verschiedene motorische Fähigkeiten angepasst werden kann und somit eine zukunftsorientierte Rolle für Trainingsmethoden in der Rehabilitation von Kindern mit neuromotorischen Beeinträchtigungen spielt.

Zusätzlich hat man in Abschnitt 2.1 gesehen, dass es haptische Geräte für die Handgelenke gibt, welche diese zusammendrücken und dabei helfen können die vom Nutzer ausgeübte Kraft der Hände bei einer Aufgabe zu reduzieren [BFCK17].

Natürlich gibt es auch haptische Handschuhe, wie es auch die in dieser Arbeit verwendeten SenseGloves sind. Da diese Form von Haptik der Hauptfokus der Arbeit ist, soll nun noch beschrieben werden was für haptische Handschuhe momentan am Markt erhältlich sind, worin diese sich (gerade in Bezug auf die SenseGloves) unterscheiden und was typische Anwendungsbereiche der einzelnen Handschuhe sind. Dieser Teil bezieht sich auf die Arbeit von Caeiro-Rodríguez et al. [COML21], welche genau diese Aspekte behandeln und dafür sehr viele wissenschaftliche Arbeiten miteinbezogen haben. Trotz 29 nicht miteinbezogener „smart gloves“, wie sie in der Arbeit genannt werden, wurden 24 Modelle berücksichtigt und anhand verschiedener Eigenschaften klassifiziert. Hieran kann man erkennen wie relevant diese Produktart geworden ist.

Es gibt verschiedene Arten von Handschuhen: Darunter z.B. das Exoskelett, welches auch der Architektur der Sensegloves entspricht. Dies bezieht sich auf die Struktur am Handrücken, an welcher z.B. Schnüre oder Schienen sind, welche an den Fingern befestigt werden, um kinästhetisches Feedback zu geben. Eine andere Art wären beispielweise Stoff-Handschuhe, welche die ganze Hand bedecken und Sensoren besitzen um die Position der Finger zu tracken.

Des Weiteren kann man die Handschuhe in deren haptischen Funktionen vergleichen: kinästhetisches oder Kraft-Feedback, welches den Widerstand der Finger z.B. beim Greifen von Objekten simulieren soll und taktilen Feedback, welches sich auf den Tastsinn z.B. durch Vibration bezieht. Auch in der Ergonomie und dem Tragegefühl könnte man die Handschuhe vergleichen.

Die in dieser Bachelor-Arbeit verwendeten SenseGlove DK1 gehören mit 300 Gramm zu den schwersten der verglichenen Handschuhe und werden in dieser Bachelor-Arbeit kabelgebunden verwendet. Es gibt wie bei vielen anderen Handschuhen, eine kabellose Version. Durch das Gewicht und das aufwendige Anziehen mittels Klettverschluss für jeden Finger gehören sie sicherlich zu den umständlichsten unter den in der Arbeit berücksichtigten Handschuhe, in Bezug auf das Anziehen und den Tragekomfort. Auf diesen Aspekt wird in der durchgeführten Studie zurückgekommen. Dafür bieten die SenseGloves die beiden angesprochenen haptischen Rückmeldungsarten – Kraft-Feedback und taktilen Feedback. Außerdem bieten sie im Vergleich zu den anderen Handschuhen viele vorprogrammierte Funktionen und sehr detailliert verstellbares taktilen Feedback, nämlich sowohl an jedem Finger einzeln, als auch an der Handfläche.

Des Weiteren werden die SenseGloves in der Publikation als tauglich für die Medizin, für Simulation und Training, Manipulation von Objekten und für Extended Reality (XR) angesehen. Wobei alle diese Punkte, außer dem letzten, äußerst relevant für diese Bachelor-Arbeit sind. Ungefähr ein Drittel der in der Arbeit gelisteten Handschuhen haben mindestens die gleichen

Anwendungsbereiche oder mehr als tauglich eingestufte Bereiche als die SenseGloves. Dies zeigt die Diversifikation der verfügbaren Handschuhe.

Die genannten Punkte zeigen, wie man Handschuhe in bestimmte Bereiche einordnen kann. Es gibt mittlerweile eine breite Palette an verfügbaren „smart gloves“, welche für unterschiedlichste Bereiche geeignet zu sein scheinen. Die in dieser Bachelor-Arbeit verwendeten SenseGloves bieten eine sehr ausgeprägte Möglichkeit haptischen Feedbacks und könnten trotz des wahrscheinlich mäßigerem Tragekomfort sehr gut in den chirurgischen Anwendungsbereich passen.

Zusammenfassend lässt sich für diesen Abschnitt sagen, dass mit haptischen Geräten viel Forschung in VR betrieben wird und es dementsprechend eine große Anzahl an kommerziell erhältlichen Geräten gibt – so viele, dass sich beispielsweise verschiedene haptische Handschuhe in bestimmte Anwendungsbereiche und Funktionen einordnen lassen. Der Körperbereich des erforschten Feedbacks reicht außerdem wortwörtlich von Kopf bis Fuß. Zudem kann man sagen, dass haptische Geräte viele positive Auswirkungen auf VR haben können. Die wichtigsten darunter sind: Immersion, Usability, Lerngeschwindigkeit bzw. Lerneffektivität und Genauigkeit.

3. Prototyp des Trainingssystems

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein Prototyp für chirurgische Eingriffe im Knöchelbereich konstruiert. Dieses Kapitel dreht sich komplett um diesen Prototypen. Hierbei wurde eine Art Dokumentation zum Verständnis des VR-Programms entwickelt, welche sich insofern von einer typischen Dokumentation unterscheidet, dass Design-Entscheidungen teilweise begründet werden. Zudem wird auf technische Details bzw. die Implementierung eingegangen und zuletzt Feedback von einem Experten zu diesem Prototypen beschrieben. Da der Code und Text in der Anwendung komplett in englischer Sprache formuliert wurden, beinhalten zugehörige Bilder auch englische Sprache.

3.1. Design

In diesem Abschnitt wird beschrieben wie der Prototyp strukturiert ist und welche Funktionalitäten er bietet.

3.1.1. Basis-Aufgabe

Die grundlegenden Aufgaben für den Prototypen werden nun beschrieben. Zunächst sollte designt werden wie der chirurgische Prozess visualisiert werden kann – also der Sägebereich und somit auch wo das Sägen beginnen soll. Danach wurde die Art und Weise des haptischen Feedbacks jeweils für die Controller und haptischen Handschuhe konzipiert und in VR implementiert. Dies ist der relevanteste Teil für die Forschungsfrage wie und ob verschiedenes haptisches Feedback chirurgisches Training in VR beeinflusst, auch wenn noch weitere interessante Funktionen wie beispielsweise Einstellungen implementiert wurden. Durch diese weiteren Funktionen wird der Prototyp detailgetreuer und somit zu einer Art High-Fidelity-Prototyp.

3.1.2. Architektur des Systems und Überblick der Funktionen

Das System besteht insgesamt aus drei Szenen: Einer non-VR-Szene, welche insbesondere zum Erstellen bzw. Definieren des Schneidebereichs dient und jeweils einer Szene für die beiden Controller-Arten (normale VR-Controller und SenseGloves) für das Operieren. Hierbei sind die beiden VR-Szenen bis auf die unterschiedliche Interaktionsmethode gleich. Die gesamte Architektur ist in Abbildung 3.1 visualisiert. In Abschnitt 3.1.3 bis 3.1.6 werden die Funktionen der VR-Szenen behandelt und in Abschnitt 3.1.7 eine Orientierung über den Operationsraum, der in allen Szenen verwendet wird, gegeben. Darauffolgend werden in Abschnitt 3.1.8 bis 3.1.11 die Funktionen der non-VR-Szene erläutert.

Funktionen der VR-Szenen Man kann eine orthopädische Knochensäge greifen und sofort mit dem Operations-Training starten und während des Sägens des Schneidebereichs werden Werte zur Genauigkeit berechnet und taktiles Feedback in Form von Vibration gegeben. Dies wird in den nächsten Abschnitten noch genauer beschrieben. Außerdem wird die Möglichkeit visueller Hilfestellungen geboten, welche ein- und ausgeschaltet werden können – zum einen kann man einer holographischen Säge für den Schneide-Prozess folgen, zum anderen kann man sehen welchen Bereich man bereits gesägt hat. Die VR-Szenen bieten des Weiteren verschiedene Möglichkeiten einen gespeicherten Schneidebereich zu laden. Man kann den gleichen Schneidebereich erneut laden (um die Genauigkeit zurückzusetzen), einen zufälligen nächsten Schneidebereich laden oder aus einer Art Liste einen bestimmten Schneidebereich auswählen. Zuletzt kann man natürlich zur Szene der Schneidebereich-Erstellung wechseln und die Anwendung beenden.

Funktionen der „Cutting Plane Creation“-Szene Die Hauptfunktion ist, dass man Schneidebereiche kreieren, speichern, laden und löschen kann. Diese können dann in der VR-Szene verwendet werden. Zusätzlich kann man Einstellungen setzen, die auch in der VR-Szene übernommen werden – beispielsweise ob visuelle Hilfsmittel standardmäßig aktiviert sein sollen. Zuletzt kann man zur VR-Szene wechseln und die Anwendung beenden. Die Szene ist vor allem dann sinnvoll, wenn Experten sie verwenden um Schneidebereiche zu erstellen mit welchen angehende Chirurgen trainieren können. Außerdem kann man sich in dieser Ansicht mit der Anatomie des Beins vertraut machen und Schneidebereiche im Detail betrachten bevor man sie in VR operiert.

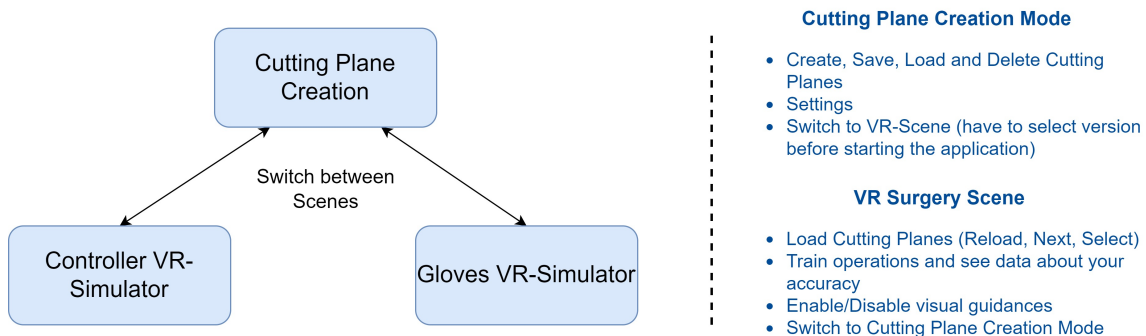
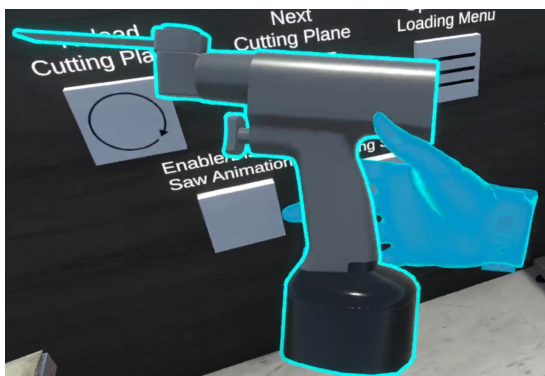


Abbildung 3.1.: Architektur des Trainingssystems. Bestehend aus den drei Szenen der Anwendung.

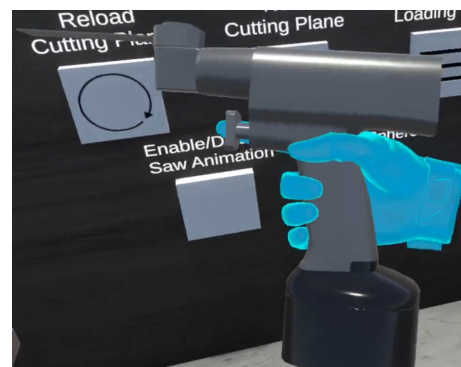
3.1.3. Prozess des Operierens

In diesem Unterabschnitt werden alle Design-Entscheidungen für das Operieren an sich beschrieben. Hierzu zählt auch das Anzeigen der Genauigkeit und das haptische Feedback. Der Nutzer ist in der Lage, sowohl bei der Controller-, als auch bei der Handschuh-Version eine orthopädische Knochensäge zu greifen. Verwendet er hierzu die haptischen Handschuhe erhält er ein Kraft-Feedback wodurch das Greifen in der Realität simuliert wird. Mit der Säge in der Hand kann der Nutzer beginnen den Schneidebereich auszusägen. In VR ist hierbei in beiden Versionen eine Hand anstelle der Hand des Nutzers dargestellt, da dies laut Jerald [Jer15] ideal für realistische Interaktionen ist – diese Form der Interaktion wird in seinem Buch als „Hand Selection

Pattern“ bezeichnet. Außerdem eliminiert das die Möglichkeit, dass bei den Handschuhen im Gegensatz zur Controller-Version eine Hand dargestellt wird und der Nutzer die Hand dadurch automatisch immersiver empfinden könnte. Somit ist diese Konsistenz der Darstellungsweise insbesondere wichtig für die durchgeführte Studie in dieser Arbeit gewesen. Des Weiteren wird die Säge in der Controller-Version hervorgehoben (in Form einer blauen Umrandung) wenn sie gegriffen werden kann, man also nahe genug mit der Hand an ihr ist. Dies ist laut Jerald ebenfalls sinnvoll, da es die Interaktion intuitiver macht. In der Handschuh-Version wird die Säge nicht hervorgehoben, da man sie direkt mit der Hand und nicht „per Knopfdruck“ greifen muss. Das Greifen in VR und Operieren kann man in Abbildung 3.2 und in Abbildung 3.4b sehen.



(a) Griffbereite Säge



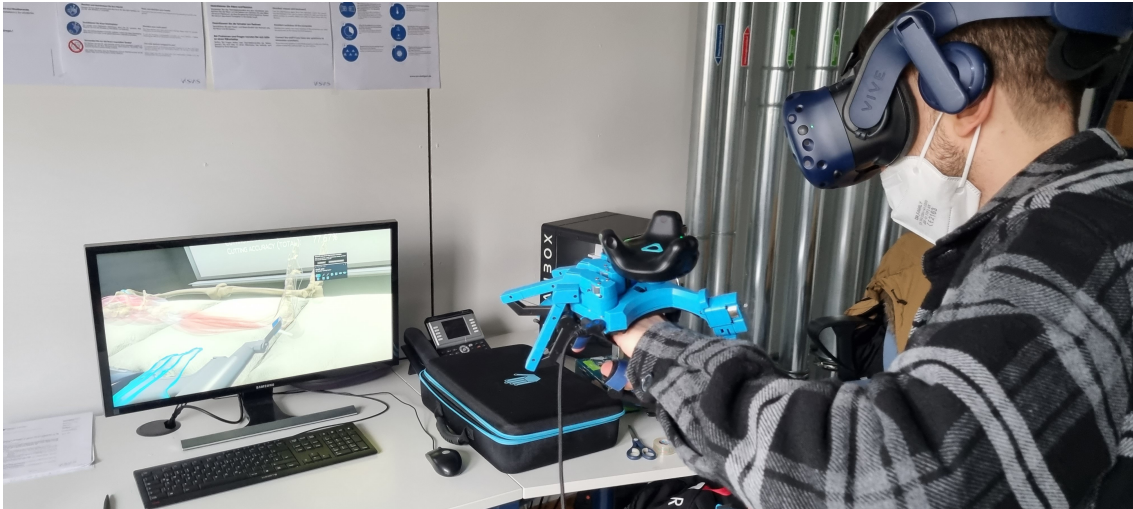
(b) Gegriffene Säge



(c) Nutzer am Operieren mit den Controllern

Abbildung 3.2.: Greifen und Operieren mit der Säge in VR. Hier sieht man die Controller-Version. Auf der nächsten Seite wird die Abbildung fortgesetzt.

3. Prototyp des Trainingssystems



(d) Nutzer am Operieren mit den SenseGloves. Hier erkennt man, dass die Hand durch das Kraft-Feedback nicht ganz geschlossen werden kann.

Abbildung 3.2.: Greifen und Operieren mit der Säge in VR. Hier sieht man die Handschuh-Version. Diese Abbildung ist eine Fortsetzung von der vorherigen Seite.

Genauigkeit des Operierens

Sobald man mit dem Schneiden anfängt, kann man auf dem Whiteboard hinter dem Operationstisch die Genauigkeit des Schneidens sehen. Hierdurch ist der Text in die virtuelle Umgebung eingebunden,



Abbildung 3.3.: Sicht auf den Operationstisch und das Whiteboard, welches die Genauigkeit des Sägens und den Namen des aktuellen Schneidebereichs anzeigt.

was die Nutzerfreundlichkeit erhöht [BMTM20]. Das Whiteboard zeigt die folgenden vier Werte:

1. **Anzahl**, wie oft man zu tief geschnitten hat.
2. **Maximale Länge**, die man zu tief geschnitten hat.
3. **Schneide-Genauigkeit** (innerhalb des Schneidebereichs): Wie viel man prozentual von dem auszusägenden Bereich tatsächlich ausgesägt hat.
4. **Schneide-Genauigkeit** (insgesamt): Dies berücksichtigt alle anderen Werte. Abhängig von den Werten 1. und 2. wird die gesamte Genauigkeit beeinflusst. Wenn man 100% des Bereichs, den man aussägen soll, ausgesägt hat, heißt das nicht automatisch, dass die Operation insgesamt sehr genau war. Es kann sein, dass man beispielsweise das komplette Bein durchgesägt hat, obwohl das nicht die Aufgabe war – in diesem Fall kann die Genauigkeit dann sogar auf 0% sinken.

Haptisches Feedback

Wie bereits beschrieben erfährt der Nutzer bei der Handschuh-Version Kraft-Rückmeldung an seinen Fingern, sodass er seine Hand beim Greifen der Säge nicht komplett schließen kann. Zusätzlich wird hier für beide Versionen taktiles Feedback in Form von Vibration beschrieben.

Hierfür wurde versucht das Feedback in beiden Versionen möglichst ähnlich zu konfigurieren. Grundsätzlich gibt es drei verschiedene Vibrationsmuster, welche beim Berühren des Schneidebereichs mit der Säge ausgelöst werden. Dabei kommt es darauf an wo sich das Sägeblatt innerhalb des Schneidebereichs befindet:

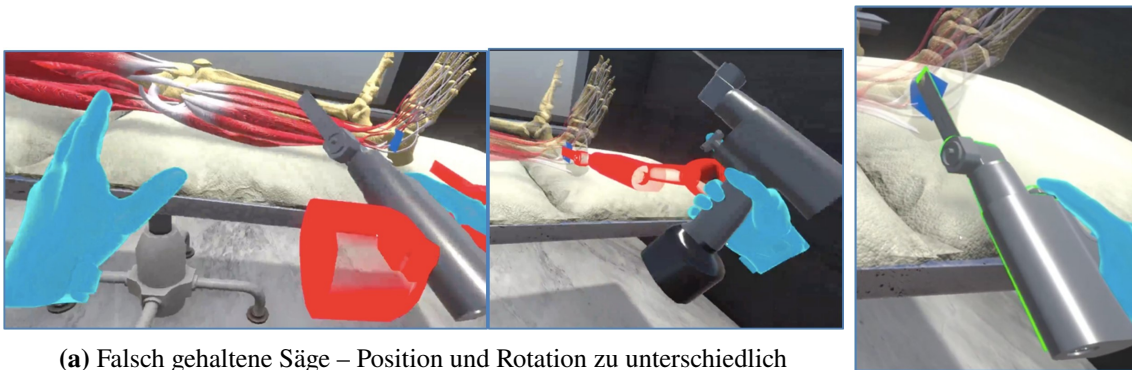
1. **Außerhalb des Knochens** werden 3 kurz andauernde und leichte Vibrationen ausgelöst.
2. **Innerhalb des Knochens** wird eine länger andauernde und stärkere Vibration ausgelöst.
3. **Zu tief im Knochen** wird eine gleich lang andauernde Vibration wie in 2.) ausgelöst, jedoch ist diese stärker.

Die Stärke der Vibration bezieht sich auf die Amplitude und die Frequenz und wurde für die Aufzählung nur verkürzt aufgeschrieben. Mit „zu tief im Knochen“ ist der Bereich gemeint, welcher sich hinter dem eigentlichen Schneidebereich befindet.

Diese taktile Rückmeldung wird an die Hand gegeben, welche nicht die Säge hält. Bei der Entwicklung wurde nämlich festgestellt, dass gerade stärkere Vibration das Tracking der Controller bzw. Handschuhe stark beeinflusst. Somit wurde die Säge von der Software an eine andere Stelle bewegt als man sie eigentlich gehalten hat, wenn auch die Hand haptisches Feedback erhalten hat, welche die Säge gehalten hat. Dies war fatal für die Genauigkeit des Sägens und wurde deswegen anders implementiert.

3.1.4. Visuelle Hilfestellungen

Es gibt drei visuelle Hilfestellungen für das Operieren. Die simpelste davon ist, dass das Skelett und die Muskeln des Bein-Modells durchsichtig werden wenn sich das Sägeblatt nahe am Schneidebereich befindet. Dies kann man in Abbildung 3.4b sehen.



(a) Falsch gehaltene Säge – Position und Rotation zu unterschiedlich

(b) Richtig gehaltene Säge

Abbildung 3.4.: Holographische Säge als visuelle Hilfestellung.

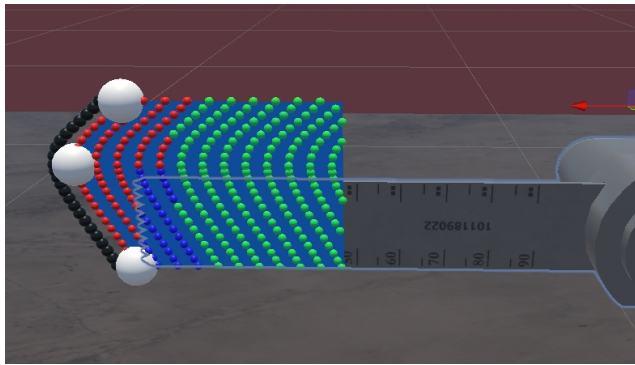
Außerdem gibt es eine holographische Säge, welche Nutzern, die das Trainingssystem zum ersten Mal verwenden eine Idee geben soll wie man den Säge-Prozess vollziehen könnte. Die holographische Säge führt also eine anleitende Animation aus. Hält der Nutzer seine Säge nicht nahe genug oder nicht in einem ähnlichen Winkel zur holographischen Säge, stoppt die Animation und die Säge wird rot gefärbt. Wird die Säge hingegen ähnlich zur holographischen Säge gehalten, färbt sich diese grün und führt die Animation weiter aus. Bevor die Animation für den momentan geladenen Schneidebereich begonnen hat ist die holographische Säge so rotiert, dass sie näher zur Säge ist, welche der Nutzer halten kann. Es gibt zwei Positionen für die holographische Säge: Beide sind von der anderen Position aus gesehen eine Rotation um 180 Grad um den vordersten Punkt des Sägeblatts.

All das eben beschriebene kann man in Abbildung 3.4 sehen. Die Animation funktioniert jedoch nur, wenn der Schneidebereich „flach“ ist – hiermit ist gemeint, ob der Bereich vertikal angeordnet und nicht kurvig (in horizontaler Richtung) ist. Dies liegt daran, dass die Implementierung sonst sehr komplex wäre und eventuell aufwendig zu programmierende AI verwendet werden müsste. Die Animation wurde entwickelt, damit Probanden schneller begreifen wie man den Säge-Prozess vollziehen kann. Sie könnte aber auch für fortgeschrittene Nutzer eine sinnvolle Funktion bieten, wenn man implementieren würde, dass Animationen vom Nutzer aufgenommen werden könnten. Dann könnte ein Experte auch für komplexere Schneidebereiche selbst eine Animation kreieren, die ein Trainierender dann verwenden könnte.

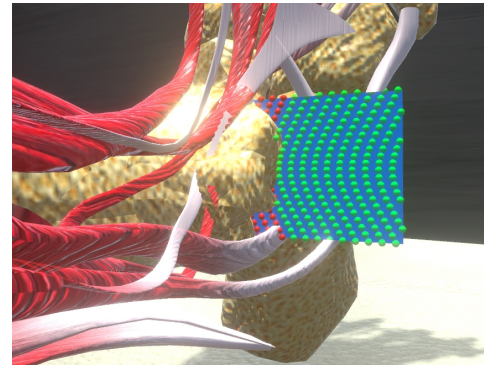
Die letzte Hilfestellungen könnte man als „Schneide-Kugeln“ bezeichnen. Es sind hierbei nämlich Kugeln im gesamten Schneidebereich verteilt bzw. auch eine Reihe an Kugeln hinter dem Schneidebereich. Als visuelle Hilfestellungen sind hierbei vor allem die roten Kugeln relevant – siehe Abbildung 3.5. Diese zeigen ungefähr den Bereich des Knochens an, welcher weggeschnitten werden soll und färben sich blau wenn sie bereits „weggeschnitten“ wurden. Somit kann man genau sehen welchen Teil des Schneidebereichs man noch nicht ausgesägt hat. Zum besseren Verständnis kann man sich hierfür Abbildung 3.5b anschauen.

In der Abbildung kann man ebenfalls schwarze und grüne Kugeln erkennen. Die Schwarzen zeigen an ab wann man zu tief schneidet. Der Abstand der schwarzen Kugeln zum Rest des Schneidebereichs kann in den Einstellungen (in der Szene für die Schneidebereich-Erstellung) verändert werden um das Operieren zu erleichtern oder zu erschweren. Die grünen Kugeln zeigen ungefähr den Bereich außerhalb des Knochens an.

Durch die Kugeln kann man auch erkennen ab wann welches taktile Feedback gesendet wird – auch wenn dies eher zur Implementierung gehört, als dass es eine Funktion darstellt. Zusätzlich lässt sich zu dieser Funktion sagen, dass sie jederzeit ein- und ausgeschaltet werden kann. Auch wenn man ohne dieses Hilfsmittel bereits gestartet hat, kann man dieses im Nachhinein noch aktivieren und bereits gesägte Bereiche können dennoch angezeigt werden.



(a) Sägeblatt, das bereits „Schneide-Kugeln“ getroffen hat.



(b) Im Knochen visualisiert

Abbildung 3.5.: „Schneide-Kugeln“ als visuelle Hilfestellung

Das Durchsichtig-Werden kann nicht deaktiviert werden, die anderen zwei Hilfestellungen schon. Dies funktioniert durch die Knöpfe an der Wand des Lademenüs bzw. der Einstellungen.

3.1.5. Laden von Schneidebereichen und Einstellungen in VR

In den VR-Szenen des Systems gibt es eine Art Menü an der Wand. Dort kann man Schneidebereiche laden und die visuellen Hilfestellungen ein- und ausschalten. Mit den fünf zugehörigen Knöpfen kann man durch Berührung mit den Händen interagieren. Dabei färbt sich der gedrückte Knopf kurzzeitig blau. Diese direkte Interaktion wurde wieder aus dem „Hand Selection Pattern“ von Jerald [Jer15] übernommen um eine möglichst realistische Interaktion bereitzustellen. Außerdem wurden die Knöpfe durch Prinzipien der Gestalttheorie aus der Vorlesung für MCI der Universität Stuttgart angeordnet [Bul20]. Hierbei wurde das gesamte Menü durch Nähe gruppiert und die Funktionalitäten innerhalb des Menüs (Laden von Schneidebereichen und Einstellungen für visuelle

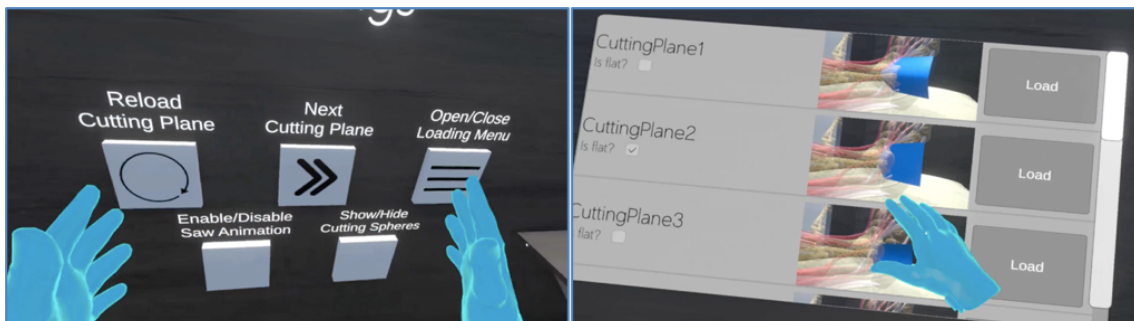


Abbildung 3.6.: Sicht auf das Menü zum Laden von Schneidebereichen und de-/aktivieren von visuellen Hilfestellungen. Rechts sieht man die geöffnete Lade-Scroll-Ansicht

3. Prototyp des Trainingssystems

Hilfestellungen) durch vertikalen Abstand getrennt. Hierdurch sollte eine möglichst hohe Usability erzeugt werden. Die Funktionen zum Laden von Schneidebereichen befinden sich in der oberen Leiste und die für die visuellen Hilfestellungen in der unteren Leiste des Menüs. Die Funktionen zum Laden eines Schneidebereichs werden nun erläutert. Bei jedem Ladevorgang werden die visuellen Hilfestellungen und alle Werte zur Genauigkeit zurückgesetzt.

„**Reload Cutting Plane**“ lädt den derzeit ausgewählten Schneidebereich erneut.

„**Next Cutting Plane**“ lädt von allen gespeicherten Schneidebereichen einen zufälligen, außer den aktuellen. Es sei denn es gibt nur einen gespeicherten Schneidebereich, dann wird dieser erneut geladen.

„**Open/Close Loading Menu**“ öffnet eine Scroll-Ansicht, welche alle gespeicherten Schneidebereiche beinhaltet. Durch erneutes Betätigen des Knopfes wird die Ansicht wieder geschlossen. Auch innerhalb dieser Ansicht kann man wieder direkt mit den Händen interagieren. Das Scrollen funktioniert wie bei einem Smartphone – indem man eine Bewegung nach oben oder unten durchführt. Für jeden Schneidebereich wird der Name, Auskunft darüber, ob der Schneidebereich flach ist und ein Bild des Schneidebereichs angezeigt. Außerdem gibt es jeweils einen Knopf mit der Aufschrift „Load“ womit der zugehörige Schneidebereich geladen werden kann. Hierdurch wird außerdem die Scroll-Ansicht wieder geschlossen.

Zuletzt wird die Leiste für die visuellen Hilfestellungen erläutert. Für beide zugehörigen Knöpfe kommt es darauf an wie die Einstellungen in der Szene für die Schneidebereich-Erstellung gesetzt sind. Standardisiert wird hierbei die holographische Säge angezeigt und die „Schneide-Kugeln“ nicht. Wenn man die Knöpfe in der VR-Szene betätigt, werden diese Einstellungen nicht überschrieben, sondern nur so lange gespeichert bis man die VR-Szene wieder verlässt.

„**Enable/Disable Saw Animation**“ deaktiviert oder aktiviert die holographische Säge, je nachdem was vorher der Fall war. Ist diese Option aktiviert, aber ein nicht flacher Schneidebereich wird geladen, wird die holographische Säge dennoch nicht angezeigt, da die Animation dann nicht richtig funktionieren würde.

„**Show/Hide Cutting Spheres**“ zeigt oder versteckt die „Schneide-Kugeln“, je nachdem was vorher der Fall war.

3.1.6. Verlassen der VR-Szene

Verlassen kann man die Operationsszene auf zwei Arten: Entweder man wechselt zur Szene der Schneidebereich-Erstellung oder man beendet die Anwendung komplett. Hierfür gibt es zwei Bereiche in welche man vier Sekunden seine Hand heben kann um die VR-Szene zu verlassen. Während die Hand in einen der Bereiche gehalten wird, wird der jeweilige Bereich in blauer Farbe hervorgehoben und ein Text angezeigt, welcher mitteilt wie lange man die Hand noch in den Bereich halten muss und was danach passiert. Diese direkte Art der Interaktion ist erneut von Jerald [Jer15] abgewandelt. Die Bereiche sollen vom Design her signalisieren was ihre Funktion sein soll. Für den Szenen-Wechsel beinhaltet der Bereich eine Schreibtisch-Einrichtung, da die Szene zu der man wechselt nicht in VR, sondern am Monitor betrachtet wird. Der Bereich zum Verlassen beinhaltet eine Tür über welcher ein Exit-Schild hängt um zu signalisieren „hier kann man den Raum verlassen“.



(a) Sicht auf den Bereich ohne Interaktion



(b) Interaktion zum Szenen-Wechsel



(c) Interaktion zum Verlassen

Abbildung 3.7.: Sicht auf die Bereiche zum Verlassen der VR-Szene und Interaktion mit diesen

3.1.7. Sicht von Oben auf den Operationsraum

Eine Ansicht von oben auf den Operationsraum kann in Abbildung 3.8 gefunden werden. Dadurch kann ein Überblick über den Raum und dessen Funktionen, welche im Laufe dieses Kapitels beschrieben wurden, erhalten werden. Dieser Raum wurde für alle drei Szenen verwendet – außer, dass das Lademenü für Schneidebereiche und die VR-Einstellungen in der Szene zur Erstellung von



Abbildung 3.8.: Sicht auf den Operationsraum von oben.

3. Prototyp des Trainingssystems

Schneidebereichen nicht vorhanden sind. Beim Design des Raums wurde darauf geachtet, dass der Raum und die Gegenstände realistisch skaliert sind, er keine flachen Gegenstände enthält, nichts relativ zur VR-Kamera fixiert wird und weitere Empfehlungen von LaValle [LaV15] befolgt.

In der Abbildung erkennt man den Operationstisch mit dem Whiteboard für die Schneide-Genauigkeit links. Wenn man in VR operiert, hat man das Lademenü (für Schneidebereiche) und die Einstellungen rechts von sich aus. Im Bild kann man dies oben mittig erkennen.

Zuletzt kann man den „Exit“- und den Schreibtisch-Bereich zum wechseln der Szene rechts im Bild erkennen.

3.1.8. Überblick über die Szene zur Erstellung von Schneidebereichen

Im restlichen Teil des Kapitels zum Design wird die Szene für die Schneidebereich-Erstellung erläutert. Zunächst wird ein Überblick zur Szene gegeben. Man hat immer einen Blick auf den Fußbereich des Bein-Modells. In der oberen linken Ecke findet man die Tastenbelegungen um sich um das Bein zu bewegen und für Funktionen um einen Schneidebereich zu erstellen. In der unteren rechten Ecke findet man außerdem fünf verschiedene Knöpfe für weitere Funktionen.

Die Anzeige der Tastenbelegungen und die der Knöpfe wurden gemäß der Prinzipien der Gestalttheorie aus der Vorlesung „Mensch-Computer-Interaktion“ der Universität Stuttgart angeordnet [Bul20]. Hierbei wurde darauf geachtet zueinander passende Funktionen zu gruppieren – in diesem Fall die Tastenbelegungen zusammen und die Knöpfe zusammen. Dies trennt die Funktionalität von der Erstellung des Schneidebereichs und dem Navigieren um das Bein von der restlichen Funktionalität, wie z.B. dem Speichern eines Schneidebereichs, räumlich. Gruppirt wurden die Tastenbelegungen und die Knöpfe untereinander jeweils beispielsweise durch Symmetrie, Geschlossenheit, Ähnlichkeit und Nähe. So sollte eine möglichst hohe Usability erzeugt werden.

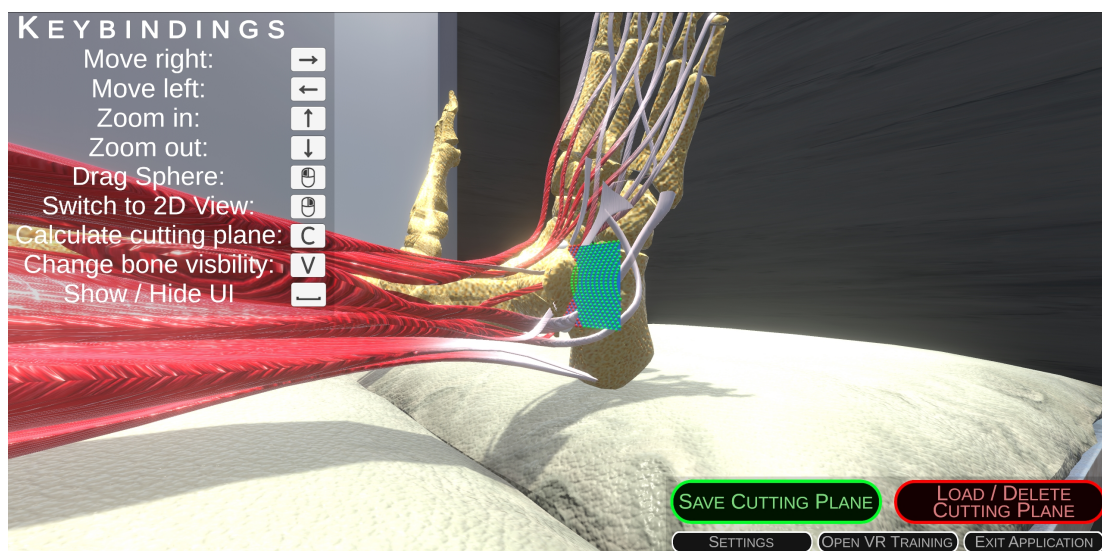


Abbildung 3.9.: Ansicht der Szene für die Schneidebereich-Erstellung

Zum VR-Training kann man durch den Knopf „Open VR Training“ wechseln. Die Anwendung kann man durch „Exit Application“ schließen. In beiden Fällen wird man gefragt ob man die Szene wirklich verlassen möchte um eine Fehlervermeidung zu ermöglichen. Dies basiert ebenfalls auf der MCI-Vorlesung.

3.1.9. Navigieren in der Szene und Erstellen und Speichern eines Schneidebereichs

Nun geht es um das Erstellen und Speichern von Schneidebereichen. Für das Erstellen kann man sich kreisförmig um den Knöchelbereich bewegen, indem man die rechte oder linke Pfeiltaste betätigt. Außerdem kann sich näher zum Knöchel oder weiter weg vom Knöchel bewegen – durch die Pfeiltaste nach oben bzw. unten.

Zu jedem Zeitpunkt kann man darüber hinaus mit der linken Maustaste die weißen Kugeln per Drag and Drop bewegen – währenddessen wird die gezogene Kugel blau umrandet. Durch diese drei Kugeln wird der gesamte Schneidebereich approximiert. Die obere und untere Kugel definieren die Höhe des Schneidebereichs, deshalb sollten diese auf dem Umriss des Knochens platziert werden. Die mittlere Kugel hingegen entscheidet wie der Schneidebereich innerhalb des Knochens aussieht bzw. gebogen ist. Weitere Details zur Implementierung sind in Abschnitt 3.2.3 zu finden.

Um besser zu sehen wo sich die weißen Kugeln genau befinden und wo man diese platziert, kann man die Taste „V“ drücken um das Bein-Modell durchsichtig erscheinen zu lassen. Zusätzlich kann man durch Drücken der Leertaste das komplette User Interface (UI) anzeigen bzw. verstecken lassen um eine bessere Sicht zu erhalten.

Durch betätigen der Taste „C“ wird der Schneidebereich durch die aktuellen Positionen der weißen Kugeln neu approximiert. Eine einfache Visualisierung des Erstellens eines neuen Schneidebereichs kann in Abbildung 3.10 gefunden werden.

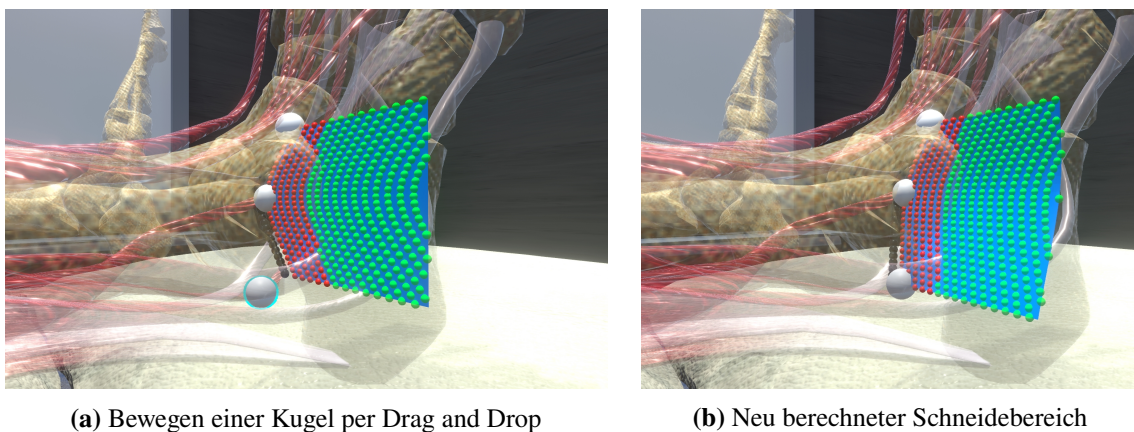


Abbildung 3.10.: Erstellen eines neuen Schneidebereichs

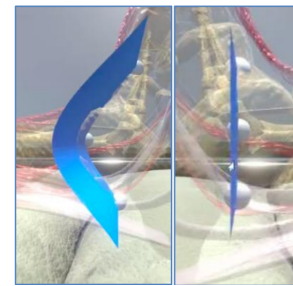
Zuletzt sollte für das Erstellen von Schneidebereichen erwähnt werden, dass das Bewegen von Objekten auf einem 2D-Bildschirm, aber in einem 3D-Raum sich schwierig gestalten kann, da man das Objekt auf drei Achsen bewegt. Um dem entgegenzuwirken kann man durch das Drücken der rechten Maustaste in eine Art 2D-Ansicht kommen. Hierbei kann man durch mehrmaliges Betätigen zwischen zwei 2D-Ansichten wechseln – das ist so gemeint, dass bei beiden Ansichten eine der drei Achsen null ist und man die Kugeln somit nur noch auf zwei Achsen bewegt. Somit kann man verhindern, dass man eine Kugel unerwünscht auf einer Achse bewegt, wenn man es eigentlich nicht möchte.

Sobald man zufrieden mit dem erstellten Schneidebereich ist, kann man diesen persistent speichern, indem man auf den Knopf „Save Cutting Plane“ drückt. Hierdurch öffnet sich ein Untermenü zum Speichern. In diesem muss ein Name für den Schneidebereich eingegeben und angegeben werden ob der Schneidebereich „flach“ ist. Vom Programm wird automatisch ein Name nach dem Muster

3. Prototyp des Trainingssystems



(a) Standardansicht des Menüs



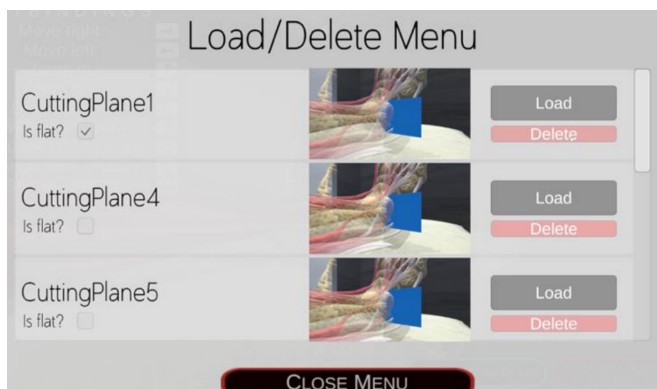
(b) Lösch-Untermenü

Abbildung 3.11.: Speichern eines Schneidebereichs.

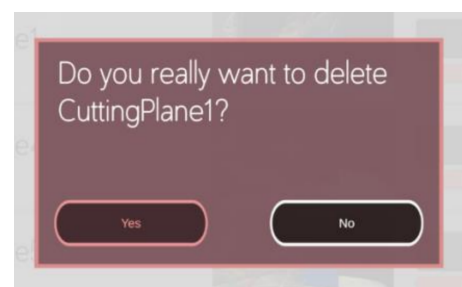
„CuttingPlaneX“ vorgeschlagen, wobei „X“ eine aufsteigende Nummer ist (je nachdem wie oft man den automatischen Namen schon verwendet hat). Mit flach ist gemeint, ob der Schneidebereich vertikal ausgerichtet und nicht kurvig ist – siehe Abbildung 3.11 für ein besseres Verständnis. Nur wenn der Bereich flach ist, funktioniert die Animation der holographischen Säge in VR. Nachdem alles ausgefüllt wurde, kann man auf „Save“ drücken um den Schneidebereich zu speichern. Dabei darf der Name des Bereichs nicht bereits verwendet worden sein, ansonsten zeigt das Programm nach dem Drücken an, dass man einen anderen Namen wählen muss.

3.1.10. Laden und Löschen eines Schneidebereichs.

Drückt man auf den Knopf „Load/Delete Cutting Plane“ öffnet sich ein Menü mit einer Scroll-Ansicht, welche alle gespeicherten Schneidebereiche beinhaltet. Wie in VR ist für jeden Schneidebereich der Name, Auskunft darüber ob der Bereich flach ist, ein Bild vom Bereich und ein „Load“-Knopf gegeben. Zusätzlich gibt es noch für jeden Schneidebereich einen Knopf um ihn zu löschen. Betätigt man diesen öffnet sich ein Untermenü in welchem man gefragt wird ob man diesen Schneidebereich wirklich löschen möchte. Hiermit sollen fälschliche Löschungen verhindert werden.



(a) Speichermenü mit automatisiert generiertem Namen.



(b) kurviger (links) und flacher (rechts) Schneidebereich

Abbildung 3.12.: Menü zum Laden und Löschen von Schneidebereichen.

Diese Funktionalität wurde in VR nicht implementiert, da dort das Training im Vordergrund steht und man dafür nur das Laden von Schneidebereichen braucht. In der non-VR-Szene hingegen geht es gerade um die Verwaltung von Schneidebereichen.

3.1.11. Einstellungen

Zu den Einstellungen kann man über den Knopf „Settings“ gelangen. Es gibt hierbei sechs Einstellungen, welche in „VR only“ und „General“ aufgeteilt sind. Somit zählen alle für die VR-Szenen, aber nur die Allgemeinen für die Schneidebereich-Erstellung.

In den Einstellungen kann man mehrere Werte ändern, die mit dem Schneidevorgang verbunden sind. Die in Abbildung 3.13 gezeigten Einstellungen sind die Standardeinstellungen. Die Werte für die animierte Säge und ob die Kugeln der Schnittebene sichtbar sein sollen, können auch in VR geändert werden, die anderen Werte nicht. Diese Werte bestimmen ob die jeweilige visuelle Hilfestellung standardgemäß aktiviert ist – falls nicht muss man sie erst in VR aktivieren bevor sie sichtbar ist.

Die Schwierigkeit ist ein Wert zwischen eins und fünf, wobei eins für sehr leicht und fünf für sehr schwer steht. Sie entscheidet, wie streng die gesamte Genauigkeit im VR-Training berechnet wird. Die Frequenz der Kugeln bestimmt, wie oft ein haptisches Feedback gesendet wird, wenn die „Schneide-Kugeln“ vom Sägeblatt getroffen werden. Die Häufigkeit der Kugeln entscheidet darüber, wie viele Kugeln innerhalb der Schnittebene platziert werden. Ein höherer Wert erhöht auch den Schwierigkeitsgrad für die Gesamtgenauigkeit, da dann fast nur noch Kugeln an den tiefsten Stellen des Schneidebereichs sind. Der Abstand der „Cut too deep“-Punkte bestimmt, wie tief man hinter den Schneidebereich schneiden muss, damit es als zu tief geschnitten erkannt wird. Ein höherer Wert vergrößert den Abstand und macht damit das Schneiden einfacher. Die „i“-Symbole im Menü bieten mehr Informationen über die entsprechenden Einstellungen, wenn man den Mauszeiger darüber bewegt.

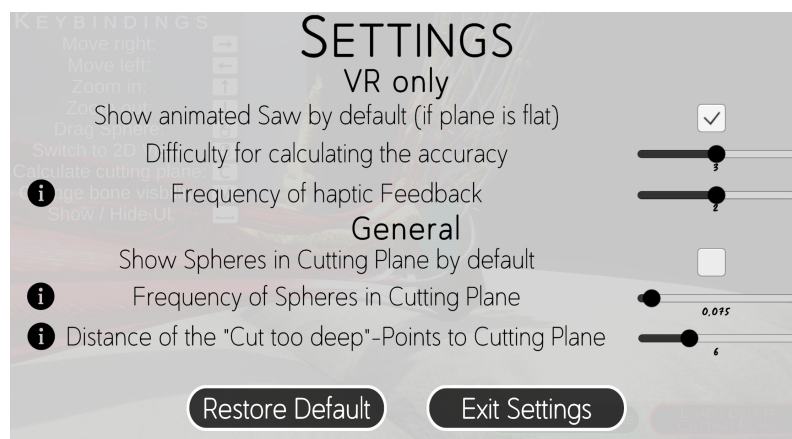


Abbildung 3.13.: Einstellungen für das System mit den Standard-Werten

3.2. Implementierung

In diesem Abschnitt werden einige aus den bereits beschriebenen Funktionalitäten des Prototyps tiefer aus der Entwicklungssicht erläutert. Der Fokus liegt hierbei auf der Kernfunktionalität.

3.2.1. Entwicklungsumgebung und verwendete Softwarepakete

Als Entwicklungsumgebung wurde **Unity**¹ in Kombination mit **Visual Studio**² verwendet. Unity fungiert hierbei als Verbindung zwischen verschiedenen VR-Plugins und vielen nützlichen Funktionen für das Trainingssystem wie die Möglichkeit kostenloser Verwendung und der Physics-Engine mit Kollisionssystem. Die wichtigsten Plugins bzw. „Packages“, wie sie in Unity genannt werden, sind die Folgenden:

SteamVR Unity Plugin³ ist ein Plugin, das verschiedene Interaktionsmöglichkeiten für die gängigsten VR-Headsets bietet. Es inkludiert das „OpenVR XR Plugin“, welches das Rendern auf diesen Headsets ermöglicht. Somit bietet SteamVR alle benötigten Standard-Funktionen für eine VR-Anwendung. Außerdem können durch Verwendung des Plugins viele verschiedene HMDs und Controller für die Controller-Version des Trainingssystems verwendet werden. Es wurde die Version 2.7.3 verwendet.

SenseGlove Unity Plugin⁴ bietet die komplette Logik für die SenseGloves um z.B. Objekte zu greifen und beinhaltet die zugehörigen Modelle für die Hand. Es wurde die Version 2.2 verwendet.

VIVE Input Utility bietet einige VR-Funktionen für VIVE Geräte. Es wurde lediglich verwendet um die SenseGloves per VIVE-Tracker zu tracken. Es wurde die Version 1.15.0 verwendet.

XR Plugin Management ist ein Paket um verschiedene XR Funktionen von Unity zu verwalten. Es wurde verwendet um den Szenenwechsel zwischen VR- und non-VR-Szene zu ermöglichen. Als Vorlage wurde der Code⁵ aus der Dokumentation genommen. Dieser musste modifiziert werden um mit dem SteamVR Plugin zu funktionieren. Es wurde die Version 4.0.7 verwendet.

Pro Builder ist ein Paket um Objekte in Unity zu modellieren und wurde vor allem für die Modellierung des Raumes verwendet. Die verwendete Version ist 4.5.2.

Post Processing ist ein Paket für die optische Nachbearbeitung einer Kamera-Ansicht. Es wurde zur optischen Verschönerung der Anwendung verwendet. Hierfür wurde auf die enthaltenen Effekte „Bloom“ und „Ambient Occlusion“ zurückgegriffen und für die Operationsszene konfiguriert. „Bloom“ sorgt hierbei für eine Art Lichtschein bzw. Lichtsaum bei besonders hellen Bereichen der Szene. „Ambient Occlusion“ sorgt für realistische Schattierungen, wie, dass es zu den Ecken des Raumes hin dunkler wird. Dies kann man besonders gut in Abbildung 3.3 sehen. Das Paket wurde in der Version 3.1.1 verwendet.

¹<https://unity.com/>

²<https://visualstudio.microsoft.com/>

³https://valvesoftware.github.io/steamvr_unity_plugin/

⁴<https://github.com/Adjuvo/SenseGlove-Unity>

⁵<https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.management@4.0/manual/EndUser.html>

Pakete, welche nicht verlinkt wurden können direkt im Unity Package Manager oder dem Asset Store gefunden werden.

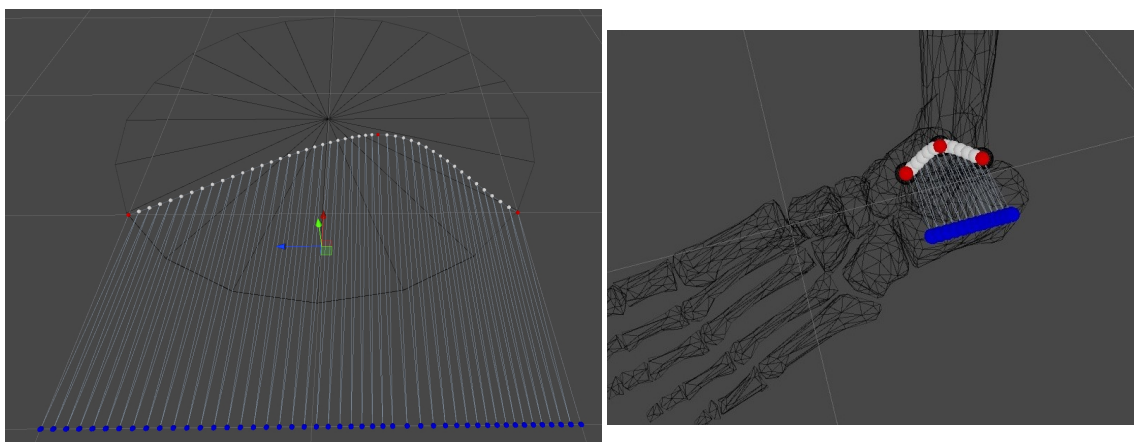
3.2.2. Wechseln zwischen Controller- und Handschuh-Version

Um zwischen den beiden Versionen des Systems zu wechseln, muss man in eine Textdatei „g“ für „gloves“ oder „c“ für „controller“ schreiben. Diese Datei mit dem Namen wird, wenn man Unity verwendet, im „Assets“-Ordner gespeichert. Verwendet man eine ausführbare Version des Systems befindet sich die Datei im Ordner „VR Training System_Data“. Dies wurde so gestaltet, da es die Implementierung sehr einfach machte und man abgesehen davon nicht zwischen den Versionen wechseln könnte wenn das Trainingssystem gerade läuft. Beim Testen wurde festgestellt, dass das taktile Feedback nicht korrekt gesendet wird, wenn man während das Programm läuft zwischen den Versionen wechselt. Ein Neustart von SteamVR behebt dieses Problem. Wenn man SteamVR neu startet während das System läuft, stürzt dieses jedoch meistens ab. Von daher war es die sinnvollste und einfachste Lösung das Wechseln mit der Textdatei zu lösen. Man sollte beim Wechseln demnach das System beenden, SteamVR neu starten, die Textdatei anpassen und dann das System erneut starten.

3.2.3. Erzeugung des Schneidebereichs

Der Schneidebereich wird in diesem Unterabschnitt ausführlich behandelt, da er den Kern des Trainingssystems darstellt. Er ist die Grundlage für das Operieren, für die Berechnung der Genauigkeit und für das taktile Feedback. Es wird nun darauf eingegangen wie dieser vom Programm genau erstellt wird und zusätzlich seine Funktionen wiederholt.

Der Schneidebereich basiert auf drei Punkten, durch welche ein geometrisches Objekt generiert wird. Man könnte es als Rechteck beschreiben, welches an einer Seite nicht unbedingt gerade, sondern gebogen ist – je nach Position der Punkte. Dies funktioniert so, dass das Programm eine Kurve durch



(a) visualisiert am Querschnitt eines Knochens (der Kreis)

(b) Visualisiert an einem Knöchel

Abbildung 3.14.: Wireframe-Ansicht eines generierten Schneidebereichs. In beiden Bilder sind die drei Ausgangspunkte, zum Berechnen des Bereichs, rot gefärbt.

3. Prototyp des Trainingssystems

die drei Punkte approximiert. Für jeden dieser Punkte wird in einem vordefinierten Abstand, welchen man auch in den Einstellungen ändern kann, ein zugehöriger weiterer Punkt gespeichert, sodass man für jeden Punkt auf der Kurve einen korrespondierenden Punkt in entgegengesetzter Richtung des Knochens hat. Aus diesen wird letztendlich ein Gitter generiert – siehe Abbildung 3.15

Für die Approximation der Kurve wurde die Klasse „AnimationCurve“ aus der Unity Scripting API⁶ verwendet, welche eigentlich dafür gedacht ist Animationen zu erstellen. Da diese Klasse aus einzelnen „Keyframes“ eine Kurve generiert, kann diese zusätzlich ideal für das Approximieren der Kurve von Schneidebereichen verwendet werden. Der Algorithmus für die Kurven-Generierung erstellt durch die übergebenen Punkte eine „AnimationCurve“ mit geglätteten Tangenten. Diese Kurve kann dann an beliebigen Stellen ausgewertet werden und ihr Wert gespeichert werden. Wenn man die Kurve in regelmäßigen Abständen auswertet, erhält man hierdurch die neuen Punkte. Exakt das gerade beschriebene wird mit der Funktion *CreateCurve* realisiert. Hierfür übergibt man ihr die Punkte, durch die eine Kurve interpoliert werden soll und einen Koeffizient, welcher in der Funktion durch die Distanz zwischen zwei Punkten geteilt wird und dadurch darüber entscheidet wie viele weitere Punkte zwischen zwei Punkten eingefügt werden.

Algorithmus 3.1 Generierung des Schneidebereichs

```
1 // creates all collections needed for mesh generation
2 private void CreateMesh()
3 {
4     //create Array out of input Points
5     startVertices = new Vector3[]
6     {
7         TopCuttingPoint.position, MidCuttingPoint.position, BotCuttingPoint.position
8     };
9     //create curve out of the vertices
10    curveVertices = CurveGenerator.CreateCurve(startVertices, curveSmoothCoef);
11    //create vertices in a straight line. Each vertex corresponds to a vertex in the curve.
12    correspondingVertices = new Vector3[curveVertices.Length];
13    for (int i = 0; i < curveVertices.Length; i++)
14    {
15        correspondingVertices[i] = new Vector3(TopCuttingPoint.position.x - lengthCoef,
16        curveVertices[i].y, curveVertices[i].z);
17    }
18    //Algorithm to connect all Vertices correctly (so that they can just be added to the
19    triangles in order)
20    List<Vector3> sortedVertices = new List<Vector3>();
21    sortedVertices = SortVertices(correspondingVertices, curveVertices);
22
23    vertices = sortedVertices.ToArray();
24    triangles = new int[vertices.Length];
25    for (int i = 0; i < vertices.Length; i++)
26    {
27        triangles[i] = i;
28    }
29 }
```

⁶<https://docs.unity3d.com/ScriptReference/>

Die Punkte der Kurve und die korrespondierenden Punkte werden im Algorithmus in zwei Listen gespeichert, wobei der selbe Index in beiden Listen jeweils einen der zwei zusammengehörenden Punkte beinhaltet. Aus diesen ganzen Punkten wird dann ein Gitter generiert, wie man es in Abbildung 3.14 sehen kann. In Unity gibt es hierfür die Klasse „Mesh“. Um hiermit ein Gitter zu erzeugen ist es ausreichend ein Objekt der Klasse zu erzeugen und die beiden Klassen-Eigenschaften „vertices“ und „triangles“ zuzuweisen. Dabei müssen die Punkte eines Dreiecks in Unity nach dem Uhrzeigerseinn hinzugefügt werden. Im Array „triangles“ gibt man hierfür die Reihenfolge der Indizes der Punkte des Arrays „vertices“ an. Dies wurde so umgesetzt, dass Algorithmus 3.2 die Punkte aus den beiden gespeicherten Listen richtig sortiert. Diese sortierte Liste wird in Abbildung 3.15 in einen Array umgewandelt und werden dann der Variable „vertices“ zugewiesen. Der Algorithmus ist in Abbildung 3.15 visualisiert. Da der Array schon sortiert ist, muss für „triangles“ nur noch jede Zahl von null bis zu der Anzahl an „vertices“ minus eins hinzugefügt werden.

Algorithmus 3.2 Sortieren der Eckpunkte für die Gittererzeugung des Schneidebereichs

```

1  /// sorts corresponding verts and curve verts to be in the right order for the triangles in
   the mesh
2  public List<Vector3> SortVertices(Vector3[] correspondingVertices, Vector3[] curveVertices)
3  {
4      List<Vector3> sortedVertices = new List<Vector3>();
5      for (int i = 0; i < correspondingVertices.Length; i++)
6      {
7          if (i == 0)
8          {
9              sortedVertices.Add(correspondingVertices[i]);
10             sortedVertices.Add(curveVertices[i]);
11             sortedVertices.Add(curveVertices[i + 1]);
12         }
13         else if (i == correspondingVertices.Length - 1)
14         {
15             sortedVertices.Add(correspondingVertices[i]);
16             sortedVertices.Add(correspondingVertices[i - 1]);
17             sortedVertices.Add(curveVertices[i]);
18         }
19         else
20         {
21             sortedVertices.Add(correspondingVertices[i]);
22             sortedVertices.Add(correspondingVertices[i - 1]);
23             sortedVertices.Add(curveVertices[i]);
24             sortedVertices.Add(correspondingVertices[i]);
25             sortedVertices.Add(curveVertices[i]);
26             sortedVertices.Add(curveVertices[i + 1]);
27         }
28     }
29     return sortedVertices;
30 }

```

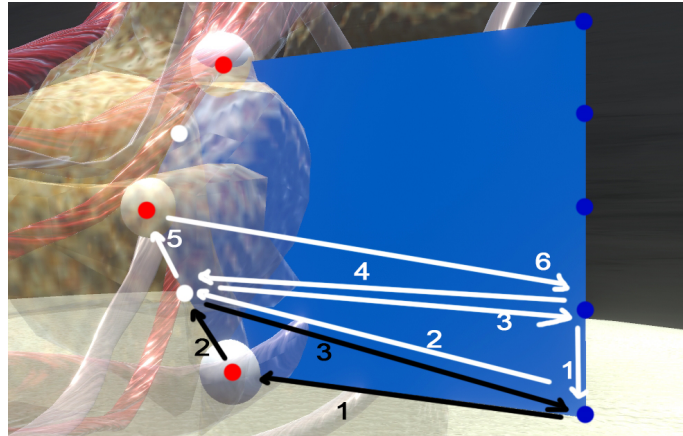


Abbildung 3.15.: Visualisierung zweier Iterationen aus Algorithmus 3.2 – die erste in schwarz und zweite Iteration in weiß. Zur Vereinfachung mit wenigen Punkten.

Die erste Implementierung, um das Gitter von beiden Seiten sichtbar zu machen, basierte auf der Invertierung des Gitters, welches danach mit dem ursprünglichen Gitter zusammengefügt wurde. Hierdurch dauerte die Berechnung für den Schneidebereich doppelt so lange wie man beispielsweise gemerkt hat, wenn man einen neuen Schneidebereich erstellt hat oder Schneidebereiche in VR geladen hat. Dies lag wahrscheinlich daran, dass für eine möglichst glatte Kurve auch viele Punkte verwendet werden, welche dann zu Dreiecken zusammengefügt werden, wodurch die Gitter-Erstellung viele Ressourcen in Anspruch nahm. Ein doppelseitiger Shader führte zu weniger Performanz-Einbußen und wurde deshalb schlussendlich verwendet.

Als Nächstes wird beschrieben wie die Kugeln innerhalb des Schneidebereichs generiert werden. Der Schneidebereich ohne diese Kugeln ist letztendlich nur eine Visualisierung, die zeigt, welchen Bereich man aus dem Knochen schneiden soll. Die Kugeln ermöglichen dann weitere Funktionen. Nämlich das Berechnen der Genauigkeit, differenziertes taktiles Feedback und visuelle Hilfestellung, da sie zeigen welchen Bereich man bereits geschnitten hat.

Es wurden drei verschiedene Arten von Kugeln als „prefab“ in Unity kreiert. Das bedeutet, dass man die Kugeln als vorgefertigte Objekte speichert, welche man dann nach Belieben in der Anwendung verwenden kann. Jede Kugel wurde für genau einen von drei Bereichen konzipiert: außerhalb des Knochens, innerhalb des Schneidebereichs im Knochen und zu tief im Knochen. Diese hat man im Laufe dieser Arbeit schon des Öfteren gesehen. Außerhalb des Knochens sind sie grün, innerhalb des Schneidebereichs im Knochen rot und zu tief im Knochen schwarz gefärbt. Die Funktionen der einzelnen Kugeln sehen dabei wie folgt aus:

Außerhalb des Knochens wird lediglich taktiles Feedback ausgelöst, sobald eine Kugel mit dem Sägeblatt kollidiert.

Innerhalb des Knochens wird taktiles Feedback ausgelöst, visuelle Hilfestellung gegeben und die Grundlage für die Berechnung der Genauigkeit geboten. Sobald eine Kugel vom Sägeblatt getroffen wird, wird das Feedback ausgelöst, die Farbe von rot zu blau geändert und die Kugel als getroffen markiert. Durch das Markieren kann prozentual berechnet werden wie viele der Kugeln innerhalb des Knochens getroffen werden, was der Genauigkeit innerhalb des Schneidebereichs entspricht.

Zu tief im Knochen wird taktiles Feedback ausgelöst und es werden weitere Möglichkeiten für die Berechnung von Werten, die mit der Genauigkeit zusammenhängen, geboten. Insbesondere kann man so eine differenziertere gesamte Genauigkeit berechnen, da Fehler beim Sägen miteinbezogen werden können. Außerdem kann gezählt werden wie oft zu tief geschnitten wurde und wie tief in diesem Fall geschnitten wurde. Während der Nutzer zu tief schneidet wird überwacht wie weit weg das Sägeblatt sich von seinem Eintrittsbereich (des zu tiefen Bereichs) befindet. So kann die maximale Tiefe bei Bedarf aktualisiert werden.

Im Weiteren wird erklärt, wie diese Kugeln in und hinter dem Schneidebereich platziert werden. Für die Kugeln innerhalb des Schneidebereichs kann man sich Algorithmus 3.3 ansehen. Hierbei wird für jeden Punkt der Kurve des Schneidebereichs eine Reihe an „Schneide-Kugeln“ zwischen dem Punkt und seinem korrespondierenden Punkt erstellt. Dafür wird zuerst berechnet wie viele Kugeln es in der jeweiligen Reihe geben soll. Hierfür wird zunächst die Distanz zwischen dem jeweiligen Punktepaar ausgerechnet und durch einen Wert geteilt. Dieser Wert besteht aus dem Produkt des

Algorithmus 3.3 Platzieren der Kugeln für den Schneidebereich (außer für zu tiefes Schneiden)

```

1 // spawns the cutting spheres as child of this object. Depends on lengthcoef and
  sphereFrequencyCoef.
2 private void InstantiateCuttingSpheres()
3 {
4     Vector3 pos = Vector3.zero;
5     // for every vert in curvVertices create a row of cutting spheres
6     for(int i = 0; i < curveVertices.Length; i++)
7     {
8         pos = curveVertices[i];
9         // calculate how many spheres should be in one row (row = curve point to end point on the
  same y position)
10        float spheresPerRow = (Vector3.Distance(curveVertices[i], correspondingVertices[i]) / (
  lengthCoef*sphereFrequencyCoef));
11        // percentage how many spheres are used for calculating the accuracy
12        float accuracyPortion = spheresPerRow/3;
13        for (int j = 0; j < spheresPerRow; j++)
14        {
15            // interpolates the position where the sphere is spanned
16            pos.x = curveVertices[i].x - j * lengthCoef * sphereFrequencyCoef;
17            GameObject go;
18            if (j < accuracyPortion) // create spheres that are used for accuracy calculation
19            {
20                go = Instantiate(cuttingSphereAccuracyPrefab, pos, Quaternion.identity);
21                AllCuttingPlaneAccuracySpheres.Add(go.GetComponent<CuttingPlane_Sphere>());
22            }
23            else // create spheres that are used for haptic feedback only
24            {
25                go = Instantiate(cuttingSphereWaveformPrefab, pos, Quaternion.identity);
26            }
27            go.transform.parent = transform;
28        }
29    }
30 }

```

3. Prototyp des Trainingssystems

„lengthCoef“ und des „sphereFrequencyCoef“, wobei beide Werte vordefiniert werden und auch in den Einstellungen angepasst werden können. Der „lengthCoef“ wird außerdem verwendet um die Länge des Schneidebereichs zu bestimmen. Zusätzlich wird der Anteil von den beiden Kugel-Arten bestimmt. Der Anteil der Kugeln innerhalb des Knochens beträgt ein Drittel der Anzahl der Kugeln in der jeweiligen Reihe (und der Anteil der Kugeln außerhalb des Knochens beträgt somit zwei Drittel). In der Praxis hat sich dies als gute Approximation herausgestellt. In konstantem Abstand werden dann die Kugeln auf der jeweiligen Reihe platziert und je nachdem die wie viele Kugel gerade platziert wird, wird entschieden zu welcher Kugel-Art sie zählt.

Für die Kugeln, welche für das zu tiefe Schneiden gedacht sind, ist der Algorithmus zur Generierung sehr simpel: Die Punkte der Kurve vom Schneidebereich werden kopiert und weiter nach hinten positioniert. Dort werden dann die Kugeln platziert. In den Einstellungen kann man die Distanz dieser Kugeln zum Schneidebereich außerdem einstellen.

Zuletzt sollte erwähnt werden, dass die Algorithmen an eine bestimmte Orientierung gebunden sind. Dies beeinflusst lediglich wie man einen Operationsraum ausrichten muss, damit der Schneidebereich in die richtige Richtung berechnet wird. Deshalb wurde nicht der Mehraufwand betrieben, die Algorithmen dynamisch in Bezug auf die Orientierung zu gestalten. Wie man in Abbildung 3.16 sehen kann, wird der Schneidebereich und somit auch die Kugeln immer in die negative x-Richtung formiert. Dadurch, dass der Schneidebereich immer in die selbe Richtung zeigt, kann er auch beliebig in jede Achsenausrichtung gebogen werden. Wie man ebenfalls in Abbildung 3.16 sieht.

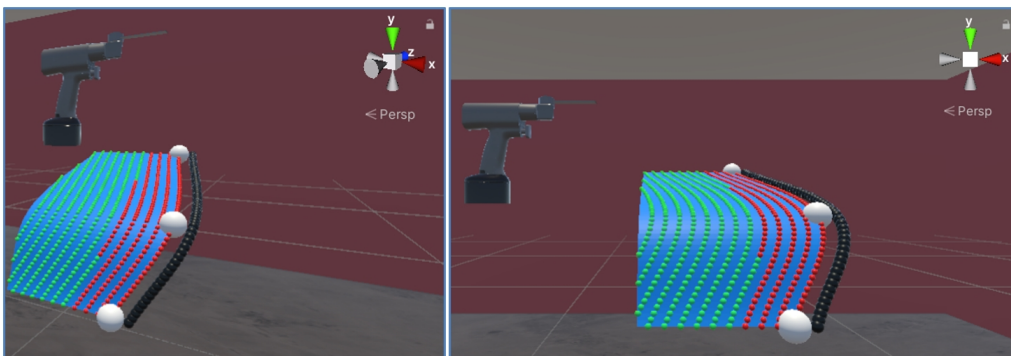


Abbildung 3.16.: Achsen-spezifische Ausrichtung von Schneidebereichen

3.2.4. Berechnung der Genauigkeit

Es wurde bereits erläutert wie das Berechnen der verschiedenen Werte zur Genauigkeit funktioniert. In diesem Abschnitt wird nun ausführlich beschrieben wie die gesamte Genauigkeit berechnet wird. Diese bezieht zur Genauigkeit innerhalb des Schneidebereichs noch die Werte, wie oft man zu tief geschnitten hat und die maximale Tiefe dabei, mit ein.

Die hierfür verwendete Funktion ist $w(x) = f(x) * g$, wobei

- g die Genauigkeit innerhalb des Schneidebereichs ist.
- $x = C_{count} * C_{length}$ das Produkt aus der maximalen Länge, die zu tief geschnitten wurde (C_{length}), und wie oft zu tief geschnitten wurde (C_{count}), ist.
- $f(x) = 5.08219 * 10^{-22}x^4 + 0.00003x^3 - 0.00194x^2 + 0.00091x + 1$

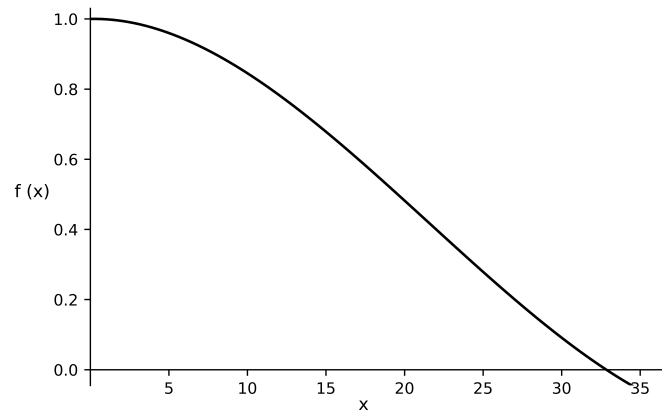


Abbildung 3.17.: Funktion für die Genauigkeitsberechnung.

Diese Funktion ist dadurch entstanden, dass überlegt wurde wie man die Genauigkeit innerhalb des Schneidebereich skalieren kann, wenn Fehler beim Sägen gemacht werden. Hierdurch kam man zu dem Entschluss ein Polynom zu definieren, welches sich in einem bestimmten Intervall zwischen eins und null befindet und streng monoton fällt. Hierdurch sinkt die Genauigkeit mit größerem x , wenn sie mit dem Funktionswert $f(x)$ multipliziert wird. Eine lineare Funktion wurde nicht als sinnvoll erachtet, da diese bei kleineren Fehlern im Verhältnis gleich viel von der Genauigkeit abziehen würde wie bei großen Fehlern, obwohl man eventuell nur zwei Mal einen Millimeter zu tief geschnitten hat und 100% Genauigkeit dann immer noch vertretbar wären. Dies wurde als ungeeignete Bewertung der Genauigkeit angesehen.

Um letztendlich eine Funktion zu erstellen, hat man sich ausgedacht und getestet wie weit nach unten die gesamte Genauigkeit, bei welchem Wert des Produkts $C_{count} * C_{length}$ skaliert werden soll. Aus diesen einzelnen Werten wurde dann die Funktion $f(x)$ interpoliert. Dies wurde mit dem Newtonschen Interpolationsverfahren durchgeführt, da dies ein gängiges Verfahren mit hoher Genauigkeit bei genügend Stützstellen ist [YG16]. Da die Funktion für Werte, welche kleiner als 0,5 sind, minimal größer als eins ist, wird der Funktionswert in diesem Fall auf eins gesetzt. Außerdem würde die Funktion für $x > 32,8$ negativ werden. Somit wird der Wert dann auf null gesetzt. Dadurch wird die gesamte Genauigkeit letztendlich null.

Nun werden noch beispielhaft Werte der letztendlichen Funktion $w(x)$ für die gesamte Genauigkeit dargestellt. Wenn man drei Mal zu tief mit einer maximalen Länge von $7mm$ geschnitten hat, dann gilt $f(x) = 0,4414$. Bei einer Genauigkeit innerhalb des Schneidebereichs von 100% wäre die gesamte Genauigkeit 44,14%.

Da dies eine relativ starke Skalierung nach unten ist, gibt es in den Einstellungen einen Wert für die Schwierigkeit, welcher diese Skalierung beeinflusst. Die Schwierigkeit ist ein Wert zwischen eins und fünf und ist standardgemäß drei. Eine Schwierigkeit von fünf bedeutet, dass x mit 1 multipliziert wird, vier meint, dass x mit 0,8 multipliziert wird, drei meint, dass x mit 0,6 multipliziert wird, usw.

Mit dem Standardwert hätte man bei dem letzten Beispiel $x = 12,6$, $f(x) \approx 0,7635$ und somit eine gesamte Genauigkeit von 76,35%.

3.2.5. Interaktion in VR

Ein weiterer fundamentaler Aspekt für das Trainingssystem ist die Interaktion mit dem Operationsraum in VR. Für die Interaktion gab es sowohl für die Controller-Version, als auch für die Handschuh-Version vorgefertigte Modelle für die Hände des Nutzers und Animationen um die Stellung der Finger realistisch aussehen zu lassen. Für die Controller-Version sind vor allem das „Player“-Prefab und „Interactable“-Skript von SteamVR wichtig, welche bereits Implementierung für beispielsweise das Greifen von Objekten beinhalten. Für die Handschuh-Version ermöglicht das „SG_Grabable“-Skript vom SenseGlove Plugin ähnliche Funktionalität.

Die Interaktion lässt sich in vier Kategorien einordnen und innerhalb dieser Kategorien erklären. Diese sind das Greifen der Säge, das Interagieren mit dem Schneidebereich, wenn man die Säge in der Hand hält, die Knöpfe an der Wand, der Bereich zum Verlassen und die Scroll-Ansicht. Diese werden im Folgenden in dieser Reihenfolge erläutert.

Das Greifen der Säge funktioniert durch die erwähnten Skripte und im Falle der Handschuhe in Verbindung mit „Collidern“ (siehe Unity Scripting API). Für die Controller-Version wurde mit dem „Skeleton Poser“ von SteamVR eine realistische Pose für das Halten der Säge modelliert – siehe Abbildung 3.2c. Sobald man die Säge greift, „springt“ diese immer in die richtige Position der Hand und die Hand nimmt die besagte Pose an. Bei der Handschuh-Version war eine Pose für die Haltung nicht notwendig, da das Hand-Modell in VR die Pose der richtigen Hand überwacht und imitiert. Durch das Skript „SG_SnapOptions“ konnte auch hier eine feste Position, welche die Säge beim Greifen in der Hand einnimmt, bestimmt werden. Außerdem konnte durch das Skript „SG_Material“ die Beschaffenheit des Materials modelliert werden. Dafür kann man eine Kurve modellieren, welche die Größe der Kraft-Rückmeldung beim Greifen bestimmt.

Das Interagieren mit dem Schneidebereich, wenn man die Säge in der Hand hält, funktioniert durch einen Collider am Sägeblatt und Collidern an jeder einzelnen „Schneide-Kugel“. Das Sägeblatt und die Kugeln können so miteinander kollidieren, was dann alle in Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Funktionen der jeweiligen Kugel auslöst.

Die Knöpfe an der Wand und der Bereich zum Verlassen funktionieren bei beiden Versionen durch Kollisionen. Sobald die Hand (unabhängig von den Controllern oder Handschuhen) mit den Knöpfen oder dem Bereich zum Verlassen kollidiert, wird die jeweilige Funktionalität ausgelöst. Außerdem werden sowohl die Knöpfe, als auch die Bereiche in blau hervorgehoben, wenn mit ihnen kollidiert wird. Bei den Knöpfen wird außerdem ein kurzes Timeout ausgelöst, damit bei längerer Kollision die Funktionalität nicht mehrmals ausgelöst wird. In der Controller Version gibt es einen kleinen Unterschied bei dem Bereich zum Verlassen: Hier wird erneut das „Interactable“-Skript verwendet. Dies ermöglicht es Interaktion anstatt Kollisionen zu detektieren. Dies ist eine SteamVR-eigene Art Kollisionen zu erkennen.

Die Scroll-Ansicht ist ein Prefab für ein UI in Unity. Der Code der Scroll-Funktionalität wurde jedoch so angepasst, dass man das Prefab auch in VR verwenden kann. Dies funktioniert in beiden Versionen des Trainingssystems durch Kollisionen. Wird eine Kollision von einer Hand mit der Scroll-Ansicht erkannt, wird zunächst der Eingangspunkt der Kollision gespeichert. Solange die Kollision besteht wird die Position der Hand getrackt und die Distanz zum Eintrittspunkt berechnet. Daraus wird dann die relative Position der Scroll-Funktionalität berechnet. Hierdurch funktioniert die Scroll-Ansicht wie das Scrollen auf einem Smartphone.

3.2.6. Persistentes Speichern

Nun wird die letzte der wichtigsten Funktionen für das Trainingssystem besprochen. Das persistente Speichern von insbesondere den einzelnen Schneidebereichen ist eine zentrale Funktionalität für das System. Diese Schneidebereiche werden, wie fast alle anderen zu speichernden Daten, in der JavaScript Object Notation (JSON) gespeichert. Diese Notation wurde gewählt, da sie sehr leserlich ist – hierdurch können beispielweise Listen von verschiedenen Computern zusammengefügt werden oder Dateien von einem Computer auf einen anderen übertragen werden. Außerdem wäre es für das Trainingssystem nicht notwendig (oder aus eben beschriebenen Gründen nicht einmal sinnvoll) die Daten in verschlüsselten Binärdateien zu speichern. Des Weiteren wird nun beschrieben wie genau welche Daten gespeichert werden.

Schneidebereiche werden in einer Liste einer JSON-Datei gespeichert. Die Liste beinhaltet für jeden Schneidebereich den Namen, einen Booleschen Wert, der klassifiziert ob der Bereich flach ist und einen Array, welcher die Positionen der drei Kugeln, die für die Schneidebereich-Generierung notwendig sind, beinhaltet. Zusätzlich wird eine Zähl-Variable gespeichert, welche sich erhöht, wenn der Namensvorschlag vom Programm für einen Schneidebereich verwendet wurde (damit das Programm weiß wie der Name als Nächstes auszusehen hat). Der zuletzt verwendete Schneidebereich wird außerdem durch seinen Namen identifiziert. Dieser wird in den sogenannten „PlayerPrefs“⁷ von Unity gespeichert, da es für einen einzelnen Namen nicht notwendig wäre eine JSON-Datei zu erzeugen. Hierdurch weiß das System welcher Schneidebereich beim Betreten der Szenen geladen werden soll. Der Wert ist der einzige, welcher nicht im JSON-Format gespeichert wird.

Einstellungen werden zusammen in einer JSON-Datei gespeichert. Diese beinhaltet für jeden Punkt aus dem Menü der Einstellungen (siehe Abschnitt 3.1.11) eine Variable.

Daten für die Nutzerstudie wurden ebenfalls in einer JSON-Datei gespeichert. Sie beinhaltet Listen für alle Werte, welche mit der Genauigkeit zu tun haben – siehe Abschnitt 3.1.3.

3.3. Zusammenfassung des Designs und der Implementierung

In diesem Kapitel wurde beschrieben, wie das mit Unity entwickelte Trainingssystem aufgebaut ist, welche Funktionen es bietet und wie diese implementiert wurden. Das System besteht aus einer Desktop-Szene für das Verwalten von Schneidebereichen und zwei weiteren VR-Szenen für das Trainieren des Operierens. Alle Szenen verwenden außerdem den gleichen Raum. Zudem kann pro Start des Systems entweder die Controller- oder die Handschuh-Version verwendet werden. Möchte man zwischen den Versionen wechseln, ist ein Neustart und das Ändern eines Buchstabens in einer Textdatei nötig. Hierbei haben beide VR-Szenen die gleichen Funktionalitäten – sie unterscheiden sich also lediglich in der Art des Eingabegeräts.

Sie können beide die in der Szene für die Schneidebereich-Erstellung erschaffenen Schneidebereiche laden, an welchen dann das Operieren trainiert werden kann. Man kann hierfür entweder den gleichen Schneidebereich erneut, einen zufälligen anderen Schneidebereich oder einen per Scroll-Ansicht auswählbaren Schneidebereich laden. Außerdem wird für Szenenwechsel und Neustarts des Systems

⁷<https://docs.unity3d.com/ScriptReference/PlayerPrefs.html>

3. Prototyp des Trainingssystems

der zuletzt verwendete Schneidebereich gespeichert. Es kann eine orthopädische Knochensäge per „Hand Selection Pattern“, wie Jerald [Jer15] die direkte Interaktion mit den Händen in VR nennt, gegriffen werden, mit welcher der Schneidebereich möglichst genau ausgesägt werden soll. In der Handschuh-Version erhält der Nutzer dabei eine Kraft-Rückmeldung. Während des Sägens ermöglichen es die so bezeichneten „Schneide-Kugeln“ verschiedene Genauigkeitswerte anzeigen zu lassen, taktile Rückmeldung durch Vibration zu geben und visuelle Hilfestellung in der Form zu geben, dass der Nutzer sehen kann welchen Bereich er bereits ausgesägt hat. Zudem gibt es eine animierte holographische Säge, welche nur bei flachen Schneidebereichen eingesetzt werden kann. Diese soll dem Nutzer durch ihre Animation zeigen, wie man eine Operation durchführen könnte. Sie müsste jedoch noch erweitert werden, um einen Alltagszweck in der Anwendung zu haben. Die beiden visuellen Hilfestellungen können in der VR-Szene ein- und ausgeschaltet werden. Zuletzt gibt es zwei Bereiche, um die Szene zu verlassen – einer ermöglicht per direkter Interaktion das Schließen der Anwendung, der andere das Wechseln zur non-VR-Szene.

Diese andere Szene ermöglicht das Erstellen von Schneidebereichen per Drag and Drop der drei Kugeln, auf Welchen die Berechnung von Schneidebereichen beruht, und weiteren nützlichen Funktionen. Diese wären das Rotieren um den Knöchelbereich, das Zoomen, das Ändern der Sichtbarkeit des Bein-Modells und des UIs, und das Wechseln zu einer 2D-Ansicht. Zudem können Schneidebereiche gespeichert, geladen und gelöscht werden. Außerdem gibt es einige Einstellungen, die für das gesamte System gespeichert werden. Gespeichert werden die Daten des Systems fast ausschließlich in JSON-Dateien.

Schneidebereiche werden vom Programm so erstellt, dass eine Kurve durch die drei Ursprungskugeln interpoliert wird, wobei für jeden Punkt auf der Kurve ein korrespondierender Punkt in einem festgelegtem Abstand erstellt wird. Aus diesen ganzen Punkten wird durch einen Triangulationsalgorithmus ein Gitter erzeugt. Zuletzt wird der Schneidebereich mit den „Schneide-Punkten“ aufgefüllt, was reihenweise in Bezug auf die korrespondierenden Punkte geschieht.

Für die Entwicklung der Anwendung in Unity wurden zum Ermöglichen der direkten Interaktion vor allem das SteamVR Unity Plugin und das SenseGlove Unity Plugin verwendet.

4. Nutzerstudie

Um die Auswirkungen des unterschiedlichen haptischen Feedbacks auf das Trainingssystem zu untersuchen, wurde eine Studie mit beiden Versionen des Systems durchgeführt. Im Folgenden wird ein Überblick zu der Vorgehensweise für diese Studie gegeben.

4.1. Design der Studie

Es wurde ein Within-Group-Design verwendet, da hierfür eine geringere Anzahl an Personen als mit einem Between-Group-Design nötig ist [Bul20]. Außerdem ergibt das Within-Group-Design Sinn wenn man die subjektive Zufriedenheit beider Versionen vergleichen möchte. Dies erkennt man bei den Hypothesen zu der Studie. Die einzige unabhängige Variable in dem Versuch war die Art der Interaktion – ob Controller oder Handschuhe verwendet werden. Die Probanden sollten das System somit in beiden Versionen testen. Um unerwünschte Effekte, wie das Erlernen oder die Erschöpfung zwischen den beiden Konditionen zu vermeiden und mögliche andere unbekannte Störvariablen zu eliminieren, wurde die Reihenfolge, in welcher die Probanden die Konditionen durchlaufen haben, randomisiert. Außerdem wurde darauf geachtet, dass es gleich viele Probanden gibt, die mit der Controller-Version starten, wie Probanden, welche mit den Handschuhen starten. Zudem wurde in beiden Konditionen der gleiche Schneidebereich verwendet.

Zusammengefasst waren die abhängigen Variablen die Genauigkeit des Schneidens, die Usability des Systems bzw. die subjektive Zufriedenheit mit dem System und die Arbeitsbelastung (kognitiv und physikalisch).

4.1.1. Hypothesen

Konkretisiert sehen die unabhängigen Variablen bzw. im Endeffekt die Hypothesen der Studie wie folgt aus:

Genauigkeit

H₁ Die Genauigkeit des Operierens unterscheidet sich bei den Versionen nicht signifikant.

Usability

H₂ Die Usability mit den Controllern ist signifikant höher als mit den Handschuhen.

Arbeitsbelastung

H₃ Die Arbeitsbelastung mit den Handschuhen ist signifikant höher als mit den Controllern.

H₄ Die kognitive Belastung beider Systeme unterscheidet sich nicht signifikant.

H₅ Die physikalische Belastung ist mit den Handschuhen höher als mit den Controllern.

Subjektive Zufriedenheit

H₆ Die Handschuhe erzeugen eine höhere Immersion als die Controller.

H₇ Die längere Nutzung am Stück ist mit den Controllern zufriedenstellender.

H₈ Beide Systeme motivieren das Interesse, die eigenen chirurgischen Fähigkeiten zu trainieren.

Die Hypothesen wurden teilweise basierend auf der verwendeten Literatur aus Kapitel 2 so gewählt und teilweise aus vorheriger Einschätzung durch Testen des Systems. H₁ wurde trotz verschiedener Arbeiten, welche zeigen, dass die Genauigkeit bzw. die Performanz in VR durch haptische Rückmeldung erhöht werden kann [FJ18; ZJSC07], so gewählt, da beim Testen kein Unterschied in dieser Hinsicht festgestellt wurde.

Bei H₂ wurde sich ebenfalls gegen die Aussage von Literatur entschieden, welche meint, dass haptische Rückmeldung in VR die Usability erhöhen kann [AGL+09; EBPC19], da die SenseGloves beim Testen als umständlich zum Anziehen klassifiziert wurden, die Kabel teilweise störten und das Gewicht relativ hoch ist. Diese Klassifizierung wurde ebenfalls aus der Arbeit von Cairo-Rodríguez et al. [COML21] abgeleitet. Aus dem gleichen Grund geht man auch von der Gültigkeit von H₃, H₅ und H₇ aus.

Des Weiteren wurde H₄ so gewählt, da die Autoren einer Publikation meinen, dass haptische Rückmeldung in VR die kognitive Belastung erhöhen kann, dies in einem dazugehörigen Experiment aber nicht festgestellt wurde Webb et al. [WTH+22] und im Rahmen einer anderen Arbeit sogar festgestellt wurde, dass haptisches Feedback die kognitive Belastung in VR verringern kann [ZJSC07].

Zusätzlich geht man von der Gültigkeit von H₆ aus, da einige Arbeiten belegen, dass die Immersion in virtuellen Umgebungen durch Haptik erhöht werden kann [ENN+16; HT96; LLD17; PMR10; RHJA06].

Zuletzt geht man durch das Testen nicht davon aus, dass eines der Systeme die Motivation des Trainierens nicht erhöht, da dies vermutlich eher vom System an sich, als von der Haptik abhängt. Dieses System ist schließlich in beiden Versionen das gleiche. Außerdem gibt es Arbeiten, welche belegen, dass VR die Motivation zum Lernen erhöht – insbesondere in der medizinischen Lehre [SPL+19] oder in Kombination mit haptischer Rückmeldung [EBPC19]. Deshalb wurde schlussendlich von der Gültigkeit von H₈ ausgegangen.

4.1.2. Methodik der Evaluation

Um die beschriebenen Hypothesen zu überprüfen, wurden zum einem Daten über die Genauigkeit der Probanden beim Schneide-Prozess gesammelt und zum anderen verschiedene Fragebögen vom Nutzer ausgefüllt und ein kleines Interview durchgeführt.

Um die Hypothese zur **Genauigkeit** zu überprüfen, wurden, wie eben angesprochen, Genauigkeitsdaten gesammelt, welche alle Werte zur Genauigkeit beinhalten, die man während der Nutzung des Systems auf dem Whiteboard sieht.

Zudem wurde zur Untersuchung der **Usability** die SUS verwendet. Sie ist der am häufigsten verwendete Fragebogen zur Bewertung der Usability eines Systems und sei ein Fragebogen, den man unbedingt in Betracht ziehen sollte, wenn man diese Eigenschaft eines Systems überprüfen

möchte [Lew18]. Der Fragebogen besteht hierbei aus zehn Fragen, welche alle auf einer Fünf-Punkte-Likert-Skala beruhen. Die Hälfte dieser Fragen ist dabei in eine positive Richtung, die andere Hälfte in eine negative Richtung, in Bezug auf die Usability, gestellt.

Um den Fragebogen auszuwerten, subtrahiert man von allen positiven Fragen zunächst den Wert eins. Bei den negativen Fragen subtrahiert man ihren Wert von fünf. Anschließend bildet man die Summe aller Fragen und multipliziert diese mit 2,5, um insgesamt einen Wert auf einer Skala zwischen null und 100 zu erhalten.

Des Weiteren wurde, um die Hypothesen zur **Arbeitsbelastung** zu überprüfen, der NasaTLX in der sogenannten „Raw“-Version verwendet. Mit dem NasaTLX-Fragebogen kann die Arbeitsbelastung von Nutzern mit verschiedenen Systemen bewertet werden ¹. Der Fragebogen würde laut Hart [Har06] sinnvolle Verwendung finden, wenn Menschen eine Aufgabe schnell, genau und zuverlässig mit verfügbaren Ressourcen erledigen sollen. Somit ist der Fragebogen sowohl sinnvoll um die beiden Versionen des Trainingssystems in Bezug auf die Arbeitsbelastung zu vergleichen, als auch zu überprüfen, ob das System als sinnvolle Trainingsmethode für die Chirurgie eingesetzt werden kann. In der Chirurgie sind Genauigkeit und Zuverlässigkeit nämlich wichtig [FSB19].

Der NasaTLX besteht aus sechs Teilskalen: geistige, körperliche und zeitliche Anforderungen, Frustration, Anstrengung und Leistung. Diese beziehen sich auf eine Aufgabe, die in einem System ausgeführt werden soll. Jede dieser Skalen hat die Werte von null bis Zwanzig, dessen Wert der Befragte auswählen soll. In der ursprünglichen Version des NasaTLX soll der Befragte diese Skalen noch in ein Verhältnis setzen bzw. die seiner Meinung nach wichtigste Skala für die Bewältigung der Aufgabe auswählen. Da es aber verschiedene Meinungen dazu gibt, ob dies einen Mehrwert für die Auswertung mit sich bringt, ist die „Raw“-Version eine häufig verwendete Modifizierung des ursprünglichen Index. Da dies ebenfalls die Durchführung verkürzt, wurde in dieser Arbeit diese abgeänderte Version verwendet.

Zuletzt wurden, für die Überprüfung der Hypothesen zur **subjektiven Zufriedenheit**, Fragen für ein strukturiertes Interview formuliert. Bei für die Studie relevanten Informationen, wie medizinische Vorkenntnisse eines Probanden, wurden manchmal auch spontane Fragen hinzugefügt, beispielsweise wie diese medizinischen Vorkenntnisse genau aussehen. Die ersten Fragen des Interviews waren dabei offene Fragen in Bezug dazu, welches System dem Probanden besser gefallen hat:

1. Welche Version des Trainingssystems hat Ihnen besser gefallen und wieso?
2. Welche Version des Trainingssystems hat sich realer angefühlt und wieso? Könnte man etwas in dieser Hinsicht verbessern?
3. War eine Version anstrengender oder umständlicher zu verwenden? Wenn ja, welche? Was könnte man verbessern? Hat die Anstrengung mit der Zeit zugenommen?
4. Falls dem Probanden die Controller-Version besser gefallen hat: Würden Sie Ihre Antworten der ersten Fragen abändern, wenn die von Ihnen genannten Änderungen für die SenseGloves umgesetzt werden würden?

Nach diesen Fragen wurden Aussagen bereitgestellt, die auf einer Fünf-Punkte-Likert-Skala bewertet und jederzeit Anmerkungen dazu gemacht werden konnten. Die Aussagen sahen wie folgt aus:

5. Ich fühle mich bei der Verwendung beider Systeme motiviert mich im Training zu verbessern.

¹<https://humansystems.arc.nasa.gov/groups/tlx/>

6. Die Darstellung der Genauigkeit des Sägens hat mir gefallen.
7. Die Interaktion mit den Knöpfen an der Wand und dem „Exit“ Bereich hat mir gefallen.
8. Die Kugeln im Schneidebereich habe ich als sinnvolle Hilfestellung empfunden.
9. Die animierte, holographische Säge hat mir dabei geholfen eine Idee zu finden, wie ich die Aufgabe des Schneidens erfolgreich abschließen kann.

Zuletzt wurden die Probanden gefragt ob Sie sonst noch etwas zu ergänzen hätten, beispielsweise noch einen Verbesserungsvorschlag.

4.2. Durchführung

In diesem Abschnitt wird der, für die Studie verwendete Apparat, der Ablauf der Studie, Informationen über die Probanden und deren Aufgabe innerhalb der Studie beschrieben. Die Studie wurde in einem wenigen Quadratmeter großen Bereich, innerhalb eines geschlossenen Raumes durchgeführt. Im Raum waren viele Kameras für das Tracking des HMDs angebracht. Das Trainingssystem wurde auf einem überdurchschnittlich leistungsfähigem Computer ausgeführt. Für beide Versionen des Systems wurde das HMD der HTC Vive Pro Serie verwendet. Für die Controller-Version wurden die zugehörigen Controller und für die Handschuh-Version die, nicht mehr am Markt erhältlichen SenseGlove DK1 verwendet.

Zunächst wurde den Teilnehmern ihre Aufgabe und die Basisfunktionen des Trainingssystems erklärt. Danach führten sie diese Aufgabe aus und füllten im Anschluss Angaben zu ihrer Person, für beide Versionen des Systems jeweils den SUS- und NasaTLX-Fragebogen aus. zuletzt wurde das Interview geführt.

Die Aufgabenstellung für das Trainingssystem, welche die Probanden schriftlich und verbal erhalten haben, war die Folgende:

Es gibt zwei Versionen des Trainingssystems und für beide müssen Sie das nun Beschriebene tun:

1. Verwenden Sie ein einziges Mal die animierte, holographische Säge um eine Idee zu erhalten, wie Sie die Aufgabe durchführen können (nur bei der zuerst verwendeten Version)
2. Wenn Sie die Handschuhe benutzen, kalibrieren Sie diese zuerst.
3. Operieren Sie am vorgegebenen Schneidebereich mit der Säge mindestens zehnmal, überprüfen Sie Ihre Genauigkeit und setzen Sie den Schneidebereich mit dem Knopf an der rechten Wand zurück, falls Sie denken, dass Sie die Genauigkeit des Schneidens nicht mehr erhöhen können.
4. Wenn Sie beim Schneiden nicht weiterwissen, überprüfen Sie mit den „Schneide-Kugeln“ welchen Bereich Sie noch nicht geschnitten haben und führen Sie die Operation fort oder setzen den Schneidebereich zurück.
5. Nach Abschluss aller Schneidevorgänge verlassen Sie die Anwendung im Ausgangsbereich.

5. Evaluation und Diskussion

In diesem Kapitel geht es um die Ergebnisse der Studie. Diese werden ausgewertet, in den Kontext der Forschungsthematik eingeordnet und darüber diskutiert, wie sinnvoll diese sind und welchen Mehrwert man aus diesen ziehen kann.

5.1. Evaluation der Studie

In diesem Abschnitt geht es um die Auswertung der Studienergebnisse. Hierfür werden zunächst die Studienteilnehmer beschrieben. Von insgesamt acht Probanden sind alle zwischen 20 und 26 Jahre alt, mit einem mittleren Alter von 23 Jahren. Nur eine der Personen ist weiblich. Die Hälfte der Studienteilnehmer sind Studenten in verschiedenen Bereichen der Informatik. Die restlichen Probanden sind ebenfalls Studenten, jedoch aus diversen Fachbereichen. Einer der Probanden ist außerdem im Wirtschaftssektor berufstätig. Zudem sind die Vorkenntnisse der Probanden in VR sehr unterschiedlich. Drei der Probanden haben noch nie in VR interagiert, weitere drei haben ein bis dreimal Erfahrung in VR gesammelt, einer hat es mehr als drei Mal verwendet und einer verwendet VR regelmäßig. Des Weiteren haben 75% der Studienteilnehmer keine medizinischen Vorkenntnisse, einer hat eine Sanitätsausbildung abgeschlossen und einer hat nur theoretische medizinische Kenntnisse.

Da die Stichprobe in der Studie durch das Within-Group-Design miteinander verbunden ist, wurde bei mindestens intervallskalierten Daten der t-Test für verbundene Stichproben mit einem Signifikanzniveau von 0,05 durchgeführt und außerdem auf deskriptive Statistik eingegangen. Außerdem wurde der Signifikanzwert immer auf drei Nachkommastellen gerundet. Dies gilt für alle erhobenen Daten bis zum Interview. In diesem wurden zusätzlich offene Fragen gestellt, welche in Form einer Zusammenfassung in diesem Abschnitt ausgewertet wurden.

5.1.1. Genauigkeit

Um die Genauigkeit statistisch zu analysieren, wurde vor allem die gesamte Genauigkeit berücksichtigt. Zunächst wird hierfür die Verteilung der Genauigkeit statistisch beschrieben. Diese wurde hierfür in Form eines Box-Plots in Abbildung 5.1 dargestellt. An diesem erkennt man, dass sowohl Quartile, als insbesondere auch die Mittelwerte und Mediane sich nur minimal unterscheiden. Das bedeutet, dass die Teilnehmer insgesamt eine sehr ähnliche Gesamtgenauigkeit in beiden Versionen des Trainingssystems aufzeigten. Zusätzlich lassen sich die Ausreißer betrachten, von welchen in beiden Box-Plots ein paar existieren. In beiden Versionen gibt es einen Ausreißer bei 0% Genauigkeit, jedoch existieren auch zwischen den 0% und der Minima beider Versionen, bei ca. 60% Genauigkeit, weitere Ausreißer. Diese sind bei der Handschuh-Version zwar breiter gestreut, da im Box-Plot aber keine Häufigkeit zu sehen ist, ist dies nicht aussagekräftig. Insgesamt kann man

5. Evaluation und Diskussion

sagen, dass in beiden Versionen die Gesamtgenauigkeit den gesamten Bereich von 0% bis 100% abdeckt und die meisten Werte im Bereich von etwa 78% bis 94% liegen.

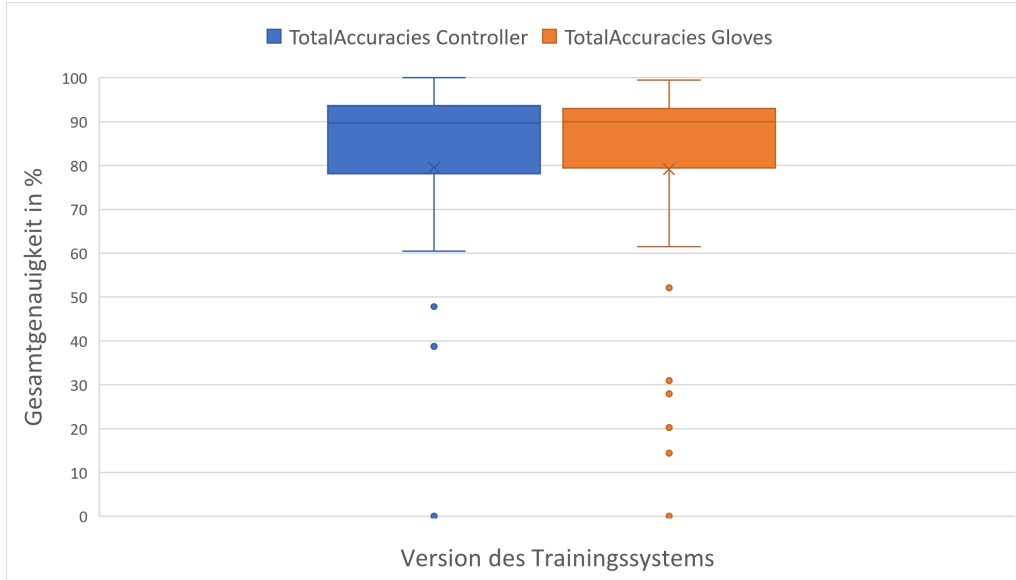


Abbildung 5.1.: Box-Plot zur Gesamtgenauigkeit des Sägens

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
Paar 1	TotalAccuracies Controller	79,494505704104	91	26,47361222660	2,77518862704039
	TotalAccuracies Gloves	79,163516799172	91	26,48892000548	2,77679331828893
Paar 2	PlaneAccuracies Controller	95,95	91	5,135	,538
	PlaneAccuracies Gloves	93,21	91	5,028	,527
Paar 3	CutTooDeepLenghts Controller	,32362637374099	91	,2558320487980	,026818485750254
	CutTooDeepLenghts Gloves	,48857142770110	91	,7144237241975	,074891955707072
Paar 4	CutTooDeepCounts Controller	3,64	91	3,129	,328
	CutTooDeepCounts Gloves	2,69	91	2,935	,308

Tabelle 5.1.: Deskriptive statistische Größen der verglichenen Genauigkeitspaare. Hierbei ist N die Stichprobengröße.

Darüber hinaus lohnt es sich auch einen Blick auf die drei anderen Genauigkeitswerte zu werfen, da die gesamte Genauigkeit von diesen abhängt. Hierfür wurden alle Werte der Controller-Version mit dem jeweils gleichen Wert der anderen Version durch einen (paarweisen) t-Test für abhängige Stichproben verglichen. In Tabelle 5.1 erkennt man verschiedene deskriptive Größen der einzelnen verglichenen Paare. Zunächst wird sich auf die Gesamtgenauigkeit beschränkt. Man erkennt, dass die Werte sowohl beim Controller, als auch bei den Handschuhen fast identisch sind. Zusätzlich kam beim t-Test ein Signifikanzwert von 0,933 heraus, was mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit die Hypothese H_1 bestätigt, da dies ein deutlich größerer Wert als das Signifikanzniveau ist – der Unterschied der Mittelwerte der Genauigkeit beider Versionen ist also nicht signifikant. Zu den anderen Werten kann man zunächst sagen, dass sich bei Paar 3 und Paar 4 interessanter

Weise schon bei bloßem Ansehen vermuten lässt, dass die Werte sich signifikant voneinander unterscheiden. Dies bestätigen zwei t-Tests. Für die maximale Länge, die in beiden Versionen zu tief geschnitten wurde, betrug der Signifikanzwert 0,046 und für die Anzahl, wie oft zu tief geschnitten wurde, betrug er 0,041.

Zuletzt ist bei der Genauigkeit innerhalb des Schneidebereichs kein großer Unterschied des Mittelwertes oder anderen Werten zu erkennen. Dennoch ergibt ein t-Test einen Signifikanzwert von 0,000. Somit ist die Genauigkeit innerhalb des Schneidebereichs bei der Controller-Version signifikant höher als in der Handschuh-Version.

5.1.2. Usability

Um die Usability auszuwerten, wird zunächst Abbildung 5.2 analysiert. In diesem Box-Plot sieht man zunächst, dass sich die Probanden unschlüssiger über die Nutzerfreundlichkeit der Handschuhe waren, da der Interquartilsabstand bei den Handschuhen knapp fünf Bewertungspunkte (ca. 15%) größer ist, als bei den Controllern. Außerdem lässt sich dies an der Spannweite erkennen, deren Größe bei den Handschuhen ungefähr 45% größer ausfällt als bei den Controllern. Alles gerade Genannte kann man ebenfalls in Tabelle 5.2 anhand der Standardabweichung und dem Standardfehler des Mittelwertes sehen. Zusätzlich sieht man sowohl in der Tabelle, als auch im Box-Plot den relativ großen Unterschied in den Mittelwerten. Dieser besagt, dass die Probanden die Controller-Version durchschnittlich etwa 13% besser in Bezug auf die Benutzerfreundlichkeit bewerteten.

Um die Hypothese zur Usability zu überprüfen, wurde ein t-Test zwischen den Ergebnissen der ausgefüllten SUS-Fragebögen durchgeführt. Bei diesem kam, trotz der zunächst sehr unterschiedlich wirkenden Mittelwerte aus Tabelle 5.2, ein Signifikanzwert von 0,06 heraus. Dieser Wert sagt aus,

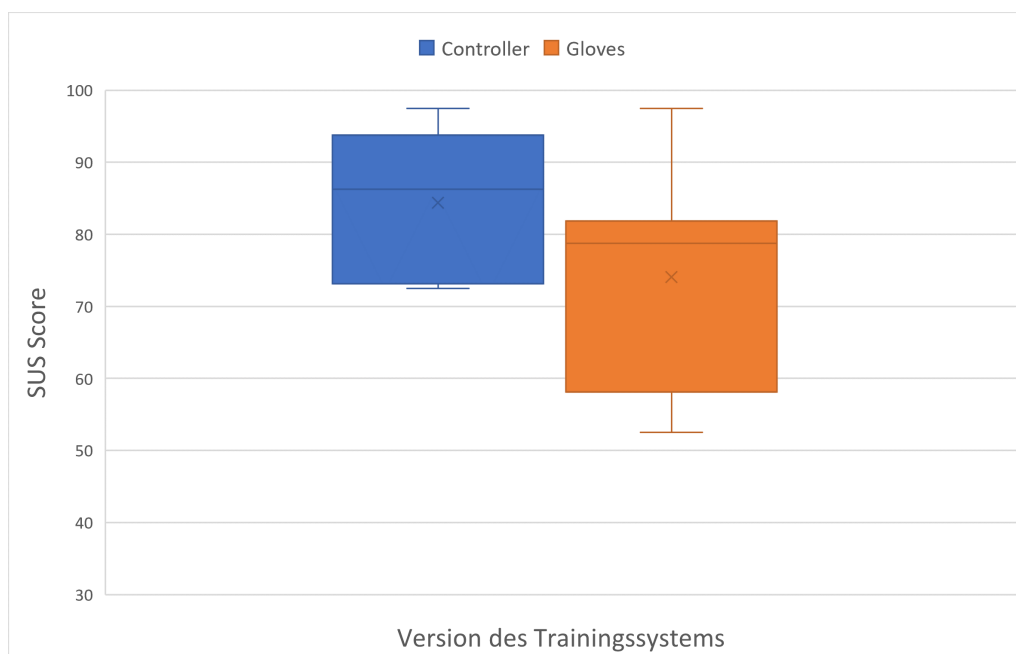


Abbildung 5.2.: Box-Plot über die SUS-Wertung

dass sich die Mittelwerte der SUS-Werte laut dem Signifikanzniveau von 0,05 nicht signifikant voneinander unterscheiden. Dies bedeutet, dass die Hypothese H_2 verworfen werden muss. Dennoch gibt es eine starke Tendenz dazu, dass die Controller-Version benutzerfreundlicher ist.

	Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes
SUS Score Controller	84,375	8	9,9777	3,5276
SUS Score Gloves	74,063	8	14,9963	5,3020

Tabelle 5.2.: Deskriptive statistische Größen der SUS. Hierbei ist N die Stichprobengröße.

5.1.3. Arbeitsbelastung

Nun werden die Daten zur Arbeitsbelastung ausgewertet. Hier lag der Fokus insbesondere auf der Gesamtbewertung, die auf den sechs Unterskalen beruht, sowie auf der körperlichen und geistigen Anforderung. Zunächst kann man in Abbildung 5.3 für alle Unterskalen des NasaTLX und beide Versionen des Systems die Mittelwerte erkennen. Man sieht deutlich, dass die Handschuhe in allen der Unterskalen einen höheren Wert als die Controller haben. Dies bedeutet, dass die Arbeitsbelastung mit den Handschuhen für alle Skalen als höher empfunden wurde.

Alle Skalen wurden durch einen t-Test verglichen um zu analysieren, ob darunter welche existieren, die einen signifikanten Unterschied der Belastung zwischen beiden Versionen des Systems beinhalten. Hierbei kam heraus, dass lediglich die körperliche Belastung bei den Handschuhen signifikant höher als bei den Controllern ist. Der Signifikanzwert betrug hierbei 0,034. Die anderen Unterskalen hatten sehr unterschiedliche Signifikanzwerte und somit auch eine unterschiedliche Wahrscheinlichkeit, dass die Mittelwerte sich nicht signifikant voneinander unterscheiden. Nach der Größe sortiert kamen dabei folgende Signifikanzwerte heraus: 0,111 für die Anstrengung, 0,142 für die geistige Anforderung, 0,379 für die Frustration, 0,521 für die zeitliche Anforderung und 0,582 für die Leistung. Man erkennt, dass sich die ersten zwei Werte noch nah am Signifikanzniveau befinden. Man kann zwar nur für einen der Werte sagen, dass er sich signifikant unterscheidet, jedoch sollten in jedem Fall die Hypothesen H_4 und H_5 beibehalten werden. Diese kognitive Belastungen unterscheidet sich in den Systemen demnach nicht signifikant voneinander und die körperliche Belastung ist bei den Handschuhen signifikant höher.

Des Weiteren wird nun die Gesamtbewertung des NasaTLX verglichen. In Abbildung 5.4 erkennt man einen Box-Plot, welcher genau diese Gesamtbewertung der Controller- mit der Handschuh-Version vergleicht. Alle für den Box-Plot relevanten Werte sind bei der Handschuh-Version höher. Interessanterweise unterscheiden sich die Minima hierbei nur um eins – bei den Controllern acht und bei den Handschuhen neun. Außerdem unterscheidet sich der Median von den dargestellten Werten am meisten. Er beträgt bei den Controllern 52 und bei den Handschuhen 65. Die Mittelwerte unterscheiden sich ebenfalls wesentlich – die Differenz beträgt 7,75. Außerdem gab es keine Ausreißer.

Für die Gesamtbewertung wurde ebenfalls ein t-Test durchgeführt. Dieser ergab zwischen den beiden Versionen einen Signifikanzwert von 0,027. Da der NasaTLX eine Aussage über die Arbeitsbelastung trifft, bedeutet dies, dass die Arbeitsbelastung beim Verwenden der Handschuhe signifikant höher ist als mit den Controllern und somit die Hypothese H_3 behalten werden sollte.

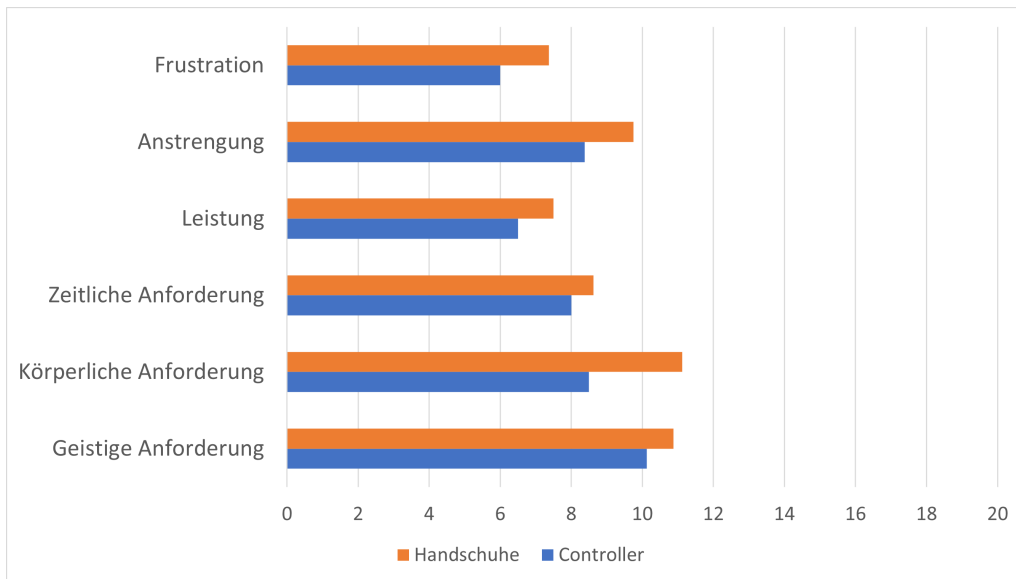


Abbildung 5.3.: Mittelwerte der Unterskalen vom NasaTLX je Eingabegerät

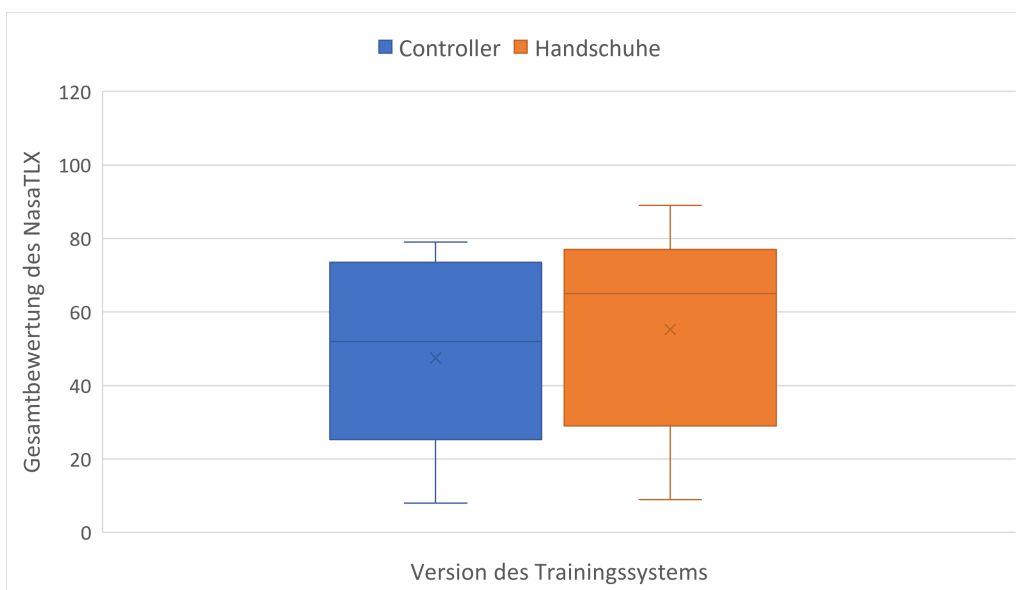


Abbildung 5.4.: Box-Plot zu den Mittelwerten der Gesamtbewertung des NasaTLX

5.1.4. Subjektive Zufriedenheit

Dieser letzte Abschnitt der Studienevaluation beschäftigt sich mit dem Interview, welches am Ende der Studie durchgeführt wurde. Zunächst werden dabei die Fragen behandelt, welche auf einer Likert-Skala beantwortet werden sollten. Dies sind die Fragen sechs bis neun aus Abschnitt 4.1.2. Aus diesen konnte man nicht wie bei vorherigen einen Gesamtwert berechnen, da diese Fragen nicht miteinander verbunden waren und sich nicht unter einer Thematik zusammenfassen lassen. Die Fragen dienten vor allem dazu bei spezifischen Bereichen des Trainingssystems, unabhängig von der verwendeten Version, Feedback zu erhalten und die Probanden dazu anzuregen, offene

Gedanken zu äußern.

Die Bewertung auf der Likert-Skala wurde deskriptiv mit dem Mittelwert und der Varianz ausgewertet. Dies kann man in Abbildung 5.5 sehen. Interessanterweise ist die Varianz bezogen auf alle Werte größer desto kleiner der Mittelwert ist. Nun wird die Abbildung von links nach rechts durchgegangen.

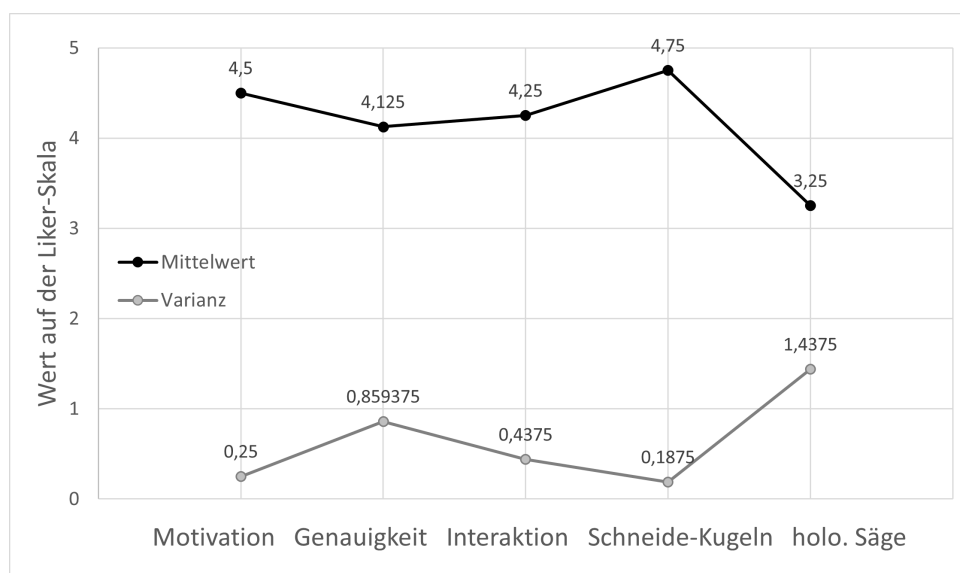


Abbildung 5.5.: Mittelwerte der Likert-Skala-basierten Fragen des Interviews

Die Aussage, dass man sich als Nutzer durch beide Versionen des Trainingssystems motiviert fühlen würde das Operieren zu trainieren, bewerteten alle Teilnehmer mit vier oder fünf. Der hierzu passende Mittelwert von 4,5 bestätigt hierdurch die Vermutung der Hypothese H_8 . Ein Teilnehmer betonte bei dieser Aussage, dass er bei den Handschuhen durch den erhöhten Realismus eine größere Motivation verspürte.

Bei der Aussage, dass einem die Darstellung der Genauigkeit (auf dem Whiteboard hinter dem Operationstisch) gefallen würde, bewerteten die Teilnehmer mit allen Werten zwischen drei und fünf. Dabei kam die fünf am häufigsten vor – dass man der Aussage vollkommen zustimmt. Insgesamt scheint die Darstellung den Probanden gefallen zu haben. Es gab auch einige Teilnehmer, die die Frage neutraler beantworteten. Drei von diesen Teilnehmern gaben hierbei an, dass sie sich wünschen würden, dass man die Genauigkeit anders bzw. näher am Geschehen platzieren würde und man nicht immer hoch schauen muss, um die Genauigkeitsanzeige zu sehen. Zwei Probanden meinten außerdem, dass sie gelegentlich nicht mehr die Genauigkeit wahrgenommen haben, da sie die Aufgabe unter einem gewissen Zeitdruck erfüllen sollten.

Als nächstes wird die Aussage zur Interaktion behandelt, genauer genommen ob den Nutzern die Interaktion mit den Knöpfen an der Wand und dem Bereich zum Verlassen der Anwendung gefallen hat. Hierbei liegt die Bewertung von den Werten her zwischen der ersten und zweiten behandelten Aussage des Abschnitts – sowohl auf den Mittelwert, als auch auf die Varianz bezogen. Diese direkte Interaktion scheint den Probanden somit gut gefallen zu haben. Zwei Probanden hätten sich dabei gewünscht, dass die Knöpfe näher am Operationstisch wären, insbesondere der Knopf zur Änderung der Sichtbarkeit der „Schneide-Kugeln“.

Nun wird die Bewertung zu der Aussage, ob die Kugeln im Schneidebereich als sinnvolle Hilfestellung

empfunden wurden, analysiert. Hierbei gab es nur einen Teilnehmer, der diese Aussage nicht mit fünf, sondern mit vier beantwortet hat. Dementsprechend gering ist die Varianz und umso höher der Mittelwert. Mit einem Mittelwert von 4,75 scheint den Probanden die Hilfestellung sehr weitergeholfen zu haben, obwohl sie während der Studie die Kugeln nicht die ganze Zeit aktiviert haben durften, sondern nur um zu schauen welcher Bereich ihnen noch fehlte, wenn sie nicht mehr weiter wussten. Nach einem kurzen Blick auf die Kugeln, sollten diese wieder deaktiviert werden. Dies verdeutlicht das Potenzial dieser visuellen Hilfestellung. Außerdem gab es keinen Teilnehmer, der zu dieser Aussage etwas anzumerken hatte. Zuletzt wird die Aussage behandelt, welche die animierte, holographische Säge beinhaltet. Diese sollten die Probanden bei ihrem ersten Schneideversuch verwenden, danach nicht mehr. Konkret ging es darum, ob die Säge dabei half eine Idee zu finden, wie man die Aufgabe des Schneidens erfolgreich abschließen kann. Jeder Wert der Likert-Skala wurde mindestens einmal ausgewählt. Der Wert vier kam drei Mal und somit am häufigsten vor. Durchschnittlich wurde die holographische Säge somit neutral in ihrer Hilfestellung gesehen. Zusätzlich waren die Antworten sehr kontrovers. Außerdem gab es einen Probanden der nicht gemerkt hatte, dass es zwei verschiedene Platzierungen der holographischen Säge gab und somit für Links- und Rechtshänder geeignet ist. Zudem gab es einen Probanden, den die holographische Säge sogar irritiert hat und meinte er hätte während der Verwendung den Schneidebereich nicht wahrgenommen. Insgesamt kann man keine konkreten Aussagen über die Nützlichkeit der Säge treffen.

Als nächstes wird der restliche Teil des Interviews ausgewertet. Hierbei ging es um offene Fragen, welcher bis auf die letzte Frage auf eine Weise gestellt wurde, dass man sich für eine der Versionen des Trainingssystems entscheiden und Begründungen bzw. Verbesserungsvorschläge ansprechen sollte. Zuletzt wurde nach sonstigen Verbesserungsvorschlägen gefragt.

In der ersten Frage ging es darum ob einem eine Version des Trainingssystem besser gefallen hat und weshalb. Hierbei gaben fünf Probanden die Controller-Version und der Rest die Handschuh-Version an. Begründungen warum die Controller den Probanden besser gefallen haben, waren vor allem, dass die Handschuhe schwieriger anzuziehen bzw. in der Handhabung waren und außerdem mehr körperliche Kraft für die Verwendung aufgebracht werden musste. Drei Probanden meinten zudem, dass die Controller durch ihre Form schon gut geeignet für die durchgeführte Aufgabe waren, da der Griff der Controller dem Griff der Säge stark ähnelte. Außerdem gaben zwei Probanden an, dass das Tracking bei den Controllern deutlich besser funktioniert hat. Die Probanden, die sich für die Handschuhe entschieden haben, gaben alle als Begründung an, dass sie das Greifen bei den Handschuhen als realistischer empfanden. Einer von ihnen gab zudem an, dass er sich nur für die Controller entschieden hatte, da er sich entscheiden musste und ihm ausdrücklich beide Versionen gefallen haben.

Darauffolgend wurde gefragt welche Version sich realer angefühlt hat. Auch hier sollten die Probanden wieder begründen und Verbesserungsvorschläge geben. Bis auf einen Probanden gaben alle an, dass sie die Handschuhe realistischer fanden. Zwei davon meinten, dass sie die Handschuhe nur geringfügig realistischer fanden. Auch die Person, die sich für die Controller entschied, gab an, dass der Realismus nur minimal höher empfunden wurde und der Grund dafür die passende Form des Griffs zu der orthopädischen Säge war (was auch andere Personen anmerkten). Insgesamt kann man sagen, dass alles zuvor genannte die Hypothese H_6 bestärkt. Des Weiteren war der Grund, weshalb sich für die Handschuhe entschieden wurde, vor allem, dass das Bewegen der einzelnen Finger ein sehr realistisches Gefühl mit sich brachte – hier wurde häufig die Kraft-Rückmeldung angesprochen, die Vibration hingegen nicht. Verbesserungsvorschläge wurden von allen Probanden nur für die Handschuhe genannt. Am häufigsten wurde genannt, dass das Kraft-Feedback nicht nur

an den Fingerspitzen gefühlt werden sollte und dass man das Kraft-Feedback ein wenig verbessern sollte, da man teilweise die Finger komplett einklappen konnte, obwohl es vom Griff her nicht möglich sein sollte. Zwei Probanden gaben des Weiteren an, dass sie einen „richtigen“ Handschuh bevorzugen würden, welcher Kraft-Rückmeldung gibt, aber die Finger und die Hand komplett umschließt.

Im Anschluss sollten die Studienteilnehmer beantworten, ob sie eine der Versionen anstrengender oder umständlicher zu verwenden fanden. Zusätzlich zu Begründungen und Verbesserungsvorschlägen sollte man sagen, ob die Anstrengung zugenommen hat, falls man eine Version als anstrengender empfand. Zwei Probanden gaben an, dass sie keine Version als anstrengender empfanden, die Handschuhe jedoch umständlicher beim Anziehen waren. Zusätzlich würden sich alle Teilnehmer wünschen, dass die Handschuhe einfacher anzuziehen wären und besser an der Hand halten würden. Dies könne beispielsweise dadurch gelöst werden, dass man keine Klettverschlüsse, sondern einen anderen Mechanismus oder einen wirklichen Handschuh verwendet. Des Weiteren gaben zwei Probanden an, dass die Anstrengung durch das Gewicht bzw. der Gewichtsverteilung der Handschuhe verursacht wurde. Nur eine Person, die die Handschuhe als anstrengender in der Verwendung empfand, meinte, dass die Anstrengung nicht mit der Zeit zunahm.

Direkt danach wurden die Probanden, welchen die Controller-Version besser gefallen hatte, gefragt, ob sie ihre Bevorzugung der Controller in den ersten Fragen ändern würden, wenn ihre Verbesserungsvorschläge umgesetzt werden würden. Alle der fünf Probanden, die den Controller bevorzugten, stimmten voll und ganz zu.

Zuletzt wurde gefragt ob die Probanden sonst noch Verbesserungsvorschläge hätten. Hierbei gaben zwei Personen an, dass die Vibration bei den Controllern als schwächer empfunden wurde, bzw. die verschiedenen Vibrationsstufen sich nicht stark genug unterschieden hätten. Außerdem gaben zwei Personen an, dass der Schneidebereich transparenter sein sollte, da man manchmal nicht erkannt hat, ob die Säge dieses getroffen hat oder nicht. Weitere zwei Studienteilnehmer gaben an, dass man beim erneuten Laden des Schneidebereichs auch die zu greifende Säge zurücksetzen sollte, da es sonst passieren kann, dass sie bereits im Bereich des neuen Schneidebereichs steckt, wenn man sie dort gelassen hat und somit die Genauigkeit beeinflusst. Außerdem gaben zwei Probanden an, dass sie die Kabel bei der Handschuh-Version als störend empfanden und eine kabellose Version geeigneter wäre. Des Weiteren gab eine Person an, dass es gut wäre wenn das Bein-Modell nicht durch die Nähe zum Sägeblatt unsichtbar werden würde, sondern z.B. durch die Nähe zur Hand. Zuletzt gab ein Proband an, dass er keine Verbesserungsvorschläge habe und die Verwendung als simpel und zufriedenstellend empfand.

5.2. Expertenfeedback

Für das Trainingssystem wurde, abgesehen von der Nutzerstudie, eine Evaluation von einer medizinischen Expertin mit klinischem Hintergrund durchgeführt. Hierfür wurde das Think-Aloud-Verfahren eingesetzt.

5.2.1. Szene für die Schneidebereich-Erstellung

Die Expertin mochte die Verwaltungsfunktionen für die Schneidebereiche. Diese Möglichkeit des Manipulierens sei eine „dringend benötigte Fähigkeit“. Die Kontrollpunkte für den Schneidebereich seien flexibel, einfach zu verwenden und würden bei der detaillierten Erstellung eines Schneidebereich helfen. Es gebe aber auch mehrere Möglichkeiten diese Funktion zu verbessern:

- Das Problem der Okklusion in 3D erschwere das Auffinden der Knochengrenze: Die vorhandenen Sichtbarkeitsoptionen lösen das Problem nicht, sondern es würde eine fortschrittlichere Rendering-Technik benötigt werden, die Grenzen hervorheben kann. In diesem Zusammenhang müsse auch die Deckkraft der Schnittebene angepasst werden, damit die Knochen sichtbar sind (momentan beträgt die Deckkraft 100%).
- Drei Kontrollpunkte würden nicht ausreichen um einen realen Schneidebereich zu setzen. Es sollte eine Funktion zum Hinzufügen/Entfernen geben.
- Die automatische Erkennung der Grenzen von Knochen, um die Kontrollpunkte intelligenter zu platzieren, wäre sehr hilfreich.

5.2.2. Szene des chirurgischen VR-Trainings

Die Medizinerin stellte fest, dass die Transparenz des Bein-Modells während des Schneideprozesses eine gute Sicht auf den Schneidebereich ermögliche. Allerdings sei die visuelle Führung des Schnitts nicht ausreichend, da keine Informationen über den aktuellen Schnittstatus im Sinne von beispielsweise Tiefe, Lage und Ausrichtung der Säge vorhanden sind. Des Weiteren wäre eine Zoom-Funktion auch in dieser Szene nützlich, da der Schneidebereich klein ist.

Positiv aufgefallen ist der Expertin des Weiteren die Vibration als zusätzliche Rückmeldung zur Hilfestellung für den Schnitt. Jedoch würde sie es bevorzugen, wenn die Vibration in dem Controller, welcher zum Sägen verwendet wird, ausgelöst werden würde. Zudem sei das Design der „Schneide-Kugeln“ für die Führung des Schnitts hilfreich, da man durch die Farbänderung gut erkennen würde, welchen Bereich man bereits geschnitten hat. In Kombination mit der genannten Zoom-Funktionalität wäre die visuelle Hilfestellung äußerst gut.

5.3. Diskussion

Aus der Evaluation kann man verschiedene Schlüsse für die Verbesserung des Trainingssystems, für die Praxis und für die Forschung ziehen. Zunächst kann man sagen, dass sich die Genauigkeit bei den Versionen des Systems nicht signifikant unterschied und das erweiterte haptische Feedback der Handschuhe somit keinen Mehrwert für diesen Aspekt bot. Die Ergebnisse anderer wissenschaftlicher Arbeiten, dass die Performanz in VR durch haptisches Feedback erhöht werden kann [FJ18; ZJSC07], konnten in dieser Arbeit nicht bestätigt werden. Zwei der Werte aus denen die Gesamtgenauigkeit sich zusammensetzt, weisen bei den Handschuhen sogar signifikant schlechtere Ergebnisse auf. Wie sich dies dann am Ende bei der Gesamtgenauigkeit ausgleicht, kann verschiedene Gründe haben, liegt jedoch wahrscheinlich daran, dass die Anzahl, wie oft pro Schneidebereich zu tief geschnitten wurde, signifikant niedriger bei den Handschuhen war. Insgesamt kann man bezogen auf die Genauigkeit sagen, dass haptische Handschuhe, wie die verwendeten SenseGloves, gleich gut

wie klassische VR-Controller für ein chirurgisches Trainingssystem geeignet sind, da der wichtigste Wert (die Gesamtgenauigkeit) beider Trainingssystem-Versionen fast identisch war und das Kraft-Feedback somit keinen Vorteil dafür bietet. Im Vergleich zu der beschriebenen Literatur könnten die unterschiedlichen Ergebnisse daran liegen, dass in beiden genannten Publikationen „passives“ haptisches Feedback gegeben wurde und kein Kraft-Feedback. Bei dieser Art des Feedbacks hat man einen wirklichen Gegenstand in der Hand, welcher dem in der Realität zu verwendenden Gegenstand ähneln sollte. Man simuliert das Greifen von Gegenständen auf eine andere Weise als beim Kraft-Feedback. Weitere Forschung, um diese Arten haptischen Feedbacks zu vergleichen, sollte in Betracht gezogen werden.

Interessanterweise meinten einige Probanden, dass die Controller-Version durch die Form der VIVE-Controller sehr gut für die Aufgabe des Operierens geeignet war, da sie dem Griff der orthopädischen Säge sehr ähnlich war. Unbeabsichtigter Weise kann es sein, dass dadurch der Effekt passiven haptischen Feedbacks entstand und die Genauigkeit der beiden Versionen sich deshalb nicht unterscheidet. Dazu sollte man noch erwähnen, dass die meisten gängigen Controller die Form eines Griffs haben und diese somit womöglich alle gut für die Aufgabenstellung des Trainingssystems geeignet wären.

Um die Usability des Systems zu diskutieren, sollte zunächst betrachtet werden, wie man den SUS-Wert sinnvoll interpretieren kann. Laut Brooke [Bro13] ist die häufig verwendete Methode, den SUS-Gesamtwert prozentual zu interpretieren, nicht aussagekräftig. Auch wenn die Skala dieses Wertes von 0 bis 100 dazu verleiten würde, seien die Gesamtwerte keine Prozentangabe. Um eine aussagekräftigere Bewertung zu treffen, sollte man die Werte als Perzentile betrachten.

Aus den eben genannten Gründen, dem dazu passenden adjektivischen Bewertungsansatz von Bangor et al. [BKM09] und den mittleren SUS-Gesamtwertungen der durchgeführten Studie, lässt sich die Controller-Version unter dem Adjektiv „excellent“ und die Handschuh-Version unter „good“ in Bezug auf die Benutzerfreundlichkeit einstufen.

Auch wenn in der statistischen Analyse kein signifikanter Unterschied in Bezug auf die Usability gefunden wurde, ist eine große Tendenz dazu vorhanden, dass die Usability des Trainingssystems mit den Controllern größer ist als mit den Handschuhen. Beide Systeme zeigen durch ihre guten Usability-Werte außerdem das Potenzial des Trainingssystems für chirurgisches Training.

Dennoch stimmt die signifikant schlechtere Usability der haptischen Hilfestellung nicht mit den Ergebnissen anderer Literatur überein [AGL+09; EBPC19]. Aus dem Interview mit den Probanden kann man hierfür ableiten, dass vor allem die Kabel und das umständliche Anziehen der Handschuhe dafür verantwortlich sind. Somit wären andere Handschuhe oder eine Verbesserung der Handschuhe sinnvoll. Es gibt von SenseGlove beispielsweise eine neuere Version der Handschuhe, welche „Nova“¹ genannt werden. Diese sind kabellos verfügbar und sollten sich durch die Form eines wirklichen Handschuhs besser anziehen lassen als die SenseGlove DK1. Mit Handschuhen wie diesen sollte man erneut eine Studie durchführen, um den Effekt haptischer Handschuhe auf die Usability weiter zu erforschen.

Als nächstes werden Schlüsse zu den Ergebnissen der Arbeitsbelastung gezogen. Diese ist bei den Handschuhen signifikant höher gewesen, was auch für die Unterskala der körperlichen Anforderung gilt. Die restlichen Unterskalen wiesen auch höhere Werte bei den Handschuhen auf, jedoch keine signifikant höheren. Besonders bei der geistigen und zeitlichen Anforderung gab es keine wesentlichen Unterschiede. Insgesamt lässt sich sagen, dass die signifikant höhere Arbeitsbelastung

¹<https://www.senseglove.com/product/nova/>

zum Großteil aus der signifikant höheren körperlichen Belastung hervorgeht, welche laut Aussagen der Probanden durch das erhöhte Gewicht der Handschuhe und der Anstrengung der einzelnen Finger durch die Kraft-Rückmeldung hervorgerufen wird. Im Gegensatz zu Arbeiten, welche eine niedrigere mentale Belastung bei haptischem Feedback feststellten [RMG15; ZJSC07], verzeichneten die SenseGloves eine minimal höhere mentale Belastung.

Des Weiteren lässt sich vor allem zur körperlichen Belastung sagen, dass diese immer vom speziellen haptischen Gerät abhängt, welches verwendet wird. Es wäre wahrscheinlich sinnvoll haptische Handschuhe für das entwickelte Trainingssystem zu verwenden, welche ein niedrigeres Gewicht mit sich bringen. Dennoch muss die größere körperliche Belastung durch haptische Rückmeldung, gerade in Form von Kraft-Feedback, im virtuellen Training kein negativer Aspekt sein, da es für viele Anwendungsfälle Sinn ergeben kann, wenn das virtuelle Training körperlich fordernder ist, da man hierdurch auf die reale körperliche Belastung, beispielsweise in der Chirurgie, vorbereitet wird. Abschließend lässt sich zur Arbeitsbelastung sagen, dass es auf den Anwendungsfall ankommt ob höhere Belastung sinnvoll ist, wie es bei den SenseGloves der Fall ist.

Zuletzt wird das Trainingssystem als solches diskutiert. Laut dem Expertenfeedback hat das Trainingssystem Potential einen realen Nutzen mit sich zu bringen. Die Funktion der Schneidebereichserstellung sei sinnvoll und einfach zu verwenden. Sie müsste aber noch erweitert werden, beispielsweise indem man mehr als drei Punkte zur Erstellung verwenden könnte und die äußersten Punkte automatisch an den Knochengrenzen platziert werden würden, um realistischere Schneidebereiche zu erstellen. Die VR-Szene würde auch noch Verbesserungsmöglichkeiten bieten. Hierbei sei vor allem eine Zoom-Funktion sinnvoll, da Schneidebereiche typischerweise klein und somit in VR schwer zu erkennen wären. Außerdem muss man der Expertin zustimmen, dass Informationen zum aktuellen Schnittstatus, wie der Tiefe, fehlen. Speziell die Tiefe könnte man momentan auch auf dem Sägeblatt erkennen, aber hierfür wäre die Zoom-Funktion wahrscheinlich auch sinnvoll, um die Aufschriften besser erkennen zu können. Wenn die genannten Punkte umgesetzt werden würden, würde die Expertin die visuellen Hilfestellungen als „äußerst gut“ einschätzen. Die momentane visuelle Hilfestellung mit den Kugeln sei außerdem sehr hilfreich.

Um das System unabhängig vom Eingabergerät zu verbessern, sollten einige Vorschläge der Probanden und der Expertin umgesetzt werden.

Die Meinung zu den „Schneide-Kugeln“ teilen auch die Probanden aus der Nutzerstudie. Sie war die am besten bewertete Funktion des Trainingssystems. Die visuelle Hilfestellung in Form der holographischen Säge war hingegen sehr durchwachsen. Wegen dieser unterschiedlichen Meinungen, könnte man sie wie in Abschnitt 3.1.4 beschrieben, verbessern, sodass Experten die Möglichkeit hätten einen idealen Ablauf aufzuzeichnen. Durch diesen könnten Trainierende lernen, wie man bestimmte Schneidebereiche aussagen könnte.

Des Weiteren hat die Interaktion mit dem VR-System allen Probanden Spaß bereitet und wurde als intuitiv bezeichnet. Außerdem scheint das System allgemein die Motivation der Nutzer zu erhöhen, das Operieren zu trainieren. Insgesamt wurde das Trainingssystem von den Probanden als sinnvoll eingestuft.

Verbesserungsvorschläge der Nutzer sind vor allem in Bezug auf die Anzeige der Genauigkeit, die Umständlichkeit der Nutzung der Handschuhe und die Distanz von den Knöpfen zum Operationsgeschehen, vorhanden. Die Anzeige der Genauigkeit und die Knöpfe näher am Operationstisch zu platzieren, würde auch nach Konzepten wie „Fitts's law“ aus der MCI Sinn ergeben um die Dauer von Interaktionen zu verkürzen [Bul20]. Des Weiteren wurde in diesem Abschnitt schon besprochen, dass die Handschuhe Verbesserungspotenzial bieten. Zusätzlich gaben die Probanden, welche die Controller-Version bevorzugten an, dass sie lieber die Handschuhe verwenden würden, wenn ein

haptisches Gerät mit den genannten Verbesserungen verwendet worden wäre. Zudem waren sich die Probanden einig, dass die Handschuhe die Immersion in VR erhöhen, wie es mehrere Arbeiten bereits vermuten ließen [ENN+16; HT96; LLD17; PMR10; RHJA06].

Zusammenfassend lässt sich zu diesem Abschnitt sagen, dass das Trainingssystem viel Potenzial bietet real einsetzbar zu sein. Dafür müsste dieses in einigen Hinsichten verbessert werden, um beispielsweise noch realistischere Schneidebereiche zu erstellen oder im VR-Training an den Schneidebereich heranzoomen zu können. Zudem hat das haptische Feedback der Handschuhe die Performanz im Training nicht verändert und brachte eine höhere Arbeitsbelastung mit sich. Dennoch wurde durch die Studienteilnehmer das Potenzial haptischer Geräte gezeigt, da sie lieber eine verbesserte Version der SenseGloves verwenden würden als die HTC VIVE Controller. Außerdem wurde bestätigt, dass die SenseGloves eine höhere Immersion als gängige VR-Controller erzeugen. Im Rahmen dieser Arbeit scheinen die Controller, abgesehen von der Immersion, jedoch insgesamt die sinnvollere Variante des Trainingssystems zu sein.

5.4. Limitation

In diesem letzten Abschnitt des Evaluationskapitels werden nun die Grenzen dieser Arbeit beschrieben. Hierbei wird zunächst auf das System und die verwendeten Handschuhe eingegangen und im Anschluss auf die Studie und die Evaluation.

Zunächst war die größte Einschränkung dieser Arbeit die zeitliche Beschränkung und der Fokus auf das haptische Feedback. Zum einem war es teilweise aufgrund des zeitlichen Rahmens nicht möglich jede Funktion des Trainingssystems perfekt zu implementieren, wie bei einem Produkt das auf den Markt kommen soll. Dies kann man beispielsweise an der holographischen Säge sehen, welche nur bei flachen Schneidebereichen funktioniert, obwohl es schon eine Idee gab wie die Funktionalität dieser Säge im Idealfall aussehen könnte. Zum anderen war es teilweise nicht sinnvoll (in Bezug auf die Forschungsfrage) bestimmte Funktionalitäten in das System einzubauen, da es eventuell die Validität der Studienergebnisse beeinflusst hätte. Hätte man beispielsweise eine Zeigegeste mit den Handschuhen implementiert, um einen Schneidebereich in VR zu laden, hätten Probanden eventuell automatisch die Usability der Handschuhe anders bewertet, obwohl es eine Funktion wäre, die mit den Controllern nicht möglich wäre. In dieser Arbeit ging es jedoch darum ein möglichst gleiches System mit zwei verschiedenen Geräten zu testen und zu vergleichen, wobei eines die haptischen Handschuhe sind.

Die nächste Limitation liegt bei den Handschuhen selbst. Es wurde festgestellt, dass diese sehr umständlich zum Anziehen sind, sodass den Probanden dabei geholfen wurde. Des Weiteren rutschten diese an einzelnen Fingern des Öfteren ab, obwohl sie richtig befestigt wurden. Manche Studienteilnehmer meinten außerdem, dass das Tracking bei den Handschuhe schlechter war, als bei den VIVE Controllern. Dies ist beim Beobachten der Probanden auch aufgefallen, obwohl die Tracker der Handschuhe ebenfalls von HTC VIVE sind. Wären die Handschuhe in den Hinsichten anders gewesen, wie es die Studienteilnehmer als Verbesserungsvorschläge eingebracht haben, dann hätte das Ergebnis der Studie mit hoher Wahrscheinlichkeit anders ausgesehen – beispielsweise bei der Usability und der Genauigkeit des Operierens.

Hinzu kommt, was ebenfalls einige Studienteilnehmer angemerkt hatten, dass die Form der Controller für das Greifen einer Säge durch den Griff realistisch wirkt. Es könnte sein, dass die Ergebnisse bei anderen Anwendungsfällen abweichen würden – wenn man beispielsweise eine

Pinzette verwenden müsste, siehe der Handgriff anders aus. Für den speziellen Fall des entwickelten Trainingssystems sind die Ergebnisse dennoch valide und das wahrscheinlich auch für ähnliche Anwendungsbereiche.

Zuletzt gibt es auch Limitationen bei der Studie an sich. Beispielsweise konnte die Expertin, die das System testete, nur die Controller-Version verwenden, da es bei ihr vor Ort keine SenseGloves gab. Somit kann man auf Expertenebene keinen Vergleich der beiden Versionen des Systems führen. Auch wenn zusätzlich eine Studie mit Laien durchgeführt wurde und das haptische Feedback hierbei sinnvoll bewertet werden konnte, lässt sich dadurch keine Aussage treffen wie Experten das haptische Feedback der Handschuhe im Vergleich zu den Controllern einordnen würden. Außerdem wäre für eine höhere Validität einiger Werte eine Studie mit einer größeren Stichprobe sinnvoll. Gerade bei Werten wie der Usability, welche statistisch gesehen nur knapp den Wert des Signifikanzniveaus verfehlt hat und hierdurch nicht als signifikant unterschiedlich bei den beiden Versionen bewertet werden kann.

6. Fazit und Ausblick

In diesem abschließenden Kapitel werden nochmals die wichtigsten Informationen und Erkenntnisse dieser Arbeit thematisiert und ein Ausblick auf die zukünftige Forschung und die Weiterentwicklung des im Rahmen der Arbeit entwickelten Trainingssystems gegeben.

Fazit

VR ist schon vor der Corona-Pandemie ein immer größer werdendes Thema als alternative Lernmethode geworden, hat durch diese und die daraus resultierende Beschleunigung der Digitalisierung jedoch noch mehr an Relevanz gewonnen. Haptische Geräte können dabei verschiedene Vorteile für lehrende VR-Systeme und Trainingssysteme in VR bieten. Beispielsweise können sie die Immersion [ENN+16; HT96; LLD17; PMR10; RHJA06] und die Usability [AGL+09; EBPC19] solcher Systeme erhöhen. Diese Arbeit zeigt den Ansatz eines Prototyps für chirurgisches Training in VR und vergleicht den Prozess des Operierens mit einem gängigen VR-Controller und einem Exoskelett-artigen haptischen Handschuh, welcher Kraft-Feedback an den Fingern und taktiles Feedback in Form von Vibration an der ganzen Hand bietet.

Der Prototyp besteht aus drei Szenen, wobei alle den gleichen Operationsraum verwenden. Zwei der Szenen haben hierbei die gleiche Funktionalität, nämlich das Trainieren des Operierens und unterscheiden sich lediglich beim unterstützten Eingabegerät. In diesen Szenen können visuelle Hilfestellungen verwendet und Speicherbereiche geladen werden, welche in der übrigen Szene kreiert, gespeichert und gelöscht werden können.

Das Feedback einer Expertin zeigt das Potential dieses Trainingssystems, was vor allem durch die Erstellung realistischer Schneidebereiche und eine sinnvolle Darstellung des bereits ausgesägten Schneidebereichs hervorkommt. Außerdem zeigen die Ergebnisse einer zusätzlich durchgeführten Studie, dass es keine Performanz-Unterschiede der Probanden zwischen beiden Versionen des Systems gab, die Usability der Controller-Version und die Arbeitsbelastung mit den Handschuhen höher sind. Dies zeigt, dass die Controller für das Trainingssystem wahrscheinlich die bessere Wahl von den beiden verwendeten Eingabegeräten sind. Darüber hinaus fand man heraus, dass die Immersion mit den Handschuhen höher ist und die Probanden diese gegenüber den Controllern bevorzugen würden, wenn man sie verbessern würde. Die Probleme mit den verwendeten Handschuhen waren insbesondere das sehr umständliche Anziehen, das Gewicht und störende Kabel.

Diese Arbeit ebnet den Weg für das Verbessern haptischer Geräte für VR und zeigt das Potenzial dieser Technologie durch Immersionserhöhung in diesem implementierten Trainingssystem. Wenn diese Technologie weiterentwickelt wird, könnte dies für erhebliche Durchbrüche im Bereich der VR-Trainingssysteme bieten und deren aktuelle Relevanz und Performanz ins Unermessliche steigen lassen.

Ausblick

Diese Arbeit hat das Potenzial haptischer Geräte mit Kraft-Rückmeldung für VR-Systeme durch Immersionsgewinn im implementierten chirurgischen Trainingssystem gezeigt. Zunächst führt dieses Ergebnis zu der Frage wie signifikant der Immersionsgewinn durch die Handschuhe in dem Trainingssystem ist. Dies ist insbesondere deswegen relevant, da festgestellt wurde, dass gängige Controller durch ihren Griff ebenfalls einen realen Eindruck beim Greifen einer orthopädischen Säge in VR erzeugen. Durch eine erneute Studie könnte man dies mit einem angepassten Fragebogen erreichen.

Im Rahmen folgender könnte man außerdem weitere haptische Geräte einbinden, da die SenseGlove DK1 viele Verbesserungsvorschläge von den Probanden, der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studie, erhielt. Des Weiteren könnte man mit einer verbesserten Version der Handschuhe (wie den SenseGlove Nova) erneute Genauigkeitsmessungen und Usability-Tests durchführen. Dies erlaubt in gewisser Weise in den Prozess des „Task-Artifact-Cycle“ einzusteigen und somit die kontinuierliche Veränderung menschlicher Bedürfnisse mit neuer Technologie zu befriedigen [Bul20]. In Bezug auf den Forschungsbereich dieser Arbeit sind haptische Geräte für die Verwendung in VR die Technologie.

Des Weiteren wäre es interessant weitere Möglichkeiten haptischer Handschuhe auf ihre Nützlichkeit zu erforschen. Beispielsweise können bei den SenseGloves Gesten der Hand definiert werden, welche bestimmte Aktionen auslösen können. Somit könnte man die Usability verschiedener Eingabemethoden vergleichen. Insbesondere ein Vergleich zu gängigen Controllern wäre hierbei interessant.

Zudem sollte die Aussagekraft der Ergebnisse dieser Arbeit durch das Durchführen einer Studie mit Experten und angehenden Chirurgen überprüft werden, da es im Rahmen der Arbeit nicht möglich war, Experten beide Versionen des Trainingssystems testen und evaluieren zu lassen.

Abgesehen von den Eingabemöglichkeiten wäre es sinnvoll das Trainingssystem zu einem High-Fidelity-Prototypen weiterzuentwickeln und dazu erneutes und kontinuierliches Feedback einzuholen. Verbesserungsmöglichkeiten sind hierbei zunächst die Schneidebereich-Erstellung, in welcher es beispielsweise die Möglichkeit geben sollte, weitere als nur die drei Punkte zur Generierung von Schneidebereichen zu verwenden und so realistischere Schneidebereiche erstellen zu können. Außerdem sollten die äußersten Punkte automatisch auf der Knochengrenze platziert und auf dieser bewegt werden können, damit Schneidebereiche wirklich an der Grenze des Knochens beginnen.

Des Weiteren sollte die VR-Trainingsszene verbessert und erweitert werden. Hierbei wäre vor allem eine Zoom-Funktion wünschenswert, um die kleinen Schneidebereiche besser erkennen zu können. Die Schneidebereiche sollten des Weiteren transparenter sein, um den Schneide-Prozess besser erkennen zu können. Zudem sollten weitere Informationen, beispielsweise zur aktuellen Schnitttiefe angezeigt werden. Eine Anpassung der Vibration der Controller-Version wäre außerdem sinnvoll, da einige Probanden diese schwächer als bei den Handschuhen empfunden haben bzw. die Abstufung der verschiedenen Stufen zu ähnlich war. Die Probanden wünschten sich zudem, dass die Anzeige der Genauigkeit und die Knöpfe, welche sich an der Wand befinden, näher am Operationsgeschehen platziert werden – dies wäre ebenfalls eine sinnvolle Anpassung des Systems.

Abschließend lässt sich sagen, dass ein Trainingssystem, wie das im Rahmen dieser Arbeit implementierte, Potenzial für die reale Anwendung mit sich bringt und motiviert die Vermutung, dass solche Systeme in der Zukunft häufiger zu sehen sein werden.

Literaturverzeichnis

- [AGL+09] A. F. Abate, M. Guida, P. Leoncini, M. Nappi, S. Ricciardi. „A haptic-based approach to virtual training for aerospace industry“. In: *Journal of Visual Languages & Computing* 20.5 (2009). Multimodal Interaction through Haptic Feedback, S. 318–325. ISSN: 1045-926X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jvlc.2009.07.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1045926X09000548> (zitiert auf S. 29, 58, 70, 75).
- [BFCK17] J. D. Brown, J. N. Fernandez, S. P. Cohen, K. J. Kuchenbecker. „A wrist-squeezing force-feedback system for robotic surgery training“. In: *2017 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. 2017, S. 107–112. DOI: [10.1109/WHC.2017.7989885](https://doi.org/10.1109/WHC.2017.7989885) (zitiert auf S. 22, 23, 30).
- [BKM09] A. Bangor, P. Kortum, J. Miller. „Determining What Individual SUS Scores Mean: Adding an Adjective Rating Scale“. In: *J. Usability Studies* 4.3 (Mai 2009), S. 114–123. ISSN: 1931-3357 (zitiert auf S. 70).
- [BLFG16] J. D. Bric, D. C. Lombard, M. J. Frelich, J. C. Gould. „Current state of virtual reality simulation in robotic surgery training: a review“. In: *Surgical Endoscopy* 30.6 (Juni 2016), S. 2169–2178. ISSN: 1432-2218. DOI: [10.1007/s00464-015-4517-y](https://doi.org/10.1007/s00464-015-4517-y). URL: <https://doi.org/10.1007/s00464-015-4517-y> (zitiert auf S. 26).
- [BLM+18] I. Bortone, D. Leonardis, N. Mastronicola, A. Crecchi, L. Bonfiglio, C. Procopio, M. Solazzi, A. Frisoli. „Wearable Haptics and Immersive Virtual Reality Rehabilitation Training in Children With Neuromotor Impairments“. In: *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering* 26.7 (2018), S. 1469–1478. DOI: [10.1109/TNSRE.2018.2846814](https://doi.org/10.1109/TNSRE.2018.2846814) (zitiert auf S. 30).
- [BMTM20] S. Baceviciute, A. Mottelson, T. Terkildsen, G. Makransky. „Investigating Representation of Text and Audio in Educational VR Using Learning Outcomes and EEG“. In: *Proceedings of the 2020 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '20. Honolulu, HI, USA: Association for Computing Machinery, 2020, S. 1–13. ISBN: 9781450367080. DOI: [10.1145/3313831.3376872](https://doi.org/10.1145/3313831.3376872). URL: <https://doi.org/10.1145/3313831.3376872> (zitiert auf S. 26, 37).
- [Bro13] J. Brooke. „SUS: A Retrospective“. In: 8.2 (Feb. 2013), S. 29–40. ISSN: 1931-3357 (zitiert auf S. 70).
- [BSHW07] C. Basdogan, M. Sedef, M. Harders, S. Wesarg. „VR-Based Simulators for Training in Minimally Invasive Surgery“. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 27.2 (2007), S. 54–66. DOI: [10.1109/MCG.2007.51](https://doi.org/10.1109/MCG.2007.51) (zitiert auf S. 26).
- [Bul20] A. Bulling. *Vorlesungsfolien Mensch Computer Interaktion – Kapitel Datenanalyse & Gestalttheorie*. 2020 (zitiert auf S. 39, 42, 57, 71, 76).

- [Car19a] J. Carfagno. „How Osso VR is Reshaping the Surgical Training Process“. In: *docwirenews* (Mai 2019). URL: <https://www.docwirenews.com/docwire-pick/future-of-medicine-picks/how-osso-vr-is-reshaping-the-surgical-training-process/> (zitiert auf S. 25).
- [Car19b] J. Carfagno. „Top 4 Virtual Reality (VR) Breakthroughs in Medicine“. In: *docwirenews* (Dez. 2019). URL: <https://www.docwirenews.com/docwire-pick/top-4-virtual-reality-vr-breakthroughs-in-medicine/> (zitiert auf S. 24).
- [CBLT21] K. G. Caballas, H. J. M. Bolingot, N. J. C. Libatique, G. L. Tangonan. „Development of a Visual Guidance System for Laparoscopic Surgical Palpation using Computer Vision“. In: *2020 IEEE-EMBS Conference on Biomedical Engineering and Sciences (IECBES)*. 2021, S. 88–93. DOI: [10.1109/IECBES48179.2021.9398796](https://doi.org/10.1109/IECBES48179.2021.9398796) (zitiert auf S. 23).
- [Chr10] C. Christou. „Virtual Reality in Education“. In: *Affective, Interactive and Cognitive Methods for E-Learning Design: Creating an Optimal Education Experience*. Hershey, PA, USA: IGI Global, 2010, S. 228–243. ISBN: 9781605669403. DOI: [10.4018/978-1-60566-940-3.ch012](https://doi.org/10.4018/978-1-60566-940-3.ch012). URL: <https://doi.org/10.4018/978-1-60566-940-3.ch012> (zitiert auf S. 24).
- [CJN15] S. Choi, K. Jung, S. D. Noh. „Virtual reality applications in manufacturing industries: Past research, present findings, and future directions“. In: *Concurrent Engineering* 23.1 (2015), S. 40–63. DOI: [10.1177/1063293X14568814](https://doi.org/10.1177/1063293X14568814). eprint: <https://doi.org/10.1177/1063293X14568814>. URL: <https://doi.org/10.1177/1063293X14568814> (zitiert auf S. 24).
- [COML21] M. Caeiro-Rodríguez, I. Otero-González, F. A. Mikic-Fonte, M. Llamas-Nistal. „A Systematic Review of Commercial Smart Gloves: Current Status and Applications“. In: *Sensors* 21.8 (2021). ISSN: 1424-8220. DOI: [10.3390/s21082667](https://doi.org/10.3390/s21082667). URL: <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/8/2667> (zitiert auf S. 30, 58).
- [EBPC19] B. I. Edwards, K. S. Bielawski, R. Prada, A. D. Cheok. „Haptic virtual reality and immersive learning for enhanced organic chemistry instruction“. In: *Virtual Reality* 23.4 (Dez. 2019), S. 363–373. ISSN: 1434-9957. DOI: [10.1007/s10055-018-0345-4](https://doi.org/10.1007/s10055-018-0345-4). URL: <https://doi.org/10.1007/s10055-018-0345-4> (zitiert auf S. 29, 58, 70, 75).
- [Elm19] N. Elmqaddem. „Augmented Reality and Virtual Reality in Education. Myth or Reality?“ In: *International Journal of Emerging Technologies in Learning (iJET)* 14.03 (Feb. 2019), pp. 234–242. DOI: [10.3991/ijet.v14i03.9289](https://doi.org/10.3991/ijet.v14i03.9289). URL: <https://online-journals.org/index.php/i-jet/article/view/9289> (zitiert auf S. 24).
- [ENN+16] D. Escobar-Castillejos, J. Noguez, L. Neri, A. Magana, B. Benes. „A Review of Simulators with Haptic Devices for Medical Training“. In: *Journal of Medical Systems* 40.4 (Feb. 2016), S. 104. ISSN: 1573-689X. DOI: [10.1007/s10916-016-0459-8](https://doi.org/10.1007/s10916-016-0459-8). URL: <https://doi.org/10.1007/s10916-016-0459-8> (zitiert auf S. 27, 58, 72, 75).
- [FAN+15] E. E. Foglia, A. Ades, N. Napolitano, J. Leffelman, V. Nadkarni, A. Nishisaki. „Factors Associated with Adverse Events during Tracheal Intubation in the NICU“. In: *Neonatology* 108.1 (2015), S. 23–29 (zitiert auf S. 21).

- [FH21] C. M. Fang, C. Harrison. „Retargeted Self-Haptics for Increased Immersion in VR without Instrumentation“. In: *The 34th Annual ACM Symposium on User Interface Software and Technology*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021, S. 1109–1121. ISBN: 9781450386357. URL: <https://doi.org/10.1145/3472749.3474810> (zitiert auf S. 28).
- [FJ18] A. Franzluebbbers, K. Johnsen. „Performance Benefits of High-Fidelity Passive Haptic Feedback in Virtual Reality Training“. In: *Proceedings of the Symposium on Spatial User Interaction*. SUI '18. Berlin, Germany: Association for Computing Machinery, 2018, S. 16–24. ISBN: 9781450357081. DOI: [10.1145/3267782.3267790](https://doi.org/10.1145/3267782.3267790). URL: <https://doi.org/10.1145/3267782.3267790> (zitiert auf S. 29, 58, 69).
- [FMR+21] G. Franklin, C. Martin, M. Ruszaj, M. Matin, A. Kataria, J. Hu, A. Brickman, P. L. Elkin. „How the COVID-19 Pandemic Impacted Medical Education during the Last Year of Medical School: A Class Survey“. In: *Life* 11.4 (2021). ISSN: 2075-1729. DOI: [10.3390/life11040294](https://doi.org/10.3390/life11040294). URL: <https://www.mdpi.com/2075-1729/11/4/294> (zitiert auf S. 17, 24).
- [FSB19] T. Fritz, N. Stachel, B. J. Braun. „Evidence in surgical training – a review“. In: *Innovative Surgical Sciences* 4.1 (2019), S. 7–13. DOI: [doi:10.1515/iss-2018-0026](https://doi.org/10.1515/iss-2018-0026). URL: <https://doi.org/10.1515/iss-2018-0026> (zitiert auf S. 25, 59).
- [Goh21] P. S. Goh. „The vision of transformation in medical education after the COVID-19 pandemic“. eng. In: *Korean journal of medical education* 33.3 (Sep. 2021). [kjme.2021.197](https://doi.org/10.3946/kjme.2021.197)[PII], S. 171–174. ISSN: 2005-7288. DOI: [10.3946/kjme.2021.197](https://doi.org/10.3946/kjme.2021.197). URL: <https://doi.org/10.3946/kjme.2021.197> (zitiert auf S. 22).
- [GPV+07] F. Gutiérrez, J. Pierce, V. M. Vergara, R. Coulter, L. Saland, T. P. Caudell, T. E. Goldsmith, D. C. Alverson. „The effect of degree of immersion upon learning performance in virtual reality simulations for medical education“. In: *Stud Health Technol Inform* 125 (2007), S. 155–160 (zitiert auf S. 26).
- [GS20] P. Goh, J. Sandars. „A vision of the use of technology in medical education after the COVID-19 pandemic [version 1]“. In: *MedEdPublish* 9.49 (2020). DOI: [10.15694/mep.2020.000049.1](https://doi.org/10.15694/mep.2020.000049.1) (zitiert auf S. 22).
- [HAA14] N. S. S. Hamid, F. A. Aziz, A. Azizi. „Virtual reality applications in manufacturing system“. In: *2014 Science and Information Conference*. 2014, S. 1034–1037. DOI: [10.1109/SAI.2014.6918317](https://doi.org/10.1109/SAI.2014.6918317) (zitiert auf S. 24).
- [Hae18] K. A. Haerling. „Cost-Utility Analysis of Virtual and Mannequin-Based Simulation“. In: *Simul Healthc* 13.1 (Feb. 2018), S. 33–40 (zitiert auf S. 26).
- [Har06] S. G. Hart. „Nasa-Task Load Index (NASA-TLX); 20 Years Later“. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 50 (2006), S. 904–908 (zitiert auf S. 59).
- [Hos19] S. J. C. Hospital. „St. Joseph’s Children’s Hospital First Children’s Hospital in Southeast to Use Virtual Reality Visualization Platform“. In: *PR Newswire* (Juni 2019). URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/st-josephs-childrens-hospital-first-childrens-hospital-in-southeast-to-use-virtual-reality-visualization-platform-300864944.html> (zitiert auf S. 25).

- [HR16] M. Hong, J. W. Rozenblit. „A haptic guidance system for Computer-Assisted Surgical Training using virtual fixtures“. In: *2016 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*. 2016, S. 002230–002235. DOI: [10.1109/SMC.2016.7844570](https://doi.org/10.1109/SMC.2016.7844570) (zitiert auf S. 22).
- [HS06] S. Haque, S. Srinivasan. „A meta-analysis of the training effectiveness of virtual reality surgical simulators“. In: *IEEE Transactions on Information Technology in Biomedicine* 10.1 (2006), S. 51–58. DOI: [10.1109/TITB.2005.855529](https://doi.org/10.1109/TITB.2005.855529) (zitiert auf S. 24).
- [HT96] R. J. Hollands, E. A. Trowbridge. „A virtual reality training tool for the arthroscopic treatment of knee disabilities“. In: International Society for Virtual Rehabilitation, 1996. ISBN: 0 7049 1140 X. URL: https://isvr.org/ICDArchive2021/1996/P/1996_16.pdf (zitiert auf S. 27, 58, 72, 75).
- [ISE+19] A. Illanes, T. Sühn, N. Esmaeili, I. Maldonado, A. Schaufler, C.-H. Chen, A. Boese, M. Friebe. „Surgical Audio Guidance SurAG: Extracting Non-Invasively Meaningful Guidance Information During Minimally Invasive Procedures“. In: *2019 IEEE 19th International Conference on Bioinformatics and Bioengineering (BIBE)*. 2019, S. 567–570. DOI: [10.1109/BIBE.2019.00108](https://doi.org/10.1109/BIBE.2019.00108) (zitiert auf S. 23).
- [Jer15] J. Jerald. *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*. Morgan & Claypool, 2015, S. 325–329. ISBN: 9781970001129. DOI: [10.1145/2792790](https://doi.org/10.1145/2792790). URL: <https://dl.acm.org/doi/book/10.1145/2792790> (zitiert auf S. 34, 35, 39, 40, 56).
- [KM21] K. A. Kowalczyk, A. Majewski. „Analysis of surgical errors associated with anatomical variations clinically relevant in general surgery. Review of the literature“. In: *Translational Research in Anatomy* 23 (2021), S. 100107. ISSN: 2214-854X. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tria.2020.100107>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214854X20300467> (zitiert auf S. 22).
- [LaV15] S. M. LaValle. *VIRTUAL REALITY*. Cambridge University Press, 2015, S. 348–352. URL: <http://lavalle.pl/vr/> (zitiert auf S. 42).
- [Lel13] A. Lele. „Virtual reality and its military utility“. In: *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing* 4.1 (Feb. 2013), S. 17–26. ISSN: 1868-5145. DOI: [10.1007/s12652-011-0052-4](https://doi.org/10.1007/s12652-011-0052-4). URL: <https://doi.org/10.1007/s12652-011-0052-4> (zitiert auf S. 17).
- [Lev04] A. Levin. „Fewer crashes caused by pilots“. In: *USA Today* (März 2004) (zitiert auf S. 26).
- [Lew18] J. R. Lewis. „The System Usability Scale: Past, Present, and Future“. In: *International Journal of Human-Computer Interaction* 34.7 (2018), S. 577–590. DOI: [10.1080/10447318.2018.1455307](https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1455307). eprint: <https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1455307>. URL: <https://doi.org/10.1080/10447318.2018.1455307> (zitiert auf S. 59).
- [LLD17] L.-m. Liu, W. Li, J.-j. Dai. „Haptic technology and its application in education and learning“. In: *2017 10th International Conference on Ubi-media Computing and Workshops (Ubi-Media)*. 2017, S. 1–6. DOI: [10.1109/UMEDIA.2017.8074138](https://doi.org/10.1109/UMEDIA.2017.8074138) (zitiert auf S. 27, 58, 72, 75).

- [LT18] Y. Liu, P. Tang. „The Prospect for the Application of the Surgical Navigation System Based on Artificial Intelligence and Augmented Reality“. In: *2018 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*. 2018, S. 244–246. DOI: [10.1109/AIVR.2018.00056](https://doi.org/10.1109/AIVR.2018.00056) (zitiert auf S. 23).
- [MBAM21] C. Munro, J. Burke, W. Allum, N. Mortensen. „Covid-19 leaves surgical training in crisis“. In: *BMJ* 372 (2021). DOI: [10.1136/bmj.n659](https://doi.org/10.1136/bmj.n659). eprint: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n659.full.pdf>. URL: <https://www.bmj.com/content/372/bmj.n659> (zitiert auf S. 17).
- [MDL+19] M. B. Molinero, G. Dagnino, J. Liu, W. Chi, M. E. M. K. Abdelaziz, T. Kwok, C. Riga, G. Yang. „Haptic Guidance for Robot-Assisted Endovascular Procedures: Implementation and Evaluation on Surgical Simulator“. In: *2019 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. 2019, S. 5398–5403. DOI: [10.1109/IROS40897.2019.8967712](https://doi.org/10.1109/IROS40897.2019.8967712) (zitiert auf S. 22).
- [MTB+07] D. Morris, H. Tan, F. Barbagli, T. Chang, K. Salisbury. „Haptic Feedback Enhances Force Skill Learning“. In: *Second Joint EuroHaptics Conference and Symposium on Haptic Interfaces for Virtual Environment and Teleoperator Systems (WHC'07)*. 2007, S. 21–26. DOI: [10.1109/WHC.2007.65](https://doi.org/10.1109/WHC.2007.65) (zitiert auf S. 29).
- [OF21] A. Otaran, I. Farkhatdinov. „A Cable-Driven Walking Interface with Haptic Feedback for Seated VR“. In: *2021 IEEE World Haptics Conference (WHC)*. 2021, S. 592–592. DOI: [10.1109/WHC49131.2021.9517167](https://doi.org/10.1109/WHC49131.2021.9517167) (zitiert auf S. 29).
- [PMR10] B. Pérez-Gutiérrez, D.M. Martínez, O.E. Rojas. „Endoscopic endonasal haptic surgery simulator prototype: A rigid endoscope model“. In: *2010 IEEE Virtual Reality Conference (VR)*. 2010, S. 297–298. DOI: [10.1109/VR.2010.5444756](https://doi.org/10.1109/VR.2010.5444756) (zitiert auf S. 27, 58, 72, 75).
- [Pot19] J. Pottle. „Virtual reality and the transformation of medical education“. eng. In: *Future healthcare journal* 6.3 (Okt. 2019). futurehealth[PII], S. 181–185. ISSN: 2514-6645. DOI: [10.7861/fhj.2019-0036](https://doi.org/10.7861/fhj.2019-0036). URL: <https://doi.org/10.7861/fhj.2019-0036> (zitiert auf S. 17, 26).
- [PRT+21] M. Papapanou, E. Routsis, K. Tsamakis, L. Fotis, G. Marinos, I. Lidoriki, M. Karamanou, T. G. Papaioannou, D. Tsiptsios, N. Smyrnis, E. Rizos, D. Schizas. „Medical education challenges and innovations during COVID-19 pandemic“. In: *Postgraduate Medical Journal* (2021). ISSN: 0032-5473. DOI: [10.1136/postgradmedj-2021-140032](https://doi.org/10.1136/postgradmedj-2021-140032). eprint: <https://pmj.bmj.com/content/early/2021/03/28/postgradmedj-2021-140032.full.pdf>. URL: <https://pmj.bmj.com/content/early/2021/03/28/postgradmedj-2021-140032> (zitiert auf S. 24).
- [RHJA06] P. Ramsamy, A. Haffegge, R. Jamieson, V. Alexandrov. „Using Haptics to Improve Immersion in Virtual Environments“. In: *Computational Science – ICCS 2006*. Hrsg. von V. N. Alexandrov, G. D. van Albada, P. M. A. Sloot, J. Dongarra. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2006, S. 603–609. ISBN: 978-3-540-34382-0. DOI: [10.1007/11758525_81](https://doi.org/10.1007/11758525_81). URL: https://doi.org/10.1007/11758525_81 (zitiert auf S. 27, 58, 72, 75).

- [RMG15] C. Ramírez-Fernández, A. L. Morán, E. García-Canseco. „Haptic feedback in motor hand virtual therapy increases precision and generates less mental workload“. In: *2015 9th International Conference on Pervasive Computing Technologies for Healthcare (PervasiveHealth)*. 2015, S. 280–286. DOI: [10.4108/icst.pervasivehealth.2015.260242](https://doi.org/10.4108/icst.pervasivehealth.2015.260242) (zitiert auf S. 71).
- [RMH+21] M. Rettinger, N. Müller, C. Holzmann-Littig, M. Wijnen-Meijer, G. Rigoll, C. Schmauderer. „VR-Based Equipment Training for Health Professionals“. In: *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2021. ISBN: 9781450380959. URL: <https://doi.org/10.1145/3411763.3451766> (zitiert auf S. 17, 24, 26).
- [SCBB11] T. Seth, V. Chaudhary, C. Buyea, L. Bone. „A Virtual Interactive Navigation System for Orthopaedic Surgical Interventions“. In: *Proceedings of the 4th International Symposium on Applied Sciences in Biomedical and Communication Technologies*. ISABEL '11. Barcelona, Spain: Association for Computing Machinery, 2011. ISBN: 9781450309134. DOI: [10.1145/2093698.2093769](https://doi.org/10.1145/2093698.2093769). URL: <https://doi.org/10.1145/2093698.2093769> (zitiert auf S. 21).
- [SO17] S. B. Schorr, A. M. Okamura. „Fingertip Tactile Devices for Virtual Object Manipulation and Exploration“. In: *Proceedings of the 2017 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. CHI '17. Denver, Colorado, USA: Association for Computing Machinery, 2017, S. 3115–3119. ISBN: 9781450346559. DOI: [10.1145/3025453.3025744](https://doi.org/10.1145/3025453.3025744). URL: <https://doi.org/10.1145/3025453.3025744> (zitiert auf S. 30).
- [SPL+19] M. U. Sattar, S. Palaniappan, A. Lokman, A. Hassan, N. Shah, Z. Riaz. „Effects of Virtual Reality training on medical students' learning motivation and competency: Medical students' learning motivation & competency“. In: *Pakistan Journal of Medical Sciences* 35.3 (Mai 2019). DOI: [10.12669/pjms.35.3.44](https://doi.org/10.12669/pjms.35.3.44). URL: <https://www.pjms.org.pk/index.php/pjms/article/view/44> (zitiert auf S. 58).
- [SSS+21] D. Schott, P. Saalfeld, G. Schmidt, F. Joeres, C. Boedecker, F. Huettl, H. Lang, T. Huber, B. Preim, C. Hansen. „A VR/AR Environment for Multi-User Liver Anatomy Education“. In: *2021 IEEE Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. 2021, S. 296–305. DOI: [10.1109/VR50410.2021.00052](https://doi.org/10.1109/VR50410.2021.00052) (zitiert auf S. 22).
- [TFR+21] V. Trabysh, T. J. Feldhacker, C. Rizzardo, J. Johnson, L. Tripp, K. Halverson, A. Gonzalez. „I Feel the Need for Speed: Empirical Evidence of the Effectiveness of VR Training Technology on Knowledge and Skill Acquisition“. In: *Advances in Human Factors in Training, Education, and Learning Sciences*. Hrsg. von S. Nazir, T. Z. Ahram, W. Karwowski. Cham: Springer International Publishing, 2021, S. 19–26. ISBN: 978-3-030-80000-0. DOI: [10.1007/978-3-030-80000-0_3](https://doi.org/10.1007/978-3-030-80000-0_3). URL: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-80000-0_3 (zitiert auf S. 17, 25).
- [UGL+16] T. Ungi, G. Gauvin, A. Lasso, C. T. Yeo, P. Pezeshki, T. Vaughan, K. Carter, J. Rudan, C. J. Engel, G. Fichtinger. „Navigated Breast Tumor Excision Using Electromagnetically Tracked Ultrasound and Surgical Instruments“. In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 63.3 (2016), S. 600–606. DOI: [10.1109/TBME.2015.2466591](https://doi.org/10.1109/TBME.2015.2466591) (zitiert auf S. 23).

- [WRSF20] F. Winther, L. Ravindran, K. P. Svendsen, T. Feuchtner. „Design and Evaluation of a VR Training Simulation for Pump Maintenance Based on a Use Case at Grundfos“. In: *2020 IEEE Conference on Virtual Reality and 3D User Interfaces (VR)*. 2020, S. 738–746. DOI: [10.1109/VR46266.2020.00097](https://doi.org/10.1109/VR46266.2020.00097) (zitiert auf S. 25).
- [WTH+22] M. Webb, M. Tracey, W. Harwin, O. Tokatli, F. Hwang, R. Johnson, N. Barrett, C. Jones. „Haptic-enabled collaborative learning in virtual reality for schools“. In: *Education and Information Technologies* 27.1 (Jan. 2022), S. 937–960. ISSN: 1573-7608. DOI: [10.1007/s10639-021-10639-4](https://doi.org/10.1007/s10639-021-10639-4). URL: <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10639-4> (zitiert auf S. 58).
- [WTN+12] C. D. W. Ward, A. L. Trejos, M. D. Naish, R. V. Patel, C. M. Schlachta. „The WHaSP: A Wireless Hands-Free Surgical Pointer for Minimally Invasive Surgery“. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics* 17.3 (2012), S. 434–442. DOI: [10.1109/TMECH.2012.2188721](https://doi.org/10.1109/TMECH.2012.2188721) (zitiert auf S. 23).
- [YG16] Y. Yang, S. P. Gordon. „Visualizing and Understanding the Components of Lagrange and Newton Interpolation“. In: *PRIMUS* 26.1 (2016), S. 39–52. DOI: [10.1080/10511970.2015.1045053](https://doi.org/10.1080/10511970.2015.1045053). eprint: <https://doi.org/10.1080/10511970.2015.1045053>. URL: <https://doi.org/10.1080/10511970.2015.1045053> (zitiert auf S. 53).
- [ZJSC07] M. Zhou, D. Jones, S. Schwaitzberg, C. Cao. „Role of Haptic Feedback and Cognitive Load in Surgical Skill Acquisition“. In: *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* 51.11 (2007), S. 631–635. DOI: [10.1177/154193120705101106](https://doi.org/10.1177/154193120705101106). eprint: <https://doi.org/10.1177/154193120705101106>. URL: <https://doi.org/10.1177/154193120705101106> (zitiert auf S. 58, 69, 71).
- [ZWYZ19] T. ZENG, K. WEI, Y. YU, Y. ZHAO. „Eye-around vibration haptics on VR immersion improvement“. In: *Virtual Reality & Intelligent Hardware* 1.2 (2019), S. 176–184. ISSN: 2096-5796. DOI: <https://doi.org/10.3724/SP.J.2096-5796.2018.0014>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2096579619300154> (zitiert auf S. 28, 29).
- [ZXW+20] S. Zhao, X. Xiao, Q. Wang, X. Zhang, W. Li, L. Soghier, J. Hahn. „An Intelligent Augmented Reality Training Framework for Neonatal Endotracheal Intubation“. In: *2020 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. 2020, S. 672–681. DOI: [10.1109/ISMAR50242.2020.00097](https://doi.org/10.1109/ISMAR50242.2020.00097) (zitiert auf S. 21).

Alle URLs wurden zuletzt am 15. 03. 2022 geprüft. Dies schließt auch Fußnoten mit ein.

A. Programmspezifischer Anhang

Hier sind weitere Informationen zum Trainingssystem zu finden. Es sind hauptsächlich Bilder vorhanden, jedoch der Vollständigkeit halber auch der Algorithmus um die Positionen für die „Schneide-Kugeln“ für das zu tiefe Schneiden zu ermitteln, da in Algorithmus 3.3 nur die zwei anderen Kugeln behandelt wurden.



Abbildung A.1.: Seitliche Ansicht auf den Operationsraum

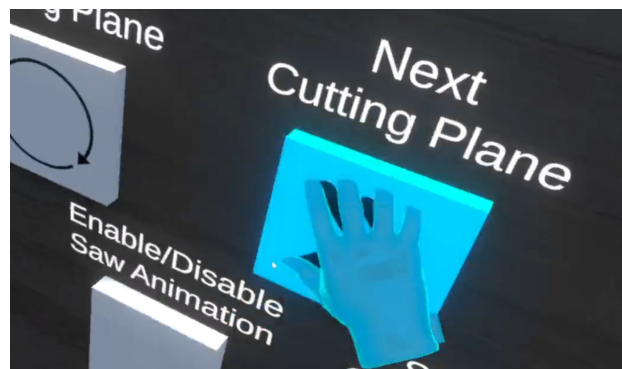


Abbildung A.2.: Visualisierung des Feedbacks bei betätigen eines Knopfes in VR

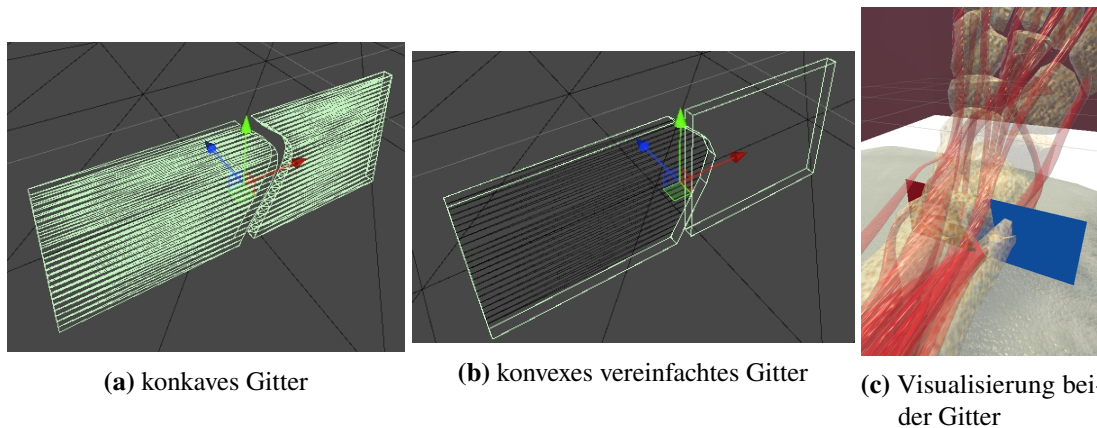


Abbildung A.3.: Ursprüngliche, verworfene Implementierung des Schneidebereichs bei welcher lediglich zwei Gitter zur Kollisionserkennung verwendet wurden.

Das Problem bei der Implementierung aus Abbildung A.3 war vor allem eine sehr ungenaue Kollisionserkennung und dass die Unity-Funktion *OnTriggerEnter* nur bei konvexen Gittern funktioniert. Außerdem konnte der Schneidebereich so nicht in drei, sondern nur zwei Teile separiert werden. Zusätzlich gab es keine Form der Visualisierung des bereits geschnittenen Bereichs.



Abbildung A.4.: Komplettansicht der angezogenen SenseGlove DK1

Algorithmus A.1 Versetzen der Kurve des Schneidebereichs um die Positionen der Punkte für zu tiefes Schneiden zu erhalten

```

1 public void CreateMovedCurve()
2 {
3     Vector3[] curveVertices = cuttingMeshGenerator.getVertices();
4     movedCurveVertices = new Vector3[curveVertices.Length];
5     for (int i = 0; i < curveVertices.Length; i++)
6     {
7         float x = curveVertices[i].x + 0.0025f + cuttingMeshGenerator.lengthCoef * 0.01f *
            distToCuttingMeshCoef;
8         movedCurveVertices[i] = new Vector3(x, curveVertices[i].y, curveVertices[i].z);
9     }
10 }

```

B. Studienspezifischer Anhang

Hier sind weitere Daten zu den t-Tests, Visualisierungen statistischer Daten und der verwendete NasaTLX-Fragebogen zu finden.

B.1. Tabellen zu den durchgeführten t-Tests

Hier sind alle ausgewerteten t-Tests die für die Arbeit verwendet wurden tabellarisch aufgezeigt. Außerdem enthält der Abschnitt eine zusätzliche Tabelle für deskriptive Statistik in Bezug auf den t-Test zum NasaTLX.

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen				T	df	Sig. (2-seitig)	
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz Unterer Wert Oberer Wert				
Paaren 1	TotalAccuracies Controller -	,33098890493204	37,669483066608	3,94883479058789	-7,514060638972	8,1760384488366	,084	90	,933
	TotalAccuracies Gloves	2	660	3	567	50			
Paaren 2	PlaneAccuracies Controller -	2,736	7,107	,745	1,256	4,216	3,673	90	,000
	PlaneAccuracies Gloves								
Paaren 3	CutTooDeepLengths Controller -	-,1649450539601	,77886722179949	,081647469843214	-,3271520036104	-,0027381043097	-2,020	90	,046
	- CutTooDeepLengths Gloves								
Paaren 4	CutTooDeepCounts Controller -	,945	4,352	,456	,039	1,851	2,071	90	,041
	CutTooDeepCounts Gloves								

Tabelle B.1.: Tabelle der ausgewerteten t-Tests für die Genauigkeit.

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen				T	df	Sig. (2-seitig)	
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz Unterer Wert Oberer Wert				
Paar 1	SUS Score Controller -	10,3125	12,9861	4,5913	-,5441	21,1691	2,246	7	,060
	SUS Score Gloves								

Tabelle B.2.: Tabelle des ausgewerteten t-Tests für die SUS-Werte.

B. Studienspezifischer Anhang

Test bei gepaarten Stichproben

		Gepaarte Differenzen					T	df	Sig. (2-seitig)
		Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler des Mittelwertes	95% Konfidenzintervall der Differenz				
					Unterer Wert	Oberer Wert			
Paaren 1	NasaTLX_C_Total - NasaTLX_G_Total	-7,750	7,869	2,782	-14,329	-1,171	-2,785	7	,027
Paaren 2	NasaTLX_C1 - NasaTLX_G1	-,750	1,282	,453	-1,822	,322	-1,655	7	,142
Paaren 3	NasaTLX_C2 - NasaTLX_G2	-2,625	2,825	,999	-4,987	-,263	-2,628	7	,034
Paaren 4	NasaTLX_C3 - NasaTLX_G3	-,625	2,615	,925	-2,811	1,561	-,676	7	,521
Paaren 5	NasaTLX_C4 - NasaTLX_G4	-1,000	4,899	1,732	-5,096	3,096	-,577	7	,582
Paaren 6	NasaTLX_C5 - NasaTLX_G5	-1,375	2,134	,754	-3,159	,409	-1,823	7	,111
Paaren 7	NasaTLX_C6 - NasaTLX_G6	-1,375	4,138	1,463	-4,835	2,085	-,940	7	,379

Tabelle B.3.: Tabelle der ausgewerteten t-Tests für die NasaTLX-Werte.

Statistik bei gepaarten Stichproben

		Mittelwert	N	Standardabweichung	Standardfehler
				ung	des Mittelwertes
Paar 1	NasaTLX_C_Total	47,50	8	25,967	9,181
	NasaTLX_G_Total	55,25	8	28,151	9,953
Paar 2	NasaTLX_C1	10,13	8	6,034	2,133
	NasaTLX_G1	10,88	8	5,743	2,030
Paar 3	NasaTLX_C2	8,50	8	6,347	2,244
	NasaTLX_G2	11,13	8	6,446	2,279
Paar 4	NasaTLX_C3	8,00	8	5,372	1,899
	NasaTLX_G3	8,63	8	6,479	2,291
Paar 5	NasaTLX_C4	6,50	8	4,342	1,535
	NasaTLX_G4	7,50	8	3,780	1,336
Paar 6	NasaTLX_C5	8,38	8	5,449	1,927
	NasaTLX_G5	9,75	8	5,230	1,849
Paar 7	NasaTLX_C6	6,00	8	6,164	2,179
	NasaTLX_G6	7,38	8	5,528	1,954

Tabelle B.4.: Deskriptive Statistik für die t-Tests des NasaTLX.

B.2. Weitere Visualisierungen zu den Fragebögen

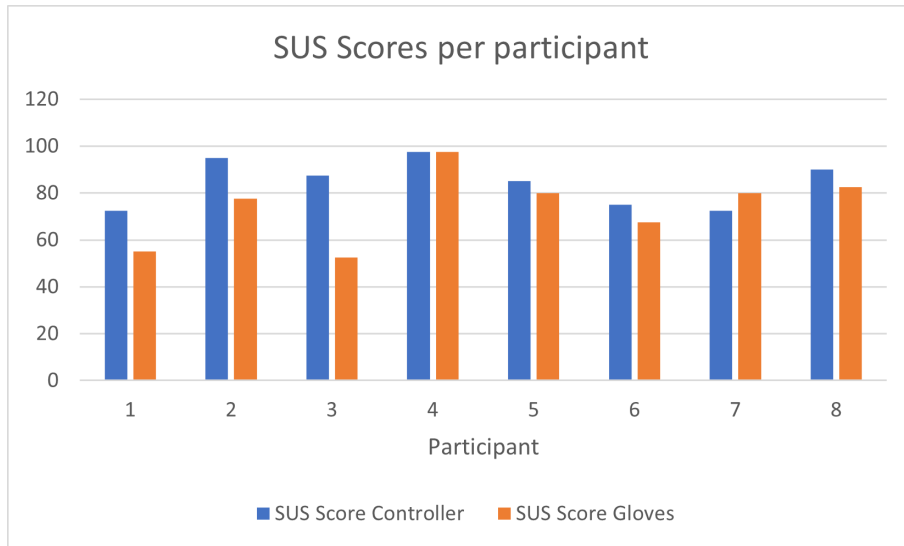


Abbildung B.1.: Visualisierung der SUS-Werte beider Versionen des Trainingssystems pro Proband.

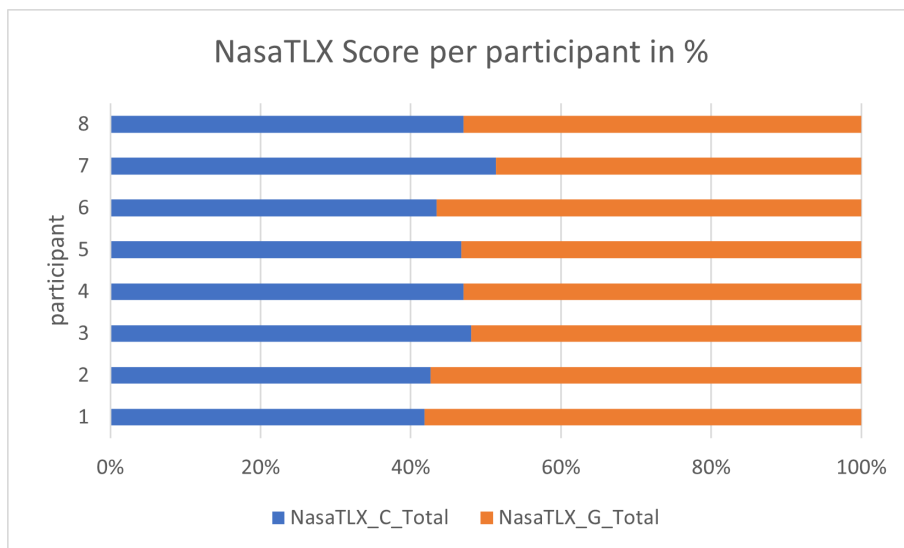


Abbildung B.2.: Visualisierung der NasaTLX-Werte beider Versionen des Trainingssystems prozentual pro Proband.

