Universität Siegen / Lebenswissenschaftliche Fakultät

SKILLSLAB+

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Deep Immersion durch Einbindung von Haptik in Augmented Reality-Anwendungen für die medizinische Aus- und Weiterbildung

vorgelegt von

Christian Gießer

Siegen, Oktober 2023

Erstbetreuer:
Prof. Dr. rer. nat. Rainer Brück
Universität Siegen
Lebenswissenschaftliche Fakultät
Professur für Medizinische Informatik und Mikrosystementwurf

Zweitbetreuer:
Prof. Dr. med. Veit Braun
Universität Siegen
Lebenswissenschaftliche Fakultät
Prodekan Digital Health Care

Erster Gutachter: Prof. Dr. Rainer Brück
Zweiter Gutachter: Prof. Dr. med. Veit Braun
Vorsitzender: Prof. Dr. Christoph Strünck
Tag der Abgabe: 13.10.2023
Tag der mündlichen Prüfung:

Vorwort

Diese Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Fakultät für Lebenswissenschaften (Fak. V) der Universität Siegen an der Professur für Medizinische Informatik und Mikrosystementwurf unter der Leitung von Prof. Dr. Rainer Brück. Ihm gilt mein besonderer Dank, da ich durch seine Unterstützung nach dem Bachelor- und Masterstudium der Medizinischen Informatik nun auch meine Dissertation einreichen kann. Darüber hinaus hat mich die Zusammenarbeit mit Prof. Braun sowohl als Student mit ihm als Dozenten als auch als Kollege geprägt und ich war immer sehr dankbar, auf sein Fachwissen zurückgreifen zu können.
Für die schöne und produktive Zeit im XR-Labor und im SkillsLab möchte ich mich bei meiner Projektgruppe bedanken. Johannes, Jonathan und Michelle, es war mir eine Ehre und Freude eure Projektgruppe zu leiten. Ich habe mich jede Woche auf unser Treffen am Freitagmorgen gefreut und es war nie langweilig mit euch. Danke an die Forschungsgrundpraktikanten, danke an meine Bachelor- und Masterstudierenden, danke für euer Vertrauen und eure großartige Arbeit.
Ich bedanke mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen für die tolle Zusammenarbeit über die Jahre, die netten Gespräche und die gemeinsame Zeit außerhalb des Arbeitskontextes. Gerade während der Coronapandemie waren diese Aktivitäten sehr wohltuend und eine notwendige Abwechslung zum Homeoffice.
Danken möchte ich auch meiner Familie, die mich immer unterstützt und an mich geglaubt hat. Vor allem meine Frau hat mir den Stress genommen und war immer für mich da. Vielen Dank, Amelie! Ohne dich und euch hätte ich diese schwierige Zeit nicht durchgestanden und wäre nicht der, der ich heute bin.

Widmung

Leb' deinen Traum, denn er wird wahr
Geh' deinen Weg, stelle dich der Gefahr
Alles was wichtig ist
Wirst du erkennen wenn die Zeit gekommen ist, ja
Greif' nach den Sternen, du bist bereit
Glaub an dich, bald ist es so weit
Wir werden bei dir sein
Sei bereit!
Digimon Adventure - Akiyoshi Hongo, Toei Animation Co., Ltd. 2000

Zitierstil und verwendete Hilfsmittel

In dieser Arbeit wird der IEEE Zitier-Stil nach der „Engineering Norm 0011/0711“ mit einer Änderung verwendet. Die Änderung bezieht sich auf die Position der Referenz im Fließtext. Die Position im Text gibt an, ob sich das Zitat auf den Satz oder den gesamten Absatz bezieht. Steht die Quelle hinter dem Satzschlusszeichen, so referenziert der gesamte Absatz oder, je nach Inahlt, die letzten Absätze, die Quelle. Steht die Quelle vor dem Satzschlusszeichen, so ist nur der letzte Satz gemeint.

Beispiel:
Diese Aussage benötigt eine Quelle [1].
Die nachfolgende Quelle bezieht sich auf den gesamten Absatz. Es ist sowohl der vorherige, als auch dieser Satz gemeint. [1]

Bildquellen

Alle Bilder ohne Quellenangabe sind entweder eigene Fotografien, selbst erstellte Grafiken oder unterliegen nicht dem Urheberrecht bzw. sind nicht gekennzeichnet.

Gendererklärung

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in dieser Arbeit das generische Maskulinum verwendet. Die in dieser Arbeit verwendeten Personenbezeichnungen beziehen sich - sofern nicht anders angegeben - auf alle Geschlechter.

Eigenständigkeitserklärung

Ich versichere, dass ich die schriftliche Ausarbeitung selbständig angefertigt und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel benutzt habe. Alle Stellen, die dem Wortlaut oder dem Sinn nach (inkl. Übersetzungen) anderen Werken entnommen sind, habe ich in jedem einzelnen Fall unter genauer Angabe der Quelle (einschließlich des World Wide Web sowie anderer elektronischer Datensammlungen) deutlich als Entlehnung kenntlich gemacht. Dies gilt auch für angefügte Zeichnungen, bildliche Darstellungen, Skizzen und dergleichen. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken sowie die Verwendung KI- basierter Textgeneratoren als solche kenntlich gemacht habe. Ich nehme zur Kenntnis, dass die nachgewiesene Unterlassung der Herkunftsangabe als versuchte Täuschung gewertet wird.

_ _

Siegen, den 13.10.2023

Christian Gießer

Zusammenfassung

Die vorliegende Dissertation beschäftigt sich mit der Relevanz von haptischem Feedback in medizinischen Augmented Reality (AR) Lernanwendungen. Sie entstand an der Professur für Medizinische Informatik und Mikrosystementwurf der Universität Siegen im Zeitraum von Oktober 2019 bis Oktober 2023. Ziel ist es, eine medizinische Augmented Reality Anwendung um State-of-the-Art Methoden der Haptik, d.h. die Integration von Datenhandschuhen, zu erweitern und zu untersuchen, ob diese den Lernerfolg, die Immersion und die Motivation der Studierenden steigern kann.

Als Beispiel für die Integration in eine medizinische Anwendung wurde die Digitalisierung des SkillsLab-Formats gewählt, das Teil der universitären Medizinerausbildung ist. Ziel des SkillsLab-Kurses ist es, angehenden Ärzten erste praktische Schritte in der Untersuchung, Behandlung, Therapie und Kommunikation mit Patienten zu vermitteln. Teure anatomisch korrekte Modelle und ein hoher personeller Aufwand sind notwendig, um diesen Kurs als Präsenzveranstaltung anbieten zu können.

Die Integration von Augmented Reality Komponenten in Kombination mit haptischem Feedback zielt in dieser Arbeit darauf ab, die physischen Modelle durch virtuelle Modelle zu ersetzen. Diese werden durch Augmented Reality-Brillen vor den Benutzer projiziert. Datenhandschuhe machen sie durch Vibration und Bewegungseinschränkung („Vibrotaktiles Feedback“ und „Force Feedback“) greifbar, so dass der Eindruck entsteht, die virtuellen Objekte könnten berührt werden. Mit dieser Technologie sollen den Nutzern Diagnose- und Behandlungsabläufe so vermittelt werden, dass sie orts- und materialunabhängig lernen können, da statt eines ganzen SkillsLab und des dafür notwendigen Lehrpersonals nur eine AR-Brille und ein Paar Datenhandschuhe benötigt werden. Lediglich die Abschlussprüfung müsste in diesem Szenario vor Ort an der Hochschule durchgeführt werden.

Die in dieser Arbeit aufgestellten Theorien wurden in drei Studien, zwei Machbarkeitsstudien und einer Lernerfolgsstudie, untersucht und evaluiert. Teilnehmer dieser Studien waren Medizinstudenten des Bachelorstudiengangs „Digital Biomedical Health Sciences“ der Universität Siegen, die parallel zur Durchführung des SkillsLab-Kurses teilnahmen, sowie praktizierende Ärzte aus lokalen Krankenhäusern.

Die Ergebnisse der Machbarkeitsstudien zeigen, dass eine um haptisches Feedback erweiterte medizinische AR-Anwendung auf Akzeptanz stößt und von den Teilnehmern als Mehrwert wahrgenommen wird. Die Folgestudie untermauert diese Vermutung und bestätigt, dass nach Durchlaufen einer solchen Trainingseinheit sowohl die Prüfungsergebnisse leicht besser ausfallen als auch der subjektive Eindruck der Probanden einer besseren Vorbereitung im Vergleich zum konventionellen Training allein verstärkt wird. Die erhöhte Immersion, die durch den Einsatz des haptischen Feedbacks induziert wird, führt zu einem erhöhten Lerneffekt im Vergleich zum konventionellen Distanztraining.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Studien eine Steigerung des Lernerfolgs und der subjektiven Wahrnehmung der Probanden zeigen und dass Augmented Reality in Kombination mit haptischem Feedback einen positiven Effekt in medizinischen Lehranwendungen bietet. Es steigert die Motivation, die Lernbereitschaft und die Studierenden fühlen sich besser auf Prüfungen in diesem Bereich vorbereitet, wenn sie zuvor ein Augmented Reality Training mit haptischem Feedback absolviert haben.

Abstract

This dissertation deals with the relevance of haptic feedback in medical augmented reality (AR) learning applications. It was written at the Chair of Medical Informatics and Microsystem Design at the University of Siegen in the period from October 2019 to October 2023. The aim is to extend a medical augmented reality application with state-of-the-art methods of haptics, i.e. the integration of data gloves, and to investigate whether this can increase the learning success, immersion and motivation of students.

The digitisation of the SkillsLab format, which is part of university medical training, was chosen as an example of integration into a medical application. The aim of the SkillsLab course is to teach budding doctors the first practical steps in examination, treatment, therapy and communication with patients. Expensive anatomically correct models and a high level of staffing are necessary to be able to offer this course as a classroom event.

The integration of augmented reality components in combination with haptic feedback in this work aims to replace the physical models with virtual models. These are projected in front of the user through augmented reality glasses. Data gloves make them tangible through vibration and movement restriction („Vibrotactile Feedback“ and „Force Feedback“), giving the impression that the virtual objects could be touched. This technology is intended to teach diagnostic and treatment procedures to users in such a way that they can learn independent of location and materials, since instead of an entire SkillsLab and the teaching staff required for it, only AR glasses and a pair of data gloves are needed. Only the final exam would have to be conducted on-site at the university in this scenario.

The theories put forward in this thesis were investigated and evaluated in three studies, two feasibility studies and one learning success study. Participants in these studies were medical students from the „Digital Biomedical Health Sciences“ bachelor's degree programme at the University of Siegen, who took part in the SkillsLab course in parallel with its implementation, as well as practising doctors from local hospitals.

The results of the feasibility studies show that a medical AR application enhanced with haptic feedback meets with acceptance and is perceived as added value by the participants. The follow-up study supports this assumption and confirms that after going through such a training session, both the exam results are slightly better and the subjects' subjective impression of better preparation is reinforced compared to conventional training alone. The increased immersion induced by the use of haptic feedback leads to an increased learning effect compared to conventional distance training.

In summary, the studies show an increase in learning success and subjective perception of the test persons and that augmented reality in combination with haptic feedback offers a positive effect in medical teaching applications. It increases motivation, willingness to learn and students feel better prepared for exams in this field if they have previously completed augmented reality training with haptic feedback.

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **I**

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation . . . 2
1.2 Forschungsfragen und Forschungsziele . . . 4
1.3 Gliederung der Arbeit . . . 6

2 Technische und medizinische Grundlagen für den Forschungsstand **9**
2.1 Augmented Reality . . . 9
2.1.1 Technische Grundlagen von Augmented Reality . . . 13
2.1.2 Entwicklung von Augmented Reality-Apps . . . 15
2.1.3 Vor- und Nachteile von Augmented Reality: Abgrenzung zu Virtual Reality . . . 18
2.2 Haptisches Feedback . . . 19
2.2.1 Arten von haptischem Feedback . . . 19
2.2.2 Mehrwert von Anwendungen mit haptischem Feedback . . . 22
2.3 Anwendungsgebiet: SkillsLab . . . 22
2.3.1 Vorstellung des Kurses SkillsLab . . . 23
2.3.2 Beschreibung und Vorstellung des SkillsLab der Universität Siegen . . . 25

3 State of the Art **33**
3.1 Eigene Publikationen . . . 33
3.2 Stand der Technik: Vorstellung aktueller Hardware Lösungen . . . 40
3.2.1 Augmented Reality-Hardware . . . 40
3.2.2 Haptische Hardware . . . 49
3.2.3 Vergleich der Hardware Lösungen . . . 63
3.3 Stand der Technik: Vorstellung der Software Lösungen . . . 66
3.3.1 Allgemeine Augmented Reality-Anwendungen . . . 66
3.3.2 Medizinische Augmented Reality-Anwendungen . . . 72
3.3.3 Augmented Reality-Anwendungen mit haptischem Feedback . . . 80
3.3.4 Medizinische Virtual Reality-Anwendungen . . . 81
3.4 Forschungsbedarf und Bezug zu den Forschungsfragen . . . 85

4 Konzeption der Augmented Reality-Anwendung **89**
4.1 Anforderungserhebung aus technischer Sicht . . . 89
4.2 Anforderungserhebung aus Experteninterviews . . . 90
4.2.1 Konzeption des Fragebogens für die Experteninterviews . . . 91

4.2.2 Ergebnisse der Experteninterviews . . . 91
4.3 Anforderungskatalog . . . 95
4.3.1 Harte Faktoren . . . 96
4.3.2 Weiche Faktoren . . . 97
4.3.3 Funktionen . . . 97
4.4 Technologieauswahl . . . 98
4.5 Vorstellung des finalen Konzepts der Anwendung . . . 99

5 Implementierung des Demonstrators 101
5.1 Unreal Engine – Terminologie . . . 101
5.1.1 Vorstellung der wichtigsten Blueprints . . . 105
5.1.2 Kurzdarstellung der wichtigsten Events . . . 107
5.2 Betriebsmodi der Hardwarekomposition . . . 108
5.3 Vorstellung SkillsLab+ . . . 110
5.3.1 Aufbau des Hauptmenüs und der Aufbau der Navigation . . . 110
5.3.2 Aufbau eines Levels . . . 112
5.3.3 Tastenbelegung des Controllers . . . 115
5.3.4 Programmablauf . . . 115
5.4 Integration der Hardware in die Unreal Engine . . . 116
5.4.1 Augmented Reality-Brille: Magic Leap One . . . 116
5.4.2 Datenhandschuhe: SenseGlove Nova . . . 116
5.5 Integration haptischer Elemente . . . 118
5.6 Bezug zum Anforderungskatalog aus technischer Sicht . . . 122

6 Evaluation des Demonstrators 125
6.1 Methodik der Evaluationen . . . 125
6.1.1 Methodik der ersten Evaluation des Demonstrators . . . 125
6.1.2 Methodik der zweiten Evaluation des Demonstrators . . . 129
6.1.3 Methodik der dritten Evaluation des Demonstrators . . . 130
6.2 Studienergebnisse . . . 132
6.2.1 Auswertung des ersten Demonstrators . . . 132
6.2.2 Auswertung des zweiten Demonstrators . . . 140
6.2.3 Auswertung des dritten Demonstrators . . . 149
6.2.4 Gesamtfazit der Studienergebnisse . . . 159

7 Diskussion 161
7.1 Bezug zum Anwendungsgebiet: Grenzen des SkillsLab . . . 161
7.2 Bewertung der Implementierung von Augmented Reality mit haptischem Feedback . . . 162
7.2.1 Grenzen und Probleme der Implementierung . . . 162
7.2.2 Bewertung der Hardware . . . 163
7.2.3 Bewertung der entwickelten Software: SkillsLab+ . . . 164
7.3 Vergleich zwischen Erwartungen und Ergebnissen . . . 164
7.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse . . . 166
7.5 Schlussbetrachtung . . . 166

8 Fazit **169**
8.1 Zusammenfassung . . . 169
8.2 Ausblick und künftige Arbeiten . . . 171
8.2.1 Ausblick: Hardware . . . 171
8.2.2 Ausblick: Software . . . 173

9 Anhang **177**
9.1 Schaubild: Zeitlicher Verlauf der Konferenzen als Gantt-Chart . . . 178
9.2 Leitfadengestütztes Expertentinterview . . . 179
9.3 1. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2022 . . . 180
9.4 2. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2023 . . . 189
9.5 3. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Lernerfolg 2023 . . . 194
9.6 SkillsLab+ – Best Paper Award der Educon 2023 . . . 200

Abbildungsverzeichnis **204**

Literaturverzeichnis **205**

Glossar **217**

Kapitel 1

Einleitung

Die medizinische Versorgung befindet sich im Wandel. Neue digitale Technologien ermöglichen es Studierenden, auf nahezu unbegrenztes Wissen zuzugreifen und in kürzester Zeit Informationen über jedes beliebige Thema zu erhalten. Früher bestand die Medizinlehre hauptsächlich daraus, Wissen aus Büchern zu entnehmen und auf das Erfahrungswissen einzelner Ärzte zurückzugreifen. Im Gegensatz dazu wird in der heutigen Medizin ein Großteil der Recherche und Kommunikation, sei es zur Wissensaneignung oder zum Datenaustausch, digital durchgeführt. Unter dem Begriff *Digitale Medizin* versteht sich im allgemeinen den Einsatz von Informations- und Kommunikationsmedien zur Verbesserung der Patientenversorgung, dem Austausch von Wissen und der verbesserten medizinischen Forschung.

Die Digitalisierung der Medizin bietet viele Vorteile für Ärzte und Patienten. Moderne bildgebende Verfahren ermöglichen es, Behandlungen besser planen und durchführen zu können, die früher undenkbar gewesen wären. Sie ermöglichen es, in den menschlichen Körper hineinzusehen und Verborgenes sichtbar zu machen. Eine Sammlung dieser und weiterer Daten stellt die digitale Patientenakte dar, welche seit 2021 von allen gesetzlichen Krankenkassen für ihre Versicherten zugänglich sein muss [1].

Diese Datensammlung fasst alle Informationen, die über einen Patienten vorliegen, an einem Ort zusammen und ermöglicht es unterschiedlichen Akteuren des Gesundheitssystems, wie z.B. Hausärzte, Fachärzte und Krankenkassen, gleichzeitig und gemeinsam damit zu arbeiten. Durch diese Sammlung kann der komplette Behandlungsverlauf, bestehende chronische Erkrankungen, verordnete Medikamente und deren Wechselwirkungen, sowie bevorstehende Eingriffe eingesehen und bei der Versorgung berücksichtigt werden.

Diese gewaltigen Mengen an Daten lassen sich händisch, mit statistischer Auswertung oder konventionellen Algorithmen bald nicht mehr zeitnah verarbeiten, sodass neue Methoden, wie der Einsatz von Künstlicher Intelligenz (kurz: *KI*) erforderlich werden. Künstliche Intelligenz ermöglicht es, Muster in Strukturen zu erkennen, die der menschlichen Auswertung verborgen bleiben. Es lassen sich riesige Datenmengen in Verbindung zueinander setzen und somit neue Erkenntnisse gewinnen. Des Weiteren lassen sich bestehende Handlungsabläufe oftmals optimieren, beschleunigen und ggf. sogar vorhersagen[2].

Damit angehende Mediziner bestens auf den bevorstehenden Alltag vorbereitet werden, ist ein gutes Medizinstudium die Voraussetzung. Sie müssen so früh wie möglich mit den digitalen Methoden in Berührung kommen und direkt mit deren Einsatz vertraut werden. Ein sicherer Umgang mit den digitalen Methoden der Medizin sorgt für eine gute Akzeptanz und den späteren Einsatz im beruflichen Alltag. Zusätzlich zum klassischen Medizinstudium gibt es vermehrt medizinnahe Studiengänge, die eine unterstützende Rolle einnehmen. Sie können beispielsweise im Gesundheitswesen liegen, um die Verwaltung der Patienten zu verbessern oder sich mit der Entwicklung und Verbesserung medizinischer Geräte befassen. Die Schulung dieser heterogenen Gruppen mit ihren zahlreichen Spezialisierungen stellt eine weitere Herausforderung der modernen Medizinlehre dar. Moderne Lehrmethoden müssen dies berücksichtigen und dieser Entwicklung Rechnung tragen.

Des Weiteren hat die Coronapandemie die Grenzen und bestehende Mängel der Lehre klar aufgezeigt. Genau wie bei der Schulbildung zeigten sich in der Medizinlehre Defizite im Bereich des selbstständigen Lernens, dem *Distance Learning*, da es Studierenden schwer fällt, den Stoff selbstständig und oftmals auf sich alleine gestellt, zu erarbeiten. [3]

Eine vielversprechende und wachsende Technologie ist die Augmented Reality (kurz: *AR*), die Erweiterung der physischen Realität durch virtuelle Elemente. Mit Hilfe von AR lassen sich virtuelle Objekte, Textfelder und auch komplexe Strukturen, wie ganze menschliche Körper, direkt in das Sichtfeld des Benutzers projizieren. Geräte für die Darstellung von Augmented Reality lassen sich dabei wie Brillen auf dem Kopf oder als eigenständige Displays, in Form von Smartphones oder Tablets, in der Hand tragen und verwenden. Neben vielen Vorteilen, die Augmented Reality den Nutzern bieten kann, steht dem ein großer Nachteil entgegen: Die virtuellen Objekte erscheinen nur visuell im Sichtfeld oder auf dem Bildschirm des Anwenders, d.h. sie sind nicht greifbar. Bewegen sich Anwender auf diese zu, können sie durch sie hindurchschreiten, durch sie hindurchgreifen und auch durch sie hindurchsehen. Um diesem Problem entgegenzuwirken, wird aktuell an sogenannten *Datenhandschuhen* geforscht und gearbeitet. Diese Handschuhe geben den Benutzern das Gefühl von Widerstand, sobald sie mit virtuellen Objekten kollidieren. Es gibt unterschiedliche Methoden, haptisches Feedback zu liefern. Die zwei wichtigsten sind *Force Feedback*, bei dem es zu einer Einschränkung der Bewegung des Benutzers kommt, und *Vibrotactiles Feedback*, welches Berührung durch Vibration signalisiert. In beiden Fällen wird dem Anwender eine physische Präsenz simuliert und er bekommt das Gefühl von greifbaren Objekten mit Masse durch die Erzeugung haptischer Reize.

1.1 Motivation

Die medizinische Versorgung, insbesondere im ländlichen Raum, steht derzeit vor großen Herausforderungen. Ein gesellschaftliches Problem, mit dem sich unsere Bevölkerung in den nächsten Jahren verstärkt auseinandersetzen muss, ist der demographische Wandel. Die Altersstruktur der Gesellschaft verschiebt sich immer mehr in Richtung der Älteren (über 65 Jahre) und die Zahl der Jüngeren (unter 25 Jahre) nimmt kontinuierlich ab (vgl. 'Abbildung 1.1'). [4]

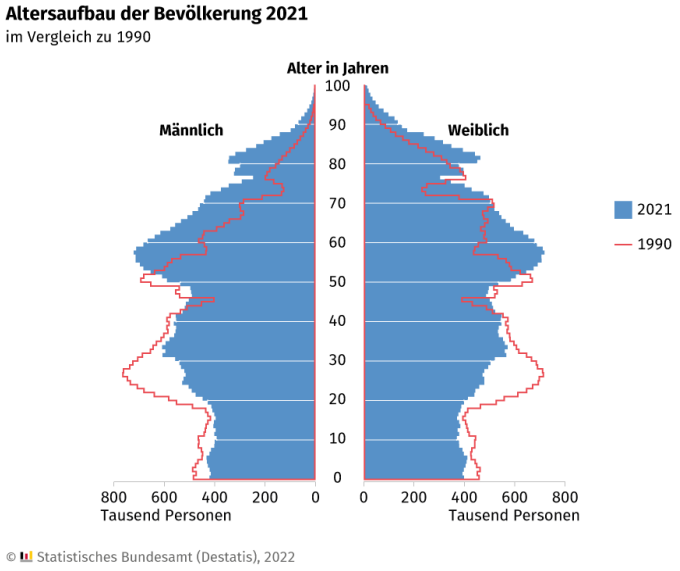


Abbildung 1.1: Demographischer Wandel in Deutschland [5]

Ein vielversprechender Ansatz, die Versorgungsqualität und die Zeit, die Ärzte mit Patienten verbringen können,

möglichst groß zu halten, ist es, sie weitgehend von Arbeiten zu entlasten, die sie nicht zwingend selbst erledigen müssen. Um diesen Ansatz umzusetzen, müssen Methoden und Technologien angewendet werden, die den Arzt Zeit einsparen lassen, ohne das Wohl des Patienten zu gefährden.

Eine Möglichkeit hierfür ist die Digitalisierung. Durch die Digitalisierung lassen sich Handlungsabläufe automatisieren, effizienter gestalten und doppelte Arbeiten vermindern oder verhindern. Damit Ärzte in der Lage sind, neue Technologien anzuwenden und diese sinnvoll und Effizient in ihren Arbeitsalltag integrieren zu können, müssen sie den Umgang und die korrekte Anwendung erlernen. Dies geschieht, wie jeder Lernvorgang im Leben, so früh wie möglich. Wenn junge Ärzte bereits in der Ausbildung mit neuen Technologien konfrontiert und geschult werden, könnte dies dazu beitragen, dass die Hemmschwelle zur Nutzung digitaler Technologien für sie sinkt. Dadurch steigt die Wahrscheinlichkeit, dass sie auch in ihrem späteren beruflichen Alltag digitale Lösungen anwenden und dadurch effizienter arbeiten, somit mehr Zeit für ihre Patienten zur Verfügung haben und/oder eine bessere Versorgung sicherstellen können.

Deutschland hat, im internationalen Vergleich, großen Nachholbedarf in der Digitalisierung des Gesundheitssystems. Laut einer Studie der Bertelsmann Stiftung aus dem Jahr 2018 belegt Deutschland mit Gesamtwert von 30 Punkten den vorletzten Platz (vor Polen mit 28,5 Punkten). Zum Vergleich, der Spitzenreiter ist Estland mit 81,9 Punkten gefolgt von Kanada (74,7 Punkte) und Dänemark (72,5 Punkte). [6]

17 Länder mit unterschiedlichen Gesundheitssystemen wurden hierbei verglichen und es wurde der Stand der Digitalisierung des Gesundheitswesens ermittelt. Kriterien, wie eine digitales Rezept, die digitale Sprechstunde und eine elektronische Patientenakte, spielten eine große Rolle bei der Ermittlung der Punktzahl. [7]

In einer Pressemitteilung der „McKinsey & Company“ vom 26. September 2018 lassen sich durch Maßnahmen der Digitalisierung rund 34 Milliarden Euro jährlich einsparen. Die Versorgungskosten würden damit um etwa zwölf Prozent sinken. Dieses Geld könnte dann vor allem den Leistungserbringern zu gute kommen, da in ihren Bereichen die größte Einsparung möglich ist. [8]

Doch die Arbeit mit neuen Technologien erfordert in einem gewissen Maß ein Umdenken und eine neue Herangehensweisen. Aus dem Studium gelernte Inhalte könnten im Widerspruch zu den neuen Technologien stehen oder andere Ergebnisse liefern. Die Ärzte von morgen müssen in der Lage sein, die Ergebnisse korrekt zu interpretieren, um mit diesen neuen Technologien arbeiten können. Um sie bei dieser möglichen Zukunft zu unterstützen, ist eine Erweiterung des Studiums um digitale Inhalte notwendig, sodass die Ärzte den Umgang mit diesen lernt und nicht davor zurückschreckt, diese anzuwenden.

Ein relativer Fachkräftemangel in nahezu allen Bereichen des Gesundheitswesens bei gleichzeitig steigenden Patientenzahlen erfordert den Einsatz neuer zeitsparender und effizienzsteigernder Technologien und Methoden, um langfristig eine gleichbleibende oder sogar verbesserte Versorgung gewährleisten zu können. Ein besonderes Augenmerk der Forschung liegt daher auf der Weiterentwicklung und Digitalisierung der medizinischen Lehre, um neues Personal in diesem Bereich effizient ausbilden zu können.

Die Corona-Pandemie hat gezeigt, wie wenig flexibel die Lehre auf solche einschneidenden Ereignisse reagieren kann. Die Lehre hatte keine Pläne für einen vollständigen Homeschooling Betrieb bereit und Studierende konnten monatelang nicht in die Universitäten [9, 10]. Besonders praktische Lerninhalte wie Laborarbeiten oder die Arbeit mit plastischen Modellen, z.B. Skelette in der Anatomielehre, sind aufgrund ihrer begrenzten Stückzahl oder Ortsgebundenheit gar nicht im Distanzunterricht abbildbar.

Neue digitale Methoden bieten schon heute die Möglichkeit, die Lerninhalte von zu Hause vorzubereiten und sich im Selbststudium anzueignen. Diese Möglichkeiten können um virtuelle Elemente erweitert werden, um den Studierenden wieder ein Gefühl der Normalität zu geben und zu vermeiden, dass jeder für sich arbeiten muss. Neben bekannten Methoden, wie Chat-Räumen und Videokonferenzen, gibt es zunehmend die Möglichkeit, sich durch Methoden der *Virtual Reality* (kurz: *VR*) zu vernetzen. Studierende können mit eigens erstellten Avataren in dreidimensionalen, virtuellen Welten aufeinandertreffen und Lerninhalte auf eine völlig neue Weise lernen [11].

An dieser Stelle kann, neben der Virtual Reality, die Augmented Reality zum Einsatz kommen. Augmented Reality hat einige Vorteile gegenüber Virtual Reality, und hebt sich dahingehend ab, dass die reale Welt als Hintergrund für AR-Anwendungen weiterhin vorhanden bleibt und lediglich durch virtuelle Elemente ergänzt wird. Auf die genauen Definitionen und Unterschiede wird im weiteren Verlauf der Arbeit noch näher eingegangen. Um einige Vorteile kurz und zusammengefasst vorwegzunehmen, ist die Augmented Reality nutzerfreundlicher und einfacher in der Anwendung, da der Benutzer nach wie vor in seiner vertrauten Umgebung bleibt und diese als Referenz für die Einschätzung von Größen und Entfernungen verwenden kann. Außerdem erfahren Anwender von AR-Anwendungen seltener *Motion Sickness*[1]. Aufgrund des (meist) geringeren Aufwands, eine AR-Anwendung zu starten und zu durchlaufen ist, hierfür ist lediglich ein AR-Headset notwendig, lassen sich AR-Anwendungen nahezu überall ausführen.
Studierenden ist es möglich, im Distanzunterricht, von einem beliebigen Ort AR-Lernanwendungen zu verwenden, um sich selbst die Inhalte beizubringen und in ihrem eigenen Tempo zu lernen. Diese Form des Unterrichts ermöglicht ein selbstbestimmtes Lernen, welches dem klassischen Frontalunterricht überlegen ist. Die Kombination mit haptischem Feedback ist in der Wissenschaft ein Novum und könnte das Lernen, durch die Verwendung zusätzlicher Sinne, verbessern und das gelernte Wissen festigen. Die Vor- und Nachteile eines solchen Systems sollen im Verlauf dieser Arbeit besprochen, evaluiert und diskutiert werden.

1.2 Forschungsfragen und Forschungsziele

Das Design und der Einsatz von medizinischen Augmented Reality-Anwendungen in Kombination mit haptischen Feedback-Elementen birgt einige Herausforderungen und Fallstricke. Die Software muss sowohl von wenig oder nicht technikaffinen Nutzern wie Ärzten und Studierenden verstanden und genutzt werden können, als auch genügend Potenzial zur Verbesserung und Wiederverwendung bieten, da diese Technologie sonst nach dem Studium nicht den Weg in den beruflichen Alltag findet. Die einzelnen Komponenten und Subsysteme (Programme und Ebenen) müssen in sich kohärent sein und dennoch nach außen ein kohärentes Gesamtbild vermitteln. Darüber hinaus birgt die Integration von haptischem Feedback, z.B. durch die Verwendung von Datenhandschuhen, eigene Probleme und Herausforderungen. Fakt ist, dass die Integration von haptischem Feedback in Virtual Reality und Virtual Reality-Learning-Anwendungen deutlich weiter fortgeschritten ist als in Augmented Reality-Anwendungen. Die bisherige Forschung weist in diesem Bereich große Lücken auf, auf die im Laufe der Arbeit noch näher eingegangen wird.
Die generelle Frage nach der Integration von haptischen Elementen in Augmented Reality-Anwendungen wird in dieser Arbeit am Beispiel einer medizinischen Lehranwendung näher untersucht. Zu Beginn der Arbeit werden die Hintergründe dieser Integration erläutert und bestehende Probleme in diesem Bereich aufgezeigt. Anschließend wird ein Konzept entwickelt, welches mögliche Lösungen für die bestehenden Probleme liefern soll. Ein erster Versuch der Umsetzung des Konzeptes soll einen möglichen Prototypen hervorbringen, der, sofern er alle Anforderungen des Konzeptes erfüllt, eine Lösung der Probleme darstellt. Die konkreten Forschungsfragen dieser Arbeit sind die Folgenden:

Forschungsfrage I: Welche technischen Voraussetzungen und Herausforderungen sind spezifisch für die Integration von haptischem Feedback in medizinische Augmented Reality-Anwendungen?
Der aktuelle Stand der Technik zeigt, dass haptisches Feedback in Augmented Reality bisher wenig erforscht und in der Praxis noch nicht realisiert wurde. Dies wirft die Frage auf, ob und in welcher Form eine Umsetzung überhaupt (technisch) möglich ist. Um sich ein Bild davon machen zu können, müssen zunächst die Anforderungen bekannt

[1] Motion Sickness: Das ungute Gefühl, welches auch als Seekrankheit beschrieben wird. Hervorgerufen wird es hauptsächlich durch die Entkopplung der Sinne, speziell des See- und Gleichgewichtssinns.

sein, die erfüllt werden müssen. Genau diesem Thema widmet sich die vorliegende Forschungsfrage und die sich daraus ergebenden Fragestellungen werden im Folgenden näher erläutert.
Ziel der Forschungen zu dieser Frage ist die Erstellung eines Anforderungskatalogs für die technischen Voraussetzungen zur Integration von haptischem Feedback in Augmented Reality-Anwendungen. Dieser Katalog soll alle Anforderungen zusammenfassen und auflisten, um eine erfolgreiche Umsetzung zu ermöglichen. Ein solcher Anforderungskatalog könnte folgende Punkte beinhalten:
Hardware mit haptischem Feedback: Um haptisches Feedback in eine Augmented Reality-Anwendung zu integrieren, sind moderne Methoden der Augmented Reality Programmierung notwendig. Dies kann den Einsatz von Datenhandschuhen oder anderer Hardware mit haptischem Feedback beinhalten. Zu den technischen Anforderungen können die Kompatibilität der Hardware mit der AR-Anwendung, die Genauigkeit und Sensibilität des haptischen Feedbacks sowie die Datenübertragung zwischen Hardware und Anwendung gehören.
Unterschied zur Implementierung von VR-Anwendungen: Die Implementierung von Augmented Reality-Anwendungen mit haptischem Feedback kann sich von der Implementierung von Virtual Reality-Anwendungen unterscheiden. Da bei AR-Anwendungen die reale Welt mit virtuellen Elementen überlagert wird, können zusätzliche Anforderungen zu berücksichtigen sein, wie z.B. die genaue Erfassung der realen Umgebung, die nahtlose Integration des haptischen Feedbacks in die reale Welt und die Gewährleistung einer konsistenten Benutzererfahrung.
Unterstützung nativen haptischen Feedbacks: Nicht alle AR-Anwendungen können natives haptisches Feedback unterstützen. Dies kann von der Art der Anwendung, den verfügbaren Technologien und den Zielplattformen abhängen. Der Anforderungskatalog sollte klären, welche Arten von AR-Anwendungen in der Lage sind, natives haptisches Feedback zu unterstützen und welche technischen Voraussetzungen dafür erfüllt sein müssen.
Durch die Erstellung eines Anforderungskatalogs für die technischen Voraussetzungen zur Integration von Augmented Reality-Anwendungen und haptischem Feedback kann ein Leitfaden für Entwickler und Forscher entstehen. Dieser Katalog kann helfen, die notwendigen technischen Schritte zu identifizieren, Herausforderungen zu überwinden und die Entwicklung innovativer AR-Anwendungen mit haptischem Feedback voranzutreiben.

Forschungsfrage II: Lässt sich haptisches Feedback mittels Datenhandschuhen mit heutigen Methoden in eine AR-Anwendung integrieren? Wie sieht ein aktueller Prototyp einer solchen AR-Anwendung mit haptischem Feedback aus?
Die zweite Forschungsfrage zielt auf die aktuelle Konzepterstellung einer Implementierung und die Realisierbarkeit des Erwartungshorizonts aus Forschungsfrage I ab. Können die Anforderungen an eine AR-Anwendung mit haptischem Feedback mit aktuellen Methoden technisch umgesetzt werden? Die Arbeit untersucht die Machbarkeit der Integration von haptischem Feedback in AR-Anwendungen mit Hilfe von Datenhandschuhen. Diese Integration kann zu einer verbesserten Immersion und Interaktion in der AR-Umgebung führen, indem dem Benutzer ein zusätzliches Feedback gegeben wird, das über die visuelle und akustische Wahrnehmung hinausgeht. Insgesamt beschäftigt sich die Forschung mit der Möglichkeit, durch die Integration von haptischem Feedback neue Interaktionsmöglichkeiten in AR-Anwendungen zu schaffen und untersucht aktuelle Methoden, um dies zu erreichen. Ein aktueller Prototyp kann helfen, diese Konzepte zu testen und mögliche Herausforderungen und Probleme zu identifizieren, die gelöst werden müssen, bevor eine solche Anwendung in den regulären Betrieb integriert werden kann.

Forschungsfrage III: Inwieweit ist die Haptik in Augmented Reality-Anwendungen für medizinische Lehranwendungen akzeptabel und realistisch genug, um eine Übertragbarkeit auf reale Anwendungsszenarien zu gewährleisten und eine erfolgreiche Umsetzung der erlernten Handlungen in die reale Behandlungspraxis zu ermöglichen? Wie beeinflusst dies die Nutzererfahrung?
Die Forschungsfrage bezieht sich auf die Übertragbarkeit von Haptik in Augmented Reality für medizinische Lehranwendungen auf reale Anwendungsszenarien. Es wird untersucht, ob die technisch realisierbare Implementierung von

Haptik in AR ausreicht, um eine realistische haptische Wahrnehmung zu ermöglichen. Insbesondere soll ermittelt werden, ob Studierende, die medizinische Handlungen in AR erlernen, diese 1:1 in die reale Behandlungspraxis umsetzen/übertragen können oder ob die haptische Wahrnehmung nicht ausreicht, um dieses Ziel zu erreichen. Die Ergebnisse der Untersuchungen können dazu beitragen, die Effektivität von AR-Anwendungen in der medizinischen Ausbildung zu verbessern und die Übertragbarkeit in die Praxis zu erhöhen.
Als Anwendungsbeispiel für die Umsetzung des Konzepts (siehe Forschungsfrage II) und den Demonstrator wird die praktische Ausbildung in der Medizin gewählt. Die grundlegende Frage ist, ob sich Augmented Reality mit haptischem Feedback in einer Weise (zeitlich und räumlich konsistent) kombinieren lässt, sodass es den Nutzern tatsächlich einen zusätzlichen Nutzen gegenüber konventionellen Lernmethoden bietet. Kann die Verwendung von haptischem Feedback die Immersion der Anwender steigern, sodass es für diese keinen Unterschied macht, ob sie mit physischen oder virtuellen Objekten lernen? Können medizinische Augmented Reality-Anwendungen mit haptischem Feedback sowohl zusätzliche Inhalte vermitteln als auch klassisches Wissen in einer neuen, möglicherweise besseren Form? Gibt es Visualisierungsmethoden, die Studierenden helfen können, bestimmte Abläufe, Strukturen und Zusammenhänge im und am menschlichen Körper besser zu verstehen als mit klassischen Lernmethoden?
Diese Frage zielt somit auch auf die Übertragbarkeit des Gelernten auf den späteren Umgang und die Nutzung dieser neuen Technologien im Alltag ab. Ein weiterer Aspekt der Fragestellung ist, ob einer möglichen Skepsis, Abneigung oder Anwendungshemmung vor der Nutzung dieser Technologien durch eine frühzeitige Auseinandersetzung entgegengewirkt werden kann. Welche notwendigen Funktionen müssen bei der Umsetzung berücksichtigt werden, damit die Nutzung als realitätsnah und hilfreich und nicht als überflüssig oder irreführend empfunden wird? Eine wichtige Frage in diesem Zusammenhang ist, ob das selbstständige Lernen mit einer solchen Anwendung den Lernerfolg von Studierenden verbessern kann, die aufgrund äußerer Einflüsse nicht die Möglichkeit haben, an Präsenzveranstaltungen teilzunehmen. Die Corona-Pandemie hat gezeigt, dass es nicht immer möglich sein wird, vor Ort zu lernen und zu lehren. Mit Hilfe dieser Forschungsfrage soll das Potential von Augmented Reality-Anwendungen im Bereich Selbststudium, *Remote-Teaching* und Homeschooling untersucht werden.

1.3 Gliederung der Arbeit

Das folgende Kapitel beschäftigt sich mit der Gliederung und dem Aufbau der Arbeit. Die Struktur der Arbeit orientiert sich (im Wesentlichen) an der einer Veröffentlichung nach Bem (2003) [12]. Diese Arbeit beginnt, neben der vorangestellten Einleitung ('1 Einleitung') und den Forschungsfragen ('1.2 Forschungsfragen und Forschungsziele') mit den medizinischen und technischen Grundlagen, welche zum besseren Verständnis der Arbeit notwendig sind ('2 Technische und medizinische Grundlagen für den Forschungsstand'). Im Verlauf der Arbeit wird wiederholt auf die Forschungsfragen eingegangen und zuletzt wird eine mögliche Beantwortung der Hauptfragen (Fragen I bis III) vorgestellt ('1.2 Forschungsfragen und Forschungsziele'). Begriffe wie Augmented Reality ('2.1 Augmented Reality') und Haptisches Feedback ('2.2 Haptisches Feedback') werden definiert und vorgestellt. Das theoretische Kapitel endet mit der Vorstellung des Anwendungsgebiets für die Anwendung, welche im Verlauf der Arbeit entwickelt und evaluiert wurde, Das Anwendungsgebiet besteht aus dem praktischen Medizinkurs *SkillsLab*, welches grundsätzlich einem stationsbasierten Aufbau folgt. Alle Stationen des Siegener SkillsLab aus dem Bachelorstudiengang Digital Biomedical an Health Science der Universität Siegen werden kurz vorgestellt, wobei ein besonderer Fokus auf den Lernzielen liegt ('2.3 Anwendungsgebiet: SkillsLab').
Daran anknüpfend folgt das State of the Art Kapitel, in dem aktuelle Anwendungen und Lösungen aus dem Bereich Augmented Reality, speziell der Einsatz von Augmented Reality in Kombination mit haptischem Feedback, vorgestellt wird ('3 State of the Art'). Der Fokus der Unterkapitel liegt hierbei auf dem Einsatz in der Medizin, der Medizinlehre, sowie der Integration in den medizinischen Alltag. Das Kapitel endet mit dem Aufzeigen des Forschungsbedarfs ('3.4 Forschungsbedarf und Bezug zu den Forschungsfragen'), speziell mit der Definition der eigenen Arbeit und dem

aufzeigen der Forschungslücke anhand der Beispiele aus dem aktuellen Forschungsstand.
Das Konzeptionskapitel ('4 Konzeption der Augmented Reality-Anwendung') beginnt mit einer Anforderungserhebung ('4.1 Anforderungserhebung aus technischer Sicht'). Hierbei werden die Anforderungen aus unterschiedlichen Quellen (z.B. Experteninterviews ('4.2 Anforderungserhebung aus Experteninterviews')) zusammengetragen und innerhalb eines Anforderungskatalogs ('4.3 Anforderungskatalog') zusammengefasst. Dieser Katalog in Listenform dient zunächst zur Erstellung des Konzepts der eigenen Anwendung ('4.5 Vorstellung des finalen Konzepts der Anwendung'), anschließend dienen die Punkte dieses Katalogs der Evaluation des finalen Prototyps der Anwendung. Für eine beispielhafte Implementierung wird die Anwendung an aktuelle Hardware angepasst und unter Berücksichtigung aktueller Best-Practice-Lösungen implementiert.
Die Implementierung des vorgestellten Konzepts findet im darauffolgenden Kapitel ihren Platz ('5 Implementierung des Demonstrators'). Die technische Realisierung ('5.3 Vorstellung SkillsLab+') beginnt mit Erläuterungen zum Programmaufbau und der Integration von haptischen Elementen ('5.4 Integration der Hardware in die Unreal Engine'). Der Aufbau des Demonstrators wird beschrieben und die Implementierung der haptischen Elemente, der Gestenerkennung und der Limitationen durch die Hardware finden in diesem Kapitel ihren Platz.
Der Anwendungsimplementierung folgt die Evaluation der Demonstratioren ('6 Evaluation des Demonstrators'). In diesem Kapitel werden die beiden Studien, die zeitgleich zur jährlichen Durchführung des Siegener SkillsLab stattfanden, vorgestellt und ausgewertet. Außerdem wurde eine Machbarkeitsstudie mit Ärzten durchgeführt, die ebenfalls, in diesem Kapitel, erläutert wird '6.1.3 Methodik der dritten Evaluation des Demonstrators'. Die erste Studie ist eine Machbarkeitsstudie, in der aufgezeigt wird, ob sich das Konzept dazu eignen könnte, das Medizinstudium, speziell den Kurs SkillsLab, zu erweitern ('6.1.1 Methodik der ersten Evaluation des Demonstrators'). Die zweite Studie dient dazu den Lernerfolg bzw. die potenzielle Erhöhung dessen in einer randomisierten, kontrollierten Studie (RCT) zu messen ('6.1.3 Methodik der dritten Evaluation des Demonstrators'). Dazwischen findet eine weitere Machbarkeitsstudie statt, welche mit einer anderen Teilnehmergruppe, in diesem Fall ausgebildeten Ärzten, durchgeführt wird, um nicht von technischem Vorwissen beeinflusst zu werden ('6.1.2 Methodik der zweiten Evaluation des Demonstrators'). Die Ergebnisse des vorangegangenen Evaluationskapitels ('6.2 Studienergebnisse') dienen dem Diskussionskapitel als Grundlage, um einen Vergleich zwischen den Erwartungen und den Anforderungen des Anforderungskatalogs mit den Ergebnissen der Studien und dem Fazit daraus zu ziehen ('7 Diskussion').
Diese Dissertation endet mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse ('8.1 Zusammenfassung') und einem Ausblick, was zukünftige Arbeiten besser machen könnten bzw. an welchen Stellen zukünftige Arbeiten ansetzen könnten, um die Ergebnisse dieser Ausarbeitung fortzusetzen ('8.2 Ausblick und künftige Arbeiten'). Weiterführende Informationen, Verzeichnisse für die Literatur und Abbildungen befinden sich im Anhang ('9 Anhang').

Kapitel 2

Technische und medizinische Grundlagen für den Forschungsstand

Das nachfolgende Kapitel befasst sich mit den theoretischen Hintergründen und Konzepten, die zum besseren Verständnis der Arbeit beitragen und notwendig sind. Konzepte wie Augmented Reality, Haptisches Feedback und Remote-Teaching werden hier erläutert.

In der heutigen Arztpraxis sind digitale Systeme nicht mehr wegzudenken. Die Vorstellung einer Arztpraxis, in der die Dokumentation händisch in Büchern, die Befundung auf Fotopapier und die Recherche mit einem medizinischen Lexikon durchgeführt wird, erscheint zunehmend unrealistisch. Dennoch ist die Arbeit mit und die Integration von neuen Technologien in den Alltag nicht selbstverständlich und passiert nicht automatisch. Die zu implementierende Technik muss einen Vorteil gegenüber der konventionellen Methode bieten und beispielsweise schneller, günstiger oder einfacher in der Benutzung sein. Ein besonderer Fokus liegt in diesem Kapitel auf der Vorstellung der Grundlagen zum Verständnis von Augmented Reality, haptischem Feedback und dem medizinischen Kurs SkillsLab.

2.1 Augmented Reality

Augmented Reality wurde in den 1950er Jahren von Morton Heilig entwickelt und ist definiert als „[...] eine direkte oder indirekte Echtzeitansicht einer physischen realen Umgebung, die durch Hinzufügen virtueller, computergenerierter Informationen verbessert/erweitert wurde“ [13]. Im Jahr 1962 wurde von Heilig ein Prototyp gebaut und im Anschluss an diesen Prototyp erfand Ivan Sutherland 1965 das erste am Kopf getragene Display und entwickelte 1968 ein AR-System [13]. AR wird von Azuma et al. mit drei Merkmalen definiert, zu denen die Kombination von Physischem und Virtuellem, die Interaktivität in Echtzeit und die Erfassung in drei Dimensionen gehören [14]. Wie in Milgrams Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum dargestellt (siehe 'Abbildung 2.1') ist AR sehr nah an der realen Umgebung, während Virtual Reality auf der anderen Seite des Kontinuums, in der virtuellen Umgebung, angesiedelt ist. Während VR den Benutzer vollständig in eine synthetische Welt eintauchen lässt, die nicht an die Gesetze der Physik gebunden ist, hängt AR von der Wahrnehmung der realen Welt durch den Benutzer ab und erweitert diese [13, 15]. Beide Darstellungsformen verwenden *Multimodeles Rendering* um eine in sich konsistente, bzw. mit der Umgebung konsistente Erfahrung für den Nutzer zu schaffen. Der Begriff *Mixed Reality* vereint beide Darstellungsformen und wird sowohl mit *MR*, als auch mit *XR* abgekürzt, wobei das *X* für beide Technologien (AR und VR) stehen kann.

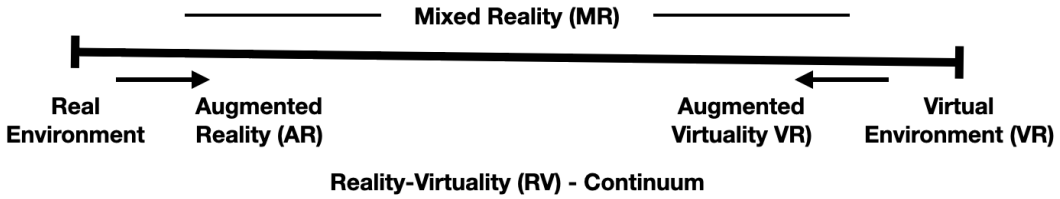


Abbildung 2.1: Milgram's Reality-Virtuality Continuum [15]

Um diese Arbeit von der Milgrams abzugrenzen und zu erweitern, wird die „reale Welt" als „physische Welt", sowie „reale Objekte" als „physische Objekte" bezeichnet. Die genauere Definition rührt daher, dass die virtuellen Objekte ebenfalls real und nicht imaginär sind. Sie sind nur für Benutzer von AR-Brillen sichtbar und interaktiv, und diese Aktualisierung der Terminologie erscheint zeitgemäßer.
Augmented Reality beschreibt die Erweiterung der physischen Welt um die Einblendung von virtuellen Objekten in das Sichtfeld des Nutzers. Dies können sowohl einfache Anzeigen in Form von Text, Textboxen oder Bildern sein, als auch komplexe dreidimensionale geometrische Strukturen und sogar dreidimensionale Repräsentationen von realen Objekten. Rein vom Prinzip macht es keinen Unterschied, ob eine einfache Textbox oder ein hochauflösendes Modell, von zum Beispiel einem menschlichen Gehirn, in dem Sichtfeld des Anwenders einer Augmented Reality-Anwendung dargestellt wird. In der Regel wird das Sichtfeld, welches über eine Kamera in Echtzeit aufgenommen wird, analysiert und um ein virtuelles Koordinatensystem ergänzt. Projiziert ein AR-fähiges Gerät ein Objekt nun in das Sichtfeld, so wird seine Position mit Hilfe eines Ankerpunkts im virtuellen Koordinatensystem festgesetzt (vgl. 'Abbildung 2.3'). Da das virtuelle Koordinatensystem immer relativ zur realen Welt verbleibt, erscheint das virtuelle Objekt genauso stationär, wie reale Objekte. Bewegen Anwender den Kopf bzw. das Gerät durch welches sie die Augmented Reality wahrnehmen, so folgt das virtuelle Objekt nicht der Bewegung, sondern verlässt ggf. das Sichtfeld und taucht erneut auf, sobald seine ursprüngliche Position wieder im Sichtfeld erscheint.

Abbildung 2.2: Augmented Reality – Konzeptbild

Um den Umgang mit der Software für den Anwender so einfach wie möglich zu gestalten, werden diese so implementiert, dass die Steuerung mit intuitiven Bewegungen und verständlichen Bedienkonzepten gestaltet ist. Ist eine Anwendung so intuitiv gestaltet, dass Nutzer handeln, ohne darüber nachzudenken, wie sie handeln, wird dieses als *Immersion*

bezeichnet. Haben sie zusätzlich das Gefühl „dort/dabei zu sein“, versteht sich dies als *Präsenz*. Dieses Gefühl „mittendrin“ oder „dabei“ zu sein ist gerade bei Mixed Reality-Anwendungen notwendig, damit diese glaubhaft sind, akzeptiert werden und ihren eigentlichen Zweck erfüllen können. [16] Um diesen Effekt zu erzeugen, muss die Zeit zwischen Aktion durch die Anwender und Reaktion durch die Anwendung möglichst gering sein, sodass der Anwender das Gefühl bekommen, dass die Reaktion von ihm (insbesondere durch seine Aktion) ausgelöst wird. Ziel der Immersion ist es, die Grenzen zwischen der physischen Welt und der virtuellen Welt verschwimmen zu lassen [17].

Abbildung 2.3: Virtuelles Objekt auf dem physischen Boden

Um ein tieferes Verständnis für die wichtigsten Begriff im Zusammenhang mit Augmented Reality im Bezug auf den/die Endnutzer zu schaffen, werden im Folgenden einige Begriffe genauer definiert und erläutert.

Immersion

Im Rahmen der Augmented Reality bezieht sich der Begriff Immersion auf die Fähigkeit einer AR-Anwendung, den Benutzer in eine virtuelle Welt einzutauchen und ihm das Gefühl zu vermitteln, tatsächlich in dieser Welt zu sein. Immersion bezieht sich darauf, wie tief der Benutzer in die virtuelle Welt eintaucht und wie realistisch diese Welt wahrgenommen wird.

Immersion in AR hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Qualität der visuellen und auditiven Darstellung, die Interaktivität und Reaktionsgeschwindigkeit der Anwendung, die Einbettung der virtuellen Welt in die reale Umgebung und die Präsenz des Benutzers in der virtuellen Welt. Wenn diese Faktoren erfolgreich umgesetzt werden, kann Immersion dazu beitragen, die Nutzererfahrung in der AR zu verbessern und das Potenzial der Technologie zu maximieren.

Die Forschung auf dem Gebiet der AR-Immersion befasst sich mit der Untersuchung der verschiedenen Faktoren, die die Immersion beeinflussen, und wie diese Faktoren optimiert werden können, um eine maximale Immersion und Interaktion in der virtuellen Welt zu erreichen. Die Entwicklung von AR-Systemen, die ein hohes Maß an Immersion bieten, hat das Potenzial, in verschiedenen Bereichen wie Bildung, Unterhaltung, Medizin und Industrie eingesetzt zu werden.

Präsenz

Der Begriff Präsenz im Zusammenhang mit Augmented Reality bezieht sich auf die Fähigkeit einer AR-Anwendung, ein immersives Erlebnis zu schaffen, bei dem der Benutzer das Gefühl hat, sich in einer anderen Realität zu befinden

oder Teil einer erweiterten Realität zu sein. Präsenz kann als das Ausmaß definiert werden, in dem der Benutzer in die virtuelle Welt eintaucht und das Gefühl hat, in dieser Welt anwesend und an ihr beteiligt zu sein.
Präsenz in AR hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Qualität der visuellen und auditiven Darstellung, die Reaktionsgeschwindigkeit der Anwendung auf die Interaktion des Benutzers, die Kontrolle des Benutzers über seine Bewegungen und die Integration der virtuellen Welt in die reale Umgebung. Wenn diese Faktoren erfolgreich umgesetzt werden, kann Präsenz dazu beitragen, die Benutzererfahrung mit AR zu verbessern und das Potenzial der Technologie zu maximieren.
Die Forschung auf dem Gebiet der AR-Präsenz befasst sich mit der Untersuchung der verschiedenen Faktoren, die die Präsenz beeinflussen, und wie diese Faktoren optimiert werden können, um eine maximale Immersion und Interaktion in der virtuellen Welt zu erreichen. Die Entwicklung von AR-Systemen mit hoher Präsenz hat das Potenzial, in verschiedenen Bereichen wie Bildung, Unterhaltung, Medizin und Industrie eingesetzt zu werden.

Deep Immersion im Vergleich zu Immersion

Der Begriff Immersion bezieht sich im Allgemeinen auf das Eintauchen in eine virtuelle Welt und das Erleben dieser Welt als real und gegenwärtig. Im Zusammenhang mit Augmented Reality bezieht sich Immersion auf die Fähigkeit einer AR-Anwendung, den Benutzer in die virtuelle Welt zu versetzen und ihm ein Gefühl der Präsenz und Teilnahme zu vermitteln.
Im Vergleich dazu bezieht sich der Begriff Deep Immersion auf einen höheren Grad der Immersion, bei dem der Benutzer eine noch stärkere Verbindung mit der virtuellen Welt erlebt. Bei Deep Immersion werden mehrere Sinne des Nutzers in die Erfahrung einbezogen, um ein noch intensiveres Gefühl der Präsenz und Teilnahme zu vermitteln. Bei AR kann Deep Immersion z. B. dadurch erreicht werden, dass die AR-Anwendung den visuellen und auditiven Input des Nutzers in Echtzeit analysiert und darauf reagiert. Dadurch kann eine noch stärkere Integration der virtuellen Welt in die reale Umgebung erreicht werden, was zu einem höheren Grad an Immersion führt. Eine weitere Möglichkeit, Deep Immersion in AR zu erreichen, ist der Einsatz von Wearables wie Smart Glasses, die den Nutzer noch stärker in die virtuelle Welt einbinden können.
Insgesamt ist die Abgrenzung zwischen Immersion und Deep Immersion in der AR eher fließend, da sich beide Begriffe auf das Eintauchen des Nutzers in die virtuelle Welt beziehen, jedoch in unterschiedlichem Ausmaß und mit unterschiedlichen Technologien und Methoden erreicht werden können.

Body Ownership im Kontext der Augmented Reality

Der Begriff Body Ownership in Augmented Reality bezieht sich auf das Gefühl des Benutzers, dass der virtuelle Körper oder Avatar, den er in der AR-Anwendung steuert, tatsächlich ihm gehört und dass er sich selbst als Teil dieses Körpers wahrnimmt. Es handelt sich um ein Phänomen, das eng mit Immersion und Präsenz in der AR verbunden ist und die Erfahrung des Benutzers in der virtuellen Welt stark beeinflusst.
Body Ownership in AR hängt von verschiedenen Faktoren ab, darunter die Qualität der visuellen Darstellung des virtuellen Körpers, die Interaktivität und Reaktionsgeschwindigkeit der Anwendung, die Integration des virtuellen Körpers in die reale Umgebung und die Wahrnehmung von Körperbewegungen durch den Benutzer. Wenn diese Faktoren erfolgreich umgesetzt werden, kann Body Ownership dazu beitragen, die Immersion und Präsenz des Benutzers in der virtuellen Welt zu erhöhen.
Die Forschung im Bereich AR-Body Ownership beschäftigt sich mit der Untersuchung der verschiedenen Faktoren, die das Gefühl der Zugehörigkeit zum virtuellen Körper beeinflussen und wie diese Faktoren optimiert werden können, um eine maximale Immersion und Interaktion in der virtuellen Welt zu erreichen. Die Entwicklung von AR-Systemen, die ein hohes Maß an Body Ownership bieten, hat das Potenzial, in verschiedenen Bereichen wie Bildung, Unterhaltung, Medizin und Industrie eingesetzt zu werden.
Ein Beispiel für den Einsatz von Datenhandschuhen mit haptischem Feedback in der Augmented Reality ist die

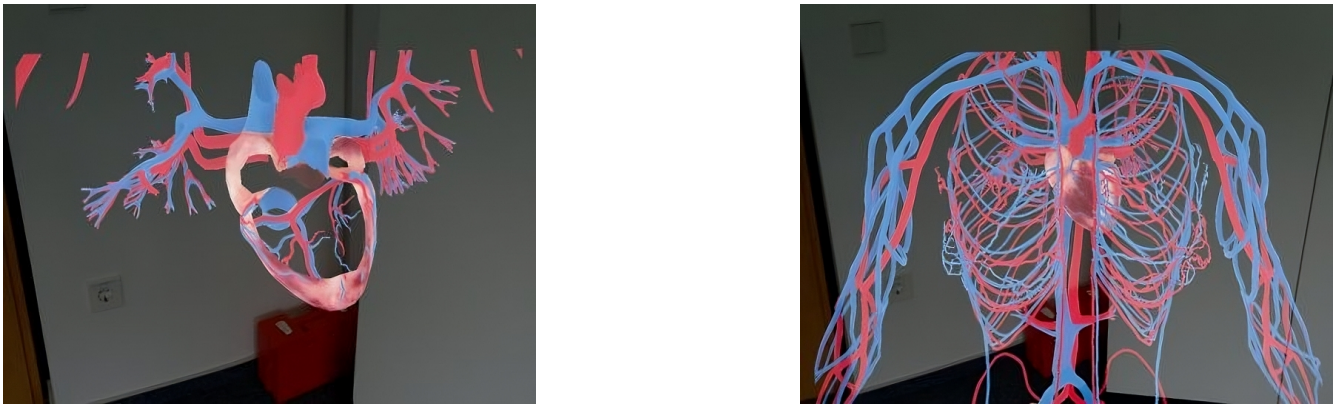
Verbesserung des „Body Ownership-Gefühls“ des Benutzers in der virtuellen Welt. Datenhandschuhe mit haptischem Feedback sind in der Lage, dem Benutzer taktile Rückmeldungen zu geben, die ihm das Gefühl vermitteln, dass seine Handlungen in der virtuellen Welt real und greifbar sind.
Durch den Einsatz von Datenhandschuhen mit haptischem Feedback in der AR kann der Benutzer eine höhere Immersion und Präsenz in der virtuellen Welt erreichen, da er durch das haptische Feedback das Gefühl hat, tatsächlich mit Objekten und Umgebungen interagieren zu können. Diese Interaktionen können auch dazu beitragen, das Körperbewusstsein des Benutzers zu verbessern, da er die virtuellen Körperteile als Teil seines eigenen Körpers wahrnimmt und durch das haptische Feedback eine stärkere Verbindung zu ihnen aufbaut.
Ein Beispiel für den Einsatz von Datenhandschuhen mit haptischem Feedback in der AR ist die medizinische Ausbildung. Hier könnten Ärzte und Medizinstudierende die Möglichkeit haben, virtuelle Operationen durchzuführen und durch das haptische Feedback ein realistisches Gefühl für Gewebebeschaffenheit und Kraftaufwand zu bekommen. Dies kann dazu beitragen, das Körperbewusstsein des Nutzers zu verbessern und ihm ein besseres Verständnis der komplexen Anatomie und Physiologie des menschlichen Körpers zu vermitteln.

2.1.1 Technische Grundlagen von Augmented Reality

Aus technischer Sicht unterscheidet sich die Augmented Reality-Programmierung nicht sehr von der Virtual Reality-Programmierung. Dennoch gibt es einzelne Unterschiede, auf die im Folgenden eingegangen wird. Der größte und sichtbarste Unterschied ist, dass Virtual Reality-Anwendungen einen virtuellen Hintergrund besitzen und alle Objekte in einer Virtual Reality-Anwendung, digital sind. Bei der Programmierung von Augmented Reality-Anwendungen steht die Farbe Schwarz für Transparenz. Alle schwarzen Elemente, dazu gehören der Hintergrund, schwarze Objekte und Schwarzanteile an Objekten, werden in der fertigen Anwendung transparent dargestellt. Dieser Fakt kommt daher, dass zur Darstellung von virtuellen Objekten Displays (in der Regel sind diese halbtransparent) verwendet werden. Die Darstellung (in der Benutzeroberfläche kurz: *GUI*) der Farbe/Helligkeitsstufe schwarz auf einem Display funktioniert durch das Abschalten aller Lichtquellen. Alles, was im virtuellen Raum schwarz dargestellt wird, erzeugt auf dem Display kein Signal. Für virtuelle Objekte bedeutet dies, dass Schwarz nicht darstellbar ist und somit transparent erscheint. Demnach ergibt sich bei der Programmierung, dass alle Objekte, egal wie dunkel sie sind, nie komplett schwarz sind, da sie andernfalls nicht darstellbar wären. Diese Eigenschaft von Displays wird außerdem dazu verwendet, den Hintergrund jeder AR-Anwendung schwarz, also transparent, zu gestalten, damit an dieser Stelle die physische Umwelt „durchscheinen“ kann (vgl. ’Abbildung 2.4’). Diese stellt dann den Hintergrund in der Anwendung dar.

Abbildung 2.4: Blick durch eine Augmented Reality-Brille

Ein weiteres Prinzip, welches für alle Augmented Reality-Anwendungen gilt und auch als Funktion verwendet wird, ist die sogenannte *Cull-Distance*. Dieser Begriff steht dafür, wie groß der Mindestabstand zwischen einem virtuellen Objekt und der Kamera sein muss, damit das Objekt dargestellt wird und nicht transparent wird. Dies ist deswegen nötig, weil virtuelle Objekte keine Kollision mit der Kamera ermöglichen und deswegen die Kamera immer durch sie hindurchsehen kann. Dieses Prinzip kann dazu genutzt werden, virtuelle Objekte „aufzuschneiden“ und so in sie hineinzusehen. Zum Beispiel in einer Anatomie-Anwendung kann damit das Herz aufgeschnitten und die Herzklappen begutachtet werden (vgl. 'Abbildung 2.5')



(a) Muskeln (b) Blutgefäße

Abbildung 2.5: Blick durch eine Augmented Reality-Brille: Aufgeschnittenes Herz

Tracking-Verfahren und Positionserkennung

Der Begriff *Tracking* beschreibt die Erkennung der eigenen Position im Raum, relativ zur Kamera. Beim Start einer AR-Anwendung wird ein virtuelles Koordinatensystem erzeugt, um die Position von virtuellen Objekten zueinander und zur Kamera im physischen Raum zu definieren. Hierzu muss der Ursprung des Koordinatensystems festgelegt werden. Sollte es keinen bestehenden Ursprung geben, dieser könnte aus einer früheren Anwendung gespeichert sein, wird die Position der Kamera während des Starts der Anwendung gewählt und als Ursprung (engl.: Origin) (0|0|0) definiert. Diese Position kann sich während der Verwendung der Anwendung ändern, aber sie dient zunächst als Einstieg. Oft wird, sobald der Boden erkannt wurde, der neue Ursprung auf diesen „herabgesenkt“.
Zur Erkennung der eigenen Position und Bewegung werden heutzutage zwei unterschiedliche Technologien eingesetzt. Beide basieren auf optischen Prinzipien und sind deswegen störungsanfällig für Veränderungen von Lichtquellen und Reflexionen.

Positionserkennung: Outside-In-Tracking

Positionserkennung: Outside-In-Tracking Bei diesem Verfahren dienen außenstehende *Lighthouse/Basistationen* als Referenzpunkte für ein Headset. Die Referenzpunkte strahlen ein Infrarotsignal aus, durch den das Headset seine Postion bestimmen kann. Werden mehrere dieser Stationen verwendet, erhöht sich die Chance, dass die „Line-of-Sight“, die direkte Linie zwischen zwei Objekten, welche in Sichtweite liegen, nicht unterbrochen wird, da dies das Tracking behindern oder sogar verhindern würde. Diese Technologie kommt hauptsächlich bei VR-Headsets, wie der „HTC Vive Pro ®“ zum Einsatz. [18]

Positionserkennung: Inside-Out-Tracking

Das Inside-Out-Tracking kommt ganz ohne außenstehende Hardware aus und benötigt lediglich Kameras, welche im Gerät selbst integriert sind. Das Erkennen der Positionsänderung funktioniert dadurch, dass verschiedene Kameras

Bilder aus unterschiedlichen Blickwinkeln der Umgebung erstellen. Aus der Differenz zwischen zwei Bildern und den Unterschieden zwischen den Bildern zweier Kameras wird ein Bewegungsvektor errechnet. Dies geschieht mit mehreren Kameras gleichzeitig und mehrmals pro Sekunde. Aus den Ergebnissen und der Kombination mehrerer Kameras lässt sich ein dreidimensionaler Bewegungsvektor bestimmen, welcher in Summe mit dem Ausgangspunkt die neue Position im Raum ergibt. [19]

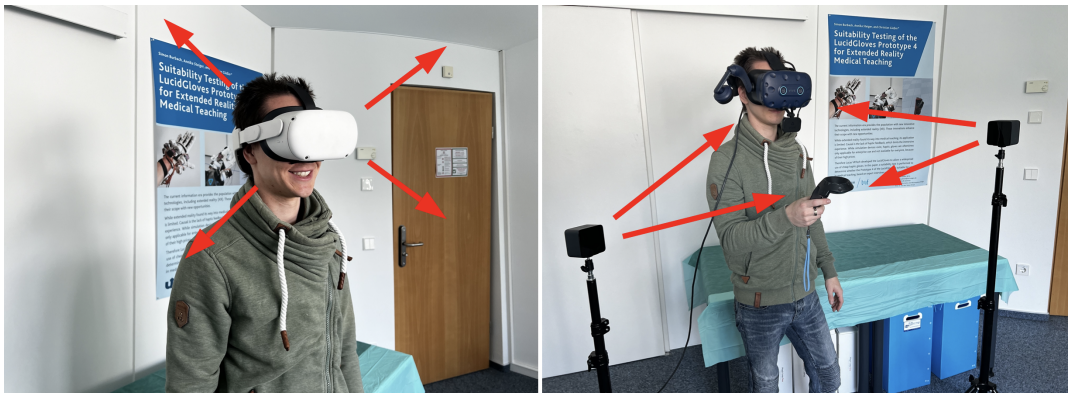


Abbildung 2.6: Tracking-Verfahren und Positionserkennung [20]

Im Vergleich beider Technologien lässt sich feststellen, dass das Outside-In-Tracking genauer ist und mit einer geringeren Latenz funktioniert, dem Nutzer im Gegenzug mehr Aufwand bereitet, da die zusätzlichen Emittier verwendet werden müssen (vgl. 'Abbildung 2.6'). Außerdem erfordert es, zusätzlich zu dem Headset, die Verwendung eines Computers, da das Headset und die Emittier über diesen synchronisiert werden.

2.1.2 Entwicklung von Augmented Reality-Apps

Neben der nativen Programmierung bieten sich Game Engines an, da diese einen Großteil der Arbeit in Bezug auf Performanz und Lauffähigkeit übernehmen. Außerdem können vorgefertigte Frameworks und Beispiele der Hardwareentwickler den Entwicklungsprozess beschleunigen und vereinfachen. Dementsprechend gibt es mehrere Möglichkeiten, die Anwendung darzustellen und dem Nutzer zugänglich zu machen. Die zurzeit gängigsten Verfahren werden in den folgenden Kapiteln vorgestellt.

2.1.2.1 Smartphone Apps

Eine weit verbreitete Lösung, Augmented Reality-Anwendungen zu verwenden, ist das Smartphone. Für beide der großen gängigen Betriebssysteme gibt es hauseigene AR-APIs zur Entwicklung von Augmented Reality-Apps oder Augmented Reality-Funktionen innerhalb bestehender *App*. Apple bietet mit dem „Apple AR-Kit ®“ die Möglichkeit, virtuelle Elemente direkt in das Kamerabild des Nutzers zu projizieren [21]. Außerdem können die Hände und damit geformte Gesten erkannt und zur Steuerung genutzt werden. „Google“ bietet mit „ARCore ®“ eine ähnliche Bandbreite an Funktionen [22].

Bei der Verwendung von Smartphones treten einige Herausforderungen auf. Zunächst bietet ein Smartphone allgemein nicht dieselbe Leistung wie ein AR-Headset, da das Smartphone neben der AR-Funktionalität parallel noch weitere Dienste zur Verfügung stellt. Außerdem ist es oft kleiner und kompakter, was ebenso die zur Verfügung stehende Hardware begrenzt. Ein kleinerer Akku und ein Prozessor für mobile Anwendungen, sowie die Displayauflösung begrenzen die Bildqualität (vgl. 'Abbildung 2.7').

Abbildung 2.7: Smartphone Augmented Reality-Anwendung am Beispiel einer Operationsroboterpositionierung [23]

Neben diesen technischen Limitationen ist die Bedienung herausfordernder als bei klassischen AR-Brillen. Dadurch, dass Smartphones mit mindestens einer Hand gehalten werden müssen, schränkt dies die Bewegungsfreiheit des Nutzers ein. Alternativ kann das Smartphone durch eine Halterung (z.B. „Google Cardboard ®“) am Kopf befestigt werden. Hierbei fällt den Nutzern die relativ niedrige Anzahl an Pixel des Displays auf und Inhalte können möglicherweise nicht detailliert genug dargestellt werden. [24]

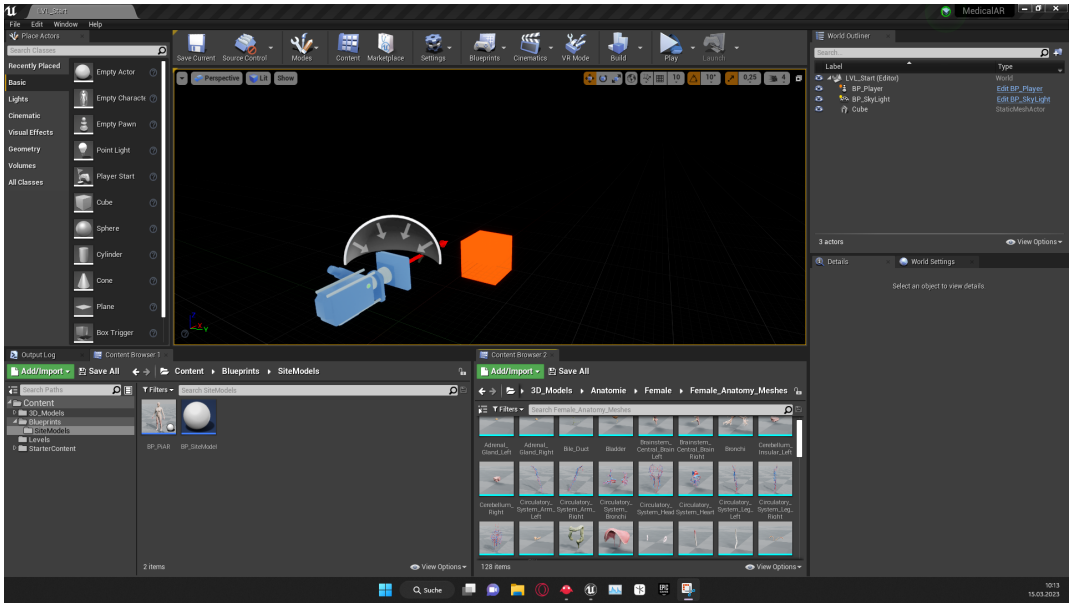
Des Weiteren gibt es keinen externen Controller, welcher Eingaben entgegennehmen kann und haptisches Feedback liefern könnte, wenn beispielsweise virtuelle Objekte berührt werde. Das Smartphone repräsentiert lediglich die Kamera in der Anwendung und wenn nicht auf Gestenerkennung zurückgegriffen wird, gibt es keine alternative Eingabemethoden neben dem Touchscreen. [25]

Sofern zusätzliche Hardware, wie beispielsweise haptische Handschuhe, verwenden werden soll, müssen diese eine Schnittstelle zur entsprechenden mobilen Entwicklungssprache (z.B. „Java“ für „Android“ oder „Swift“ für „iOS“) haben. Da die Nutzung mit einem Smartphone in der Regel nicht der Zielgruppe dieser Hersteller entspricht, gestaltet sich der Support als schwierig bis unmöglich.

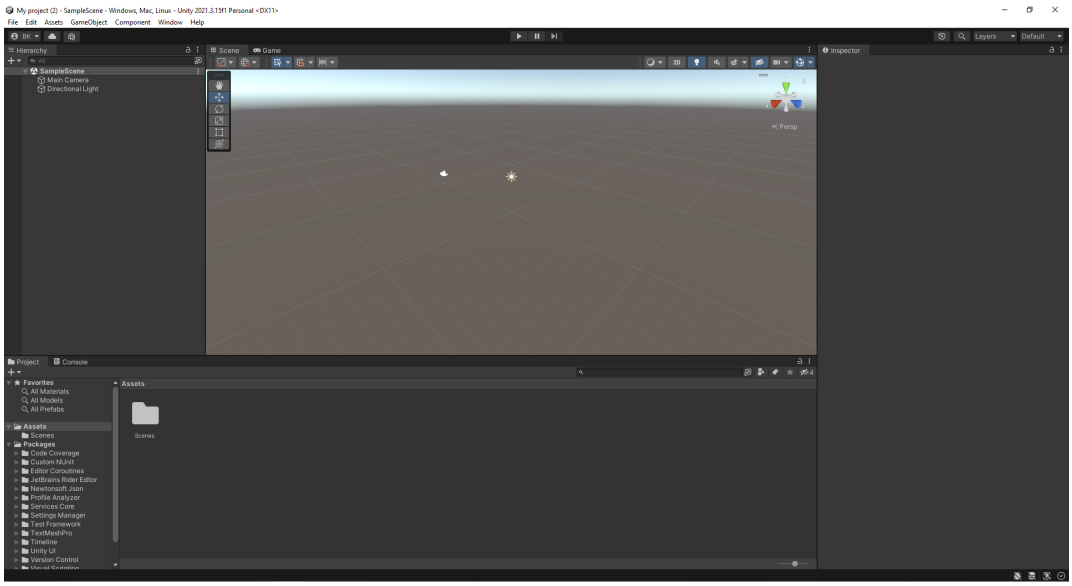
2.1.2.2 Native Programmierung

Eine Möglichkeit der Implementierung ist die native Programmierung. Hierbei wird das Programm von Grund auf neu geschrieben und durch vorgefertigte Funktionen und Pakte der Entwickler erweitert. Nativ programmierte Apps schneiden in der Regel bei Performanztests am besten ab. Ein großer Nachteil der nativen Programmierung ist die Schwierigkeit der Programmierung, sowie der damit verbundene große Zeitaufwand.

2.1.2.3 Game Engines



(a) Unreal Engine 4 Editor



(b) Unity Engine Editor

Abbildung 2.8: Editoren der Engines im Vergleich

Neben der nativen Programmierung bietet sich die Verwendung von Game Engines an. Diese Art der Programmierung erleichtert den Entwicklern die Arbeit, da ihnen eine Reihe von Werkzeugen wie Programmgerüste, Code-Schnipsel mit vordefinierten Funktionen etc. zur Verfügung stehen, wodurch diese direkt mit der Entwicklung des eigentlichen Programms beginnen können, ohne sich vorher mit den Rahmenbedingungen auseinandersetzen zu müssen. Zum Beispiel bietet die Verwendung der „Unreal Engine ®“ von „Epic Games“ oder „Unity ®“ von „Unity Technologies“ (vgl. 'Abbildung 2.8b') die Möglichkeit, mit der Programmierung an einem Punkt zu beginnen, an dem das Programm bereits lauffähig ist (vgl. 'Abbildung 2.8a'). Das Programm ist zwar noch ohne Funktionen und es wird noch nichts dargestellt, alle Rahmenbedingungen, wie die Zusammenfassung in einer Applikation, der Empfang von

Steuerungseingaben der Anwender und das finale Berechnen (engl. rendering) des Bildes, welches letztendlich auf einem Monitor dargestellt wird, funktioniert bereits.
Die Verwendung von Game Engines ist in der Regel gut dokumentiert und es gibt zu vielen Problemen und Aufgabenstellungen bereits eine Lösung im Internet. Auf die Arbeiten anderer Programmierer kann zurückgegriffen und diese in die eigene Anwendung integriert werden. Vor allem bei komplexen Funktionen ist dies besonders effizient, da Entwickler nicht jede Funktion selbst implementieren müssen.
Ein Nachteil ist, dass die Veröffentlichung einer fertigen Anwendung in der Regel kostenpflichtig ist, da eine Lizenz benötigt wird. Bei der Unreal Engine werden ab einem Umsatz von einer Million Dollar 5% der Einnahmen des Produkts verlangt [26]. Die Unity Engine verlangt ab Januar 2024 ca. 20 US Cents pro Installation, ab einem Gewinn von 200.000 Dollar oder 200.000 Installationen [27]. Die Entwicklung und eine Testphase sind bei beiden Engines kostenlos, die Verbreitung von Demos ist mit Unity kostenpflichtig.

2.1.3 Vor- und Nachteile von Augmented Reality: Abgrenzung zu Virtual Reality

Wie bereits in den vorangestellten Unterkapiteln (siehe '2.1.1 Technische Grundlagen von Augmented Reality') beschrieben, kann die Virtual Reality leicht von der Augmented Reality dadurch abgegrenzt werden, dass bei der VR eine komplett virtuelle Welt erzeugt wird, wohingegen bei der AR die physische Welt immer noch als Hintergrund dient und durch virtuelle Elemente ergänzt wird. Dies bietet sowohl Vor- als auch Nachteile, auf welche nun genauer eingegangen wird.

2.1.3.1 Vorteile der Augmented Reality

Zu den Vorteilen von Augmented Reality im Vergleich zu Virtual Reality zählen Punkte aus den Bereichen der Programmierung, also die Arbeiten, bevor eine Anwendung vom Nutzer verwendet wird, und der Anwendung durch den Nutzer. Die Anfertigung von Augmented Reality-Anwendungen ist für den Programmierer einfacher, da er sich auf das Wesentliche beschränken kann und keine Zeit für die Implementierung von Hintergründen, dekorativen Elementen oder Beleuchtung aufwenden muss. Diese Dinge werden durch die physische Welt zur Verfügung gestellt und müssen lediglich erkannt und (sofern nötig) verwendet werden. Virtual Reality sollte demnach nur verwendet werden, wenn dies einen echten Nutzen bietet. Wenn beispielsweise ein kompletter Operationssaal nachgebaut und virtuell verwendet werden soll, wäre Virtual Reality die bessere Lösung. Geht es nur um die Arbeit mit einzelnen Geräten oder die Vermittlung einzelner Handlungsabläufe, bei denen der Operationssaal an und für sich keinen signifikanten Nutzen liefert, sollte auf VR verzichtet und stattdessen AR verwendet werden. [25]
Ein weiterer Vorteil ist, dass Nutzer weniger Motion Sickness verspüren. Dadurch, dass die physische Welt stets sichtbar bleibt, kann sich das Gehirn im Raum orientieren und es findet keine Entkopplung des Seh- und Gleichgewichtssinns statt. Durch das Beibehalten der „vertrauten“ (physischen) Umgebung fällt neuen Nutzern von Mixed Reality Geräten der Einstig in Augmented Reality-Anwendungen leichter, als der mit Virtual Reality-Anwendungen. [28–30]

2.1.3.2 Nachteile

Augmented Reality bietet, neben den zahlreichen Vorteilen, auch einige Nachteile gegenüber anderen digitalen und herkömmlichen Methoden. Zum einen wäre der Punkt, dass ein gewisses technisches Vorwissen erforderlich ist um eine Augmented Reality-Brille verwenden zu können. Anwendungen erscheinen vielleicht Intuitiv, wenn die Anwender sich bereits mit der Thematik auseinandergesetzt haben, oftmals ist dieses Wissen erlerntes Wissen und steht demnach Anfängern nicht zur Verfügung. Ein weiterer Nachteil ist die Rekonstruierbarkeit. Augmented Reality verwendet die physische Welt als Hintergrund für die Anwendung. Demnach beeinflusst die Umgebung die AR-Erfahrung. Dies ist zum einen ein großer Vorteil der AR und zum anderen könnte es sich als Nachteil erweisen, wenn beispielsweise eine komplett virtuelle Welt in einem komplexeren Szenario, wie einem virtuellen Operationssaal

benötigt wird. In solchen Fällen, wenn der Hintergrund und die Umgebung für die Anwendung von Bedeutung ist, bietet es sich an, auf Virtual Reality zu wechseln.
Als letzter betrachteter Nachteil sei erwähnt, dass sich im Raum befindende Gegenstände die AR-Anwendung beeinträchtigen können. Virtuelle Objekte könnten auf der Position von physischen erscheinen und diese überlagern. Möglicherweise könnten virtuelle Objekte direkt in die Wand, den Boden oder die Decke projiziert werden und so unzugänglich sein. Eine gute Ausrichtung und Erkennung der Umgebung ist, um dem vorzubeugen, wichtig.

2.2 Haptisches Feedback

Anwendungen können den Nutzern auf unterschiedlichen Wegen Feedback zu ihrem Handeln geben. So kann via Text, blinken, Farb- oder Formänderung visuelles Feedback geliefert werden. Töne, Melodien oder Geräusche liefern akustisches Feedback. Eine weitere Form ist das haptische Feedback, welches meistens durch Vibration, Bewegung oder Bewegungseinschränkung vermittelt wird. In den folgenden Unterkapiteln geht es um die gängigsten Formen von haptischem Feedback und den Vorteilen, die es den Nutzern in der Anwendung geben könnte.

Piezo Aktoren und Motoren
Der Blogeintrag „Haptic Actuators: Comparing Piezo to ERM and LRA“ von Michael Motolabarnes auf www.piezo.com behandelt die Unterschiede zwischen Piezoaktoren und herkömmlichen haptischen Aktoren. Dazu gehören Motoren mit exzentrischer rotierender Masse (ERM) und lineare Resonanzaktoren (LRA). Diese auch als „taktile-Aktoren“ bezeichneten Geräte erzeugen Bewegungen, die es elektronischen Geräten ermöglichen, Informationen über den Tastsinn an den Benutzer weiterzugeben. Der Artikel befasst sich auch mit den wichtigsten Leistungsparametern, den Mechanismen hinter den Geräten und schließlich mit einigen Beispielen kommerziell erhältlicher Produkte. Es gibt viele quantitative Kriterien für die Bewertung haptischer Aktoren, aber das wichtigste ist die Leistung. Die Leistung bezieht sich auf die Bewegung, die ein Aktor erzeugen kann, und dafür gibt es zwei Hauptkriterien: Stärke der Bewegung und Geschwindigkeit. Anschließend wird die Funktionsweise der beiden Aktortypen im Detail beschrieben. Außerdem werden die Vor- und Nachteile der ERM beschrieben. [31]

2.2.1 Arten von haptischem Feedback

Haptisches Feedback kann auf unterschiedliche Weise vom Körper aufgenommen und wahrgenommen werden. Grundsätzlich werden zwei Arten von haptischem Feedback unterschieden, das Force Feedback, bei dem es um eine Bewegungseinschränkung geht, und das Tactile Feedback (auch Vibrotactile Feedback genannt), wo es um induzierte Berührung, meistens durch Vibration, geht. Des Weiteren gibt es auch Mischformen oder spezielle Varianten, die sich nicht klar in eine der beiden Kategorien einordnen lassen. Diese werden im Verlauf der Arbeit erläutert, wenn sie genannt werden.

2.2.1.1 Tactile Feedback

Diese Form des haptischen Feedbacks ist die einfachste und gängigste Variante, da sie sich durch simple mechanische Bauteile umsetzen lässt. Sie wird in einigen Veröffentlichungen auch als passives haptisches Feedback beschrieben, wenn sie eine benachrichtigende Rolle erfüllt. Das Feedback lässt sich durch Signale in Form von Vibration beschreiben. Viele technische Geräte ermöglichen es, z.B. durch kleine Motoren mit einer Schwungmasse oder durch die Verwendung von Piezo-Aktoren, zu vibrieren und damit den Nutzern eine Rückmeldung zu einem Ereignis zu geben. Es beginnt bei dem Vibrationsalarm eines Handys, sodass nur die Besitzer die Vibrationen in der Tasche spüren und reicht über die Vibration eines Smartphones, sobald eine virtuelle Taste auf dem Touchscreen gedrückt wird. Unterschiedliche Vibrationsmuster werden für unterschiedliche Benachrichtigungen verwendet. Moderne Gamecontroller ermöglichen

es, durch Vibration das Schussverhalten verschiedener (virtueller) Waffen zu simulieren. Der Auslöser verhält sich je nach Anwendung unterschiedlich, so dass ein merklicher Unterschied im Schussverhalten besteht (vgl. 'Abbildung 2.9'). [32]

Abbildung 2.9: Beispiele für Datenhandschuhe mit Vibrotaktilem Feedback (SenseGlove Nova) [33]

Es gibt unterschiedliche Methoden um diese Form des Feedbacks an den Nutzer zu übertragen. Neben kleinen beweglichen Motoren gibt es die Möglichkeit, mittels elektrischer Muskelstimulation (EMS) den Körper der Anwender direkt anzusprechen. Dabei wird eine geringe Spannung an entsprechenden Stellen des Körpers angelegt und die entsprechenden Muskeln reagieren auf diesen Impuls, als käme er direkt vom Gehirn. Je nach Intensität, Dauer und Amplitude kann das Gefühl von einem Prickeln, über Berührung bis hin zu Stößen oder Schlägen reichen. [34]

Das Gefühl von kleinen Berührungen oder einem Prickeln kann ebenfalls durch piezoelektrische Aktoren hervorgerufen werden. Diese elektrischen Bauteile beinhalten Piezokristalle, welche je nach anliegender elektrischer Spannung ihre Form verändern können. Durch all diese Möglichkeiten ist es möglich, den Nutzern das Gefühl von Bewegung oder Berührung (durch Vibration) zu vermitteln.

2.2.1.2 Force Feedback

Im Gegensatz zum Tactile Feedback, das in erster Linie passiv funktioniert, indem es den Benutzer informiert, aber nicht in seiner Bewegung einschränkt, greift das Force Feedback aktiv in die Bewegungsfreiheit des Benutzers ein. Bei dieser Form der Rückmeldung geht es darum, die Bewegungsfreiheit des Benutzers so einzuschränken, dass er einen Widerstand spürt und seine Handlung entsprechend anpassen muss. Beispielsweise kann eine Hand über einen Handschuh mit Hilfe eines Seilzugsystems immer dann zurückgehalten werden, wenn sie in einer Anwendung auf ein virtuelles Objekt trifft. Die Fingerspitzen wären in diesem Beispiel über Seile oder Drähte mit Motoren verbunden, die eine Bewegung, d. h. ein Beugen der Finger, verhindern können (vgl. 'Abbildung 2.10'). Neben einem Seilzugsystem kann dies auch durch ein starres Exoskelett auf dem Handrücken eines Handschuhs erreicht werden (vgl. 'Abbildung 2.11'). Neben Handschuhen kann sogar ein ganzer Anzug mit einem solchen System ausgestattet sein und bei der Verwendung volles haptisches Feedback am ganzen Körper erzeugen.

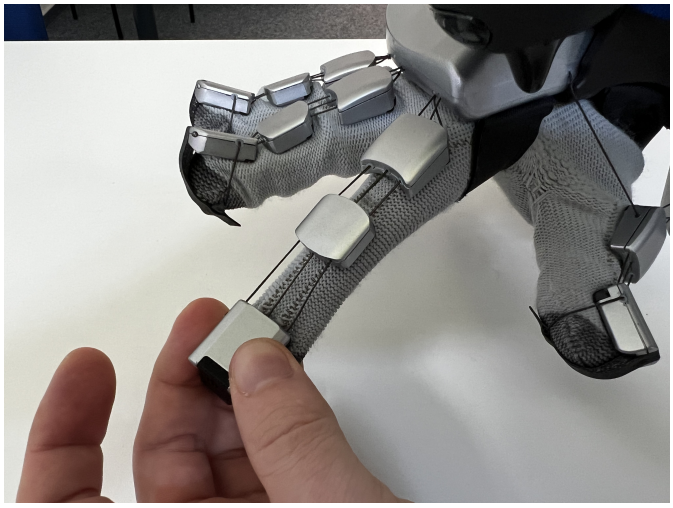


Abbildung 2.10: Seilzugsystem des SenseGlove Nova

Ein anderes Beispiel für Force Feedback sind Lenkrad Simulationen. Je nach Geschwindigkeit, Untergrund und Fahrbahnbeschaffenheit passt das Lenkrad die benötigte Kraft an, welche zur Rotation nötig ist. Ebenso kann es „gegenlenken“ und den Benutzern das Gefühl vermitteln, ein echtes Lenkrad in der Hand zu halten, welches sich, je nach Geschwindigkeit des Fahrzeugs, anders verhält.

In Studien konnten unter anderem eine Forschungsgruppe um J. Kreimeier einen signifikanten Zusammenhang zwischen haptischem Feedback und einer Erhöhung der Immersion (getestet in VR-Anwendungen) feststellen. Besonders das Force Feedback lieferte gegenüber dem vibrotakilen Feedback nochmals bessere Ergebnisse. [35] Die Ergebnisse können ebenfalls von L. Cappello unterstützt werden[1][36].

Abbildung 2.11: Beispiele für Datenhandschuhe mit Force Feedback (SenseGlove Nova) [33]

[1] engl.: Continuous tactile feedback leads to a significantly larger number of successful trials than discrete vibrational cues and no feedback conditions. [36]

2.2.2 Mehrwert von Anwendungen mit haptischem Feedback

In vielen Anwendungen kann haptisches Feedback einen Vorteil bieten, da Benutzer mehr Informationen und mehr Rückmeldung zu ihren Handlungen erhalten. Allgemein führt das Involvieren mehrerer Sinne zu einer höheren Immersion und Akzeptanz von Anwendungen. Diese Form von Feedback, welches sich speziell nicht auf audiovisuelle Informationen beschränkt, hilft es den Nutzern Informationen zu vermitteln, ohne sie von ihren Tätigkeit abzulenken. Sie können weiterhin ihrer Aufgabe folgen, zuhören und bekommen gleichzeitig durch Berührungen oder Bewegungen weitere Informationen. Ebenso können sie auf diese Sinneseindrücke anders und auch intuitiver reagieren, da diese zumeist so gestaltet sind, nicht die komplette Aufmerksamkeit einzunehmen. [37–39]
Die große Relevanz von haptischem Feedback lässt sich besonders deutlich an der häufigen Anwendung bei Smartphones erläutern. An zahlreichen Stellen kommt es zum Einsatz und gibt Hinweise auf Neuigkeiten, Änderungen und erfolgreiche Eingaben durch den Nutzer. Augmented Reality-Anwendungen fehlt es zumeist an diesen Komponenten, da das Potenzial offensichtlich noch nicht erkannt wurde.
Hervorzuheben ist außerdem der Unterschied in den Einsatzgebieten von Tactile und Force Feedback, welcher durch ihre aktive und passive Natur begründet ist. Tactile Feedback findet sich eher in einer benachrichtigenden Form in Anwendung. Es wird dazu verwendet, die Nutzer passiv auf Statusänderungen aufmerksam zu machen, ohne sie zu sehr abzulenken. Force Feedback dagegen ist ein aktives Einschreiten in die Bewegungsabläufe der Nutzer. Sie werden in dem, was sie tun, eingeschränkt, müssen reagieren und sich mit ihrer Aufmerksamkeit den geänderten Gegebenheiten anpassen.

2.3 Anwendungsgebiet: SkillsLab

Das allgemeine Ziel des SkillsLab ist es, medizinische Fertigkeiten zu vermitteln, ohne diese am lebenden Menschen üben zu müssen. Dies geschieht durch das Lehren und Trainieren von Hard und Soft Skills an anatomischen Modellen in einer risikofreien Umgebung. Auf der praktischen Ebene bedeutet dies, dass die Fertigkeiten im Umgang mit medizinischen Geräten, Diagnosewerkzeugen und den Patientinnen und Patienten selbst in einer kontrollierten Umgebung geübt werden, da der Einsatz von Modellen und Simulationswerkzeugen die Teilnahme von realen Patientinnen und Patienten überflüssig macht. Die streng algorithmische Struktur erleichtert die Vergleichbarkeit und Reproduzierbarkeit der Handlungen. Die Lernenden können ihre Fortschritte genau verfolgen und Fehler schnell erkennen. Der Prozess der Einrichtung eines SkillsLab erfolgt mehrstufig und bedarf einer umfassenden und frühzeitigen Planung. Je nach angestrebtter Gruppengröße, Raum- und Materialkapazität können eine unterschiedliche Anzahl an Stationen angeboten, vorgehalten und auch nachträglich ergänzt werden. Im Folgenden wird zunächst das SkillsLab allgemein erläutert. Im Anschluss wird das Siegender Skillslab vorgestellt und das Kurskonzept mit dem anderer Universitäten verglichen.
Im 20. Jahrhundert wurde die Luftfahrtindustrie durch die Einführung der simulationsgestützten Ausbildung bereichert. Zuerst konnten die Studierenden mechanische Geräte benutzen, die die Bewegung des Flugzeugs simulierten, dann wurden hydraulische Systeme eingeführt, und später kamen die Full-Motion-Simulatoren hinzu. In den 1970er Jahren wurde schließlich die computergestützte Flugsimulation eingeführt. Das Konzept des Lehrens und Lernens von Fähigkeiten und Fertigkeiten, insbesondere in hochspezifischen Situationen, wurde zum Standard in der Pilotenausbildung. Trotz natürlicher und außergewöhnlicher Risiken ist die Luftfahrtindustrie eine der sichersten Berufssparten. [40]
Dieser Gedanke lässt sich auch auf den simulationsbasierten Ansatz des SkillsLab im medizinischen Kontext übertragen. Zwar gibt es die praxisnahe Ausbildung von Studierenden, auch an Leichen oder einzelnen lebenden Patienten, schon seit Jahrhunderten, aber bekanntlich hat die Ausübung der Medizin und der allgemeinen Gesundheitsversorgung erst in den letzten Jahrzehnten den extrem hohen Sicherheitsstandard erreicht, den wir seitdem bis heute genießen dürfen.

Ähnlich wie in der Luftfahrt ist auch die Ausübung der Medizin mit Risiken verbunden, die im schlimmsten Fall von außerordentlichen körperlichen Verletzungen bis hin zum Tod führen können. Die ersten modernen Varianten des SkillsLab-Konzepts im Bereich der Gesundheitsversorgung wurden in den 1970er Jahren in den Niederlanden und den USA eingeführt und in die medizinische Ausbildung integriert. Die früheste Eröffnung eines SkillsLab in Deutschland geht auf das Jahr 1999 und die Berliner Charité zurück [41]; in den Folgejahren, vor allem in den 2000er Jahren, adaptierten immer mehr Hochschulen in Deutschland das Projekt SkillsLab, wenn auch teilweise unter anderen Namen. [42]

2.3.1 Vorstellung des Kurses SkillsLab

Der Kurs SkillsLab ist nicht standardisiert. Daher kann die Umsetzung des SkillsLab-Konzepts von Einrichtung zu Einrichtung sehr unterschiedlich sein. Dies führt letztlich zu einer nicht standardisierten Ausbildung, deren Ergebnisse möglicherweise nicht konkret vergleichbar sind. Eine weitere Herausforderung bei der Umsetzung des SkillsLab-Konzepts stellt häufig die Verfügbarkeit von Ressourcen wie Raum, Personal und Material dar, da diese begrenzt und in unterschiedlichem Maße vorhanden sind. Auch dieser Faktor muss beim Vergleich medizinischer Ausbildungssituationen berücksichtigt werden, da hierdurch sehr unterschiedliche Lehr- und Lernumgebungen entstehen können. Dieses Thema ist sowohl aus Sicht der „klassischen“ Medizinstudierenden als auch aus Sicht der Gesundheitsversorgung von großer Bedeutung. Eine effektive medizinische Ausbildung ist von zentraler Bedeutung für die Qualität der Versorgung und die Patientensicherheit. Daher ist es wichtig, sich mit den Fragen der unterschiedlichen Umsetzungen von SkillsLabs im medizinischen Bereich auseinanderzusetzen und auch Lösungen zu finden, die die Effektivität der medizinischen Ausbildung verbessern.

Im Folgenden werden verschiedene Aspekte der Umsetzung des SkillsLab-Konzepts herausgegriffen und die Unterschiede anhand eines Vergleichs einzelner (z.T. nur affiliierter) Hochschulen gegenübergestellt. Dazu wurden frei verfügbare Informationen der jeweiligen SkillsLab der Erasmus Universität Rotterdam [43], der Universität Bielefeld [44], der Universität Witten/Herdecke [45] und der Universität Bonn [46] gesammelt und verglichen. Konkret werden die Aspekte *Konzept und Zeitlicher Aufbau*, *Material*, *Stationen und Themen* sowie *Lernziele und Prüfung* betrachtet.

Konzept und zeitlicher Aufbau

Aufgrund der unterschiedlichen Umsetzungen gibt es dementsprechend auch keine einheitlichen Richtlinien für den tatsächlichen zeitlichen Umfang der einzelnen Kurse oder überhaupt für die Nutzung des SkillsLab Konzepts, zumal hier der größte Unterschied zwischen der hochschulintegrierten und der weiterbildenden Variante zu beobachten ist. Während an der Universität Bielefeld und der Universität Bonn mehrere thematisch unterschiedliche Kurse in einem Programm für die Studierenden angeboten werden, müssen sich die Studierenden für die SkillsLab Workshops des EMC und des OPUS SkillsLab eigenständig anmelden. An den Universitäten Bonn und Bielefeld, an denen das SkillsLab in den Studiengang integriert ist, werden mehr Themen behandelt, so dass insgesamt mehr Zeit für dieses Konzept aufgewendet wird. An der Universität Bielefeld kommen die Studierenden der Medizinischen Fakultät bereits im ersten Semester mit dem SkillsLab in Kontakt. Pro Modul haben die Studierenden sechs bis neun Unterrichtseinheiten, wobei eine Unterrichtseinheit 45 Minuten im SkillsLab entspricht.

Für Studierende der Universität Bonn beginnt der Unterricht im SkillsLab ebenfalls im ersten Semester mit einem Grundkurs in klinischer Notfallmedizin. Ein Kurskalender zeigt die einzelnen Kurse an jedem Wochentag. Alle Kurse dauern ein bis zwei Stunden und werden von studentischen Tutoren betreut. Zusätzlich finden ein Blockpraktikum sowie ein Querschnittskurs (4 Termine à 90 Minuten) im SkillsLab statt. Das Kursangebot des Erasmus Medical Center SkillsLab & Simulation Center sowie des OPUS SkillsLab erstreckt sich über einen Zeitraum von wenigen Stunden bis zu einigen (maximal drei) Tagen.

Material

In den meisten Fällen werden in den Kursen, in denen Materialien benötigt werden, diese auch den Teilnehmern zur Verfügung gestellt. Häufig ist das Inventar auch einfach an die Ausstattung der jeweiligen Einrichtung gekoppelt, z.B. der Klinik der Medizinischen Fakultät. Die Studierenden verwenden sowohl Einwegprodukte wie Spritzen, Kanülen, Tupfer und Pflaster als auch Mehrweginstrumente wie Zangen, Skalpelle und Untersuchungsinstrumente. Die Universität Bielefeld weist zudem darauf hin, dass die Studierenden Untersuchungsinstrumente, die in der späteren ärztlichen Tätigkeit verwendet werden, selbst mitbringen müssen. Dies gilt beispielsweise für ein eigenes Stethoskop.

In den weiterführenden Kursen außerhalb der Universität werden neben komplexeren chirurgischen Instrumenten wie Hochleistungsbohrern auch menschliche Leichen verwendet. Ansonsten bieten das Erasmus Medical Center, die Universität Bielefeld und die Universität Bonn realistische Simulationen an, bei denen Schauspieler die Rolle der Patienten übernehmen. Auch das EMC SkillsLab arbeitet mit computergestützten Simulationen.

Themengebiete und Stationen

Die Themenbereiche legen fest, welche Inhalte und Kompetenzen in den einzelnen Veranstaltungen vermittelt werden sollen. So sollen den Studierenden der Medizinischen Fakultäten der Universitäten Bonn und Bielefeld in inhaltlich getrennten Veranstaltungen bzw. Kurstagen verschiedene Fachpraktiken grundlegend vermittelt werden, während die außeruniversitären Angebote ein bestimmtes Thema und die damit verbundenen Fertigkeiten sehr umfassend und fachlich fundiert behandeln.

Die Universität Bielefeld bietet, ähnlich wie die Universität Bonn, Lehrveranstaltungen in Modulen an. So werden Routineversorgungstechniken, Notfallversorgung und Patientenkommunikation geübt. Konkrete Themen sind zum Beispiel Fertigkeiten zu Kreislauf und Atmung, zum Urogenitalsystem, zum Stütz- und Bewegungsapparat und mehr. Darüber hinaus können die Studierenden selbstständig für die Abschlussprüfungen der Module üben, in denen sie die relevanten Fertigkeiten frei trainieren; Räume und Materialien werden zur Verfügung gestellt und von studentischen Tutoren betreut.

Die Universität Bonn bietet spezielle Kurse zu bestimmten Themen an. Der Grundkurs zur klinischen Notfalluntersuchung anhand des ABCDE-Schemas, ein Blockpraktikum zur Anästhesie und Peer-to-Peer-Kurse zu verschiedenen Themen wie Laparoskopie, Basismotorik, orthopädische Untersuchung, EKG-Kurs, Basic Life Support werden von praktizierenden Ärzten unterstützt.

Das Erasmus MC bietet auch verschiedene Kurse an, die sich vor allem an Ärzte und medizinisches Personal richten. Es werden sowohl realitätsnahe Routine als auch lebensbedrohliche Situationen simuliert und die Trainingsszenarien anschließend in einem Debriefing reflektiert. Zu den angebotenen Kursen gehören: Core Skills for Laparoscopic Surgery, Endoscopic Skills Training, Nerve Repair Techniques, Oncoplastic Breast Surgery, Micro Surgery, Arthroscopy und andere.

Das OPUS SkillsLab bietet Workshops zu den Themen Minimal Invasive Chirurgie Intensivkurs, Thoraxchirurgie Advanced Skills, Thoraxchirurgie Basic Skills, Bronchoskopie Basic Skills und Nahtkurs an. Für das Jahr 2023 sind jedoch neue Kurspremieren angekündigt, darunter Viszeralchirurgie Basic Skills, Difficult Airway Management, Klinische Anatomie und Invasive Skills in der Notfallmedizin.

Lernziele und Prüfung

Im Jahr 2011 hat der Ausschuss Praktische Fertigkeiten der Gesellschaft für Medizinische Ausbildung (GMA) einen Lernzielkatalog veröffentlicht, der zur Standardisierung der Integration praktischer Fertigkeiten in die Ausbildung der Medizinstudierenden beitragen und dazu dienen soll, „die praktischen Fertigkeiten im Medizinstudium zu definieren und damit den Fakultäten eine rationale Planungsgrundlage für die zur Vermittlung praktischer Fertigkeiten notwendigen Ressourcen zu geben.“ Konkret werden in diesem Lernzielkatalog 289 zu erlernende Fertigkeiten der

ärztlichen Berufsausübung definiert, die sich im Wesentlichen auf zwölf Organsysteme wie Herz-Kreislauf, Atmung oder Haut sowie vier weitere, eher fächerübergreifende Kompetenzbereiche verteilen. [41]
Darüber hinaus werden nicht-curriculare Kurse und Veranstaltungen angeboten, die zur Vertiefung verschiedener ärztlicher Fertigkeiten beitragen sollen. Von ihrem Charakter her sind diese SkillsLab-Veranstaltungen daher eher als Fort- oder Weiterbildungskurse zu verstehen. Da es sich um außercurriculare Veranstaltungen handelt, würden Studierende der Medizin oder anderer Gesundheitsstudiengänge (vorausgesetzt, sie dürfen teilnehmen) ohnehin keine direkten Credits erhalten. Für die Teilnahme an bestimmten Kursen werden jedoch manchmal Fortbildungs- und Zertifizierungspunkte gutgeschrieben.
Je nach Einbindung des SkillsLab in das Curriculum kann eine Prüfung angeschlossen werden, um den Lernerfolg der Studierenden zu überprüfen und ggf. Leistungspunkte zu vergeben. Dies ist jedoch nicht zwingend erforderlich und auch nicht standardisiert.

Fazit zum SkillsLab-Konzept
Das SkillsLab-Konzept ist eine sehr erfolgreiche Methode, um Studierende und medizinisches Personal stärker mit dem praktischen Teil ihrer Ausbildung und ihres späteren Berufslebens bzw. der jeweiligen Spezialisierung vertraut zu machen. Insbesondere in der medizinischen Ausbildung zeigt sich der enorme Nutzen, da die Studierenden durch realitätsnahe Modelle, Szenarien und Simulationen mit realen medizinischen Instrumenten und Verfahren eine sichere Qualifikationsumgebung genießen können, ohne Angst haben zu müssen, durch einen Fehler einem anderen Menschen zu schaden. Das SkillsLab-Konzept erweist sich auch in der Umsetzung als Weiterbildungsinstrument in Form von Fort- und Weiterbildungskursen und Workshops als besonders effektiv. Junge Ärzte können von erfahrenen Spezialisten ihres Faches unter genauer Anleitung und Supervision nicht nur Tipps und Tricks, sondern auch ein tieferes Verständnis für wesentliche praktische Fertigkeiten und spezielle Skills in der ärztlichen Berufsausübung erhalten.
Nach der Vorstellung der allgemeinen Ausbildung deutscher und internationaler SkillsLab-Angebote, wird im Folgenden das Siegener SkillsLab vorgestellt.

2.3.2 Beschreibung und Vorstellung des SkillsLab der Universität Siegen

Das SkillsLab der Lebenswissenschaftlichen Fakultät der Universität Siegen beinhaltet insgesamt zehn verschiedene Stationen, welche von Studierenden aus dem medizinischen und medizinnahen Bereich genutzt werden können.[2] Aus den zahlreichen möglichen Übungen, die an jeder Station theoretisch möglich sind, wird eine Auswahl für den Studiengang DBHS (Digital Biomedical and Health Sciences) angeboten. Im Folgenden wird jede Station zunächst kurz vorgestellt und anschließend werden die Lernziele aufgezählt, die diese Station vermitteln soll. Die nachfolgende Tabelle ('Abbildung 2.3.2') gibt eine Übersicht über alle Stationen und deren Lernziele.

[2]Diese Angabe bezieht sich auf den Zeitpunkt der Durchführung der ersten Evaluation. Das Siegener SkillsLab wird kontinuierlich ausgebaut und verbessert. Es werden neue Stationen angelegt und bestehende, um weitere Aufgaben und Übungen, erweitert.

Tabelle 2.1: SkillsLab – Übersicht über alle Stationen und deren Lernziele

Name der Station	**Zusammenfassung der Aufgaben**	**Lernziel**
Injektionsarm	- Durchführung einer muskulären Injektion - Legen einer Venenverweilkanüle	Der Studierende lernt den Ablauf einer intramuskulären Injektion und des Legens einer Venenverweilkanüle.
Abdomen	- Durchführung von Palpation, (Kratz-) Auskultation und Perkussion des Abdomens	Der Studierende ist in der Lage, den physiologischen Aufbau des Abdomens zu beschreiben und Pathologien mittels Palpation, (Kratz-)Auskultation und Perkussion zu erkennen.
Blasenkatheter	- Blasenkatheter bei Mann und Frau legen	Der Studierende ist in der Lage, einen Blasenkatheter bei Mann und Frau zu legen und wieder zu entfernen.
Reanimation	- Durchführung einer Reanimation	Der Studierende kann beurteilen, wann eine Reanimation notwendig ist und kann diese korrekt durchführen.
Prostata	- Durchführung einer rektalen Untersuchung	Der Studierende kennt den richtigen Ablauf einer rektalen Untersuchung und ist in der Lage, diese durchzuführen und dabei verschiedene Pathologien der Prostata zu erkennen.
Auge und Ohr	- Durchführung einer Otoskopie - Durchführung einer Ophtalmoskopie	Der Studierende kann eine Otoskopie und Ophtalmoskopie korrekt durchführen und pathologische Veränderungen in Auge und Ohr erkennen.
Weibliche Brust	- Inspektion und Abtasten der Brust	Der Studierende ist in der Lage, die weibliche Brust korrekt abzutasten, Unregelmäßigkeiten zu erkennen und eventuelle Pathologien zu benennen.
Weibliches Becken	- Weibliches Becken abtasten	Der Studierende kann das weibliche Becken abtasten und Pathologien benennen.
Auskultation	- Auskultation des Herzens, der Lunge und des Abdomens	Der Studierende kann Herz, Lunge und Abdomen richtig auskultieren und dabei gesunde Sounds von pathologischen unterscheiden.
Nähen und Knoten	- Donati Heft-Naht - Intra-Subkutan Naht - Instrumentenknoten - Mittelfinger-Knoten	Der Studierende kann die Donati Heft-Naht, die Intra-Subkutan Naht sowie Instrumentenknoten und Mittelfinger-Knoten korrekt ausführen.
Sonographie	- Durchführung einer Sonographie	Der Studierende kann eine Sonographie durchführen und kann Pathologien beschreiben.
Arterienpunktion	- Durchführung einer Arterienpunktion	Der Studierende ist in der Lage, eine Arterienpunktion korrekt durchzuführen.
Arzt-Patienten-Gespräch	- Durchführung eines Arzt-Patienten-Gesprächs	Der Studierende kennt die Inhalte und den Ablauf eines Arzt-Patienten-Gesprächs.

Transurethraler Harnblasenkatheter

Die Station „Transurethraler Harnblasenkatheter“ dient dazu, dem Lernenden den korrekten Umgang mit einem Blasenkatheter zu vermitteln (vgl. ’Abbildung 2.12’). Die Durchführung wird an zwei Unterleibsphantomen (männlich und weiblich) trainiert. Die Trainingsziele sind die korrekte Einführung und Entfernung des Katheters, die richtige Anwendung von Gleitgel bei Männern, die Einhaltung von hygienischer Standards bei der Katheterisierung und die Arzt-Patienten-Kommunikation. In der Regel werden Einwegprodukte, wie Katheter, Tupfer und Spritzen mehrfach verwendet, um nicht unnötig viel Material zu verschwenden. Dennoch entsteht ein hoher Materialverbrauch.

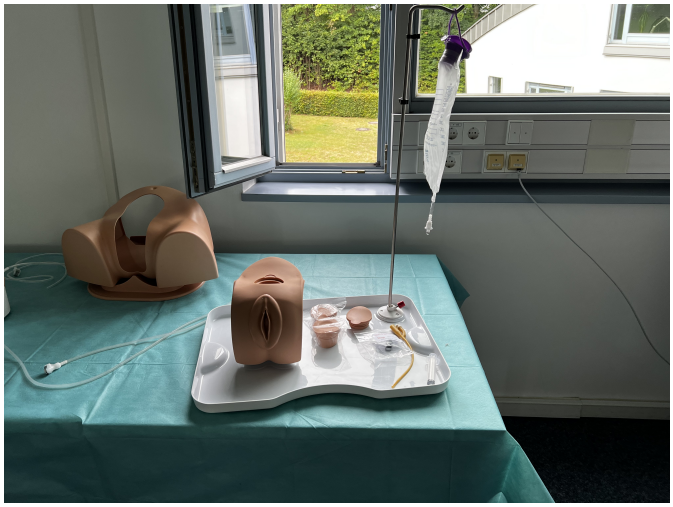


Abbildung 2.12: SkillsLab Station – Transurethraler Harnblasenkatheter

Injektionsarm

Die Arbeit mit dem Injektionsarm vermittelt die korrekte Durchführung einer i.v.-Injektion in einen zentralen Venenkatheter (ZVK), sowie die anschließende Blutentnahme aus diesem (vgl. ’Abbildung 2.13’). Des Weiteren kann an dieser Station zunächst die Palpation einer Vene (oftmals auf dem Handrücken) und die anschließende Punktion der Vene mit der Anlage eines venösen Zugangs geübt werden. Neben der Arbeit mit Venen kann die Verabreichung einer Impfung in den Oberarm trainiert werden. Die wichtigsten Lernziele sind die Vermittlung der korrekten Handlungsabläufe in der richtigen Reihenfolge und die Arbeit mit sterilem Material. Die Verwendung der „Vasofix Safety Kanüle ®“ hat den Vorteil, dass das Verletzungsrisiko durch die Sicherung der Nadelspitze nach dem Herausziehen minimiert wird. Der Nachteil besteht darin, dass jede Nadelspitze nur einmal verwendet werden kann und somit für jede Durchführung ein Katheter erforderlich ist.

Abbildung 2.13: SkillsLab Station – Injektionsarm

Freies Auskultieren des Herzens (Simulator SAM)

Das Auskultationstraining besteht aus dem Simulator (SAM), welcher durch seine eingebauten Lautsprecher Herztöne an unterschiedlichen Punkten simulieren kann. Ebenso können Nebengeräusche (systolische und diastolische) eingespielt werden. Lernende erlernen den korrekten Umgang mit dem Stethoskop, sowie die Orientierung am menschlichen Körper anhand von Landmarken (vgl. 'Abbildung 2.14'). Der Trainer ist mit seinen Anschaffungskosten von ca. 25.000 Euro sehr teuer und demnach nur in begrenzter Stückzahl im SkillsLab vertreten. Dadurch kann es zu Wartezeiten kommen, da sich Studierende abwechseln und nur nach einander Trainieren können. [47]

Abbildung 2.14: SkillsLab Station – Freies Auskultieren des Herzens (Simulator SAM)

Tastuntersuchung der Brust

Das richtige Abtasten ist der Schlüssel zur Früherkennung von Brustkrebs. Dazu dient diese SkillsLab Station und unterrichtet, neben der Orientierung am weiblichen Oberkörper, die Erkennung und Unterscheidung von Zysten und Knoten in der weiblichen Brust (vgl. 'Abbildung 2.15'). Als Anschauungsmaterial dient hierzu ein Modell einer weiblichen Brust, welches sich ein Teilnehmer anlegen kann. Andere Lernende können nun an diesem die Abtastung erlernen. Durch verschiedene Einsätze können innere Strukturen wie Knoten, Tumore und Zysten dargestellt werden.

Abbildung 2.15: SkillsLab Station – Tastuntersuchung der Brust

Klinische Abdomen Untersuchung

Eine Abdomenuntersuchung liefert im klinischen Alltag oft wesentliche differentialdiagnostische Rückschlüsse, weswegen sie eine hohe Priorität in der Lehre hat. Die Aufgabengebiete an dieser Station bestehen aus Auffinden und Erkennen von anatomischen Landmarken, Abtasten (Palpation der Organe), Abklopfen (Perkussion der Oberfläche) und Abhören (Auskultation des Gewebes) (vgl. 'Abbildung 2.16'). Ziel ist die Identifizierung von pathologischen Veränderungen bei Aorta, Blase, Leber, Milz, Niere und die Erkennung von festen und weichen Gewebewiderständen.

Abbildung 2.16: SkillsLab Station – Klinische Abdomen Untersuchung

Klinische Ohruntersuchung

Das Vorgehen bei der klinische Ohruntersuchung, sowie die korrekte Handhabung der dafür erforderlichen Instrumente wie dem Otoskop vermittelt diese Station (vgl. 'Abbildung 2.17'). Modelle von geschädigten Ohren vermitteln den Unterschied zwischen dem Normalzustand und zeigen typische Veränderungen bei Krankheiten wie Entzündungen oder Schäden am Trommelfell. Außerdem können Fremdkörper und deren Entfernung simuliert werden. Außerdem wird der korrekte Umgang mit dem Otoskop erlernt.

Abbildung 2.17: SkillsLab Station – Klinische Ohruntersuchung

Klinische Augenuntersuchung

Die klinische Augenuntersuchungsstation hat als Lernziele die korrekte Handhabung des Ophthalmoskops, die Beurteilung der Netzhaut im Hinblick auf Veränderungen und Krankheiten, sowie die Bewertung dieser Fälle (vgl. 'Abbildung 2.18'). Krankheiten wie Diabetes, Blutungen oder Entzündungen können simuliert und vom Normalzustand abgegrenzt werden. Darüber hinaus soll der standardisierte Pupillarreflex-Test geübt und die Handhabung und Funktion des Ophthalmoskops erlernt werden.

Abbildung 2.18: SkillsLab Station – Klinische Augenuntersuchung

Weibliches Becken

Bei dieser Station soll der Lernende das weibliche Becken durch Abtasten untersuchen (vgl. 'Abbildung 2.19'). Durch verschiedene Einsätze können anatomische Strukturen ertastet werden, wie z.B. der Unterschied zwischen einer schwangeren und einer nicht schwangeren Frau. Ebenso soll der Unterschied zwischen einem Fötus und einer anderen krankhaften Veränderung (z.B. Karzinom) vermittelt werden. Der adäquate Umgang mit der Patientin und die Kommunikation der eigenen Handlungen und Befunde stehen ebenso im Vordergrund wie die eigentliche Diagnostik.

Abbildung 2.19: SkillsLab Station – Weibliches Becken

Tastuntersuchung der Prostata

Diese Station besteht aus einem Modell des männlichen Unterleibs und dient der rektalen Untersuchung von Anus, Rektum und Prostata (vgl. 'Abbildung 2.20'). Die Wände und die Prostata werden nach Veränderungen abgetastet bzw. mit dem Normalzustand verglichen. Die Lernenden lernen die verschiedenen Formen und Veränderungen in Bezug auf Größe und Rundung sowie Hinweise auf mögliche Knotenbildung kennen. Der richtige Umgang mit Gleitmittel und die Kommunikation zwischen Arzt und Patient stehen auch bei dieser Station im Vordergrund.

Abbildung 2.20: SkillsLab Station – Tastuntersuchung der Prostata

Kapitel 3

State of the Art

Das Kapitel beginnt mit einer Einordnung und Erläuterung der Veröffentlichungen, die im Verlauf dieser Dissertation publiziert wurden. Der jeweilige Erkenntnisgewinn und Einfluss auf die Arbeit wird kurz herausgestellt und ein zeitlicher Verlauf kann abgelesen werden. Eine Übersicht und der zeitliche Ablauf sind in '3.1 Eigene Publikationen' im Anhang dargestellt.
Daraufhin folgt eine Darstellung der gängigen Anwendungen, Methoden und Technologien in den Bereichen Augmented Reality und haptischem Feedback, die dem Stand der Technik entsprechen. Neben kommerziell erhältlichen Lösungen für Industrie und Konsumenten wird auch auf konkrete medizinische Anwendungen eingegangen. Besonderer Fokus liegt auf den Anwendungen, die schon heute haptisches Feedback liefern. Bestehende Lösungen werden folgend miteinander verglichen und ihre Eignung für den Einsatz sowohl im Medizinstudium, als auch im therapeutischen Alltag untersucht. Außerdem wird kommerzielle Hardware vorgestellt, die von diesen Technologien Gebrauch macht. Die Geräte werden verglichen und ihre jeweiligen Besonderheiten sowie Vor- und Nachteile verglichen. Diese werden immer am Ende der Unterkapitel in tabellarischer Form zusammengefasst.

3.1 Eigene Publikationen

Im nun folgenden Kapitel werden meine eigenen Publikationen inhaltlich zusammengefasst und in Bezug zueinander gesetzt. Die Veröffentlichungen beginnen 2019 und reichen bis zur Fertigstellung dieser Arbeit Ende 2023. Es werden sowohl Veröffentlichungen berücksichtigt, bei denen der Autor dieser Arbeit selbst der Erstautor ist, d.h. inhaltlich die meiste Forschung geleistet hat (z.B. Forschungen mit dem Bezug zum SkillsLab, haptischen Handschuhen oder Augmented Reality), Veröffentlichungen, bei denen die konzeptionelle Leitung und Betreuung im Vordergrund stand, die Hauptarbeit von jemand anderem geleistet wurde (z.B. Veröffentlichungen aus den Ergebnissen von Abschlussarbeiten), als auch Publikationen, bei denen mitgearbeitet wurde.
Der zeitliche Verlauf der Konferenzen, bei denen die Ergebnisse dieser Arbeit publiziert wurden ist in 'Abbildung 9.1' dargestellt. Die X-Achse repräsentiert einen Zeitstrahl und auf der Y-Achse sind die jeweiligen Konferenzen eingetragen, auf denen mindestens ein wissenschaftliches Paper angenommen wurde.

SkillsLab+ – Proof of Concept for Medical Augmented Reality Teaching Application with Haptic Feedback (in progress), IEEE TLT 2024
C. Gießer, J. Schmitt, M. Limbach, J. Otterbach and R. Brück.
Dies ist ein Journal Paper für die IEEE Transactions on Learning Technologies (IEEE TLT) und baut auf der gleichnamigen Publikation der IEEE Educon 2023 auf. Die Autoren wurden explizit eingeladen, an dieser Publikation und ihrer Erweiterung zu arbeiten.

Virtual and Augmented Reality for Digital Medicine – Design and Implementation of a Hybrid, Interdisciplinary Course for Engineering and Medical Students (in progress), IEEE TLT 2024
T. J. Eiler, V. Schmücker, C. Gießer and R. Brück.
Dies ist ein Journal Paper für die IEEE Transactions on Learning Technologies (IEEE TLT) und baut auf der gleichnamigen Publikation der IEEE Educon 2023 auf. Die Autoren wurden explizit eingeladen, an dieser Publikation und ihrer Erweiterung zu arbeiten.

Evaluation of MetaHumans as Digital Tutors in Augmented Reality in Medical Training [48], DGBMT in Duisburg, September 2023
C. Gießer, M. Ebrahimi Pour, J. Schmitt, R. Brück.
Die Digitalisierung der medizinischen Ausbildung hat in den letzten Jahren zunehmend an Unterstützung gewonnen. Eine der Möglichkeiten ist der Einsatz von Augmented Reality, um konventionelle Methoden in der medizinischen Ausbildung zu ergänzen oder zu ersetzen und eine effizientere Lernumgebung für Medizinstudierende und angehende Fachkräfte im Gesundheitswesen zu schaffen. In dieser Veröffentlichung wird ein Digitaler Tutor in Augmented Reality in der medizinischen Ausbildung evaluiert, um herauszufinden, ob er einen Mehrwert gegenüber konventionellen Lern- und Lehrmethoden bietet. Zu diesem Zweck wurde eine Anwendung für die medizinische Ausbildung erstellt und eine Nutzerbefragung mit 24 Studierender der Fakultät für Lebenswissenschaften der Universität von Siegen durchgeführt. Die verwendete Anwendung hatte zwei Versionen. Eine Version enthielt den digitalen Tutor, der die Anweisungen mündlich gab, und die andere Version enthielt ein Textfeld mit schriftlichen Anweisungen. Die Studierenden bewerteten beide Anwendungen mit Hilfe eines Fragebogens.
Erkenntnisgewinn: Aus den Ergebnissen geht hervor, dass der digitale Tutor im Vergleich zum Textkasten einen Mehrwert bietet. In Zukunft sollte die Interaktivität des digitalen Tutors mit den Studierenden verbessert und eine größere Studie durchgeführt werden, um dieses Ergebnis weiter zu validieren.

SkillsLab+ — Digitization of the Otoscopy Station through State of the Art Methods of Augmented Reality [49], DGBMT in Duisburg, September 2023
C. Gießer, A. Karunairatnam, J. Schmitt, R. Brück.
Die Otoskopie-Station, eine der Stationen in SkillsLab+, ermöglicht es den Studierenden, die korrekte Verwendung von Otoskops zu erlernen und Fallunterscheidungen zu treffen. Die Digitalisierung dieser Station bietet mehrere Vorteile gegenüber herkömmlichen Lehrmethoden. Anatomisch korrekte Modelle und 3D-Modelle von Diagnoseinstrumenten sorgen für die nötige Realitätsnähe und Präzision der Anwendung. Lern- und Prüfungsmodi wurden in die Anwendung integriert, um die Lernerfahrung zu verbessern. Die Evaluierung der Anwendung erfolgte anhand eines Fragebogens, der von 79 Bachelor- und Masterstudierenden der Medizinischen Informatik und der Digitalen Biomedizin und Gesundheitswissenschaften ausgefüllt wurde.
Im Durchschnitt äußerten sich 54,25% der Studierenden positiv über die digitale Otoskopie-Station in der SkillsLab+ Anwendung, während 22,71% eine negative Antwort gaben. Die Ergebnisse des Fragebogens deuten darauf hin, dass die Digitalisierung der Otoskopie-Station durch Augmented Reality in der SkillsLab+ Anwendung von den Studierenden gut angenommen wurde.
Erkenntnisgewinn: Die SkillsLab+ Anwendung digitalisiert den praktischen SkillsLab Kurs und bietet mehrere Vorteile gegenüber traditionellen Lehrmethoden. Sie bietet den Studierenden ein digitales Werkzeug zum Erlernen und Anwenden praktischer Handgriffe, Erstbehandlungen und diagnostischer Techniken. Die Evaluierung der Anwendung mit Hilfe eines Fragebogens zeigte, dass die Anwendung von den Studierenden gut angenommen wurde.

Conception of a Native Connection of Data Gloves with Haptic Feedback to an Augmented Reality-Headset with a planned evaluation in a medical use case [50], DGBMT in Duisburg, September 2023

C. Gießer, J. Schmitt, V. Schmücker, T.J. Eiler, V. Braun, R. Brück.

Die Integration von Datenhandschuhen in Augmented Reality-Der Einsatz von Anwendungen für die medizinische Ausbildung mit haptischem Feedback erhöht die Immersion und den Realismus. Dies ermöglicht eine bessere und intuitivere Steuerung, verbessert das Lernen und die Prüfungsvorbereitung und ermöglicht auch das Selbststudium zu Hause ohne physische Modelle oder Anwesenheit. Eine nahtlose Integration und Vernetzung der Geräte ist dabei entscheidend. Diese Arbeit zielt darauf ab, die native Integration zwischen einem Augmented Reality Headset und einem Paar Datenhandschuhe zu demonstrieren. In Zukunft wird der Einsatz von AR und Datenhandschuhen in der Medizin weiter zunehmen und der technologische Fortschritt wird noch realistischere und immersivere Lernmöglichkeiten schaffen.

Erkenntnisgewinn: Die Integration von Datenhandschuhen in AR-Anwendungen bietet viele Vorteile. Eine drahtlose Verbindung verbessert den Benutzerkomfort und kann zukünftige Anwendungen für eine unerfahrene Gruppe zugänglicher machen.

Conception And Implementation of an virtual Reality application for the evaluation of different types of commercially available haptic gloves [51], DGBMT in Duisburg, September 2023

V. Schmücker, F. Grensing, R. Jakob, C. Gießer, R. Brück, T. J. Eiler.

Immersion und Präsenz sind wichtige Aspekte der virtuellen Realität. Daher werden Anstrengungen unternommen, diese Effekte zu verstärken, um die Wirkung von VR und ihre Übertragbarkeit auf die Realität zu erhöhen. Dies ist besonders wichtig in Forschungsbereichen wie der medizinischen Ausbildung. Datenhandschuhe mit haptischem Feedback ermöglichen es virtuelle Objekte greifbar zu machen. Das Forschungsfeld ist jedoch noch sehr jung und die Handhabung und Wirkung noch nicht ausreichend erforscht. Aus diesem Grund wurde eine Anwendung entwickelt, um verschiedene haptische Datenhandschuhe mit unterschiedlichen haptischen Technologien zu vergleichen. Ein Handschuh mit vibrotaktilem Feedback (Manus Prime X Haptic VR vgl. 'Abbildung 3.13') und ein Handschuh mit zusätzlichem Kraftfeedback (SenseGlove vgl. 'Abbildung 3.16') wurden eingesetzt und in verschiedenen Aufgaben verglichen. Dazu gehören Fingertracking und Gestenerkennung sowie Handtracking und das Verhalten des Handschuhs beim Greifen von Objekten mit und ohne Haptik. Ziel ist es herauszufinden, wie gut die Haptik integriert werden konnte und was von den Probanden besser akzeptiert wird.

Erkenntnisgewinn: Haptische Datenhandschuhe verbessern das Immersionsempfinden in der virtuellen Realität. Unterschiedliche haptische Eindrücke wirken sich je nach Anwendung immersionssteigernd aus.

SkillsLab+ – Proof of Concept for Medical Augmented Reality Teaching Application with Haptic Feedback [52], IEEE Educon in Kuwait 2023

C. Gießer, J. Schmitt, M. Limbach, J. Otterbach and R. Brück.

In dieser Veröffentlichung wurden die Ergebnisse der Proof of Concept-Studie mit dem Demonstrator des SkillsLab+ zusammengefasst und veröffentlicht. Im August 2022 fand eine freiwillige Evaluation statt, bei der die Studierenden einen digitalen Fragebogen mittels QR-Code-Scan mit ihrem Smartphone ausfüllen konnten. Diese Machbarkeitsstudie untersucht die Integration von virtuellen Augmented Reality-Elementen und haptischem Feedback in das SkillsLab. In einer Folgestudie wird der potenzielle Mehrwert in Bezug auf Lernerfolg und Motivation evaluiert. Ziel des SkillsLab+ ist es, Studierenden die Möglichkeit zu geben, sich vor dem Präsenzunterricht mit den Handlungsabläufen vertraut zu machen und durch zusätzliche Elemente mehr Informationen als anatomisch korrekte Modelle zu gewinnen. Die Studie ist Teil der Evaluation des ersten Demonstrators und wird im Kapitel '6.1.1 Methodik der ersten Evaluation des Demonstrators' genauer beschrieben. Dieses Paper gewann auf der IEEE Educon in Kuwait den **Best Paper**

Award in der Kategorie „Serious Games, Game-Based Learning and Gamification for Engineering Education“ [53].
Erkenntnisgewinn: Mit dieser Publikation konnte gezeigt werden, dass die Digitalisierung eines praktischen Medizin-Kurses mit aktuellen Methoden der Augmented Reality möglich ist.

Virtual and Augmented Reality for Digital Medicine – Design and Implementation of a Hybrid, Interdisciplinary Course for Engineering and Medical Students [54], IEEE Educon in Kuwait 2023
T. J. Eiler, V. Schmücker, C. Gießer and R. Brück.
Während der Corona-Pandemie waren praktische Programmierkurse in Präsenz nicht in der Form umsetzbar, wie es in den Jahren zuvor Durchgeführt wurde. Ein Hybridmodell mit minimierter Kontaktzeit wurde im Verlauf dieser Publikation entworfen, um Methoden, Inhalte und Kompetenzen der Medizininformatik und einfache Programmiererfahrungen einer heterogenen Gruppe, bestehend aus DBHS Studierenden der Universität Siegen und Medizin Studierenden aus Rotterdam, zugänglich zu machen. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Trennung von theoretischem Wissen, das über Distanzunterricht vermittelt wird, und praktischen Übungen, die vor Ort durchgeführt werden, erfolgversprechend ist. Während der Umsetzung entstand die Anwendung *SARA – Simulation in Augmented Reality for Auscultation*, ein virtueller Auskultationstrainer. Die Ergebnisse dieser Implementierung bildeten die Grundlage für die virtuelle Auskultationsstation im SkillsLab+.
Erkenntnisgewinn: Die Digitalisierung und Durchführung eines Hybridkurses zur Vermittlung von Programmierkenntnissen und medizininformatischen Inhalten ist in einem angepassten Modell auch während einer Pandemie möglich. Distanzlehre ist ein gutes Mittel, um grundlegende Informatikkenntnisse zu vermitteln.

Augmented Reality Application for Simulation of Mamma Palpation [55], DGBMT, Innsbruck, September 2022
A. Steiger, S. Burbach, T. Eiler, V. Schmücker, C. Gießer.
Diese Veröffentlichung entstand aus der Abschlussarbeit von Annika Steiger. In diesem Beitrag wird eine Möglichkeit zur Schulung der Mamma Palpation vorgestellt, die Studierenden das Vorgehen und die Erkennung von möglichen Tumoren vermittelt. Durch virtuell eingeblendete Punkte, die mithilfe eines AR-Headsets auf die zu untersuchende Brust eingeblendet werden, werden die abzutastenden Stellen angezeigt, ohne dabei von der Palpation abzulenken. Leitfaden gestützte Interviews im Nachgang zu der Unterrichtseinheit konnten einen gesteigerten Lernerfolg belegen.
Erkenntnisgewinn: Ein gesteigerter Lernerfolg einer AR-Anwendung konnte in einer medizinischen Lehranwendung im Vergleich zum konventionellen Training gezeigt werden.

Suitability Testing of the LucidGloves Prototype 4 for Extended Reality Medical Teaching [56], DGBMT, Innsbruck, September 2022
S. Burbach, A. Steiger, C. Gießer.
Für Augmented Reality in der Medizin, speziell der Medizinlehre gibt es bereits einige Beispielanwendungen, doch ihre Anwendung ist im Vergleich zu physischen Modellen begrenzt. Ein Grund dafür ist das Fehlen von haptischem Feedback, wodruch die immersive Erfahrung eingeschränkt ist, da virtuelle Objekte nicht wirklich berührt und somit nicht direkt mit ihnen interagiert werden kann. Es gibt zwar Simulationsgeräte, welche eine gewisse Form von haptischem Feedback in einem speziellen Anwendungsbereich bieten. Im Gegensatz dazu verfolgen Handschuhe mit haptischem Feedback einen eher generellen/allgemeineren Ansatz. Aufgrund ihrer hohen Anschaffungskosten sind sie oft nur für den Einsatz in Unternehmen geeignet und nicht für jedermann erhältlich. Deshalb hat „Lucas VRTech“ die „LucidGloves ®“ entwickelt, um einen weit verbreiteten Einsatz von günstigen haptischen Handschuhen zu ermöglichen. In dieser Veröffentlichung, welche aus der Bachelorarbeit von Simon Burbach entstand, wird anhand von Experteninterviews mit vier Ärzten geprüft, ob der nachgebaute „Prototyp 4 der LucidGloves ®“ für den Einsatz in der medizinischen Lehre, speziell in Verbindung mit Augmented Reality, geeignet ist.

Erkenntnisgewinn: Datenhandschuhe mit haptischem Feedback könnten für die Positionserkennung auf externe Positionserkennungsmethoden angewiesen sein. Die verbreiteten „Vive Tracker ®“ eigenen sich hierzu nicht, da ihre Integration in die Unreal Engine die Verwendung von SteamVR vorraussetzt und sich dieses Plugin mit der Verwendung der Magic Leap ausschließt.

Internship Digital Medicine-Biomedical Sensors for Medical Computer Scientists (Abstract) [57], DGBMT in Innsbruck, September 2022

C. Gießer, N. Dörner.

Das Praktikum „Digitale Medizin-Biomedizinische Sensorik“ befasst sich mit Schaltungstechnik, der Programmierung, Signalen von Mikrocontrollern, sowie der Messung und Verarbeitung von Signalen. Für diesen Kurs sollten die Studierenden Grundkenntnisse in Informatik, Medizin und Elektrotechnik verinnerlicht haben. Das Praktikum wurde mit dem Umzug des Studiengangs von der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät der Universität Siegen (Fakultät IV) in die neu gegründete Lebenswissenschaftliche Fakultät (Fakultät V) durch die Abschlussarbeit von Niklas Dörner auf ein neues, angepasstes Kurskonzept umgestellt. In der bisherigen Ausrichtung richtete sich das Praktikum nur an Medizininformatiker mit einem hohen Hintergrundwissen in Informatik. Nun ist der Kurs primär für Studierende des Studiengangs DBHS – Digital Biomedical and Health Sciences mit Schwerpunkt Digital Medical Technology (DMT) der neuen Fakultät V konzipiert. Durch die Reduzierung des theoretischen Informatikanteils und die Erweiterung auf die relativ einfache Plattform „Arduino“ konnten auch Nicht-Informatiker die Aufgaben gut bewältigen.

Erkenntnisgewinn: Themen der Medizininformatik können einem weniger technisch vorgebildeten Publikum in vereinfachter Form präsentiert werden, indem die Komplexität reduziert und der Anwendungsfall greifbarer gemacht wird.

Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) in medical applications – an overview (Abstract) [58], 73. Jahrestagung der DGNC in Köln, Mai 2022

C. Gießer, V. Braun, R. Brück, T. Eiler, V. Schmücker.

Diese Veröffentlichung dient dazu, einen Überblick über die aktuellen Forschungsgebiete der interdisziplinären Forschungsgruppe um Professor Brück und Professor Braun und deren Entwicklungen im Bereich AR- und VR-Tools für die Ausbildung und Behandlung im medizinischen Bereich zu geben. Die XR-Anwendungen wurden für medizinische, therapeutische und psychologische Zwecke entwickelt und reichen von einem VR-Trainer für die chirurgische Händedesinfektion bis hin zu AR-Tools, mit denen die Auskultation von Lunge und Herz, das dem bekannten SAM-Skillslab-Trainer ähnelt, trainiert werden können. Die aktuellen Anwendungen helfen Studierenden, Patienten und Ärzten, den Trainings- und Therapieerfolg zu steigern, die Angst vor Behandlungen und Eingriffen abzubauen und deren Akzeptanz zu steigern. Kostenintensive SkillsLab-Modelle könnten durch kostengünstigere virtuelle Modelle ersetzt werden. In naher Zukunft ist die Einführung von chirurgischen Trainingsinstrumenten, die neurochirurgische Ansätze und Techniken simulieren, zu erwarten.

Erkenntnisgewinn: Der aktuelle Stand von AR und VR in der Medizin ist bereits heute gut fortgeschritten und zukünftige Mediziner müssen mit dieser jungen Technologie umgehen lernen, sodass diese erfolgreich in ihren Arbeitsalltag integriert werden kann.

Virtual Reality Training Application to Prepare Medical Student's for Their First Operating Room Experience [59], IEEE AIVR in Taichung (Taiwan), November 2021

A. Grünewald, R. Schmidt, L. Sayn. C. Gießer, T. Eiler, V. Schmücker, V. Braun, R. Brück.

Medizinstudierende sind oft überwältigt, wenn es darum geht zum ersten Mal einen Operationssaal (OP) zu betreten. Um die Ängste der Studierenden zu verringern und sie auf den Besuch vorzubereiten, wird in diesem Beitrag eine Virtual Reality-Anwendung vorgestellt, die die traditionelle Ausbildung um ein virtuelles Training ergänzt.

In dieser Anwendung gehen Medizinstudierende virtuell durch die verschiedenen Schritte der OP-Vorbereitung (Anlegen der OP-Kleidung, Durchführen einer chirurgischen Händedesinfektion) und betreten im Anschluss daran einen virtuellen Operationssaal. In diesem OP müssen sie sich aufhalten, ohne sich zu kontaminieren und Fragen zur Operationsvorbereitung beantworten. Das hybride Kursformat wurde in einer kleinen Pilotstudie mit fünf Medizinstudierenden sehr positiv bewertet und die Studierenden gaben an, dass sie sich nun besser auf ihren nächsten OP-Besuch vorbereitet fühlten.
Erkenntnisgewinn: Die Vorbereitung komplexer medizinischer Aufgaben kann, dank des streng algorithmischen Aufbaus in Virtual Reality bereits vorab trainiert werden und Studierende erzielen bessere Ergebnisse und fühlen sich nach einem solchen Training besser vorbereitet. Haptisches Feedback erfolgt in dieser Anwendung durch die Arbeit an den eigenen Händen.

Improving the Approach-Avoidance Task in Virtual Reality Through Presence and Virtual Risk Situations [60], IEEE AIVR in Taichung (Taiwan), November 2021
T. Eiler, V. Schmücker, B. Haßler, Alla Muchalska, A. Grünewald, T. Klucken, C. Gießer, R. Brück.
Die automatische Neigung zur Annäherung an alkohol- und rauchbezogene Reize wird mit Suchtverhalten in Verbindung gebracht. Die Annäherungs-Vermeidungs-Aufgabe (Approach-Avoidance Task, AAT) wurde verwendet, um diese Neigungen zu verändern, aber die Trainingseffekte sind gering und uneinheitlich. Die Autoren entwickelten und bewerteten eine VR-AAT, um die Wirksamkeit des Trainings zu verbessern, und die Ergebnisse zeigten, dass es das tägliche Rauchen reduzierte. Um die Wirkmechanismen der Approach Bias Modification (ABM) zu untersuchen, entwickelten die Autoren eine Erweiterung für ihre VR-AAT-Anwendung in Form einer virtuellen Bar, einer Risikosituation in Bezug auf Alkohol- und Zigarettenkonsum. Der Artikel beschreibt das Konzept, die Implementierung und das geplante Studiendesign für diese Erweiterung.
Erkenntnisgewinn: Methoden der Virtual Reality können dazu genutzt werden psychologische Behandlungsverfahren mit moderner Technologie neu abzubilden. Die Ausgangslange, in diesem Fall eine Bar, lässt sich virtuell repräsentieren und die gleichen Bedingungen gelten für den virtuellen Simulator, wie für das physische Vorbild.

Customizable Memory Training in Virtual Reality with Personal Memoirs [61], IEEE AIVR in Taichung (Taiwan), November 2021
V. Schmücker, T. Eiler, A. Grünewald, S. Forstmeier, F. Grensing, C. Gießer, R. Brück.
Der Artikel beschreibt die Entwicklung einer Virtual Reality-Anwendung, die personalisierte Lernumgebungen und persönliche Erinnerungen nutzt, um altersbedingte Unterschiede beim Gedächtnistraining auszugleichen, und die in einer kleinen Usability-Studie positive Ergebnisse in Bezug auf Design, Benutzerfreundlichkeit und Wohlbefinden zeigte.
Erkenntnisgewinn: Personalisierende Elemente können den Nutzen und die Akzeptanz virtueller Umgebungen steigern.

Training Application for Ostomy Patients in Virtual Reality [62], IEEE AIVR in Taichung (Taiwan), November 2021
F. Grensing, A. Grünewald, T. Eiler, V. Schmücker, C. Gießer, R. Brück.
Der Artikel zeigt die Entwicklung einer Virtual Reality-Trainingsanwendung für Patienten, die sich aufgrund von Darmkrebs einer Stomaoperation unterziehen müssen. Die Anwendung soll den Patienten helfen, die notwendigen Schritte der Stomapflege zu erlernen und Ängste abzubauen. Die Machbarkeitsstudie, die mit den Nutzern durchgeführt wurde, ergab positive Ergebnisse, und es ist eine größere Langzeitstudie geplant, um die Wirksamkeit der Anwendung zu ermitteln.
Erkenntnisgewinn: Virtuelle Trainingsanwendungen können auf die reale Situation vorbereiten und das Lernszenario in einer sicheren und stressfreien Umgebung abbilden.

SkillsLab+ – Augmented Reality Enhanced Medical Training [16], IEEE AIVR in Taichung (Taiwan), November 2021

C. Gießer, J. Knode, A. Grünewald, T. Eiler, V. Schmücker, R. Brück.

Als erste Veröffentlichung, mit direktem Bezug zu dieser Dissertation entstand diese Veröffentlichung aus der Bachelorarbeit von Julian Knode. Hier wird erstmals das SkillsLab+ vorgestellt. Das Ziel dieses Projekts ist die Digitalisierung des Medizinstudiums voranzubringen und vor allem praktische Elemente des Studiums durch virtuelle Elemente der Augmented Reality zu erweitern. Zusätzliche Informationen, Bilder und Anleitungen werden direkt in das Blickfeld der Lernenden projiziert und diese erlernen den sinnvollen Umgang dieser neuen Technologie und wie sie sinnvoll zur Schulung eingesetzt werden kann. Weiterhin werden so Impulse gegeben, wie die Technologie sinnvoll in den Arbeitsalltag integriert werden kann.

Erkenntnisgewinn: Durch den Einsatz und die Implementierung eines digitalen SkillsLab kann jede Station virtuell nachgebildet werden (dargestellt am Beispiel der Station Oberarm), so dass einzelne Aufgaben (in diesem Beispiel die Injektion in den Oberarm) ohne physisches Material durchgeführt werden können. Dieses Training kann zur Vorbereitung auf das reale Training oder als Ersatz, z.B. während einer Pandemie, genutzt werden, wenn eine physische Durchführung nicht möglich ist.

EIT-based Gesture Recognition Training with Augmented Reality [63, 64], IEEE AIVR in Taichung (Taiwan), November 2021

C. Gießer, C. Gibas, A. Grünewald, T. Eiler, V. Schmücker, R. Brück.

Die elektrische Impedanztomographie (EIT), kombiniert mit Methoden der Künstlichen Intelligenz (KI), eignet sich zur Erkennung von Gesten, die zur Steuerung von Prothesen für körperbehinderte Menschen verwendet werden kann. In dieser Arbeit wird Augmented Reality zur Visualisierung dieser erkannten Gesten verwendet, so dass ein neuronales Netz mit EIT-Daten trainiert werden kann. Anwender sollen die durch das System erkannte Geste mit der tatsächlich durchgeführten Geste vergleichen und eine Rückmeldung geben. Ziel ist es, eine KI zu schaffen, die möglichst allgemein und personenunabhängig Erkennungen durchführen kann. Personenspezifische Unterschiede sollen automatisch erkannt und durch einen Kalibrierungsprozess kompensiert werden. Der Einsatz von Augmented Reality hilft, den KI-basierten Trainingsprozess auf der Basis von EIT-Daten zu verbessern, da er direkt in sein Sichtfeld die nachzuahmende Geste eingeblendet bekommt.

Erkenntnisgewinn: Augmented Reality kann dazu verwendet werden, dem/der Nutzer Handlungsabläufe zu zeigen, sodass diese imitiert und ein neuronales Netz mit den gemessenen Daten trainiert werden kann.

Going Virtual: Teaching Practical Skills of Circuit Design and Programming for Heterogeneous Groups Online [65] IEEE Educon in Wien, April 2021

A. Grünewald, C. Gießer, S. Büchner, C. Gibas, R. Brück.

Zu Beginn der Corona-Pandemie mussten einige Kurse umgestellt werden, um nach der Schließung der Universität Siegen digital in der Distanzlehre angeboten werden zu können. Besonders die praktischen Kurse hatten mit dieser Umstellung zu kämpfen, da gewisse Materialien und ein Laborzugang nicht digital angeboten werden können. Zu diesem Zweck wurde der praktische Universitätskurs „Medizintechnik“ der Fakultät V, bei dem es um die Vermittlung biomedizinischer Techniken und Sensoren, sowie Themen aus dem öffentlichen Gesundheitswesen auf eine neue Weise in die Distanzlehre gebracht. Zunächst wurden die Grundlagen der Schaltungstechnik, Programmierung und moderne Entwurfsmuster virtuell durch die Webanwendung „TinkerCad ®“, Telesprechstunden, E-Mail-Support und digitalen Vorlesungen vermittelt. Die gründliche Evaluierung zeigt, dass die Umwandlung, die auf umfangreichen Recherchen zum theoretischen Hintergrund der Fernlehre basiert, sehr erfolgreich war und das Potenzial für weitere Forschung bietet. Die Leitung dieser Veröffentlichung lag bei Dr. Armin Grünewald.

Erkenntnisgewinn: Distanzlehre kann dazu eingesetzt werden, um praktische Kurse, von zu Hause aus angeboten zu werden. Digitale Methoden helfen, durch eine Überführung der physisch notwendigen Aktionen ins Digitale, bei der Umsetzung.

3.2 Stand der Technik: Vorstellung aktueller Hardware Lösungen

In diesem Kapitel wird die Hardware vorgestellt, welche dazu verwendet wird, um Anwendern AR-Inhalte wiederzugeben und um haptisches Feedback zu liefern. Da es allgemein nur sehr wenige Anwendungen gibt, welche haptisches Feedback in Augmented Reality-Anwendungen ab Werk unterstützen, werden beide Fälle zunächst separat betrachtet und die Kombination aus Virtual Reality und haptischem Feedback wird ebenfalls betrachtet. Einige VR-Anwendungsfälle lassen sich (zukünftig) in AR-Anwendungen mit haptischem Feedback übertragen.

3.2.1 Augmented Reality-Hardware

Um eine Augmented Reality-Anwendung verwenden zu können ist eine Art Display notwendig, welches die virtuellen Elemente anzeigt. Die Darstellungsmöglichkeiten reichen heutzutage von halbtransparenten Displays, durch die die physische Umgebung um virtuelle Elemente ergänzt wird, über normale Displays, die das Bild einer Kamera in Echtzeit darstellen und um virtuelle Elemente erweitert, bis hin zu Kontaktlinsen, die nur ein kleines Bild direkt vor dem Auge darstellen und somit virtuelle Elemente im gesamten Sichtfeld des Nutzers abbilden können.
Die Einsatzgebiete von Augmented Reality-Hardware können dabei genauso vielfältig sein wie die Technik selbst. Besonders im medizinischen Kontext gibt es zahlreiche Einsatzgebiete, auf die im Folgenden genauer eingegangen wird.

3.2.1.1 Head-Mounted Displays

Augmented Reality-Brillen, auch *Head-Mounted Displays* (kurz: *HMD*) genannt, sind der heutige Standard für die Darstellung von AR-Inhalten. Sie bestehen aus einem Display, welches die Nutzer direkt vor den Augen (meistens als eine Art Brille) tragen. Die Einsatzgebiete der AR-Headsets sind besonders in der Medizin sehr vielfältig. Je nach den Anforderungen, die eine medizinische Anwendung an das Darstellungsmedium stellt, sind bei der Auswahl des geeigneten Gerätes zu berücksichtigen. Die größten und bekanntesten Marken und Produkte von AR-Headsets werden im Folgenden vorgestellt, ihre Besonderheiten werden herausgestellt und sie werden am Ende des Kapitels miteinander verglichen. Seit dem ersten Prototypen eines AR-Headset aus dem Jahre 1968 hat sich in der Entwicklung einiges getan. Vergleichbar mit der Entwicklung von Computern begann die AR-Brille als großes Konstrukt, welches in einem Raum fest montiert ist. Seine Position im Raum wurde mechanisch bestimmt und einfache geometrische Formen konnten über das Display dargestellt werden. [66]
Im Laufe der Zeit wurden die Brillen immer kompakter, mobiler und durch den Einsatz von Akkus immer unabhängiger vom Einsatzort. Außerdem bietet die Möglichkeit, eine Anwendung direkt über die Rechenkapazität der Brille ausführen zu können, Unabhängigkeit von einem externen Computer. Kabellose Modelle schränken zudem den Benutzer immer weniger in der Bewegungsfreiheit ein und lenken diese weniger von der eigentlichen Tätigkeit ab.
Für medizinische Anwendungen ist die Tatsache, dass AR-Brillen in der Regel desinfizierbar sind, von besonderer Bedeutung. Das bedeutet, dass AR-Brillen mit Patienten in Kontakt kommen können, ohne diese zu gefährden oder ein unnötiges Infektionsrisiko darzustellen. Sie können in der Operationsvorbereitung, während einer Operation und zur Nachbehandlung eingesetzt werden.

Nreal Light

Die „Nreal Light ®“ ist eine Augmented Reality-Brille, die die Vorteile von AR einem breiteren Publikum zugänglich machen soll. Die Nreal Light wurde von „Nreal“, einem 2017 gegründeten chinesischen Startup, entwickelt und soll eine tragbare und erschwingliche Alternative zu bestehenden AR-Headsets sein. Ein besonderes Merkmal der Nreal Light ist ihre kompakte Größe und ihr leichtes Design. Die Brille wiegt nur 100 g und ist so konzipiert, dass sie wie eine normale Brille getragen werden kann, wodurch sie über einen längeren Zeitraum hinweg bequem zu tragen ist. Das schlanke Design und die vergleichsweise hohe Akkulaufzeit von bis zu drei Stunden macht sie zu einer guten Wahl für medizinische AR-Anwendungen (vgl. 'Abbildung 3.1').

Abbildung 3.1: Nreal Light [67]

Die Nreal Light wird von einem „Qualcomm Snapdragon 845“ Prozessor angetrieben und läuft mit dem Android-Betriebssystem. Sie hat ein 52° Sichtfeld und ein 1080p-Display, das ein hochauflösendes AR-Erlebnis bietet. Außerdem verfügt sie über ein 6DoF-Tracking (sechs Freiheitsgrade, *DoF*), das es dem Nutzer ermöglicht, sich zu bewegen und mit virtuellen Objekten auf natürliche Weise zu interagieren. Die Nreal Light kann mit einem Smartphone oder einem PC verbunden werden, um auf AR-Inhalte zuzugreifen. Außerdem verfügt es über ein eingebautes Mikrofon und einen Lautsprecher für die Sprachsteuerung und Audiowiedergabe.
Einer der Hauptvorteile der Nreal Light ist die Fähigkeit, AR-Erlebnisse auf eine tragbare und bequeme Weise zu vermitteln. Im Gegensatz zu anderen AR-Headsets ist die Nreal Light so konzipiert, dass sie in der Öffentlichkeit getragen werden kann und sich leicht in einer Tasche mitnehmen lässt. Das macht sie zu einer geeigneten Option für Menschen, die unterwegs auf AR-Inhalte zugreifen möchten oder AR-Inhalte im täglichen Leben integrieren wollen, ohne aufzufallen.
Die Anwendungsmöglichkeiten der Nreal Light sind sehr vielfältig. Sie kann zur Unterhaltung eingesetzt werden, z. B. zur Darstellung von Filmen oder Spielen, oder für praktischere Zwecke, z.B. für Trainingssimulationen oder zur Visualisierung von (medizinischen) Daten. Es kann auch für Kommunikationsanwendungen wie Videoanrufe, telemedizinische Beratung und virtuelle Meetings verwendet werden. Ein Nachteil gegenüber anderen AR-Brillen ist, dass sie aktuell über keine Unterstützung für die Unreal Engine verfügt. Für die Programmierung ist demnach zwingend die Unity Engine erforderlich. [68]

Nreal Air

Die „Nreal Air ®“ ist ein Mixed-Reality (MR)-Gerät, mit dem Nutzer virtuelle Objekte in der physischen Welt sehen und mit diesen interagieren können. Sie ist der Nachfolger der „Nreal Light ®“ und zielt mehr auf die Integration in den normalen Alltag der Anwender, als auf einen speziellen Anwendungsfall. Es handelt sich um eine MR-Brille, die über der vorhandenen Brille getragen werden kann und eine separate Verarbeitungseinheit verwendet, die drahtlos verbunden ist.
Eines der herausragenden Merkmale der Nreal Air ist ihr immersives Erlebnis. Die Brille verwendet halbtransparente Displays, um virtuelle Objekte über die reale Welt zu legen und den Nutzern das Gefühl zu geben, mit diesen Objekten zu interagieren, als ob sie tatsächlich vor ihm wären. Dies kann für eine Vielzahl von Zwecken genutzt werden, z. B. für Unterhaltung, Schulung, Ausbildung und im medizinischen Alltag.
Die Nreal Air wird mit Handcontrollern bedient und ermöglicht es den Benutzern, auf natürliche Weise mit den virtuellen Objekten zu interagieren. Die Controller verwenden Motion-Tracking-Technologie, um die Handbewegungen der Benutzer zu erkennen, und können verwendet werden, um virtuelle Objekte aufzunehmen, zu bewegen und zu manipulieren, genau wie es in der physischen Welt der Fall wäre.
Einer der Vorteile der Nreal Air ist seine Tragbarkeit. Sie ist viel kleiner und leichter als andere MR-Headsets und kann daher problemlos transportiert und in den Alltag integriert werden. Alles in allem ist die Nreal Air ein vielversprechendes neues MR-Gerät, das ein äußerst immersives und mobiles Erlebnis bietet. Sie verfügt über ein breites Spektrum an potenziellen Anwendungsbereichen und wird sicherlich wegweisend für alles sein, was mit neuester Mixed-Reality-Technologie möglich sein wird. [68]

Magic Leap One und Magic Leap 2

Das „Magic Leap One ®“ ist ein Augmented Reality-Headset, das von „Magic Leap“ entwickelt wurde, einem 2010 gegründeten Startup-Unternehmen aus Florida. Es ist ein eigenständiges Headset, das die Fähigkeiten von Mixed Reality und Augmented Reality kombiniert, um immersive und interaktive Erfahrungen zu schaffen.
Eine Besonderheit des Magic Leap One ist sein leichtes und tragbares Design (vgl. 'Abbildung 3.2'). Das Headset wiegt nur knapp 500 Gramm und ist so konzipiert, dass es wie eine Brille getragen werden kann. Dadurch ist eine komfortable Nutzung über einen längeren Zeitraum gewährleistet.Der Vorteil liegt in der Trennung von Brillen- und Recheneinheit. Die Recheneinheit kann am Gürtel befestigt oder wie eine Handtasche über der Schulter getragen werden. Dadurch lastet nur ein geringer Teil des Gewichts auf dem Kopf des Trägers und der Tragekomfort ist deutlich besser als bei schwereren Headsets.

Abbildung 3.2: Magic Leap One

Das Magic Leap One HMD wird von einem „Nvidia Parker“ Prozessor angetrieben und läuft mit dem Lumin-

Betriebssystem. Es hat ein Sichtfeld von 40° und ein 1080p HD-Display, das ein klares und detailliertes MR-Erlebnis bietet. Außerdem verfügt es über einen Motioncontroller mit 6DoF-Tracking (sechs Freiheitsgrade) und um Handerkennung, sowie Gestenerkennung, welche es den Benutzer ermöglicht, sich zu bewegen und mit virtuellen Objekten auf natürliche Weise zu interagieren. Die Erkennung der Umgebung erfolgt mittels Infrarot und LiDAR Sensor, wobei eine Rasteransicht/Rasterkarte des Raums erstellt wird. [69]
Am 30. August gaben die Entwickler bekannt, dass das Produkt Magic Leap One am 31.12.2023 eingestellt wird. Ab diesem Zeitpunkt können keine neuen Apps mehr für die Brille zertifiziert werden und alle Online-Dienste wie Multiplayer-Support durch den Austausch von Rauminformationen werden eingestellt. Der Nachfolger der Brille ist jedoch bereits in Arbeit und wird die entstehende Lücke schließen. [70]

Abbildung 3.3: Magic Leap 2

Die Weiterentwicklung des Magic Leap One-HMDs ist das „Magic Leap 2 ®“. Es bietet mit einem 1440 x 1760px großen Display, einem 70° großen Sichtfeld und einer Bildwiederholrate von 120 Hz ein qualitativ besseres Bild, als ihr Vorgänger (vgl. 'Abbildung 3.3'). Um dieses Display mit der nötigen Leistung zu versorgen, wurde ebenso der Prozessor der Recheneinheit verbessert und bietet eine „14 Core AMD CPU“, basierend auf der 7 nm Technologie. Softwareseitig werden, neben den auf Lumin basierten Anwendungen der Magic Leap One, nun auch Anwendungen, die den OpenXR-Standard verwenden, unterstützt. Diese Unterstützung ermöglicht es Entwicklern, ihre Anwendung nicht bloß auf ein Headset zuschneiden zu müssen, sondern Anwendungen auf jedem Gerät, das den OpenXR Standard unterstützt, zu verwenden. [71, 72]

Microsoft Hololens 2

Das HMD „HoloLens 2 ®“ ist ein Mixed Reality-Headset, das von „Microsoft“ entwickelt wurde. Es handelt sich um ein Gerät, mit dem Benutzer Augmented Reality-Inhalte auf eine Weise erleben können, die sowohl immersiv als auch interaktiv ist (vgl. 'Abbildung 3.4').
Eines der Hauptmerkmale der HoloLens 2 ist die Verwendung der holografischen Technologie, die es den Nutzern ermöglicht, virtuelle Objekte so zu sehen und mit ihnen zu interagieren, als ob sie tatsächlich in der physischen Welt vorhanden wären. Erreicht wird dies durch den Einsatz transparenter Displays und fortschrittlicher Sensoren, die die Bewegung und Ausrichtung des Kopfes sowie die Handbewegungen der Nutzer erfassen können. Sie verfügt über ein hochauflösendes Display mit einem großen Sichtfeld sowie ein eingebautes Audiosystem, das ein 3D-Klangerlebnis bietet. Außerdem verfügt sie über eine Reihe von Sensoren, die die Anwesenheit anderer Personen und Objekte in der Umgebung erkennen können, was realistischere und immersivere Interaktionen ermöglicht.

Einer der Anwendungsfälle für die HoloLens 2 ist die Geschäftswelt, wo sie zur Visualisierung und Bearbeitung von 3D-Modellen, zur Durchführung von Fernschulungen und zur Zusammenarbeit mit Kollegen in Echtzeit verwendet werden kann. Die HoloLens wird auch in einer Reihe anderer Bereiche eingesetzt, darunter das Gesundheitswesen, das Bildungswesen und das Militär.
Die HoloLens 2 verfügt über zwei „Holographic LCoS-Displays“ mit einer Auflösung von 2.048 x 1.536 Pixel pro Auge, die es ermöglichen, holografische Inhalte in Echtzeit darzustellen. Die Brille ist mit einer Hand-Tracking-Technologie ausgestattet, die es ermöglicht, die Bewegungen der Hände zu verfolgen und in der virtuellen Welt darzustellen. Diese Funktion ermöglicht es Benutzern, holografische Inhalte direkt mit ihren Händen zu manipulieren und Interaktionen mit der virtuellen Welt zu ermöglichen.

Abbildung 3.4: Microsoft HoloLens 2 [73]

Die HoloLens 2 wird von einem „Qualcomm Snapdragon 850“ Prozessor angetrieben. Sie ist mit einer 8 Megapixel-Kamera mit Autofokus ausgestattet und verfügt über zwei Mikrofone und zwei Lautsprecher für Audioaufnahme und -wiedergabe. Die Brille hat eine Akkulaufzeit von bis zu 2 bis 3 Stunden. Die HoloLens 2 läuft auf dem Betriebssystem „Windows 10“ und ist mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet, darunter ein Beschleunigungsmesser, ein Gyroskop, ein Magnetometer und Infrarotsensoren. Diese Sensoren ermöglichen es der Brille, ihre Umgebung zu erkennen und sich anzupassen, um holografische Inhalte realitätsnah in der physischen Welt darzustellen. [73]

Varjo XR 3

Das Headset „Varjo XR 3 ®“ ist ein Mixed-Reality Headset der Firma „Varjo“ und wurde 2023 erstmals auf der CES In Las Vegas vorgestellt (vgl. ’Abbildung 3.5’). Anders als reine AR oder konventionelle VR-Headsets erlaubt die moderne Technologie dieses XR-Headsets, die reale Welt durch zwei Kameras an der Vorderseite aufzuzeichnen und im Display wiederzugeben.
Die Wiedergabe kann dann durch virtuelle Elemente ergänzt. Eine Besonderheit dieses Headsets sind die LiDAR-Sensoren zur Distanzberechnung, welche außerdem zu einer Verbesserung der Handerkennung führen. Die genaue Bestimmung der Position der Hände in Echtzeit erlaubt es der Brille, besonders schnell zu reagieren und Funktionen wie Okklusion, die, wenn sie schlecht umgesetzt sind, die Immersion der Nutzer beeinträchtigen können, sehr gut umzusetzen. Ein Anwendungsgebiet dieser Brille ist die Erweiterung der realen Welt um eingeblendete Informationen, die meistens aus Text bestehen (vergleichbar mit einem Head-Up-Display). Das Field-of-View ist auf ca. 30 cm bis 80 cm ausgelegt und kann in diesem Bereich besonders gut für die Darstellung von zeitlich veränderlichen Informationen, wie Geschwindigkeit im Auto, Distanz zum Vordermann oder der aktuellen Geschwindigkeitsbegrenzung (zum

Beispiel auf Grundlage erkannter Verkehrsschilder) darstellen. [74]

Abbildung 3.5: Varjo XR 3 [74]

Oculus Quest 2 / Meta Quest 2

Die „Oculus Quest 2 ®“ ist ein Virtual Reality-Headset, das von (vormals „Oculus“, einer Abteilung von) „Facebook Reality Labs“, welche nun zum Konzern „Meta“ gehört, entwickelt wurde. Es ist der Nachfolger der ursprünglichen „Oculus Quest ®“, welche 2019 veröffentlicht wurde. Im April 2022 kam es zur Namensänderung von „Oculus Quest 2“ zu „Meta Quest“[1]. Eines der wichtigsten Merkmale, welches dieses HMD von anderen (gängigen) VR-Headsets unterscheidet, ist seine Portabilität. Es ist ein eigenständiges Headset (Stand-Alone), das heißt, es benötigt keinen Computer oder Smartphone, um zu VR-Inhalte darzustellen. Das macht es zu einer guten Option für Anwender, die VR ortsunabhängig erleben wollen und nicht auf ein festes Setup angewiesen sein wollen oder können (vgl. 'Abbildung 3.6').

Abbildung 3.6: Oculus Quest 2/Meta Quest 2

Die Oculus Quest 2 wird von einem „Qualcomm Snapdragon XR2“ Prozessor angetrieben und verfügt über ein hochauflösendes Display, das ein flüssiges und immersives VR-Erlebnis durch eine Bildwiederholrate von bis zu 144 Bilder pro Sekunde ermöglicht. Außerdem verfügt es über ein 6DoF-Tracking (sechs Freiheitsgrade), welches es den

[1]Im Laufe dieser Ausarbeitung wird weiterhin, aus Gründen der eindeutigen Identifizierbarkeit der Name Oculus Quest 2 verwendet.

Benutzern ermöglicht, sich zu frei bewegen und mit der virtuellen Umgebung auf natürliche Weise zu interagieren. Die Oculus Quest 2 unterstützt zusätzlich Hand-Tracking, wodurch Benutzer mit ihren bloßen Händen und nicht mit einem Controller, mit virtuellen Objekten interagieren können. Dies sorgt für eine weitere Ebene der Immersion und erleichtert den Nutzern die Interaktion mit virtuellen Umgebungen.
Einer der Nachteile von Oculus Quest 2 ist, dass für die Nutzung ein Facebook-Konto erforderlich ist. Dies war ein umstrittener Schritt, da er Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes und der Datenerhebung aufwarf[2]. Nach der Umbenennung entfällt die Registrierungspflicht und die Nutzung des Headsets ist auch ohne Facebook/Meta-Account möglich.
Ein zusätzlicher Betriebsmodus, genannt Pass-Through-Mode, ermöglicht es dem Headset, das Bilder der Kameras direkt als Hintergrund für den Benutzer in seinem Sichtfeld dargestellt werden. Diese Art der Mixed Reality kann dazu verwendet werden AR-Inhalte darzustellen, die auf die Nutzung der physischen Welt als Hintergrund angewiesen sind oder die den Hintergrund nicht benötigen und deswegen auf die virtuelle Repräsentation verzichten. [76]

Abbildung 3.7: Oculus Quest Pro/Meta Quest Pro

Der direkte Nachfolger von Oculus Quest 2 ist das „Meta Quest Pro ®“ (vgl. 'Abbildung 3.7'). Es unterscheidet sich im Funktionsumfang und bietet ein verbessertes Bild gegenüber seinem Vorgänger. Zusätzlich bietet es neben Eye-Tracking in seinen AR- und MR-Fähigkeiten ein Farbbild im Pass-Through-Modus. Es ist damit ein Mixed-Reality-Headset und kann auch für reine AR-Anwendungen verwendet werden. Da das Bild aus vier einzelbildern zusammengesetzt ist (um ein rundum 180 Grad Bild zu ergeben) ist die Qualität entsprechend schlechter, als bei einer nativen AR-Brille. Der aktuelle Stand der Technik dieser Brille reicht nicht für eine Implementierung einer AR-Anwendung mit Datenhandschuhen aus. [77]

Meta Quest 3
Im Oktober 2023 erschien das „Meta Quest 3 ®“ der Firma „Meta“ als neuestes Mixed Reality Headset. In der Präsentation wurde ein besonderer Fokus auf die Mixed Reality Möglichkeiten gelegt und diese vorgestellt. In 'Abbildung 3.8' ist das HMD zu sehen und die größte Änderung im Vergleich zu seinen Vorgängern ist der LiDAR-Sensor an der Front, sowie zwei Kameras, die ebenfalls nach vorne gerichtet sind. Insbesondere die Farbdarstellung im so genannten „Pass-Through-Modus“, der die Mixed-Reality-Funktionen durch die Darstellung des Live-Kamerabildes ermöglicht, wurde deutlich verbessert. Im Gegensatz zu seinem Vorgänger, dem Meta Quest Pro, wird er nicht chromatisch erweitert, sondern stammt live von der Kamera. Es bietet eine zehnmal bessere Auflösung als das Meta Quest 2 und eine doppelt so gute Auflösung wie das Meta Quest Pro. Auch das Display ist mit 2.064 x

[2] An dieser Stelle sei auf die aktuellen Regelungen der *DSGVO* zum Einwilligungserfordernis hingewiesen [75].

2.208 Pixeln pro Auge fast 30% schärfer als das der Meta Quest 2. Damit ist dieses HMD in der Lage, AR- und VR-Inhalte gleichermaßen darzustellen. Das Sichtfeld ist mit 110 Grad horizontal und 96 Grad vertikal das größte, aller Stand-Alone-Brillen auf dem Markt. [78]
Die Controller bieten wie die Brillen einige Neuerungen, insbesondere im Bereich des haptischen Feedbacks. So werden im Gegensatz zu bisherigen Controllern keine Elektromotoren mit Schwungmasse zur Erzeugung des vibrotaktilen Feedbacks verwendet, sondern ein Schallwandler. Dieser erzeugt ähnlich wie ein Lautsprecher aus elektrischen Signalen Schwingungen, die als Vibrationen wahrgenommen werden. Mit dieser Technik können die sogenannten „Touch Pro-Controller ®“ ein individuelleres und gezielteres haptisches Feedback erzeugen, als es mit bisherigen Techniken möglich war. Dieses System benötigt mehr Strom, was sich voraussichtlich in der Akkulaufzeit niederschlagen wird. Ein Langzeittest wird dies zeigen. [78]

Abbildung 3.8: Meta Quest 3

3.2.1.2 Smartphones

Neben den HMDs bieten moderne Smartphones ebenfalls die Möglichkeit, virtuelle Elemente für Augmented Reality-Anwendungen darzustellen. Die beiden großen Betriebssysteme („iOS“ von „Apple“ und „Android“ von „Google“) haben jeweils ihre eigenen Schnittstellen, welche es Entwicklern ermöglichen native Apps für die Betriebssysteme zu entwickeln. Ebenso besteht, wie bei HMDs auch, die Möglichkeit, eine Engine zu verwenden, um den Entwicklungsprozess anzupassen.
„ARKit“ ist eine Plattform für Augmented Reality-Apps, die von Apple entwickelt wurde und auf iOS-Geräten verfügbar ist. Sie ermöglicht es Entwicklern, AR-Anwendungen zu erstellen, die nur auf den hauseigenen Geräten „iPhone ®“ und „iPad ®“ laufen. [21]
„ARCore“ ist eine Plattform von Google, die Augmented Reality auf Android-Smartphones ermöglicht. Sie erkennt die Umgebung und ermöglicht es Entwicklern, virtuelle Objekte nahtlos in die reale Welt zu integrieren. ARCore nutzt die Sensoren des Geräts, um AR-Erlebnisse zu schaffen, ohne dass spezielle Hardware erforderlich ist. [22]
Eines der wichtigsten Merkmale beider Plattformen ist die *World Tracking-Technologie*, die es ermöglicht, die Umgebung der Benutzer in Echtzeit zu erfassen und zu verarbeiten. Diese Technologie verwendet *Computer Vision-Algorithmen* und Sensoren wie Kameras und Gyroskope, um die physische Welt zu scannen und zu verstehen. Dies ermöglicht es, virtuelle Objekte in der physischen Welt darzustellen und sie so zu positionieren, dass sie realistisch aussehen und sich entsprechend zu verhalten.
Des Weiteren verfügen die Technologien auch über eine *Scene Understanding-Technologie*, die sie ermächtigt, die physische Welt in Echtzeit zu analysieren und im Kontext einzuordnen. Diese Technologie verwendet *Deep Learning-*

und Machine Learning-Algorithmen (Methoden der Künstlichen Intelligenz), um Muster und Strukturen in der Umgebung zu erkennen und zu kategorisieren. ARKit und ARCore bieten auch Unterstützung für verschiedene AR-Erlebnisse wie Bild-in-Bild, Bild-in-Raum und Bild-in-Welt. Diese Funktionen ermöglichen es Entwicklern, AR-Inhalte in verschiedenen Formaten darzustellen, um unterschiedliche AR-Erlebnisse zu ermöglichen.

Insgesamt bieten beide Technologien leistungsstarke Plattformen für die Entwicklung von AR-Anwendungen auf iOS- und Android-Geräten. Dank der World Tracking- und Scene-Understanding-Technologien ermöglicht es ARKit und ARCore, die physische Umgebung in Echtzeit zu analysieren und in den Kontext der jeweiligen Anwendung zu setzen, was für die Entwicklung von AR-Anwendungen von großem Nutzen ist. [21, 22]

3.2.1.3 Kontaktlinsen

In den letzten Jahren hat die Technologie der Augmented Reality zunehmend an Bedeutung gewonnen, und die Entwicklung von AR-Kontaktlinsen ist ein vielversprechender Ansatz, um die Vorteile der AR in unseren Alltag zu integrieren, ohne dabei auf schwere Geräte zurückgreifen zu müssen, dabei Bewegungsfreiheit und Wahrnehmung der Nutzer einzuschränken. Eines der aktuellsten Beispiele für AR-Kontaktlinsen ist das „Mojo Augmented Reality-System ®“ (kurz: Mojo-System), das von der Firma „Mojo Vision“ entwickelt wurde.

Das Mojo-System besteht aus einer Kontaktlinse, die mit einem mikroskopisch kleinen Display, einer Kamera und anderen elektronischen Sensoren ausgestattet ist. Die Linse ist so konstruiert, dass sie mühelos von den Trägern getragen werden kann und den natürlichen Blick dabei nicht beeinträchtigt. Das Display in der Linse projiziert das AR-Bild direkt auf die Netzhaut des Trägers, die Kamera erfasst dabei auch die Umgebung und fügt sie in die AR-Anzeige ein.

Eines der Anwendungsgebiete für AR-Kontaktlinsen ist die Verbesserung der visuellen Wahrnehmung von Menschen mit Sehbehinderungen. Mit Mojo-System können blinde Menschen Informationen über ihre Umgebung erhalten, die ihnen sonst verborgen geblieben wären. Zum Beispiel kann das System Text oder Gesichter erkennen und sie in gesprochener Sprache umwandeln. Eine weitere Anwendung von Mojo-System ist die Unterstützung von Menschen mit altersbedingten Augenerkrankungen wie Makuladegeneration. In diesem Fall kann das System die Bilder vergrößern und kontrastreicher darstellen, um das Sehen zu erleichtern.

Weitere Anwendungen von Mojo-System beinhalten die Erweiterung der menschlichen Wahrnehmungsfähigkeiten, die Unterstützung bei der Navigation, die Übermittlung von Benachrichtigungen und die Verbesserung der Produktivität am Arbeitsplatz. Zum Beispiel kann das System den Trägern in Echtzeit Informationen über die Umgebung bereitstellen, wie z.B. Geschäfts- oder Straßennamen oder ermöglicht es den Trägern, E-Mails oder Kalendertermine direkt auf der Kontaktlinse einzusehen.

Aus technischer Sicht ist die kompakte Bauform der *Smarten Kontaktlinse* und die damit verbundene Miniaturisierung der Komponenten eines der hervorstechendsten Merkmale. Das Herz des Produkts ist das weltweit kleinste und dennoch dichteste Micro-LED-Display. Mit einem Durchmesser von einem halben Millimeter und ca. 280 Pixeln in der Länge hat es die höchste Pixeldichte (Pixel pro Inch) in einem Display dieser Größe. Des Weiteren verfügen die Linsen über eine 5 GHz Funkmodul, um mit einer Recheneinheit, einem Relais, welches die Nutzer wie eine Kette um den Hals tragen können, zu kommunizieren. Die Vorverarbeitung der Sensorwerte und kleine Berechnungen finden direkt auf der Kontaktlinse statt. Dafür verfügt sie über einen *ARM-Prozessor*.

Das monochrome Display ist in der Lage, unterschiedliche Grünstufen darzustellen, da Helligkeitsunterschiede in grün besser unterschieden werden können als in grau. Diese erste Implementierung einer Smarten Kontaktlinse ist definitiv zukunftsweisend und kommende Modelle können an diesen Ansatz anknüpfen und versprechen bahnbrechende Erfolge. Zukunftsvisionen, wie sie bereits popkulturell in der Science-Fiction zu finden sind, rücken durch eine solche Technologie in greifbare Nähe. [79]

3.2.2 Haptische Hardware

Dieses Kapitel soll auf die unterschiedlichen Geräte eingehen, welche in der Lage sind, dem Anwender haptisches Feedback zu geben. Es wird sowohl auf Geräte eingegangen, die von den Nutzern getragen oder geführt werden, als auch solche, mit denen diese interagieren.

3.2.2.1 Controller

Controller bieten unterschiedliche Ein- und Ausgabemethoden. Als Eingabe ist die Aufnahme und Verarbeitung von Benutzereingabe gemeint, d.h. die Interaktion mit einer laufenden Anwendung. Dazu gehören die Knöpfe (engl.: Buttons), Touchpads, die Informationen aus dem Lagesensor (3DoF-Tracking) und die Position im Raum (6DoF-Tracking). Zur Ausgabe dienen RGB-LEDs, die als Kontrolllampen fungieren, und Vibrationsmotoren, welche Tactile Feedback liefern (siehe auch '2.2.1.1 Tactile Feedback').
In Verbindung mit Augmented Reality-Anwendungen lassen sich virtuelle Elemente durch diese Ein- und Ausgabemethoden beeinflussen und manipulieren. Außerdem können sie dem Nutzer zusätzliche Informationen liefern. Im Folgenden werden einige Controller-Modelle vorgestellt und es wird auf ihre Vorteile eingegangen.

Magic Leap-Controller

Das Augmented Reality-Headset der Magic Leap One verfügt neben Display und Recheneinheit über einen Controller für die Interaktion mit den Benutzern. Im Gegensatz zu den meisten Controller, kommt ein LED Ring (*genannt LED-Halo*) zum Einsatz, durch den zusätzliche Statusmeldungen ausgegeben werden können. Der Controller wird in der Regel in der rechten Hand gehalten und wird einhändig bedient. Die freie Hand dient zur Interaktion mit Gesten (mittels Gestenerkennung der Brille). Er besitzt einen mechanischen Knopf (gennant *Bumper*) und einen analogen Knopf (genannt *Trigger*). An der Oberseite befindet sich ein rundes Touchpad und ein weiterer kleinerer Knopf, genannt *Home Button* (vgl. 'Abbildung 3.9'). Ein besonderes Feature, das der Magic Leap-Controller bietet, ist das haptische Feedback in Form von Vibration, bzw. Vibrationsmustern. Er kann unterschiedliche Vibrationsmuster in vier unterschiedlichen Intensitäten wiedergeben. Dadurch können AR-Anwendungen ein großes Spektrum an Feedback-Varianten zurückgeben. [80]

Abbildung 3.9: Magic Leap One-Controller

HTC Vive-Controller

Die Controller der VR-Headsets der Firma „HTC“ aus der „Vive“-Serie (vgl. ’Abbildung 3.10’) verfügen, neben einem Outside-In Tracking, über ein besonderes Touchpad. Dieses liefert über ein System aus Bolzen in Zylindern Vibrotaktiles Feedback. Je nach Position der Finger auf dem runden Touchpad gibt dieses ein leichtes Vibrationsgefühl an den Finger. Zusätzlich kann der ganze Controller über Vibrationsmotoren in unterschiedlichen Stärken vibrieren. Diese Technik kam erstmals im „Steam Controller ®“ von „Valve“ zum Einsatz und wurde seitdem weiterentwickelt. Das Online Magazin „The Verge“ schrieb dazu:
„The haptic feedback was and still is incredible: using tiny solenoid actuators, the trackpads could pulse and click to re-create the physical sensations of a traditional control scheme, you really felt like you were moving something when you scrolled your thumbs around the cup-shaped pads. It sounds similar to a laptop trackpad, but it worked closest to a trackball, designed to let you fling a cursor around your TV at the same speed you could with a regular mouse.“ [81]

Abbildung 3.10: HTC Vive Controller

Der Aufbau des Controllers definiert den Standard VR-Controller und wird, wie die meisten auch, mit nur einer Hand bedient. Dies liegt daran, dass jede Hand einen separaten Controller führt und damit die Position der Hände im Raum verfolgt und in die virtuelle Welt übertragen werden können. Zusätzliche Tasten an den einzelnen Fingern ermöglichen es dem Nutzer mit der VR-Anwendung zu kommunizieren.
Die Kombination aus Outside-In Tracking der HTC Vive und einem AR-Headset kann die Position der Controller auslesen und in einer AR-Umgebung darstellen. Im Vergleich zu einer direkten Anbindung ist für diese Lösung ein Computer für die Verbindung zwischen AR-Headset und Controller nötig. Trotz des höheren Aufwands zahlt sich dies durch höhere Genauigkeit des Trackings aus und AR-Anwendungen werden über das spezielle Feedback des Touchpads verbessert. [82]

Meta Quest 2-Controller

Die Controller der Meta Quest 2 sind die aktuelle Generation von Controllern für die Virtual Reality Headset-Plattform von Meta. Sie wurden entwickelt, um eine noch realistischere und immersivere Virtual Reality-Erfahrung zu bieten (vgl. ’Abbildung 3.11’). Sie verfügen über haptisches Feedback in Form von taktilem Feedback und sensorsensitive Bewegungserkennung, die es den Benutzern ermöglichen, interaktiv in die virtuelle Welt einzutauchen. Sie verwenden auch eine neue Handtracking-Technologie, die es den Benutzern ermöglichen, die Controller zu

benutzen, ohne sie tatsächlich zu berühren. Dies funktioniert über eine Form der Kapazitätserkennung, ähnlich der Erkennung von Touchscreens. Der Controller erkennt die einzelnen Finger der Benutzer, wenn sich diese den Tasten nähern und nur leicht berühren. Dadurch kann jede Taste einen zusätzlichen Zustand (neben gedrückt und nicht gedrückt) erkennen und definieren. Entwickler können mit dieser Funktion arbeiten und ihre Anwendungen entsprechend anpassen und so eine zusätzliche Eingabeoption nutzen. Ein Beispiel ist das Tutorial für die Meta Quest 2. Hierbei leuchten die Tasten nacheinander auf und sobald diese berührt, aber noch nicht gedrückt werden, verändern sie ihre Farbe. Die Nutzer bekommen durch dieses Feedback die Information, mit den Fingern an der richtigen Stelle zu sein, ohne selbst nachsehen zu müssen.

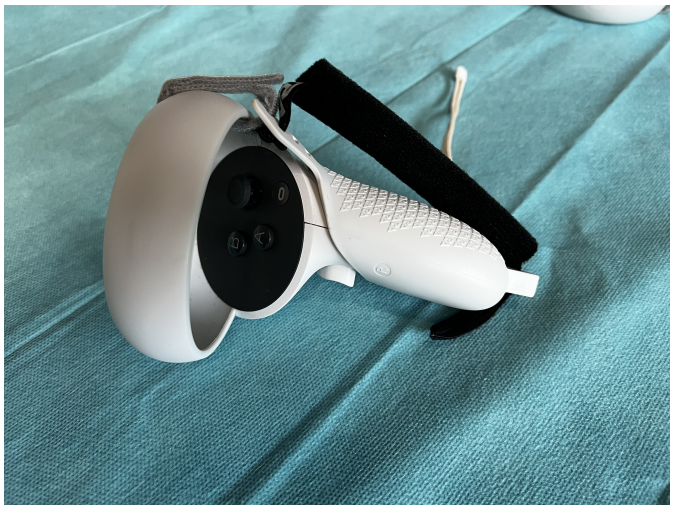


Abbildung 3.11: Meta Quest 2-Controller

Die Controller sind mit einer Vielzahl von Funktionen ausgestattet, darunter ein Touchpad, ein Trigger-Button und eine Menütaste. Sie sind mit Bluetooth-Technologie ausgestattet, sodass sie mit anderen bluetoothfähigen Geräten gekoppelt werden können. Softwareseitig ist es eine Konvention, dass jede Benutzereingabe und jede Interaktion mit interaktiven Objekten [3] durch eine kurze Vibration vermerkt wird. Dadurch bekommen Benutzer nach kurzer Zeit ein Gefühl dafür, mit welchen Objekten interagiert werden kann und welche lediglich zum Hintergrund gehören. Auch werden sie durch das haptische Feedback benachrichtigt, dass eine Eingabe vom System erkannt wurde. Dies sorgt für mehr Nachvollziehbarkeit und ein besseres Verständnis der aktuellen Anwendung bei den Nutzern. [76]
Im Unterschied zu den Controllern der Meta Quest 2 verfügt die Meta Quest Pro eine andere Positionserkennung für den Controller. Sie verwendet ein optisches System, welches nach dem Prinzip der Positionserkennung des Headsets, dem Inside-Out Tracking, funktioniert. Das haptische Feedback und die kapazitiven Tasten sind genauso wie die Feedback-Konventionen der Software vorhanden und es wird deshalb auf eine genauere Vorstellung und Analyse verzichtet. [77]

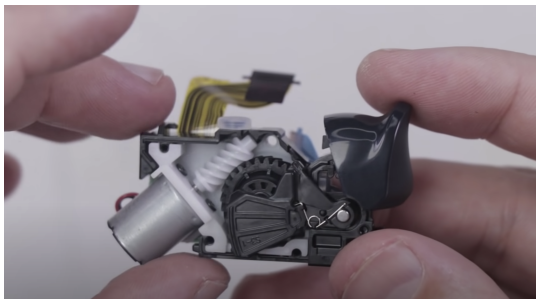
Sony Playstation 5- und Sony PSVR2-Controller

Der Controller der „Sony Playstation 5 ®“, „DualSense Controller ®“ genannt, ist wie ein klassischer Spielecontroller aufgebaut (vgl. 'Abbildung 3.12a'). Er wird mit beiden Händen bedient und verfügt, neben einem Touchpad, über zahlreiche Eingabeknöpfe und zwei analoge Joysticks, die mit den Daumen bedient werden. Die besonderen Vorteile dieses Controllers sind seine *Adaptiven Trigger* für die Zeigefinger. Anders als bei gewöhnlichen Spielecontrollern ist der Weg, den der Finger zurücklegen muss, um den analogen Knopf vollständig zu drücken, nicht immer gleich,

[3] Interaktive Objekte sind Objekte, die durch den Benutzer einer Anwendung manipuliert werden können. Sie können beispielsweise in die Hand genommen, verschoben, berührt oder ausgewählt werden.

sondern kann (softwareseitig) angepasst werden. Dies ermöglicht neue Möglichkeiten der Simulation von Knöpfen aus dem realen Leben. Als Beispiel beschreibt Sony hier den Abzug einer Handfeuerwaffe in einem ihrer Spiele. Je nach Modell der Waffe muss der Finger unterschiedlich weit bewegt werden, bevor die Waffe reagiert (die Länge des zurückgelegten Wegs nennt sich *Traveldistance*). Der Druckpunkt des Abzugs kann mittels Force Feedback simuliert werden. Um diesen zu überwinden, müssen die Spieler zusätzlich Kraft aufwenden, um den Schuss auszulösen.
Des Weiteren kann der Controller mechanisch die Trigger gegen die Finger der Anwender drücken, um ein Gefühl von Widerstand zu erzeugen (vgl. 'Abbildung 3.12b'). Diese Technologie kann in unterschiedlichen Szenarien eingesetzt werden, um virtuell physische Handlungen bzw. Interaktionen mit Objekten abzubilden.

(a) Sony Dual Sense-Controller



(b) Haptisches Feedback durch Adaptive Trigger — Bild von TronicsFix [83]

Abbildung 3.12: Sony Playstation 5-Controller Technologie

An dieses Design angelegt ist der Controller des „Playstation VR2 ®“ Headsets mit derselben Besonderheit ausgestattet. Sein Aufbau ähnelt dem Controller der Meta Quest Reihe und bildet über die adaptive Trigger-Technologie in VR-Anwendungen virtuelle Interaktionen ab. In Verbindung mit einem AR-Headset lässt sich diese Technologie, entweder mit dem Playstation 5 Controller oder dem Controller der Playstation VR 2, auch für Augmented Reality-Anwendungen verwenden. [32]

3.2.2.2 Datenhandschuhe

Eine der ersten Formen des haptischen Feedbacks, die einem in den Sinn kommt, ist die Kombination mit Datenhandschuhen. Filme wie *Minority Report* von Steven Spielberg aus dem Jahr 2002 oder die Serie *The Good Doctor* von David Shore aus dem Jahr 2017 zeigen eindrucksvoll, wie Augmented Reality in Verbindung mit Datenhandschuhen eingesetzt werden kann. In diesen Medien interagieren die Protagonisten fast mühelos und intuitiv mit Computern, wobei sie nur ihre Hände zum Gestikulieren verwenden.
Heutzutage können Datenhandschuhe in rudimentärerem Umfang, für einen ähnlichen Anwendungsfall verwendet werden. Sie erlauben es Nutzern, mit Hilfe von Gesten und der Erkennung der Position der Finger (Fingertracking), Computer und andere elektrische Geräte zu steuern und dabei haptisches Feedback zu bekommen. Dieses Feedback kann, wie bereits im '2.2 Haptisches Feedback' beschrieben, auf unterschiedliche Weise induziert werden. Kommerzielle Lösungen aktueller Handschuhmodelle werden im Folgenden vorgestellt und ihre jeweilige Besonderheit wird herausgestellt.
Handschuhe bieten gegenüber visuellen Verfahren den Vorteil, dass keine Selbstverdeckung auftreten kann. Die Position kann selbst dann noch bestimmt werden, wenn der Benutzer nicht auf die Hände schaut (Object permanence). Der Markt bietet zahlreiche Modelle von Datenhandschuhen, die haptisches Feedback in unterschiedlichen Formen darstellen und wiedergeben können. Da das Ziel dieser Arbeit die Integration von haptischem Feedback in einer

AR-Umgebung bzw. in Kombination mit einem AR-Headset ist, wird im Folgenden lediglich auf Handschuhe eingegangen, die softwareseitig die Möglichkeit bieten, mit einem AR-Headset verwendet werden zu können. Das bedeutet, dass es grundsätzlich keine Abhängigkeit zu Schnittstellen von „Valves – SteamVR“ geben darf, da dieses Positionserkennungsverfahren nicht von allen AR-Brillen unterstützt wird und bei manchen sogar ausgeschlossen wird.

Manus Prime X Haptic VR

Ein Datenhandschuh, welcher besonders im Bereich „Motion-Capturing“ für Filme und Videospiele verwendet wird, ist der „Manus Prime X Haptic VR ®“ von der gleichnamigen Firma „Manus“ (vgl. 'Abbildung 3.13'). Ursprünglich für VR-Anwendungen konzipiert, spricht nichts gegen eine Verwendung in AR-Anwendungen. Die von den Entwicklern bereitgestellten Ressourcen erleichtern die Integration in aktuelle Game Engines wie Unity und die Unreal Engine.

Abbildung 3.13: Manus Prime X [84]

Ein Handschuh wiegt ca. 70 g und gehört damit zu den leichtesten Handschuhmodellen, welche haptisches Feedback unterstützen. Das „weiche“ Skelett der Handschuhe, bestehend aus Kabeln und Aktoren an deren Enden, bietet ein 9 DoF IMU Tracking für den ganzen Handschuh und 2DoF pro Finger, sodass die Position jedes Fingers einzeln und relativ zueinander erfasst werden kann. Das Tracking erfolgt auf bis zu plus/minus 2,5 Grad genau. Das haptische Feedback erfolgt in Form von Vibrotaktilem Feedback, jeweils auf der Oberseite einer Fingerspitze und kann dazu genutzt werden, Berührung zu simulieren. [84]

HaptX Gloves G1

Die Firma „HaptX“ verfolgt mit den „Haptik Glooves G1 ®“ einen neuen Ansatz für haptisches Feedback. Anstelle von taktilem Feedback durch Vibration setzt sie auf Force Feedback durch Pneumatik. Die vom Unternehmen entwickelte „Microfluidic skin“ ermöglicht es, durch Druckluft kleine Erhebungen in einem Silikonpanel zu erzeugen. Die entstandenen Luftkammern lassen sich mit Luftpolsterfolie vergleichen. Die Größe und Anzahl an aufgeblasenen Blasen pro Fläche lässt sich softwareseitig steuern. Eine Integration in die großen Engines ist bereits verfügbar. Neben dem Gefühl an den Fingerspitzen durch diese neuartige Technologie mit Luftblasen können die Handschuhe zusätzlich die Bewegungsfreiheit der Finger restringieren. Dies erfolgt ebenfalls über Druckluft durch ein Exoskelett an der Handschuhoberseite.

Um die pneumatischen Elemente mit Druckluft zu versorgen, sind die Handschuhe an einen Kompressor angeschlossen, welcher wie ein Rucksack getragen wird (vgl. 'Abbildung 3.14'[4]). Die Akkulaufzeit dieses Systems beträgt circa drei Stunden [85]. Dieses Paar Datenhandschuhe steht aktuell zum Vorverkauf bereit und ist Endkunden noch nicht zugänglich. Der aktuelle Preis ist mit ca. 5.500 Dollar ebenfalls nicht zu vernachlässigen [86].

Abbildung 3.14: HaptX Gloves G1 haptics system [86]

LucasVR Tec V4

Zurzeit gibt es vier veröffentlichte Prototypen der „LucidGloves ®“, die im Laufe der Entwicklung mit immer mehr Funktionen ausgestattet wurden. Mit Prototyp #1 begann Lucas De Bonet, ein MIT Absolvent und Gründer der Firma „Lucas VRTech“, mit der Implementierung von Fingertracking. Nach dem kompakteren Prototyp #2 fügte er in Prototyp #3 die Funktion zum Aufbau einer Bluetooth-Verbindung hinzu. In Version #4 integrierte er schließlich haptisches Feedback (vgl. 'Abbildung 3.15'). Aktuell setzt er sein Projekt mit einem kompakteren Design der Handschuhe fort.

[4]HaptX Gloves G1 haptics system, announced in 2022, consists of the HaptX Gloves and Airpack shown here (product design may be modified), and includes the HaptX SDK. The HaptX Gloves are designed to work with immersive virtual reality systems to provide realistic touch simulation. Image provided courtesy of HaptX. ©Copyright HaptX, Inc., 2023.

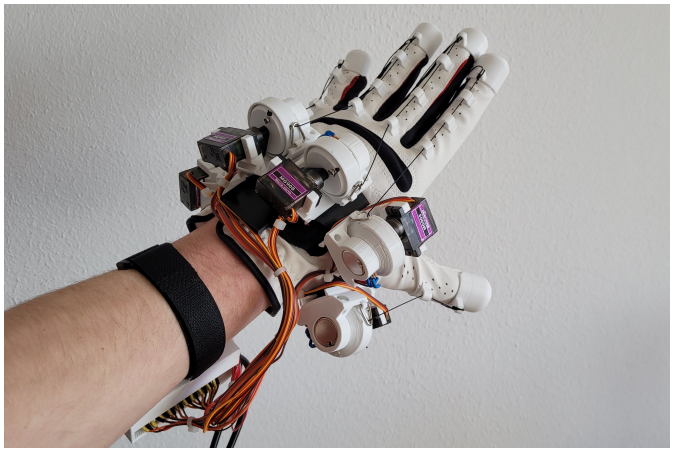


Abbildung 3.15: Lucas VR Gloves V4 [56]

Für die Funktionsweise der Handschuhe hat er ein Konzept entwickelt, das auf der Verwendung von kostengünstiger Elektronik, Alltagsgegenständen und 3D-gedruckten Teilen basiert. Um die Funktionsweise der LucidGloves zu verstehen, ist es notwendig, den Aufbau der einzelnen Komponenten und deren Zusammenspiel zu erklären. In das 3D-gedruckte Teil (vgl. 'Abbildung 3.15') sind jeweils ein Potentiometer, ein Servomotor und eine Spule des ID-Jojos integriert. Diese fünf Halterungen können auf dem Handrücken befestigt werden. Die Drähte der Spule laufen durch die Führungen über die Finger und werden an ihrem Ende, den Fingerspitzen, befestigt. Sowohl die Servomotoren als auch die Potentiometer sind mit dem Mikrocontroller, der die Firmware enthält, verbunden und werden von diesem mit Strom versorgt. [87, 88]

Diese Handschuhe bieten aktuell keine Integration in eine AR-Umgebung, da sie zwingend eine Integration zu SteamVR benötigen. Sie werden trotzdem in diesem Kapitel aufgeführt, da die Analyse der Handschuhe zu dieser Erkenntnis geführt hat. [56]

SenseGlove Nova

Eines der wenigen Paare Handschuhe mit haptischem Feedback, welches neben Vibrotaktilem Feedback auch Force Feedback bietet, sind die „SenseGlove ®“ der gleichnamigen Firma „SenseGlove“. Gemeinsam mit Volkswagen wurde 2017 in den Niederlanden der erste Prototyp eines VR-fähigen Handschuhes mit Force Feedback entwickelt und vorgestellt. Das Grundprinzip dieses Prototyps besteht aus einem 3D-gedruckten Exoskelett auf der Oberseite des Handschuhs, welches die Bewegungsfreiheit der einzelnen Finger restringieren kann (vgl. 'Abbildung 3.16'). Greift der Nutzer nach einem virtuellen Objekt, blockieren die Gelenke des Prototypen und die Nutzer können die Hand nicht weiter schließen. [33]

Im Januar 2021 stellte die Firma ihr neuestes Modell, den „SenseGlove Nova ®“ vor. Dieses Model bietet einige Verbesserungen gegenüber seinem Vorgänger und vergleichbaren Produkten auf dem Markt. Der Handschuh ist so konstruiert, dass sich die elektronischen und mechanischen Komponenten vom Stoff trennen lassen und so eine gründliche Reinigung und Desinfektion möglich sind. Er bietet Tracking sowie haptisches Feedback der einzelnen Finger (mit Ausnahme des kleinen Fingers) und kann deren Position sowie die Positionierung relativ zueinander erkennen. Für das Erkennen der Position im Raum setzt dieses Modell, genau wie sein Vorgänger, auf externe Tracker der Zielhardware. Dies können die Tracker der HTC Vive sein oder ein Controller der Zielplattform, welcher auf der Oberseite der Handschuhe an einer dafür vorgesehenen Halterung angebracht wird. [89]

Abbildung 3.16: SenseGlove Nova

Der Datenhandschuh von SenseGlove bietet zahlreiche Einsatzgebiete. Neben Simulatoren für die Automobilindustrie, bei denen entweder schwierige Konstruktionsschritte trainiert oder neue Produkte virtuell präsentiert werden, bieten die SenseGloves eine gute Unterstützung in medizinischen Anwendungen. In einem Pilotprojekt haben DistrictXR gezeigt, dass nach körperlichen Verletzungen die Genesung durch ein VR-Training in Verbindung mit diesen Handschuhen beschleunigt werden kann. Insbesondere die motorische Funktion der Hände nach schweren Verletzungen lassen sich besser wiederherstellen und der Heilungs- bzw. Lernprozess kann beschleunigt werden. [90]

SenseGlove 2

Ende Mai 2023 stellte die Firma „SenseGlove“ das Nachfolgemodell, den „SenseGlove Nova 2 ®“ vor. Er stellt eine direkte Verbesserung des Vorgängers dar, in dem er all seine Funktionen weiterverwendet und diese um neue erweitert und ergänzt. Die größte Neuerung, ist das Force Feedback in der Handfläche, welche über Kontraktion das Gefühl von einem gegriffenen Gegenstand in der Hand vermitteln kann. Zusätzliches vibrotraktiles Feedback ermöglicht weitere haptische Eindrücke an dieser Stelle. Das Angelpunkt für das haptischen Feedback des Daumens ist nun drehbar, sodass es sich mit dem Daumen, beim Öffnen und Schließen der Hand, mitbewegen kann. Dieser zusätzliche Freiheitsgrad kann die Größe von virtuellen Objekten besser simulieren, da die Daumenaufhüngung nicht mehr an einen Punkt gebunden ist (vgl. ’Abbildung 3.2.2.2’). Zum aktuellen Zeitpunkt steht noch kein Erscheinungsdatum und kein Preis fest, sodass dieser Handschuh nicht weiter betrachtet wird. [91]

Abbildung 3.17: SenseGlove Nova 2 [91]

Teslaglove

Der „Teslaglove ®“ ist ein innovatives Produkt von „Teslasuit“, das entwickelt wurde, um Extended-Reality-Erlebnisse noch realistischer zu machen. Es handelt sich um einen kabellosen Handschuh, der mit einer Vielzahl von Sensoren ausgestattet ist und durch die Integration von Elektroden auch taktiles Feedback erzeugen kann. Der Teslaglove ist hochpräzise und kann Handbewegungen in XR-Umgebungen sehr genau nachahmen. Dank der hochentwickelten Sensorik kann der Benutzer auch fühlen, wenn er virtuelle Objekte berührt oder nach ihnen greift. Das Vibrotaktile Feedback wird durch elektrische Impulse erzeugt, die von den Elektroden im Handschuh abgegeben werden. Das Force Feedback überträgt der Handschuh durch sein Exoskelett an die Nutzer. Durch das starre Führungssystem kann dieses Handschuhmodell mehr Kraft ausüben, als ein Seilzugsystem. [92]
Der Teslaglove ist kabellos und kann leicht mit anderen XR-Geräten verbunden werden, was ihn zu einem äußerst flexiblen und vielseitigen Gerät macht. Die Positionserkennung im Raum erfolgt wie bei anderen modernen Handschuhen über externe Tracker. Integrierte Biosensoren erlauben es, die Vitalwerte der Nutzer während der Verwendung zu messen und innovativ auf diese zu reagieren. Die erfassten Vitalwerte sind Puls, Hautleitfähigkeit und Temperatur. Sein derzeit mit 15.000€ hoher Anschaffungspreis macht ihn leider unattraktiv für einen großen Einsatz außerhalb der Industrie. [92]

Tactglove

Der „Tactglove ®“ der Firma „bHaptics“ ist vom Design her einem normalen Handschuh nachempfunden. Er soll die Nutzer in ihrer Tätigkeit möglichst nicht beeinträchtigen. Der Handschuh ist mit zwölf haptischen Aktoren ausgestattet, die ein vibrotaktiles Feedback in verschiedenen Abstufungen erzeugen können. Das Design ermöglicht die Verwendung von optischem Fingertracking, da die Finger nicht durch ein Exoskelett oder andere Aufsätze verdeckt werden . Dies ist auch notwendig, da der Handschuh über kein eigenes Fingertracking verfügt. Dennoch kann der Handschuh nativ über Bluetooth mit verschiedenen modernen VR-Headsets verbunden werden. Eine Integration mit AR-Headsets erfordert eine Integration in die AR-Anwendung, da eine native Schnittstelle über Bluetooth nicht möglich ist. [93]

3.2.2.3 Kleidung mit haptischem Feedback

Neben Datenhandschuhen gibt es eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten, den Nutzern haptisches Feedback zu geben. Die Integration in Kleidung ist hierbei vielversprechend, da es den Nutzer in seiner eigentlichen Tätigkeit (im besten Fall) nicht einschränkt. Gewohnte Handlungsabläufe können wie gewohnt ausgeführt und Trainings können realitätsnah durchgeführt werden. Einige Beispiele von Kleidung, die in der Lage ist, haptisches Feedback in unterschiedlichen Formen zu geben, wird im Folgenden vorgestellt und miteinander verglichen.

Teslasuit

Der „Teslasuit ®“ von „VR Electronics Limited“ ist ein zweiteiliger Anzug bestehend aus einer Jacke und einer Hose, mit integrierten vibrotaktilen Aktionszonen (vgl. ’Abbildung 3.18’). Die Technik, auf der das haptische Feedback des Anzugs basiert, sind Elektromyostimulation (EMS) und transkutane elektrische Nervenstimulation (TENS). Leichte Stromschläge (Stromstärke: 1-60 mA, Frequenz: 1-150 Hz) lassen die Muskeln kontrahieren, aktivieren Nerven und erzeugen damit ein Gefühl von Berührung. 80 Kontaktflächen, welche über den ganzen Anzug verteilt sind, sorgen für ein präzises Gefühl direkt auf der Haut. Verläufe und unterschiedliche Berührungsmuster können genauso simuliert werden wie einzelne „Stöße oder Schläge“ bzw. haptische Impulse. Der Anzug besitzt außerdem Sensoren zur Messung der Herzaktivität und soll zukünftig die Sauerstoffsättigung des Blutes überwachen können.

Die wichtigsten Anwendungsgebiete des Anzugs sind „Motion Capturing“ (z.B. in der Film- und Videospielproduktion), die Simulation von Lernszenarien und die Verwendung für Videospiele. Softwareseitig bietet der Teslasuit eine Integration über ein Plugin in die beiden großen Spiele Engines Unity und Unreal. Eine Verbindung zu einem Computer ist in jedem Fall notwendig, da sich der Anzug nur über ein Programm auf diesem verbinden und ansteuern verbinden lässt. Da das Anzugsystem eng am Körper getragen werden muss ist in sechs Größen pro Geschlecht verfügbar und kostet im Set ca. 13.000 $ [94, 95]

Abbildung 3.18: Teslasuit

Tactsuit X40

Im Bereich der Kleidung mit haptischem Feedback stellt der „Tactsuit X40 ®“ von *bHaptics* eine Besonderheit dar. Diese Weste wird über der normalen Kleidung getragen und erzeugt auf seinen 40 Aktivierungspunkten (ERM Motoren) durch Vibration, das Gefühl von Berührung. Unterschiedliche Vibrationsstärken und Vibrationsmuster können zu individuellen haptischen Eindrücken verhelfen (vgl. ’Abbildung 3.19’).

Abbildung 3.19: Tactsuit X40

Die Implementierung und Umsetzung von Signalen eines Computers, einer AR- oder VR-Brille oder eines Smartphones erfolgt entweder über eine native Implementierung, d.h. es wurde von den Entwicklern festgelegt, zu welchem Zeitpunkt

welches Muster mit welcher Intensität ausgespielt wird, oder die Weste errechnet aus einem Audiosignal ein passendes Vibrationsmuster.
Anwendungsfälle für diese Weste finden sich hauptsächlich im Videospielbereich, wobei das haptische Feedback dazu genutzt wird, den Spielern ein immersiveres Erlebnis zu bereiten. Neben dem Modell X40 gibt es das Modell X16 mit lediglich 16 Aktivierungpunkten. Außerdem gibt es zusätzliche Manschetten für die Arme, Beine und Füße, die das Haptische Feedback auf diese Körperregionen erweitern können. [93]

Haptic Lead Skin

Der japanische Hersteller „AI Silk“ arbeitet seit 2018 an einer neuen Technologie zum Erkennen der Position von Textilien und haptischem Feedback durch EMS. Mit nur ca. 380 g wiegt einer dieser Handschuhe ungefähr so viel, wie ein gewöhnlicher VR-Controller [96].
Der Gewebeverbund mit dem Namen „Haptic Lead Skin ®“ wurde 2023 in einem Handschuh auf der CES in Las Vegas vorgestellt. Das Material ist mit leitfähigen Fasern durchzogen, die elektrisch aktiviert werden können, um dem Träger leichte Stromstöße zu versetzen. Dieser Ansatz der verteilten Reizübertragung setzt nicht wie üblicherweise auf metallische Kontakte oder Zonen in Form von Elektroden zur Reizerzeugung und wirkt deswegen präziser und immersiver, da die Aktionsfläche der gesamte Handschuh ist und nicht bloß ein definierter Bereich. [97]

OWO Skin

Auf der CES 2023 in Las Vegas wurde erstmals das OWO Skin, ein T-Shirt mit haptischem Feedback, vorgestellt. Diese haptische Kleidung bietet ein auf EMS basierendes Vibrotaktiles Feedback-System mit zehn Zonen. Gesteuert wird das T-Shirt mit einer App, angeschlossen an einen Computer oder an ein Smartphone (vgl. 'Abbildung 3.20'). Anwendungen (vor allem Computerspiele) können entweder eine direkte Integration haben oder dynamisch (aus der Audiowiedergabe) berechnet werden. Die App kann zusätzlich bestimmte Muster in diversen Intensitäten abspielen. Haptisches Feedback kann dazu verwendet werden, um Muster wiederzugeben, die das Gefühl von Regen, leichten Berührungen oder zum Beispiel Schlägen abbilden. Aktuell steht diese zum Vorverkauf bereit, ein genaues Erscheinungsdatum ist noch nicht bekannt. [98]

Abbildung 3.20: OWO Skin [98]

3.2.2.4 Weitere Geräte mit haptischem Feedback

In diesem Kapitel sind alle Geräte zusammengefasst, die keiner der vorstehenden Kategorien zugeordnet werden können. Bei diesen Geräten steht die Technologie und nicht das Gerät selbst im Vordergrund.

Ultrasonic - Haptik durch Ultraschall

Mit dem Ziel, den LMC-Benutzern trotz des berührungslosen Trackings eine Form von taktilem Feedback zu geben, hat Ultraleap die Hardware-Serie Ultrahaptics entwickelt. Derzeit werden zwei Geräte angeboten, STRATOS Inspire für kommerzielle und Unterhaltungsanwendungen [99] und STRATOS Explore für Forscher und Entwickler [100]. Diese Mid-Air-Schnittstellen senden Ultraschallwellen aus, die die getroffene Hautoberfläche stimulieren, was als Vibration spürbar ist. Wie bei der LMC ist auch diese Technik auf eine Distanz begrenzt, in der das Feedback wahrgenommen werden kann (gilt für STRATOS Inspire: 63 cm T x 48 cm B x 48 cm H), wie dem Datenblatt zu entnehmen ist. Abgesehen von diesen Schwächen hat die Technologie vorteilhafte Eigenschaften. Zum einen wird trotz Berührungslosigkeit eine vibrotaktile Rückmeldung erzeugt, zum anderen führt diese Berührungslosigkeit zu einer besseren Hygiene. Dennoch bewerten Singhal und Phutane die Technologie (Ultrahaptics STRATOS Explore) als noch nicht reif für den Einsatz in der physischen Welt [101].

Force Feedback Lenkräder

In Rennsimulationen und Renncomputerspielen können Lenkräder mit haptischem Feedback eingesetzt werden, um das Fahrgefühl und das Spielerlebnis zu verbessern. Es ist wie ein normales Lenkrad aufgebaut und verfügt über zusätzliche Tasten zur Interaktion mit dem Computer oder der Spielkonsole. Das haptische Feedback kann in Form von Vibrotaktilem Feedback, z.B. bei Kollisionen des eigenen Rennwagens oder bei der Simulation des Untergrundes, oder als Force Feedback, z.B. durch erschwertes Drehen des Lenkrades oder sogar Gegenlenken, erfolgen. Beide Formen des haptischen Feedbacks sorgen für ein realitätsnäheres Spielgefühl und bieten den Spielern zusätzliches Feedback über die aktuelle Lage des virtuellen Autos.

Ringe mit haptischem Feedback
Ein Ansatz, um haptisches Feedback dezent zu vermitteln, ist der Einbau von Sensoren und Aktoren in Ringe. Diese fallen, anders als Kleidungstücke wie Handschuhe nicht so sehr auf und bieten trotzdem genügend Fläche für Hautkontakt. Im Artikel „Augmented tactile-perception and haptic-feedback rings as human-machine interfaces aiming for immersive interactions“ beschreibt Herr Sun einen Ring bzw. ein Ringsystem (ein Ring pro Finger), der haptisches Feedback und Temperaturempfinden simulieren kann. Vibrotaktiles Feedback wird beim Kontakt mit virtuellen Objekten aktiviert und die Temperatur des virtuellen Objekts kann über die Hitzeelemente simuliert werden. Beide reize müssen in der Anwendung angesprochen werden und der Ring kann diese Signale nicht von sich selbst generieren. [102]

3.2.2.5 Simulatoren

Ein klassischer Ansatz, um Training durch haptisches Feedback zu erweitern, sind Simulatoren. Simulatoren gibt es seit der Antike und sie dienen dazu, Lehrlingen die echte Situation künstlich in einer kontrollierten Umgebung, abzubilden. Die Lernenden haben so in der Regel einen Einblick in die Tätigkeit und können im eigenen Tempo am Training teilnehmen. Haptisches Feedback wird beispielsweise durch die Konstruktion des Simulators selbst wiedergegeben.

Ausbildungssimulatoren

Die moderne Ausbildung kann durch Simulatoren unterstützt werden. Besonders komplexe, gefährliche und sicherheitskritische Berufe benötigen vorab genügend Training, damit die Personen weder sich selbst, noch andere gefährden. Simulatoren können an dieser Stelle die reale Umgebung nachbilden und ein kontrolliertes und Risikofreies

Lernen ermöglichen. Ein Beispiel eines solchen Simulators ist der Flugsimulator von „Airbus“ (vgl. 'Abbildung 3.21'). Mit ihm ist es möglich ein Airbus A320-Cockpit zu simulieren, welches alle Funktionen eines richtigen Flugzeugs nachbildet und darstellt. Dieser Simulator verfügt über Servomotoren, die den gesamten Simulator bewegen, Monitore, die das Geschehen außerhalb visuell darstellen, Knöpfe, Anzeigen und Schalter zur Bedienung. Eine Software reagiert auf alle Benutzereingaben und simuliert unterschiedliche Szenarien. [103]

Abbildung 3.21: Cockpit eines Flugsimulators [103]

Einen ähnlichen Ansatz verfolgt die „Deutsche Bahn“ mit ihren Simulationskonzepten. Diese setzen zum einen auf die vollständige Nachbildung eines Lokführerstandes [104] und zum anderen auf Virtual Reality (mit VR-Brille) und haptische Datenhandschuhe (vgl. 'Abbildung 3.22'). Im zweiten Ansatz wird diese flexible Technologie genutzt, um verschiedene Arbeitsschritte abzubilden, ohne auf zusätzliches Equipment angewiesen zu sein. Die rein virtuellen Modelle bilden den allgemeinen Arbeitsalltag des Lokführers sowie eine Auswahl von auftretenden Komplikationen inklusive Lösungsansätzen ab. [105]

Abbildung 3.22: Norddeutsche Eisenbahnfachschule GmbH | Eurodual Simulator in Braunschweig [104]

Ein weiteres Beispiel ist die Militärausbildung. Diese kann durch moderne Methoden, z.B. um ein Laser-System erweitert werden, sodass auch hier in einer sicheren Umgebung trainiert werden kann. Echte Waffen werden um ein Laserzielsystem erweitert und ermöglichen ein Training mit echten Waffen und virtueller Munition. Treffer Feedback erfolgt über Computermonitore, das Gefühl für die Waffen ist jedoch das Echte. [106]

Medizinische Simulatoren

Speziell im medizinischen Bereich (d.h. im Bereich der Medizinlehre) können Simulatoren verwendet werden, um medizinische Behandlungen, Bewegungen, Handgriffe oder die Anatomie abzubilden. Der große Vorteil, des Einsatzes von Simulatoren im medizinischen Kontext ist, dass es kein Risiko für potenzielle Patienten gibt, da die Lehre ohne menschliche Versuchspersonen auskommt. Erst nach dem erfolgreichen Training an anatomischen Modellen kann die Arbeit mit echten Patienten begonnen werden. Das Training an leblosen Objekten kann so lange und so oft wie nötig durchgeführt werden und bildet (idealerweise) die echten Bedingungen und Gegebenheiten ab. Eine Besonderheit, die eigentlich alle Modelle verbindet, ist, dass sie das haptische Gefühl von Strukturen wiedergeben. Seien es die Unterschiede zwischen gesundem und kranken Gewebe, die Oberflächenbeschaffenheit oder die Verschieblichkeit von Strukturen. Alle Modelle versuchen stets, so nah wie möglich an das reale Vorbild zu kommen. Technisch unterstützte Simulatoren bieten in Bezug auf Realismus und Wirklichkeitstreue andere Maßstäbe als herkömmliche Modelle. Sie können Lautsprecher verwenden, um wie das Modell „SAM ®“ (siehe ’2.3.2 Beschreibung und Vorstellung des SkillsLab der Universität Siegen’), Töne wiederzugeben, mit denen Studierende die menschliche Anatomie besser lernen können. Motoren oder pneumatische Elemente erlauben es diesen sogar, sich zu bewegen, Bewegungsmuster nachzubilden und zu simulieren.

Ein Nachteil dieser physischen Simulatoren gegenüber Hard- und Softwarelösungen ist, dass diese nicht miteinander kommunizieren oder selten miteinander (in Kombination) verwendet werden können. Es fehlen Schnittstellen zwischen den Geräten, sodass jedes Modell immer seinen Anwendungsfall abbildet und oft nur für diesen verwendet werden kann. [107]

Im Folgenden werden einige Beispiele von modernen medizinischen Simulatoren gegeben, die jeweils einen medizinischen Aspekt abbilden.

KOKEN – Koloskopie-Trainer

Mit dem Koloskopie-Trainer für den unteren Gastrointestinaltrakt können verschiedene endoskopische Eingriffe, ohne Verletzungsrisiko für Patienten, trainiert werden. Die korrekte Handhabung des Endoskops kann durch das ausgestaltete Modell erlernt werden. Optional kann das Modell mit Polypen und verschiedenen Dünndarmvarianten erweitert werden, um das Training abwechslungsreicher und anspruchsvoller zu gestalten. Diese Form der Anpassung durch verschiedene (physische) Einsatze wird oft bei solchen Modellen verwendet. Die Individualisierung und Darstellung unterschiedlicher Krankheitsbilder in einem Modell ist preisgünstiger, als starre Modelle, die jeweils nur einen Fall abbilden (vgl. ’Abbildung 3.23’).

Neben unterschiedlichen Fällen können an einem Modell auch unterschiedliche Verfahren trainiert werden. In diesem Fall wäre das beispielsweise das Erfassen und Beurteilen des Kolons, einschließlich Tumor, Polypen und Darmwand. Optional kann auch die Polypektomie mit einem elektrischen Skalpell und die Blutstillung trainiert werden. Beide Maßnahmen sind grundverschieden und doch am selben Modell trainierbar.

Zudem kann optional die richtige Handhabung des Enteroskops im Dünndarm mit zwei verschiedenen Schwierigkeitsgraden erlernt werden. Die eigene Ausrüstung wird für das Training verwendet, um den Transfer des Gelernten in die „reale“ Anwendung zu erleichtern. Solche Formen der Schwierigkeitsgrade ermöglichen es, das Training leicht zu beginnen und zunehmend die Komplexität erhöhen. [108]

Abbildung 3.23: KOKEN LM-107 – Colonoscopy (Lower GI Endoscopy) Simulator [108]

Pedia Roid – Kinderpatienten Simulator

Der medizinische Trainingsroboter „Pedia Roid ®“ der Firma „tmsuk co“ ist einem sechsjährigen Kind nachempfunden und soll in der Pädiatrie die Behandelnden auf den Umgang mit Kindern vorbereiten. Zu den Funktionen des Simulators zählen Abwehrreaktionen, wie Bewegungen, Schreien und Rötungen, Interaktion mittels Kommunikation, die Simulation von Vitalzeichen, wie Atmung und Herzschlag, Gesichtsausdrücke, mittels Blickkontakt und der Bewegung von Mund und Zunge, und die Simulation von Notfällen und Krankheiten. Der japanische Hersteller zielt vor allem auf die Ausbildung von Zahnärzten und die Lehre des ersten physischen Kontakts zwischen Behandelnder Person und Kinder-Patient ab. Durch diesen Roboter kann eine stressige Situation simuliert werden, ohne das es zu Stress für Kinder oder Schauspieler kommen muss. Es können Trainings- und Prüfungsszenarien abgebildet werden und der Roboter kann zahlreiche Fachbereiche abdecken. Mit einem hohen Anschaffungspreis von ca. 200.000 Euro ist die Beschaffung nicht für jede Einrichtung sinnvoll. [109]

3.2.3 Vergleich der Hardware Lösungen

Nachdem im vorangegangenen Kapitel die Hardware für Augmented Reality-Anwendungen und haptisches Feedback vorgestellt wurden soll nun, mit Hilfe von Tabellen, ein Vergleich zwischen den Geräten der jeweiligen Technologie, erfolgen. Aus Sicht der Anwendung hat die AR-Hardware immer das selbe Ziel, nämlich die Darstellung der Anwendung. Im Punkt Funktionsumfang sind die Geräte nicht unterschiedlich genug, sodass in diesem Fall ein Vergleich der einzelnen Hardware Spezifikation durchgeführt wurde. Der Vergleich von ähnlichen Umsetzungen der selben Technologie soll die kleinen Unterschiede aufzeigen. Diese Analyse wird als *Most-Different-Analyse* bezeichnet. Im Fall der Hardware zur Wiedergabe von haptischem Feedback unterscheidet sich, je nach Hardware, der Anwendungsfall und der Vergleich erfolgt hierbei funktionsspezifisch. Bei diesem Vergleich sollen die allgemeingültigen Eigenschaften der Hardware und die Ähnlichkeiten herausgestellt werden. Dies wird als *Most-Similar-Analyse* betitelt. Als Quelle standen sowohl die Webseiten der jeweiligen Hersteller, die Dokumentation für Entwickler (wenn möglich Datenblätter), die ebenfalls von den Herstellern bereitgestellt wurden, als auch der technische Support, falls Informationen nicht direkt zugänglich oder widersprüchlich waren.

3.2.3.1 Vergleich der Augmented Reality-Hardware

Die Tabelle in 'Abbildung 3.24' zeigt eine Übersicht über die aktuellen Augmented Reality-Headsets. Die Tabelle liefert einen Vergleich in den wichtigsten Kategorien und im folgenden Kapitel werden die Geräte einzeln vorgestellt. Die Informationen stammen zusätzlich von der Webseite VR-Compare.com (https://vr-compare.com) und arvrtips.com (https://arvrtips.com/vr-headset-comparison-tool/)und wurden mit den Daten der jeweiligen Hersteller abgeglichen.

Vergleich der Head Mounted Displays

Kategorie	Nreal Light	Nreal Air	Meta Quest 2	Magic Leap One	Magic Leap 2	Microsoft Hololens 2	Varjo XR 3
Hersteller	Nreal	Nreal	Meta	Magic Leap	Magic Leap	Microsoft	Varjo
Gerätetyp	Smartphone-gestützte AR	Smartphone-gestützte AR	Stand Alone VR	Stand Alone AR	Stand Alone AR	Stand Alone AR	PC gestützte VR
Veröffentlichung	21.08.2020	04.03.2022	13.10.2020	08.08.2018	30.09.2022	07.11.2019	01.01.2021
Verkaufspreis	499,00 $	400,00 $	399,00 $	2.295,00 $	3.299,00 $	3.500,00 $	5.495,00 $
Auflösung (pro Auge)	1920x1080	1920x1080	1832x1920	1280x960	1440x1760	1440x936	2880x2720
Bildwiederholrate	60 Hz	90 Hz	120 Hz	122 Hz	120 Hz	60 Hz	90 Hz
FoV (diagonal)	52°	46°	85°-97°	50°	70°	52°	90°
Gewicht	106 Gramm	76 Gramm	503 Gramm	316 Gramm	260 Gramm	556 Gramm	594 Gramm
Tracking-Typ	6 DoF (2 Kameras)	3 DoF	6 DoF (4 Kameras)	6 DoF (4 Kameras)	6 DoF (4 Kameras)	6 DoF (4 Kameras)	6 DoF (Marker)
Akkulaufzeit	2,5 Stunden	5 Stunden	3 Stunden	3 Stunden	3,5 Stunden	3 Stunden	Kein Batteriebetrieb

Abbildung 3.24: Vergleich der Head-Mounted Displays

Bei einem Vergleich der derzeit verfügbaren AR-Headset-Hardware fällt sofort der Preisunterschied auf. Dieser liegt bei den verglichenen Modellen zwischen 400 und 5.500 Dollar. Je nachdem, wie viele dieser Brillen in einem Lernszenario angeschafft werden müssen, ist dies ein nicht zu unterschätzendes Kriterium. Weiterhin kann zwischen Brillen unterschieden werden, die ohne zusätzliche Rechenunterstützung, z.B. durch einen Computer oder ein Smartphone, auskommen (Stand-Alone-Brillen), VR-Brillen mit zusätzlicher AR-Funktion und Brillen, die nicht ohne zusätzliche Hardware auskommen. Die Headsets unterscheiden sich in der Qualität der Displays und damit in der Qualität der Bilder.

Die Auflösung der beiden Magic Leap-Brillen ist geringer als Full HD, weshalb das dargestellte Bild in den anderen Brillen besser aussehen sollte. Ein Vorteil der Nreal-Brille ist die verwendete Displaytechnologie OLED, die vor allem bei hellen Lichtverhältnissen und Tageslicht einen besseren Kontrast liefert. Ein weiteres Qualitätsmerkmal, bei dem vor allem VR-Headsets punkten, ist das diagonale Sichtfeld. Diese Kennzahl gibt die Größe (in der Diagonale) des darstellbaren Inhalts an, wobei generell gilt: je größer, desto besser. Der Unterschied zwischen AR-Brillen mit ca. 50 Grad und VR-Brillen mit ca. 90 Grad ist enorm.

Neben der Displaytechnologie ist ein besonders guter Tragekomfort wichtig, damit die Brille von den zukünftigen Nutzern akzeptiert und auch über einen längeren Zeitraum getragen werden kann. Hier spielt vor allem das Gewicht eine wichtige Rolle. Die Brille von Magic Leap und die auf Smartphone-Berechnung basierende Brille haben hier den Vorteil, dass das Gewicht der Recheneinheit nicht am Kopf getragen werden muss. Im Vergleich liegt das Gewicht bei ca. 100 Gramm, während die Microsoft Hololens mit über 550 Gramm mehr als das Fünffache wiegt. Ein Grund für das Gewicht ist auch der eingebaute Akku. Hier müssen die Entwickler zwischen höherem Gewicht und besserer Akkulaufzeit und geringerem Gewicht und schlechterer Akkulaufzeit abwägen. Alle verglichenen Brillen kommen mit etwa drei Stunden Akkulaufzeit aus.

3.2.3.2 Vergleich der Datenhandschuhe für haptisches Feedback

In diesem Kapitel sollen nun die Geräte, die in der Lage sind haptisches Feedback zu erzeugen miteinander verglichen werden, um möglichst genau den aktuellen Stand der Technik im Bereich haptischem Feedback, in Form von vibrotaktilem und Force Feedback, darzustellen. Eine Vergleichstabelle soll helfen auf die Unterschiede und auf die Gemeinsamkeiten aufmerksam zu machen (vgl. 'Abbildung 3.25').

Vergleich der haptischen Datenhandschuhe

Kategorie	Manus Prime X Haptic VR	HaptX Gloves G1	LucidGlove V4	SenseGlove Nova	Teslaglove	Tactglove
Hersteller	Manus VR	HaptX Inc.	LucasVR	SenseGlove B.V.	TESLASUIT	Tactigon Skin S.r.l.
Vibrotaktiles Feedback	Vibration an den Fingern, Handflächen und am Handrücken	Vibrotaktiles Feedback mittels Luftdruck	Kein Vibrotaktiles Feedback	Vibration an Zeigefinger, Daumen, Handrücken	transkutane elektrische Nervenstimulation (TENS)	Vibration an den Fingerspitzen
Force Feedback	Kein Force Feedback	Force Feedback durch ein Exoskelett	Force Feedback durch ein Seilzug-System	Force Feedback durch ein Seilzug-System	Force Feedback durch ein Exoskelett	Kein Force Feedback
Veröffentlichung	06.2021	Q3 2023	Q1 2022	03.2022	(TBA) 2024	Q2 2022
Verkaufspreis	3.999,00 $	5.495,00 $	(Materialkosten) ca. 60 $	5.500,00 $	14.999,00 $	399,00 $
Programmiersprachen	C++	C++	C#	C++, C#	C++, C#	C++ C# Python Java
Schnittstelle (zu Unity und Unreal Engine)	ManusPlugin, Unity, Unreal Engine, SteamVR	Unity, Unreal Engine	SteamVR	SenseGlove Plugin, Unity, Unreal Engine	TeslaPlugin Unity, Unreal Engine	Unity, Unreal Engine
Native Integration	Keine	Keine	Keine	Meta Quest 2	Meta Quest 2	Keine
Gewicht	70 Gramm	450 Gramm	ca. 130 Gramm	320 Gramm	300 Gramm	ca. 115 Gramm
Tracking-Typ	2 DoF pro Finger, magnetisch	1 DoF pro Finger, magnetisch	1 DoF pro Finger, Seilzug	2 DoF pro Finger, Seilzug	2 DoF pro Finger, Exoskelett	Kein Tracking
Akkulaufzeit	5 Stunden (Akku austauschbar)	3 Stunden	Kein verbauter Akku/ Externe Stromquelle	3 bis 4 Stunden	4 bis 5 Stunden	3 Stunden

Abbildung 3.25: Vergleich der Hardware für haptisches Feedback

Wie bei den Head-Mounted Displays gibt es auch bei den Datenhandschuhen deutliche Preisunterschiede. Die günstigste Variante ist für ca. 60 Dollar Materialkosten erhältlich, muss dann aber selbst zusammengebaut werden. Die kommerziell erhältlichen Lösungen unterscheiden sich je nach verwendeter Technologie und angebotener Genauigkeit und Funktionalität. Handschuhe mit einfacher vibrotaktiler Rückmeldung sind für ca. 300 Dollar erhältlich. Um Force Feedback zu bekommen liegen die Preise bei ca. 4.000 Dollar. Die teureren Modelle unterstützen in der Regel Force Feedback in verschiedenen Formen, entweder über ein Exoskelett oder ein Seilzugsystem, und alle verfügen zusätzlich über vibrotaktiles Feedback und Fingertracking (entweder mit einem oder zwei Freiheitsgraden). Softwareseitig verfügen alle Handschuhe mit Ausnahme des LucidGlove über eine Schnittstelle zu Unity und der Unreal Engine.

Der größte Unterschied liegt im Gewicht der Datenhandschuhe. Die Handschuhe ohne Exoskelett und 3D-gedruckte Komponenten wiegen um die 100 Gramm und sind noch flexibel wie ein normaler Arbeitshandschuh. Die starren Modelle wiegen mit 300 bis 450 Gramm deutlich mehr, was sich vor allem bei längerem Tragen bemerkbar macht. Zu diesem Gewicht muss noch die Möglichkeit der Positionserkennung im Raum hinzugerechnet werden. Dies kann entweder ein Tracker der HTC Vive oder ein normaler Controller des jeweiligen HMDs sein.

Zuletzt ist noch die Akkulaufzeit zu erwähnen, die entweder ca. drei Stunden beträgt oder durch austauschbare Akkus sogar im Dauerbetrieb genutzt werden kann.

3.3 Stand der Technik: Vorstellung der Software Lösungen

Dieses Kapitel befasst sich mit aktuellen Beispielen aus dem Bereich der Softwareanwendungen. Es soll den aktuellen Stand der Technik medizinischer Augmented Reality-Anwendungen und Anwendungen mit haptischem Feedback abbilden. Ein besonderer Fokus liegt auf Applikationen aus dem medizinischen Bereich mit haptischem Feedback.

3.3.1 Allgemeine Augmented Reality-Anwendungen

In diesem Kapitel wird eine Auswahl aktueller AR-Anwendungen vorgestellt, um dem Leser den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik näher zu bringen. Besonderes Augenmerk wird hierbei auf Anwendungen mit medizinischem Bezug gelegt. Es werden computerbasierte Anwendungen genauso wie Smartphone Applikationen betrachtet. Es gibt beispielsweise zahlreiche moderne Smartphone-Apps, die von AR-Technologien Gebrauch machen. Da es sich hierbei um ein weites Feld handelt, können nicht alle in Betracht gezogen werden. Einige der bekanntesten und erfolgreichsten werden im Folgenden, sortiert nach Ihrem Anwendungsgebiet, vorgestellt.

3.3.1.1 Industrielle Augmented Reality-Anwendungen

Dieses Kapitel befasst sich mit Augmented Reality-Anwendungen, die bereits heute im täglichen Gebrauch von Unternehmen sind. Sie verhelfen, teilweise branchenübergreifend, zur schnelleren, effizienteren und anschaulicheren Methoden, Daten zu visualisieren, die Ausbildung zu verbessern oder den Kunden Produkte näher zu bringen.

Architektur

Augmented Reality kann im Bereich der Architektur verwendet werden, um geplante Bauvorhaben wie Häuser, Räume oder die Position von Möbeln vor der tatsächlichen Konstruktion begutachten zu können (vgl. 'Abbildung 3.26'). Dabei werden virtuelle Objekte an ihre vorgesehene (zukünftige) Position projiziert und im Falle eines Hauses oder eines Raums auch „betreten“ werden. Kunden erhalten ein ganz anderes Gefühl für Größen und Größenverhältnisse, da die virtuelle, maßstabsgetreue Planung in der physischen Welt visualisiert wird.

Abbildung 3.26: AR in der Architektur [110]

AR in der Bauindustrie

Der Verlauf von Rohren und Leitungen im Boden ist manchmal schwer zu verfolgen oder aus bestehenden Plänen abzulesen. Eine deutlich einfachere und visuell ansprechendere Variante ist die Nutzung von Augmented Reality zur Visualisierung der Verläufe im Boden und gegebenenfalls in den Wänden. Die Daten aus den Bauplänen werden in ein virtuelles Koordinatensystem übertragen und dieses wird an die physischen Gegebenheiten angepasst (vgl. 'Abbildung

3.27'). Durch dieses System kann der Verlauf in Echtzeit überwacht werden, um zum Beispiel bei Bohrarbeiten die genaue Lage der Rohre und Kanäle berücksichtigen zu können.

Abbildung 3.27: AR in der Bauindustrie (Foto: DFKI) [111]

AR in der Automobilindustrie

Die Konstruktion von Komponenten der Automobilindustrie erfordert viel Wissen und Vorstellungskraft. Sowohl in der Planung und Konstruktion, der Fertigung und auch in der Vermittlung von Montageschritten können Methoden der AR verwendet werden, um so Prozesse zu verbessern und zu beschleunigen. In der Konstruktion können Modelle vor den Konstrukteuren und Kunden projiziert werden, sodass diese die einzelnen Komponenten oder auch das komplette Fahrzeug, als maßstabsgetreues Modell oder in seiner Originalgröße, vor sich wahrnehmen können (vgl. 'Abbildung 3.28'). Die Visualisierung des fertigen Produkts, sei es Fahrzeug oder Komponente, erfolgt mittels Augmented Reality und hat zum Vorteil, dass Größenverhältnisse, relative Positionen, einzelne Details und auch mögliche Fehler in der Planung besser visualisiert werden können.

Abbildung 3.28: AR in der Automobilindustrie [112]

Head-Up-Displays in Automobilen

Die Anzeige diverser Parameter wie Drehzahl, Geschwindigkeit und die Position des Blinkers sind während der Fahrt von großer Bedeutung. Moderne Autos bieten teilweise die Möglichkeit diese Informationen durch ein halbtransparentes Display (sogenannte Head-up Display, kurz: *HUD*) direkt an der Frontscheibe vor dem Fahrer, anzuzeigen. Die Anzeige kann über die Statusanzeige hinaus erweitert werden und zusätzlich die Richtung anzeigen,

die das Navigationssystem für die Routenplanung errechnet hat. Anders als die anderen Systeme, die bisher vorgestellt und in Betrachtung gezogen wurden, ist diese Form der Augmented Reality starr und positionsunabhängig. Sobald die Navigation, zum Beispiel durch virtuelle Pfeile auf der Fahrbahn, im Head-Up-Display dargestellt werden, werden die Vorteile der Augmented Reality erst richtig ausgenutzt (vgl. 'Abbildung 3.29').

Abbildung 3.29: AR in Automobilen zur Anzeige eines Head-up-Displays [113]

Augmented Reality in der Pilotenausbildung

Die Ausbildung zum Piloten ist eine komplexe, arbeitsintensive und risikoreiche Tätigkeit. Darüber hinaus wird den Auszubildenden eine große Anzahl von Menschenleben anvertraut, wie es auch im Beruf selbst der Fall ist. Vor diesem Hintergrund soll Augmented Reality eingesetzt werden, um die Ausbildung realitätsnäher zu gestalten. So werden die Auszubildenden auf reale Szenarien vorbereitet und das Handeln wird besser vermittelt. Die Vorgehensweise ist wiederum ähnlich wie bei den oben beschriebenen Möglichkeiten ('Abbildung 3.21'), mit dem Unterschied, dass AR über ein HMD verwendet wird. Eine Studie hat sich zusätzlich auf einen weiteren Aspekt spezialisiert, Geschlechtsspezifik bei Piloten. In der Studie wurde Augmented Reality nicht nur zur Unterstützung der Aufgaben eingesetzt, sondern auch zur Unterstützung der individuellen Interessen der verschiedenen Piloten in Bezug auf Overlays und Erklärungen. Ein weiterer wichtiger Aspekt während des Trainings war der permanente Zeitdruck durch das HMD, welche die reale Situation nachempfinden sollte. [114]

Augmented Reality in der Mechanik

Wie bereits in den vorangegangenen Bereich beschrieben, kann Augmented Reality auch in anderen Bereichen mit ähnlichen Anwendungsmethoden eingesetzt werden. Eine dieser Methoden wird in der Mechanik verwendet. In diesem Beispiel handelt es sich um ein militärisches Fahrzeug, genauer gesagt um einen Panzerturm. Augmented Reality wurde hier eingesetzt, um zu sehen, wie nützlich sie bei der Wartung dieser Fahrzeuge sein kann. Die Sicht der Nutzer wird durch Texte, Beschriftungen, Pfeile und animierte Sequenzen erweitert, die Vorgänge beschreiben und wie diese auszuführen sind. Eine Evaluation mit zwei Gruppen sah wie folgt aus: Benutzer haben alle Daten korrekt aufgelistet und angezeigt, wo sich die richtigen Geräte befanden, während andere Benutzer zum Vergleich nur alle Informationen auf Abruf hatte. Während der Tests musste die Probanden 18 Aufgaben unter Feldbedingungen in dem engen und kleinen Raum des Geschützturms ausführen. Dazu gehörten zum Beispiel das Lösen und Befestigen von Halterungen, das Reparieren von Lampen an den Displays und das Wiederanschließen der entsprechenden Kabel. Die Ergebnisse zeigten, dass Benutzer, denen alle Daten korrekt aufgelistet und angezeigt wurden, unnötige Bewegungen vermieden und somit ihre Arbeit schneller, effizienter und angenehmer erledigen konnten. In der Mechanik wurde diese Art

der Anwendung durch ein spezielles System verbessert. Dies ist der AR-Mentor, der wiederum eine Kombination aus drei verschiedenen Systemen ist. Zuerst ein “Optical-See-Through (OST) display device“ mit “high precision 6-DegreeOf-Freedom (DOF) pose tracking“ und ein “virtual personal assistant (VPA)“ mit einer eingestellten Sprache, Möglichkeit der verbalen Interaktion und Kommunikation. Das OST ist ein HMD, daher ist das System so konfiguriert, dass nach der Installation keine Änderungen vorgenommen werden müssen. So können sich der Bediener voll und ganz auf die Aufgaben konzentrieren. Die Bedienung ist die gleiche wie beim Tower, der einzige Unterschied ist das VPA. Während das HMD aktiviert ist, kann sich, bei Fragen und benötigten Hilfestellungen, durch verbale Fragen an das System gewendet werden. Dadurch können die Anwender völlig selbstständig arbeiten und benötigen nur das System als Hilfe. [115, 116]

3.3.1.2 Personalisierung mittels Augmented Reality

Augmented Reality-Anwendungen für Konsumenten weisen zunehmend die Tendenz zur Personalisierung auf. AR bietet die Möglichkeit, virtuelle Objekte im eigenen Haus oder am eigenen Körper darzustellen. So kann vorab überprüft werden, ob ein Möbelstück ins eigene Haus passen würde oder ob das online ausgesuchte Brillenmodell gefällt. Die folgenden Beispiele sind nur ein Auszug aus den Möglichkeiten, virtuelle Objekte zu projizieren. Die Betriebssysteme und Webseiten bieten aktuell die Möglichkeit, durch die Implementierung von bestimmten APIs und Schnittstellen, AR-Inhalte über das Smartphonedisplay anzuzeigen. Apple selbst gibt an, dass es tausende Apps mit AR-Inhalten in ihrem AppStore zum Herunterladen gibt. [117]

Mister Spex

Der Online Brillenshop „Mister Spex“ bietet seinen Kunden die Möglichkeit, sich selbst eine virtuelle Brille über eine Webcam aufzusetzen. Das digitale Einkaufserlebnis wird so durch eine virtuelle Anprobe ergänzt. Zunächst wird das Gesicht von der Webcam erfasst und die Nutzer sollen es in einem Rahmen ausrichten. Nach einer Drehung nach Links und Rechts kann ein Algorithmus gewisse Punkte im Gesicht sowie deren Tiefeninformationen errechnen. Aus den gewonnenen Informationen kann ein virtuelles Modell des Kopfes errechnet und dargestellt werden. An die erkannten Punkte angepasst, wird den Nutzern eine virtuelle Repräsentation der gewählten Brille aufgesetzt (vgl. ’Abbildung 3.30’).

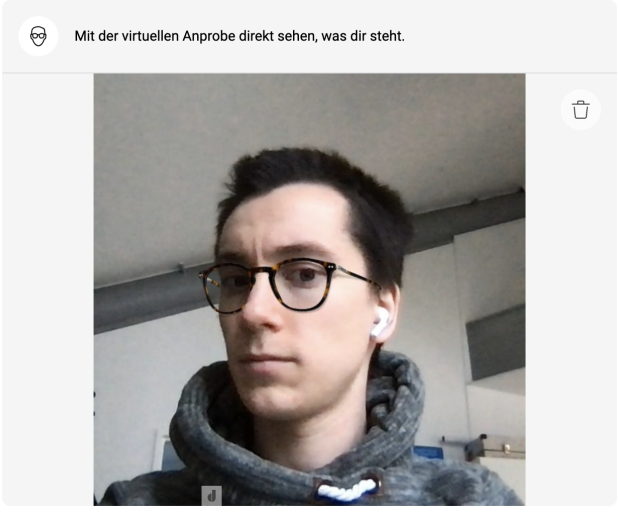


Abbildung 3.30: AR in der Personalisierung am Beispiel von Mister Spex

Amazon AR-Viewer

Der Versanddienstleister „Amazon“ hat 2022 für ausgewählte Produkte die Möglichkeit eingeführt, virtuelle Repräsentationen dieser vor dem Kauf mittels Augmented Reality direkt vor sich zu projizieren. Dieses System kann dazu verwendet werden, Produkte vorab durch die Kamera zu betrachten und so die Kaufentscheidung zu beeinflussen. Kunden können ein Gefühl dafür bekommen, wie Gegenstände in ihrer Wohnung aussehen oder Kleidung direkt an ihnen selbst aussieht, bevor sie diese bestellen (vgl. 'Abbildung 3.31'). Das Prinzip basiert auf Ankerpunkten, die in der Umgebung erkannt und verfolgt werden können. Dadurch kann das Produkt immer auf der selben Stelle angezeigt werden, auf die richtige Größe skalliert werden und teilweise sogar Schatten werfen und auf Lichtquellen reagieren. [118]

Abbildung 3.31: AR in der Personalisierung am Beispiel von Amazon [119]

Ikea Place APP

Das Möbelhaus „Ikea“ war eines der ersten Unternehmen, die mit ihrer eigenen App mithilfe von Augmented Reality, die Möglichkeit bieten, sich Möbel in seinem eigenen zu Hause anzeigen zu lassen. Der Raum wird dazu mit einem Augmented Reality-fähigen Smartphone eingescannt und virtuelle Modelle der Möbel, die in der App ausgewählt werden können, auf Knopfdruck, im eigenen Wohnraum angezeigt werden. Die Position der virtuellen Objekte bleibt, selbst beim Bewegen des Smartphones, bestehen und kann außerdem abgespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt erneut betrachtet werden (vgl. 'Abbildung 3.32'). Die Abbildung zeigt, wie ein virtuelles Modell eines Stuhls aus dem aktuellen Katalog in das Wohnzimmer des Nutzers projiziert wird. Dieser kann nun entscheiden, ob das neue Möbelstück zu seiner Einrichtung passt und ob er es z.B. direkt aus der App heraus bestellen möchte. Darüber hinaus ist es möglich, verschiedene Varianten in Farbe, Form oder Modell anzupassen, so dass viele Möglichkeiten nacheinander ausprobiert werden können.[120]

Abbildung 3.32: AR in der Personalisierung am Beispiel von Ikea, Inter IKEA Systems B.V. [120]

3.3.1.3 Augmented Reality in der Populärkultur

Ein großes und umsatzstarkes Einsatzgebiet für Augmented Reality ist die Unterhaltungsbranche. In Science Fiction Filmen wird Augmented Reality dazu verwendet, fortschrittliche Technologien darzustellen. Bildschirme und Monitore werden durch Hologramme und Augmented Reality-Brillen oder -Kontaktlinsen ersetzt, die physische Welt wird um Werbeeinblendungen erweitert und Daten in jeder Form werden um Objekte und Personen herum dargestellt. Viele dieser futuristisch wirkenden Visionen einer möglichen Zukunft sind, zumindest in Ansätzen, heute schon verfügbar. Beispielhaft ist die Videospielindustrie. Täglich werden unzählige Apps und Spiele veröffentlicht und einige von Ihnen haben AR-Funktionen oder basieren in ihren Spielprinzipien auf dieser. In manchen Fällen können Funktionen dieser Spiele oder Filme ihren Weg in Industrie- und Medizinanwendungen finden oder als Basis für diese dienen. Einige Beispiele für die Verwendungen von Augmented Reality in Filmen, sowie die Verwendung von AR-Elementen in Videospielen werden im folgenden vorgestellt.

Videospiele: Pokémon Go

Anfang Juli 2016 veröffentlichte die Firma „The Pokémon Company, Nintendo“ das Augmented Reality-Spiel „Pokémon GO ®“ und löste damit eine weltweite Begeisterung aus. Das Spielprinzip besteht daraus, dass kleine Wesen, genannt „Pokémon“, durch die Augmented Reality-Funktionen der App überall in der Welt virtuell dargestellt werden können. Ziel des Spiels ist es, durch die reale Welt zu laufen und immer wieder Pokémons zu begegnen, um diese einzusammeln. Den Spielern wurde erstmals die Möglichkeit gegeben, die Pokémons in die physische Welt zu projizieren, sie einzufangen und diese zu füttern.

Metaverse

Das Unternehmen Facebook hat seinen Namen am 28. Oktober 2021 in Meta geändert. Dies soll die geänderte Unternehmensstrategie, nämlich die Erschaffung einer künstlichen, virtuellen Welt, dem Metaverse, widerspiegeln. In diesem Raum sollen Nutzer, repräsentiert durch Avatare, eine neue Existenz aufbauen können (vgl. 'Abbildung 3.33'). Sie sollen darin Arbeiten, ihre Freizeit verbringen und einkaufen können. Meta versucht den Zugang zu dieser Sammlung von Anwendungen so einfach wie möglich zu gestalten. Aktuell ist lediglich eines ihrer VR-Headsets, z.B. die Meta Quest 2, und Anmeldung mit einem eigenen Account nötig. In dieser virtuellen Welt können Entwickler eigene Anwendungen einbetten und Spieler können, in der Regel, frei zwischen diesen wechseln. Virtuelle Konferenzen, Schulungen und private Treffen sind möglich und gut abbildbar. [121]

Abbildung 3.33: Metaverse von Meta, vormals Facebook [122]

Das Ziel ist scheinbar ein Erlebnis gleich dem sogenannten „Holodeck“ aus der Filmserie Star Trek. Ein virtueller Raum, in dem jedes Szenario, jede Handlung und jeder Ort virtuel nachgebaut und erlebt werden kann. Durch die Einbindung weiterer Sinne (Haptik, Geruch usw.) kann die Immersion weiter gesteigert werden und Spieler könnten völlig vergessen, dass sie sich in einer Simulation befinden. Die Filmreihe „Matrix“ zeigte eine Dystopie, in der fast alle Menschen in einer Simulation lebten und keine Ahnung von ihrem realen Körper und der physischen Welt hatten. Je nachdem, wie weit dieser Gedanke gedacht wird, könnte die Frage aufkommen, ob sich das ganze Leben nicht bereits jetzt schon in einer Simulation befindet.
Trotz all diesen Bemühungen und hohen Investitionen wird die Erfahrung bei der Nutzung zumeist negativ wahrgenommen. Die grafische Darstellung liegt deutlich unterhalb des Stands der Technik, die Verbindungsqualität variiert teilweise stark zwischen den Nutzern und Probleme in der Umsetzung der Spiele (sog. „Bugs“) und Systemabstürze trüben das Metaverse-Erlebnis. [123]
Vergleichbare Ansätze werden auch in VR-Anwendungen umgesetzt und angeboten. Einer der größten Anbieter ist „VRChat ®“ der „VRChat Inc.“. Dieser Anbieter zeichnet sich durch eine Vielzahl von Räumen, sogenannten „Welten“, aus, in denen speziell von der Community entwickelte Szenarien angeboten werden. So können Spiele, Chaträume oder andere Anwendungen in dieser Umgebung nachgebildet werden. Ein weiterer Vorteil ist die Integration von Full-Body-Trackern, die es dem Nutzer ermöglichen, seine Bewegungen vollständig in VR abzubilden.

3.3.2 Medizinische Augmented Reality-Anwendungen

Neben den Anwendungen mit einem eher konventionellen/industriellen Hintergrund gibt es auch Beispiele für medizinische Augmented Reality-Anwendungen. Anders als konventionelle AR-Anwendungen gelten bei medizinischen Anwendungen andere (höhere) Sicherheitsstandards. Je nachdem, wie stark Patienten in die Nutzung involviert sind, müssen die Anwendungen bestimmte Sicherheitskriterien erfüllen, um überhaupt zugelassen zu werden. Die genauen Angaben, welche Kriterien erfüllt werden müssen und die Prüfung über die Erfüllung dieser findet sich beim Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (kurz: BfArM)[5]. Sofern eine Augmented Reality-Anwendung ein Medizinprodukt bzw. eine digitale Gesundheitsanwendungen (kurz: *DiGA*) ist, muss es beim BfArM registriert und erfolgreich geprüft werden. Nach einem erfolgreichen „Fast-Track-Verfahren“ kann eine Anwendung als DiGA klassifiziert und in die Versorgung aufgenommen werden. [125]
Medizinische AR-Anwendungen dienen oft der Visualisierung von medizinischen Daten. Für die Rekonstruktion von 3D-Modellen müssen möglichst gute Daten verwendet werden, denn nur wenn eine gute Ausgangslage besteht, kann auf ein gutes Ergebnis gehofft werden. Um, vor allem zu Forschungszwecken, mit guten Daten versorgt zu werden gibt es Online-Datenbanken mit anonymen medizinischen Befunden, Bildern, Krankheiten und konkreten Fällen.

[5] „Das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) ist eine selbstständige Bundesoberbehörde im Geschäftsbereich des Bundesministeriums für Gesundheit (BMG).“ [124]

Eine dieser Datenbanken (kurz: *DB*) ist PhysioNet.
PhysioNet ist eine freie und offene Online-Plattform, die sich der Förderung des Austauschs und der offenen Entwicklung von medizinischen Datenbanken und Signalen widmet. PhysioNet ist eine Initiative des Massachusetts Institute of Technology und wurde 1999 ins Leben gerufen. PhysioNet bietet Wissenschaftlern weltweit Zugang zu einer Vielzahl medizinischer Datenbanken, darunter zum Beispiel Elektrokardiogramme, Elektroenzephalogramme und andere biomedizinische Signale. Die Plattform bietet auch Werkzeuge und Ressourcen, um Forscher bei der Analyse und Verarbeitung dieser Daten zu unterstützen. PhysioNet hat dazu beigetragen, die internationale Zusammenarbeit zu fördern und die Entwicklung medizinischer Diagnose- und Behandlungssysteme zu beschleunigen. [126]

Operationsvorbereitung und -planung

Der „Mixed Reality Viewer ®“ von „Brainlab“ ist eine medizinische Augmented Reality-Anwendung zur Visualisierung von Patientendaten, direkt im Sichtfeld der Anwender. Diese Software kann zur Operationsplanung und zur Patientenaufklährung verwendet werden. Ein großer Vorteil gegenüber anderen 3D-Visualisierungsanwendungen ist die Verwendung des Brainlab-Algorithmus zur Erkennung von anatomischen Strukturen. Dadurch können einzelne Bereiche farblich von einander getrennt hervorgehoben werden, sodass selbst feine Strukturen, Abweichungen von der Norm und Gebiete von besonders großem Interesse gut zu unterscheiden sind. Ein Beispiel für die Ausgangsdaten, sowie einen Träger einer dafür vorgesehen AR-Brille ist in Abb. 'Abbildung 3.34' dargestellt.

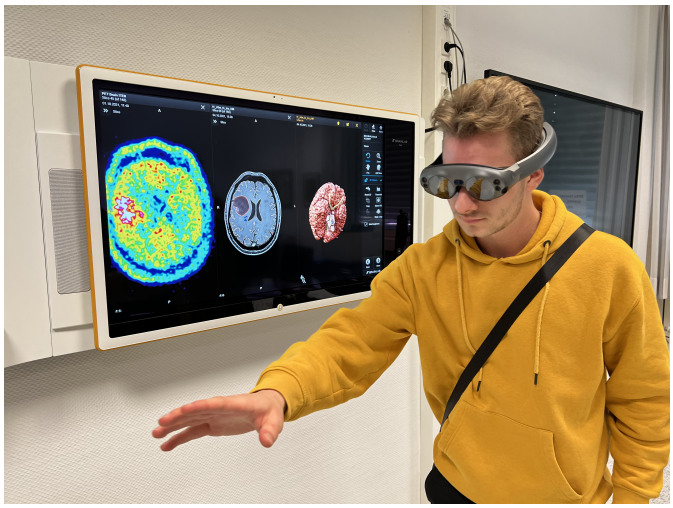


Abbildung 3.34: Medizinische AR-Anwendungen: Operationsvorbereitung am Beispiel von Brainlab

Der Arbeitsablauf beginnt mit dem Einlesen medizinischer Bilder wie CT- oder MRT-Aufnahmen. Aus diesen Bildern werden dann 3D-Modelle generiert, die zusätzlich eingefärbt werden, um bestimmte Strukturen zu erkennen und besser zu visualisieren. Durch den Einsatz von sogenannten „Tracern“ (radioaktiven Elementen) können Strukturen zusätzlich kontrastiert und beispielsweise Tumore sichtbar gemacht werden. [127]

Intraoperative Mikroskopnavigation

Ebenfalls von „Brainlab“ stammt die Intraoperative Mikroskopnavigation. Dabei wird das Mikroskopbild um AR-Elemente erweitert, sodass dem Operateur während der Operation bestimmte Bereiche (zum Beispiel die Grenzen des Tumors) eingefärbt dargestellt werden. Die vorab aufgenommenen medizinischen Bilddaten dienen der 3D Rekonstruktion und mittels Kranialer Navigationssoftware lässt sich die genaue Position des Patienten, des Mikroskops und das Verhältnis zwischen diesen bestimmen (vgl. 'Abbildung 3.35'). Mit dieser Technologie können

Chirurgen in Echtzeit auf hochauflösende Bilder zugreifen, die während der Operation aufgenommen werden, und so die genaue Position und Ausrichtung von Instrumenten und Implantaten bestimmen. Da es sich um Augmented Reality handelt, ist das Sichtfeld des Operateurs nicht beeinträchtigt und dieser kann sich auf das Wesentliche konzentrieren. Diese Technologie kommt hauptsächlich bei neurologischen Eingriffen zu Einsatz. Die intraoperative Mikroskopnavigation von Brainlab bietet zahlreiche Vorteile, darunter eine höhere Präzision bei neurochirurgischen Eingriffen. Diese Technologie ermöglicht es Chirurgen, kleinste Bereiche des Gehirns zu erreichen und gleichzeitig das umliegende Gewebe zu schonen. Darüber hinaus kann die intraoperative Mikroskopnavigation von Brainlab die Operationszeit verkürzen, da die Chirurgen schneller und präziser arbeiten können. Einer Anwendung oder Übertragung in andere Gebiete der Chirurgie steht nichts im Wege. [128]

Abbildung 3.35: Intraoperative Mikroskopnavigation am Beispiel von Brainlab [128]

Augmented Reality im Operationssaal

In diesem Unterkapitel sollen die Vorteile von Augmented Reality-Anwendungen und den Möglichkeiten zur Darstellung durch AR vorgestellt und anhand von aktuellen Beispielen aus der Forschung erläutert werden.

In dem 2018 veröffentlichten Artikel „Display Technologien für Augmented Reality in der Medizin“ von Ulrich Eck und Alexander Winkler werden mehrere medizinische Verfahren vorgestellt, in denen AR-Displays integriert sind. Derzeit ist es schwierig, bildgebende Verfahren sinnvoll einzusetzen, da die Darstellung dieser Bilder auf separaten Monitoren im Operationssaal erfolgt. Augmented Reality bietet hier eine Lösung, da sie eine Verschmelzung von realen und virtuellen Daten ermöglicht. Beispiele hierfür sind Datensichtbrillen, erweiterte Operationsmikroskope, transparente Monitore und erweiterte bildgebende Verfahren. [129]

Die medizinische VR-Anwendung „Medical Holodeck ®“ verfügt seit 2023 über einen AR-Modus. In einer angepassten Version werden alle relevanten Informationen direkt in das Sichtfeld des Nutzers projiziert. Die Steuerung erfolgt entweder über den Controller der Magic Leap 2 oder über Gesten auf der Microsoft Hololens 2. Zu den Funktionen gehören die Darstellung des Patienten mit allen (bekannten) Beschwerden, ein OP-Planer und ein medizinisches Training, das wie ein Quiz funktioniert. Eine genauere Beschreibung findet sich im Kapitel ’3.3.4 Medical Holo Deck’. [130]

Der Einsatz von Augmented Reality in der Neurochirurgie ist schon heute weit fortgeschritten. Laut Guha kann ein Chirurg ein Head Mount Display erhalten und Augmented Reality im Operationssaal verwenden. Die Kamera des HMD nimmt die Umgebung auf und zeigt sie dem Chirurgen. Die Erweiterung des Sichtfelds findet auf dem Körper des Patienten statt, wo graue Marker für die Kalibrierung des HMD verantwortlich sind. Wenn der Chirurg seinen Kopf über diese hält, werden ihm weitere gelbe Marker angezeigt, die die genaue Position und den Einführungswinkel

der Geräte für den Eingriff anzeigen.

Das HMD kann sogar das Gehirn als Projektion anzeigen, um die Sicherheit beim Beginn eines invasiven Eingriffs zu erhöhen. Augmented Reality kann auch in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie eingesetzt werden, um Unfälle und Verletzungen zu vermeiden. Hier liegt das Hauptaugenmerk auf der Darstellung der Venen, Nerven und Gefäße des Patienten. Es ist ähnlich wie in der Neurochirurgie, jedoch ohne Lokalisierung durch Marker. [131]

Ein Beispiel für den Einsatz von Augmented Reality in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie ist die Ausrichtung von oralen Knochen, wie z.B. Zähnen. Um die Genauigkeit zu testen, wurden Basiswerte genommen und am Ende mit den Testergebnissen verglichen. Alle Werte lagen im Toleranzbereich, wie bei einem Eingriff mit normalen Methoden. Es ist bemerkenswert, wie Augmented Reality die medizinische Praxis revolutioniert und dabei hilft, präzise und sichere Eingriffe durchzuführen. [132]

Der Artikel „Intraoperative Augmented Reality-Visualisierung“ von S. Weidert et al. aus dem Jahr 2012 beschäftigt sich mit dem damaligen Stand der Entwicklung und den ersten Erfahrungen mit dem „CamC ®“. In der Medizin wird die physische Realität mit Bildinformationen verknüpft, die zeitgleich durch CT, Röntgen, MRT, Ultraschall etc. erzeugt wurden. Des Weiteren werden die Probleme bei der Etablierung der AR-Technologie diskutiert. Im weiteren Verlauf werden die verschiedenen Anwendungen des CamC beschrieben. Dazu gehören Schnittplanung, Instrumentenausrichtung, Implantation von Kirschner-Drähten und Anpassung von Implantaten. All dies war bereits 2012 vorstellbar und die Entwicklung der letzten Jahre hat gezeigt, dass diese Technologie ihren Einzug in den chirurgischen Alltag finden könnte. [133]

In dem Artikel „Augmented und Virtual Reality in der Urologie“, der 2019 von Maximilian Peter Sparwasser, Christoph Schregel und Hendrik Borgmann veröffentlicht wurde, werden die Anwendungsmöglichkeiten von AR in der Urologie beschrieben. Zu Beginn wird der Unterschied zwischen Virtual Reality und Augmented Reality erläutert. Anschließend wird ein AR-Gerät näher beschrieben und die Vorteile, speziell für die Urologie, erläutert. Anwendungsmöglichkeiten sind z.B. chirurgisches Training, Verbesserung der Lymphknotenidentifikation, roboterassistierte Nierenteilresektion, roboterassistierte radikale Prostatavesikulotomie und Telemonitoring. Anschließend wird ein Beispiel aus der Urochirurgie erläutert und mögliche weitere Anwendungsgebiete aus Sicht der urologischen Operateure vorgestellt. [134]

Der Beitrag „Robotik und Augmented Reality“ von H. Feußner, D. Ostler, D. Wilhelm aus dem Jahr 2018 befasst sich mit dem aktuellen Entwicklungsstand und den Zukunftsperspektiven von AR in Verbindung mit Operationsrobotern. Zu Beginn wird der aktuelle technische Entwicklungsstand der chirurgischen Robotik dargestellt. Chirurgische Roboter gibt es in verschiedenen Ausführungen: programmierbare Automaten, Assistenzsysteme und Telemanipulationssysteme. Anschließend werden die Zukunftsperspektiven der roboterassistierten Chirurgie erläutert. Im weiteren Verlauf wird Augmented Reality näher vorgestellt, wobei der Schwerpunkt auf dem Anwendungsgebiet der Chirurgie liegt. Der Beitrag schließt mit einer kritischen Würdigung und einem Ausblick. Augmented Reality kann in der Verwendung der Operationsrobotern für eine bessere Darstellung des Operationsgebiets sorgen und kann dem Chirurgen eine dreidimensionale Sicht auf das Operationsfeld ermöglichen. [135]

In dem vom Fraunhofer-Institut für Graphische Datenverarbeitung (kurz: IGD) veröffentlichten Artikel „Augmented Reality für medizinische Interventionen“ wird beschrieben, inwieweit der Einsatz von Augmented Reality-Brillen eine effektive Unterstützung im Operationssaal darstellt. Bisher musste sich das medizinische Personal jedes Bild eines Patienten aneignen, um diese dreidimensionalen Bilddaten mit Hilfe von medizinischer Erfahrung und Wissen während einer Operation am Patienten anwenden zu können. Um die Operationssituation zu erleichtern, können AR-Brillen die oben genannten Bilddaten auf die Patienten (bzw. auf seine Postion) einblenden und ihn überlagern. Mit dieser Technologie können Informationen schneller zugänglich gemacht werden, so dass gezielte Eingriffe möglich sind. Das Fraunhofer IGD stellt eine solche AR-Technologie zur Verfügung. Dazu gehört zum Beispiel eine Software, mit der räumliche Daten ausgelesen werden können, um Objekte zu lokalisieren. Bei einem solchen Darstellungs- und Lokalisierungsprozess spielen vor allem Technologien der Bildverarbeitung sowie der Bildregistrierung eine

wesentliche Rolle. „3D-ARILE ®“ ist ein Beispiel für den Einsatz von AR während einer Operation. Mit diesem System können Lymphknoten lokalisiert und entfernt werden, deren Entfernung wichtig ist, um die Ausbreitung eines Tumors zu verhindern. [136]

Der Artikel „Konzeption zum Einsatz von Augmented Reality in der Leberchirurgie“ von Tim Suthau et al. aus dem Jahr 2002 befasst sich mit der zunehmenden Bedeutung von Augmented Reality. Mit Hilfe von AR kann eine Brücke zwischen der realen und der virtuellen Welt gebaut werden. Es werden verschiedene AR-Technologien sowie deren technische und klinische Anforderungen vorgestellt. Ziel dieser Arbeit ist es, ein Konzept zu entwickeln, mit dessen Hilfe AR in der Leberchirurgie eingesetzt werden kann. Als Beispiel wird die Leberchirurgie herangezogen, da der Aufbau der Leber ohne eine dreidimensionale Darstellung nur schwer zu erklären ist. Für die onkologische Leberchirurgie wurde bereits das bildgestützte Navigationssystem „Augmented Reality for intra-operative navigation" entwickelt. Dabei müssen fünf Schritte durchlaufen werden, um bestimmte Visionen zu realisieren. Die Verbindung zwischen virtueller und physischer Welt wird durch verschiedene Displaytechnologien erreicht. Dazu gehören stationäre Systeme, die mit Hilfe eines halbdurchlässigen Spiegels den gleichzeitigen Blick auf den Patienten und die zuvor gewonnenen Bilddaten ermöglichen, sowie tragbare Systeme, die dem Konzept einer Brille ähneln (HMDs), da sie direkt vor dem Auge getragen werden. Hier wird nochmals zwischen Video-See-Through und Optical-See-Through-Systemen unterschieden. Natürlich gibt es auch Anforderungen an ein AR-System. Diese sind neben den technischen Anforderungen wie eine Darstellung in Echtzeit, eine hohe Auflösung und eine möglichst geringe Verzerrung, ein breites Sichtfeld, eine gute Überlagerungsgenauigkeit und geringe Herstellungskosten auch die perzeptiven Anforderungen wie Benutzerakzeptanz und Sicherheit, Sichtbarkeit, Adaption, Projektionsentfernung, Tiefenschärfe und Qualitätsaspekte. [137]

Der Artikel „Augmented Reality und Virtual Reality im Operationssaal – Status Quo und Quo vadis“, der 2018 von Peter Maximilian Sparwasser et al. veröffentlicht wurde, beschreibt die aktuellen und zukünftigen Möglichkeiten von Augmented Reality und Virtual Reality im medizinischen Bereich sowie deren Vor- und Nachteile. In den letzten Jahren wurden in diesem Bereich große Fortschritte erzielt. Ermöglicht wurde dies natürlich durch die Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Computern und Algorithmen sowie von Batterien und Kommunikationstechnologien. VR-Geräte mit ihrer 360-Grad-Sicht und AR-Geräte mit der Überlagerung von Bilddaten auf dem menschlichen Körper haben ein großes Potenzial im perioperativen Bereich. Diese Technologien ermöglichen die Lokalisierung von Gefäßen und Organen, die Einblendung zusätzlicher visueller Informationen und die Unterstützung von Ärzten durch andere Ärzte, die sich nicht im Operationssaal befinden, durch komplexe visuelle und verbale Kommunikation.

Operationsprozesse können für Patienten virtuell nachvollziehbar gemacht, die Qualität der Arbeit verbessert, Komplikationsraten minimiert und Kosten eingespart werden. Dennoch muss auch der Aspekt des Datenschutzes beachtet werden, da nicht sichergestellt werden kann, dass Daten nicht von Unbefugten entwendet werden. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass durch die Überlagerung von bildgebenden Verfahren, durch Telemonitoring und durch die Weiterentwicklung der chirurgischen Ausbildung das Potential dieses Bereiches deutlich erkennbar ist und weiter ausgebaut werden muss. [138]

Aufgrund der schwierigen Navigation durch die Blutgefäße bei der Entfernung von Krebsgewebe sind diese Eingriffe immer auf die Erfahrung des Chirurgen angewiesen. Zur Schulug neuer Chirurgen wird dies durch eine Kombination von Bildern der Anatomie des Patienten und einer Kamera, die sowohl den Patienten als auch den Chirurgen während des Eingriffs filmt. In diesem Trainingsszenario ist die Kamera mit einem Tablet Computer verbunden, der sowohl den Patienten als auch die Instrumente des Chirurgen zeigt. Wie in der Navigation in der Neurochirurgie werden Marker verwendet, um sicherzustellen, dass das Bild akkurat positioniert bleibt, auch wenn sich der Patient bewegt. Das von der Kamera erzeugte Bild zeigt permanent die Gefäße, Nerven und Gewebe des Patienten sowie den Weg, den der Chirurg mit seinen Instrumenten zurücklegen muss, um den Patienten nicht zu gefährden. Am Tumor angekommen, zeigt das Bild, wie groß der Tumor ist und wie viel Tumorgewebe entfernt werden muss. Die genauen Werte werden berechnet, aufgearbeitet und angezeigt. [139]

Lernapps Anatomie

In den AppStores der Smartphones finden sich zahlreiche Anwendungen zur Anatomielehre. Ein Beispiel hierfür ist die App „Atlas der Humananatomie ®“ von „Visible Body“. Die Apps folgen einem ähnlichen Aufbau, bei dem im Kern immer ein anatomisch korrektes Model vor die Nutzer projiziert wird. Durch Eingaben am Touchscreen und die Position des Smartphones lassen sich die Apps bedienen, um zum Beispiel die Modelle zu skalieren, zu bewegen oder zu rotieren. Anwender können die medizinischen Modelle einzeln oder mit Bezug zueinander betrachten. Sie können sich beispielsweise nur die Muskeln, das Skelett oder nur die Venen anzeigen und so ihren Verlauf lernen. Die Apps können als Nachschlagewerke oder für die Erforschung des menschlichen Körpers verwendet werden. Patienten können damit Befunde oder Anatomie erklärt werden und junge Mediziner können ihr Studium erweitern und besonders komplexe Zusammenhänge durch die dreidimensionale Visualisierung besser verstehen.

Anatomie Lernanwendungen und Darstellungsformen

In dem 2018 von Bork veröffentlichten Artikel „Interactive Augmented reality system“ wird das Augmented Reality System „Magic Mirror“ beschrieben. Magic Mirror ermöglicht es dem Benutzer, ein detailliertes 3D-Modell des menschlichen Körpers und Schnittbilder in einem digitalen Spiegel interaktiv zu untersuchen. Das System findet Anwendung in Bereichen wie Patientenaufklärung, Rehabilitation und Anatomielehre. Im Bereich der Patientenaufklärung übernimmt das System eine unterstützende Rolle, indem z.B. schwierige Abläufe des Bewegungsapparates am eigenen Körper genauer und anschaulicher erklärt werden können. Aspekte wie Zeitaufwand, Komplexität und ethische Gesichtspunkte müssen jedoch noch genauer untersucht werden. In der Rehabilitation gibt der Magic Mirror direktes Feedback zur Bewegungsausführung. [140]
Eine weitere Möglichkeit, Augmented Reality einzusetzen, in der Darstellung der menschlichen Anatomie zu verwenden, ist die direkte Projektion auf einen menschlichen Körper. Dies geschieht durch die Verwendung von kodierten Mustern auf bestimmten Kleidungsstücken. Die Muster auf diesen Kleidungsstücken ermöglichen die Visualisierung von Organen, Muskeln und ähnlichem des Menschen. Damit dies funktioniert, wird eine Kamera benötigt, genauer gesagt eine „Microsoft Kinect Kamera ®“. Die Muster auf den Kleidungsstücken werden erkannt und ausgelesen. Daraus werden animierte Bilder der Anatomie der Person erstellt und projiziert. Ziel ist es, Zeit zu sparen und die Behandlung von Patienten auf pathologischer Ebene zu verbessern. In Verbindung mit Virtual Reality ist es auch möglich, den ganzen Körper auf einmal zu sehen, was voraussetzt, dass alle Kleidungsstücke mit den richtigen Mustern getragen werden. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit in Verbindung mit Virtual Reality wäre die Darstellung von Blutgefäßen. [141]

Überblick über die Möglichkeiten der Augmented Reality in der Medizin

Die Veröffentlichung „Augmented Reality – Realität und Virtualität in der Medizin“, der von A. Rieger, H. Friess und M. E. Martignoni im Jahr 2014 veröffentlicht wurde stellt die Anwendungsmöglichkeiten von AR dar, wobei der Fokus auf dem Anwendungsbereich Medizin liegt. Anschließend werden die Hauptkomponenten von AR-Systemen näher beschrieben. Dazu gehören das Tracking-System, das Darstellungssystem und das Rechnersystem. Anschließend wird der Anwendungsbereich in der Medizin beschrieben: Innere Medizin, Telemedizin und Chirurgie. [142]

Augmented Reality in der medizinischen Aus- und Weiterbildung

Der Artikel „Chirurgische Ausbildung im digitalen Zeitalter – Virtual Reality, Augmented Reality und Robotik im Medizinstudium“ von S. Kuhn et al. aus dem Jahr 2021 beschäftigt sich mit digitalen Anwendungen wie Augmented Reality in der Lehre während des Medizinstudiums. Ziel der Arbeit war die Evaluation eines Lehrkonzepts zu

digitalen Transformationen. Der Fokus lag dabei auf der chirurgischen Lehre und Ausbildung. Hierzu haben 35 Studierende an 3 Kursen teilgenommen. Nach Abschluss dieser Lehrinhalte wurde eine Evaluation des Lehrkonzepts mittels Interviews und Fragebögen durchgeführt. In den Interviews wurden 79 Textaussagen analysiert und 4 Schwerpunktkategorien identifiziert. Die größte Kategorie (35%) beinhaltete Äußerungen der Studierenden zum „Expertengespräch“, welches als wichtiger Bestandteil des Kurskonzepts betrachtet wurde. Darüber hinaus wurde der Kurs als horizonterweiterndes „Lernerlebnis“ (29% der Aussagen) mit einem hohen „Praxisbezug“ (27%) bewertet. Die quantitative Studierendenevaluation ergab eine positive Entwicklung in Bezug auf Wissen und Fertigkeiten sowie eine tendenziell positive Haltung nach Kursabschluss.

Insgesamt zeigt sich, dass die chirurgische Lehre eine ideale Plattform für die Entwicklung digitaler Kompetenzen bietet. Es ist jedoch wichtig, die Geschwindigkeit der digitalen Transformation im chirurgischen Fachgebiet zu berücksichtigen und in das curriculare Konzept zu integrieren. [143]

Der Artikel „Technische Innovation in der Lehre am Beispiel des Fachgebietes Orthopädie und Unfallchirurgie“ von Mohamed Ghanem und Georg Osterhoff beschäftigt sich mit dem Einfluss der heutigen Digitalisierung auf die medizinische Lehre. Digitalisierte Lehrmittel und damit die heutigen technischen Innovationen in der Medizin stellen ergänzende Lehrmittel dar. Auch wenn internetbasierte Lehrmethoden in der Medizin keinen hohen Stellenwert haben, werden beispielsweise „Podcasts“ in der medizinischen Lehre als Lehr- und Prüfungsinstrument, aber auch als Lernmaterial eingesetzt. Darüber hinaus wird in dem Artikel auf die Begriffe Augmented Reality und Virtual Reality eingegangen. AR beinhaltet ein Trackingsystem, ein Anzeigesystem sowie eine Steuerungssoftware. Mit Hilfe von Augmented Reality können generierte Bilddaten und die reale Situation kombiniert betrachtet werden. Virtual Reality hingegen bedeutet, dass die computergenerierten Objekte in einen virtuellen Raum eingebettet sind. Daraus ergibt sich der wesentliche Unterschied, dass bei VR die gesamte Umgebung dargestellt wird. Die technischen Voraussetzungen sind daher komplexer und kostenintensiver. Als weitere Innovation wird der 3D-Druck vorgestellt. Dieser hat eine wesentliche Bedeutung in der medizinischen Lehre, da die so erstellten 3D-Objekte eine bessere Darstellung und Modellierung von Krankheitsbildern ermöglichen. AR und VR können diese Haptik nicht (von sich aus) reproduzieren. Eine Kombination aus AR oder VR mit haptischen Elementen, zum Beispiel 3D-Objekten aus dem Drucker könnte neue Lernmethoden ermöglichen und die Vorteile beider Technologien vereinen. [144]

Ein Nutzen von Augmented Reality zeigt sich beim Defibrillationstraining. Bei diesem digitalen Training muss ein HMD verwendet werden. In einem Notfall, der den Einsatz eines Defibrillators erfordert, muss schnell, präzise und in der richtigen Dosierung gehandelt werden. Mit dem AR-Trainer lässt sich diese Stresssituation kontrolliert nachempfinden und die Handlungsabfolge trainieren. Anders, als im konventionellen Defibrillationstraining wird kein weiteres Gerät benötigt, um die Patientendaten anzuzeigen, da dies direkt über das HMD erfolgt. So müssen sich die Benutzer nicht auf das separate Gerät schauen und kann sich voll auf die Anwendung konzentrieren. Mit dieser Unterstützung kann sofort auf die Bedürfnisse der Patienten reagiert und die Defibrillation problemlos durchgeführt werden. Die notwendige Dosis und die Zeitintervalle werden angezeigt und die Aktionen der Anwender werden kontrolliert und ausgewertet. [145]

Aumgented Reality in der Nachsorge und Pflege

Augmented Reality kann im Bereich der Nachsorge und der Pflege, zum Beispiel in einem Kontext der Reha-Anwendung verwendent werden. In dem vorgestellten Beispiel besteht die Behandlung aus einer Reihe von Spielen, die z.B. zu Hause allein und ohne Aufsicht durchgeführt werden können. Als Beispiel stellt dieser Artikel die Behandlung von Schulterproblemen vor. Zur Behandlung von Schulterproblemen werden Übungen mit dem gesamten Oberkörper durchgeführt, ähnlich wie bei den Geräten der „Rolyan Range of Motion Shoulder Arc ®“. Bei den Spielen benutzten die Spieler einen virtuellen Controller, um mit dem rechten Arm ein Gerät von ganz links nach rechts zu führen. Das funktioniert natürlich auch mit dem linken Arm. Zusätzlich muss der Kopf mitbewegt werden, wie es auf

dem Display angezeigt wird. Die weitere Anwendung dieser Übungen besteht darin, den angezeigten Linien in einer bestimmten Zeit zu folgen. Fehler werden als rote Meldungen angezeigt und korrektes Folgen wird mit Punkten belohnt. Am Ende der Behandlungssitzung werden die Werte gespeichert und an den zuständigen Arzt übermittelt. Dieser kann die folgenden Spiele und Behandlungen an die Nutzer anpassen und somit den Schwierigkeitsgrad erhöhen oder verringern, um allen Patienten die bestmögliche Behandlung zu bieten. Die Behandlung beschränkt sich nicht nur auf die Schultern, sondern trainiert auch die motorischen Fähigkeiten. Die Vorteile der digitalen Anwendung liegen bei dieser Anwendung in der Selbstständigkeit der Nutzer. Sie bekommen sofort Feedback zu ihren Aktionen, können die Wiederholung und die Dauer selbst bestimmen und sind unabhängig von anderen Teilnehmern, wie es bei einem Kurs der Fall wäre. [146]

Um Patienten nach einem Schlaganfall zu helfen, werden Methoden zur Rehabilitation benötigt. Ein Ansatz hierfür ist der Einsatz von Augmented Reality. Durch die Darstellung der Methoden, mit Hilfe von Augmented Reality, soll die Herangehensweise an die Übungen, sowie deren Durchführung dargestellt werden. Voraussetzung dafür ist, dass Augmented Reality als vollständige Übungsanleitung fungieren kann, sowie die vollständige Kooperation des Patienten. Zur Unterstützung ist eine Funktion des Augmented Reality Systems geplant, bei der das eigene Zuhause als Projektion in das Krankenzimmer projiziert wird. [147]

Ein Weg der Rehabilitation gelingt durch ein Konzept, bei dem der Patient mit Hilfe eines haptischen Gerätes nach greifbaren Objekten greifen soll. Durch die Installation solcher Objekte in der eigenen Wohnung soll dies ohne die Hilfe eines Therapeuten geschehen. Dabei werden über das Augmented Reality-Objekt, wie ein HMD oder auch eine Augmented Reality-Brille, über den Tag verteilt Aufgaben gestellt, bei denen der Patient nach den greifbaren Objekten greifen soll. Durch die unterschiedliche Nutzung über den Tag verteilt, wird die Zeit zur Erfüllung der Aufgabe und die Geschwindigkeit, sowie die Geschicklichkeit der Handbewegungen des Patienten gemessen. Es ist wichtig zu erwähnen, dass die Schwierigkeit je nach Patient und Rehabilitationsfortschritt bzw. Schweregrad der Erkrankung variiert werden kann. Nach der Übung werden die Daten an die Klinik oder den behandelnden Arzt zur Auswertung weitergeleitet. [148]

Ein großes Problem nach einem Schlaganfall sind bleibende Schäden an den Händen. Um diesen Zustand mit Hilfe von Augmented Reality zu verbessern, gibt es einen Ansatz mit drei verschiedenen Methoden. Um diesen Ansatz realisieren zu können, wird ein weiteres HMD sowie ein haptischer Handschuh benötigt. Das Konzept folgt dem gleichen Muster wie die anderen Methoden. Mittels Augmented Reality werden Objekte eingeblendet und durch das Berühren und Greifen der virtuellen Objekte soll die Rehabilitation wirken. Der große Unterschied bei diesem Konzept ist die Unterstützung durch Zusatzgeräte. Diese Geräte sind zum einen eine „body-powered orthosis“ (BPO), das ist eine Prothese, die die Armbewegungen unterstützen soll, wenn Hilfe benötigt wird. Das zweite Gerät ist ein „pneumatic-powered device“ (PPD). Hierbei handelt es sich um ein weiteres Hilfsgerät, das mit Druckluft betrieben wird. [149]

AR-Zahnoperationstraining mit haptischem Feedback

In diesem Beitrag wird der zahnärztlich-chirurgische Simulator beschrieben, der es den Arzt ermöglicht, zahnärztlich-chirurgische Eingriffe zu simulieren. Die Durchführung zahnärztlich-chirurgischer Methoden kann mit Hilfe realer Hand- und Körperhaltungen erlernt werden. Das vorgestellte System basiert auf einem Bildschirm, auf dem ein virtuelles Zahnmodell sowie echte Zähne und Zahnfleisch abgebildet sind. Diese befinden sich in unmittelbarer Nähe zu den Händen des Benutzers, so dass dieser die Objekte mit direktem haptischen Feedback manipulieren kann. Für eine vorläufige Bewertung wurde die Abweichung zwischen dem Bild des realen Objekts und dem Bild des virtuellen Objekts aus dem Blickwinkel des Benutzers auf dem Display gemessen. Auf diese Weise konnten die Möglichkeiten und Grenzen des Systems bestätigt werden. Die Verbindung zwischen den physischen Modellen und der virtuellen Darstellung ermöglicht eine deutlich variantenreichere Darstellung von medizinischen Fällen, als nur durch den Einsatz von physischen Modellen. [150]

3.3.3 Augmented Reality-Anwendungen mit haptischem Feedback

Die Kombination von Augmented Reality und haptischem Feedback mag zunächst befremdlich erscheinen. Schließlich kann im Gegensatz zu VR die Hardware nicht ausgeblendet werden und diese ist notwendig, um haptisches Feedback zu induzieren. Dennoch kann der Vorteil, haptisches Feedback zu spüren und damit einen weiteren Sinn anzusprechen, den Nachteil einer möglichen Beeinträchtigung der Immersion wert sein.
Leider kommt es in der Literatur häufig zu einer Verwechslung von AR und VR, so dass Anwendungen, die ein Bild oder eine Simulation mit zusätzlichem Wissen anreichern, als Augmented Reality bezeichnet werden. Dabei muss, insbesondere wenn es um die Erweiterung von AR mit haptischem Feedback geht, genau zwischen AR, VR und XR unterschieden werden (siehe '2.1 Augmented Reality'). Grundlegende Errata sind an dieser Stelle erforderlich. Als Beispiel kann die Publikation von Luciano et al. aus dem Jahr 2011 dienen, in der das Training eines neurochirurgischen Eingriffs, das Setzen einer thorakalen Pedikelschraube, mit haptischem Feedback des Bohrvorgangs geübt wird [151]. Aus heutiger Sicht handelt es sich hierbei eindeutig um eine VR-Anwendung. Darüber hinaus wird für Hardware mit haptischem Feedback eine Schnittstelle zu Augmented Reality angeboten bzw. ein Anwendungsgebiet genannt, ohne jedoch konkrete Anwendungen zu nennen und anzubieten.
Im Folgenden werden einige Beispiele aus diesen Bereichen vorgestellt, so dass am Ende dieses Kapitels auf diese aktuellen Anwendungen verwiesen werden kann.

Augmented Reality-Anwendungen mit haptischem Feedback in der Medizin
Der Artikel „Augmented reality and haptic interfaces for robot-assisted surgery“ von Yamamoto et al. aus dem Jahr 2011 beschreibt ein Mixed-Reality-System für die robotgestützte Telechirurgie. Im Gegensatz zu der in dieser Arbeit vorgestellten SkillsLab+ Anwendung läuft die Roboterunterstützung auf zwei Rechnern mit zwei „Phantom Premium Manipulator ®“ der Firma „SensAble Technologies Inc., MA, USA“. Einer der Computer dient zum Empfang und zur Verarbeitung der Signale, der zweite zur Wiedergabe des haptischen Feedbacks über einen der Aktuatoren und zur Visualisierung des Mixed-Reality-Bildes. Die Signale können entweder von einem zweiten Aktor, ebenfalls ein Phantom Premium, genutzt werden, um die Aktion des ersten zu spiegeln und somit ortsunabhängig zu arbeiten, oder um eine Simulation zu Trainingszwecken mittels VR anzusteuern. Das Bildsignal wird am ausführenden Ende aufgenommen und am empfangenden Ende des Systems mittels Augmented Reality erweitert und wiedergegeben. [152]
Ein KI-basiertes System analysiert das Bild und fügt Bereiche hinzu, die der Arm nicht betreten darf, sogenannte *forbidden-region virtual fixtures*. „The goal of a *FRVF* is to prevent the user from entering an unexpected region, or at least to generate enough force to make the user aware that he is entering such a region.“ [152] Zusätzlich zu diesen Begrenzungen kann der Zustand der Oberfläche erfasst und dem Benutzer wiedergegeben werden.
Die in dieser Publikation beschriebene Anwendung kann auch in der Ausbildung eingesetzt werden, so dass der Roboter am ausführenden Ende an einem Modell operiert. Durch die Verwendung von Phantom Premium Manipulatoren ist die Anwendung auf Handlungsabläufe beschränkt, die von diesem Arm dargestellt werden können. Außerdem handelt es sich nicht um Augmented Reality im klassischen Sinne, da die reale Welt wie bei einer gewöhnlichen Computeranwendung auf einem Bildschirm dargestellt wird. Dies entspricht einem Live-Kamerabild, das um zusätzliche Informationen erweitert wird. Der Preis ist nur auf Anfrage erhältlich, was auf hohe Anschaffungskosten schließen lässt.
Ein weiterer Einsatz einer AR-Anwendung in Kombination mit einem „PHANTOM haptic device ®“ wird in einer Veröffentlichung von Sutherland aus dem Jahr 2013 vorgestellt. Neben dem Training, bei dem die Position auf einem Tablet verfolgt wird, kann es außerdem um eine haptische Komponente erweitert werden und den Studierenden von einer beobachtenden in eine ausführende Rolle überführen. Bei dieser Form des Trainings soll ein optisches Navigationssystem und eine Benutzerschnittstelle für sofortiges Feedback, das Training zu unterstützen. Im Beispiel wurde ein „MicronTracker2 optical tracking system“ und ein „PHANTOM haptic device ®“ verwendet. Dieses

Training bietet die Möglichkeit, lebensbedrohliche Eingriffe an der Wirbelsäule zu üben, ohne Personen zu gefährden oder an Kadavern zu arbeiten, und ohne dass ein Arzt anwesend sein muss, um das Training zu überwachen, da die notwendige Unterstützung durch das HMD und die Benutzerschnittstelle gegeben wird. Zuerst wird ein Dummy benötigt, der als Torso eines Patienten fungieren soll und ein HMD, auf dem das Navigationssystem installiert ist. Das HMD projiziert dann den benötigten Teil des Torsos auf die Puppe. Die Puppe besteht aus einem speziellen Material, das beim Einführen einer Nadel einen Widerstand wie der menschliche Körper leistet. [153]
Nach dem gleichen Prinzip arbeiten heutige Operationsroboter wie das „Da Vinci-Operationssystem ®“ und das „Senhance-Chirurgiesystem ®“. Die Systeme nehmen die reale Welt mit einer Kamera auf und erweitern das Bild um — meist von einer KI berechnete — Informationen über beispielsweise Position, Oberflächenbeschaffenheit und Hochrisikozonen im Bild. Die Betriebsmodi (Training und Anwendung) unterscheiden sich dahingehend, dass das Training in der Regel mit Virtual Reality in einem Simulator durchgeführt wird, während die eigentliche Arbeit mit Augmented Reality erfolgt.
Nachdem verschiedene medizinische Bilder (z.B. CT- und MRT-Bilder) korrekt übereinandergelegt, d.h. *registriert* wurden, können sie im Sichtfeld des Anwenders oder auf einem Computermonitor an derselben Stelle am Patienten dargestellt werden. Je nach Position oder Drehung bewegen sich die medizinischen Bilder mit, so dass der Operateur immer die zuvor aufgenommenen Bilder in der richtigen Position sieht. Diese Darstellung kann durch AR oder einen 3D-Monitor unterstützt werden, so dass das Bild noch realer erscheint und zusätzlich durch die Tiefenwahrnehmung eine bessere Operation ermöglicht wird. [154, 155]

Augmented Reality mit indirektem haptischem Feedback
Indirektes haptisches Feedback ist die benachrichtigende Form des haptischen Feedbacks (siehe ’2.2.1.1 Tactile Feedback’). Beispiele für diese Integration gibt es viele, da einige Augmented Reality- Geräte von sich aus mit vibrotaktilem Feedback ausgestattet sind. Im Prinzip reicht bereits die Vibrationsfunktion eines Smartphones in einer AR-Anwendung aus, um den Nutzer durch indirektes haptisches Feedback auf eine Zustandsänderung in einer AR-Anwendung aufmerksam zu machen. Als Beispiel für ein solches System dient die Veröffentlichung „Communicating Inferred Goals With Passive Augmented Reality and Active Haptic Feedback“ von Mullen et al. In diesem Beitrag wird ein System vorgestellt, das aus einem arbeitenden Roboterarm besteht, dessen Bewegungen einem Benutzer zuvor über eine Augmented Reality-Brille angezeigt werden. Jedes Mal, wenn eine Kollision droht oder eine Entscheidung getroffen werden muss, vibriert ein Armband und signalisiert dem Benutzer, dass er eingreifen muss. [156]

3.3.4 Medizinische Virtual Reality-Anwendungen

Um einen Blick über den Tellerrand zu werfen, werden hier einige medizinische Virtual Reality-Anwendungen vorgestellt. Sie können dabei helfen den Unterschied zwischen der Nutzung von AR und VR zu verstehen und ermöglichen einen Einblick in eine ähnliche Technologie. Es gibt Einsatzgebiete, in denen es sowohl AR- als auch VR-Anwendungen gibt. In manchen Fällen ist eine Transformation von der einen in die andere Technologie ebenfalls sinnvoll und könnte sogar einen Mehrwert bzw. Potenzial für Forschung bieten.

Medical Holo Deck
Das „Medical Holodeck ®“ ist eine medizinische VR-Anwendung, die in der medizinischen Ausbildung eingesetzt werden kann. Es handelt sich um eine immersive 3D-Umgebung, die es angehenden Ärzten und medizinischen Fachkräften ermöglicht, komplexe medizinische Szenarien zu visualisieren und zu interagieren. Die Hauptfunktion der Anwendung ist die Visualisierung anatomischer Strukturen, die dazu verwendet werden kann, eine virtuelle Planung und Simulation medizinischer Eingriffe und Operationen durchzuführen. Studierende können in einer sicheren und kontrollierten Umgebung üben, ohne dass jemand zu Schaden kommen könnte. Mit den anatomischen Modellen kann

interagiert werden, sie können bewegt, gedreht und skaliert werden (vgl. 'Abbildung 3.3.4'). Ein Quiz kann verwendet werden, um erlerntes Wissen abzufragen und zu festigen. Das Ziel des Medical Holodecks ist es, medizinisches Personal bei der Ausbildung, Simulation und Planung von medizinischen Eingriffen und Operationen zu unterstützen. Es bietet auch die Möglichkeit, komplexe anatomische Strukturen und Krankheitsprozesse zu visualisieren und zu untersuchen.

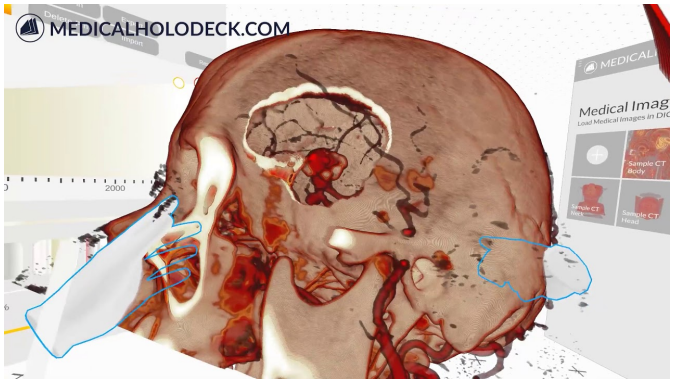


Abbildung 3.36: Medical Holo Deck [157]

Die Zusammenarbeit zwischen Medizinern kann verbessert werden, denn das Training kann ortsunabhängig durchgeführt werden. Alle teilnehmenden Studierenden verbinden sich über das Internet und absolvieren gemeinsam eine Anwendung. So kann ein virtueller Operationssaal von allen Teilnehmenden gleichzeitig geführt werden und erste Erfahrungen können vor dem Betreten eines echten Operationssaals gemacht werden.
Die Anwendung basiert auf einem System von Sensoren und Kameras, die Bewegungen und Gesten des Benutzers erfassen und in Echtzeit in die virtuelle Umgebung übertragen. Dies ermöglicht es den Benutzern, in der virtuellen Welt zu navigieren, Objekte zu manipulieren und mit anderen Benutzern zu interagieren. Der Einsatz von teuren Modellen entfällt hierbei, da lediglich die VR-Hardware und ein Computer notwendig sind.
Ein weiterer wichtiger Einsatzbereich des Medical Holodeck ist die Verbesserung der Patientenaufklärung und Patientenberatung. Durch die Darstellung von virtuellen Modellen und Simulationen können Patienten besser verstehen, was bei einem medizinischen Eingriff passieren wird, was die Therapieziele sind und wie sie sich auf ihre Gesundheit auswirken werden. Das Training kann aufgezeichnet werden und als Video exportiert werden. So kann auch ohne VR-Hardware im Nachhinein weiter gelernt werden und die Studierenden können sich ihre Arbeit noch einmal ansehen, um beispielsweise Fehler zu erkennen. Insgesamt bietet das Medical Holodeck eine innovative Möglichkeit, medizinisches Wissen zu vermitteln, komplexe Szenarien zu simulieren und die medizinische Versorgung zu verbessern. [157]
Das Medical Holodeck wird aktuell an der Universitätsklinikum Bonn getestet und ab August 2023 in den Regelbetrieb aufgenommen. „Medicalholodeck is proud to announce its participation in the Innovative Secure Medical Campus ISMC which will be unveiled at the University Hospital Bonn on August 18, 2023. Medicalholodeck is contributing its leading medical imaging solution for AR and VR, Medical Imaging XR, to the project, driving the advancements in the field of Medical Augmented and Virtual Reality.“ [158]

Medizinische Ausbildung mit Virtual Reality: VIREED

Das medizinische Simulationstraining der Firma „VIREED“ bietet mit seinen einzelnen Modulen moderne Trainingsansätze in Virtual Reality. Das 2017 in Hamburg gegründete Startup versucht mit seinem kleinen Entwicklerteam die medizinische Lernszenarien mittels VR abzubilden und setzt zusätzlich auf haptische Elemente, die die Anwendung „greifbarer“ machen.
Die Basis-Anwendung „VIREED Med ®“ genannt „First Aid“ kommt als All-In-One-Lösung, das heißt, die Anwendung

besteht nicht nur aus der Software, sondern ebenso aus der VR-Brille, dem Computer, einem Monitor und den haptischen Elementen (z.B. einer Reanimations-Puppe) und bietet aktuell zwei Szenarien. Den Basic Life Support und die Herzdruckmassage (vgl. 'Abbildung 3.37').

Abbildung 3.37: Lernanwendung VIREED [159]

Durch den Einsatz prozessorientierter Lernszenarien werden alle Schritte des klinischen Verhaltensalgorithmus vom Auffinden eines bewusstlosen Patienten über eine effektive Teamkommunikation bis hin zum Eintreffen des Rettungsteams durchlaufen. Um die Authentizität des Szenarios zu erhöhen, werden Emotionen und Geräuschkulissen, wie z.B. das Wehklagen von Angehörigen, in die virtuelle Umgebung integriert. Der Anwender sieht durch die VR-Brille das Patientenzimmer. Die Interaktion erfolgt sowohl über den Controller, als auch über Sprache mit der herbeikommenden Krankenschwester. Ebenso muss die Angehörige, durch Sprachbefehle beruhigt werden. Dieses Szenario kann zu einer konstruierten Stresssituation führen, auf die sich angehende Mediziner vorbereiten können, ohne einem Patienten zu schaden. Der streng algorithmische Aufbau der medizinischen Herangehensweise an eine solche Situation ist wie geschaffen für eine digitale Umsetzung. Einer Art Check-Liste folgend kann die Anwendung eine Handlung nach der anderen abspielen und die Reaktion der Anwender überwachen.
Im erweiterten Szenario der Herzdruckmassage wird zusätzlich das haptische Element der Reanimationspuppe hinnzugefügt. Das taktiles Lernszenario ermöglicht es dem Benutzer, während er die virtuelle Welt sieht mit etwas Physischem zu interagieren. Dank der Positionserkennung und Verfolgung des Simulators stimmen die virtuellen und physischen Erfahrungen überein. Während der Reanimation kann der Benutzer sogar einen Blick in das Innere des Patienten werfen, da virtuelle Elemente nicht von physischen Strukturen überdeckt werden. [159]
Neben der Basis-Anwendung gibt es aktuell auch die Anwendung Schockraum. Diese bietet die Möglichkeit für gemeinsames Lernen und Training im interdisziplinären Team durch die Multiplayer-Funktion. Das Training beinhaltet einen anspruchsvollen und interaktiven Ablauf von der Ankunft bis Behandlung des Notfalls auf der Intensivstation. Die Anwender müssen gemeinsam den Patienten versorgen und auf die Ereignisse der Handlung reagieren. Die Verwendung mehrerer VIREED Systeme an einem Ort ist zwar möglich, aber nicht zwingend notwendig, da die Anwendung eine online Funktion besitzt, sodass ortsunabhängig trainiert werden kann. [160]

Virtual Reality Simulation der Chirurgie

Der Artikel „VR medical simulation from Precision OS trains surgeons five times faster“, der von Sébastien Loze im Jahr 2020 veröffentlicht wurde, beschreibt, wie eine Virtual Reality-Lösung, „Precision OS ®“, die medizinische Ausbildung durch eine schnellere und mobilere Ausbildung verändert und die Möglichkeit bietet, neue Chirurgen für jedes Szenario auszubilden. Mit Hilfe dieser Virtual Reality Plattform können Chirurgen während ihrer Ausbildung authentische chirurgische Erfahrungen sammeln. In diesem Artikel wird auch ein Vergleich zwischen der Ausbildung von Piloten und Ärzten gezogen. Um die positiven Auswirkungen dieser Plattform zu bestätigen, wird eine Studie beschrieben. Dabei wurden die chirurgischen Fähigkeiten von VR- und Nicht-VR-Nutzern verglichen. Abschließend

werden die aktuellen Entwicklungen und die daraus resultierenden Vorteile von Precision OS beschrieben. [161]
Der Artikel „Chirurgische Ausbildung im digitalen Zeitalter – Virtual Reality, Augmented Reality und Robotik im Medizinstudium“, der von Sebastián Kuhn et al. im Jahr 2021 veröffentlicht wurde, zeigt auf, wie die Digitalisierung die heutige Medizin verändert und inwiefern das Curriculum des Medizinstudiums angepasst werden muss. Der Artikel stellt ein konkretes, neu entwickeltes Lehrkonzept der Universitätsmedizin Mainz vor. Zunächst bereiten sich die Studierenden mit Hilfe von eBooks auf das Modul AR, VR und Robotik vor. Während des Kurses stehen die Dozenten als Lernbegleiter zur Verfügung. In praxisorientierter Interaktion durchlaufen die Studierenden verschiedene technologische Innovationen, wie z.B. die Nutzung einer VR-Brille oder die Möglichkeit, die eigenen Fähigkeiten an einem VR-Simulator zu testen. Auch Experteninterviews sind Teil des Kurses. Hier haben die Studierenden die Möglichkeit erfahrene Chirurgen zu befragen. Der gesamte Kursverlauf wurde abschließend von den Studierenden sowohl qualitativ als auch quantitativ evaluiert. Qualitativ zeigt dieses Kurskonzept eine hohe Akzeptanz, insbesondere durch die praxisorientierte Interaktion, durch den Kontakt mit neuer Medizintechnik und auch durch das Experteninterview. Quantitativ lässt sich eine positive Bewertung des Lernerfolgs zusammenfassen. [143]

Oxford Medical Simulation

Die medizinische VR-Anwendung, „Oxford Medical Simulation ®“ bietet die Möglichkeit, medizinisches Personal effizient und effektiv zu trainieren, um eine erstklassige Patientenversorgung zu gewährleisten, ohne dabei Risiken oder gefährliche Situationen eingehen zu müssen. Das Training simuliert den Umgang mit Patienten wie im wirklichen Leben. Krankheiten müssen diagnostiziert werden, Behandlung eingeleitet durchgeführt werden. Die Lernenden müssen in der Lage sein auf Veränderungen im Ablauf und auf unterschiedliche Szenarien reagieren zu können.
Die VR-Simulation stellt sogenannte Szenarien zur gezielten Verbesserung und Schulung von Entscheidungsfindung, klinischem Denken, kritischem Denken, Kommunikation und Teamarbeit für Studierende und praktizierende Ärzte bereit. Das System kann sowohl alleine zum Training, als auch mit Trainer, zur besseren Erklärung und Erläuterung von Handlungsabläufen eingesetzt werden. Die Trainingsszenarien orientieren sich am medizinischen Curriculum und können nahezu beliebig ergänzt und ausgeweitet werden.
Die VR-Simulation zeichnet sich durch ein hochwertiges, standardisiertes und evidenzbasiertes Simulationsdesign aus, das den Nutzern eine schnelle Integration in die Simulationsumgebung ermöglicht. Unmittelbares, objektives und persönliches Feedback ermöglicht es Nutzern und Tutoren, ihre Handlungs- und Denkprozesse zu erkennen und zu verbessern. Auch die Wiederholung bereits durchgespielter Szenarien zur Verbesserung der Nutzerleistung durch Feedbackauswertung ist möglich. Die VR-Simulation ist platzsparend, da sie ohne zusätzliches Material auskommt, weswegen sie zeit- und ortsunabhängig eingesetzt werden kann. Diese kostengünstige Lösung ermöglicht ein Training ohne große Teams und Ressourcen zu jeder Zeit. Darüber hinaus trägt der schnelle Wechsel von einem Szenario zum anderen ohne Umbau- oder Raumwechselzeiten zu einem effizienteren, nahezu barrierefreiem Training bei.
Die Oxford Medical Simulation bietet eine Vielzahl von Szenarien für verschiedene medizinische Bereiche. In der medizinischen Notaufnahme können neue und sich verschlechternde Patienten in der Notaufnahme und im gesamten Krankenhaus gemanagt werden. Pädiatrische Notfälle werden mit Fokus auf den Arzt behandelt, während im Bereich der psychischen Gesundheit der Fokus auf Kommunikation, Risikobewertung und Deeskalation liegt. Für Medizinstudierende werden Szenarien angeboten, die sich auf Beurteilung und Diagnose konzentrieren. Fortgeschrittene Szenarien für Ärzte beinhalten eine vollständige Beurteilung, Untersuchung, Verwaltung und Überweisung. [162]

3.4 Forschungsbedarf und Bezug zu den Forschungsfragen

Die Integration von haptischem Feedback in Augmented Reality eröffnet neue Möglichkeiten in der medizinischen Ausbildung. Durch die Kombination dieser Technologien können Studierende eine immersive Lernerfahrung machen und praktische Fähigkeiten in einer realistischen Umgebung entwickeln. Dieser innovative Ansatz bietet eine Reihe von potenzieller Vorteile.
Um den aktuellen Stand der Technik aufzuarbeiten und Erkenntnisse für die eigene Umsetzung zu gewinnen, wird im Folgenden zu den im Kapitel '1.2 Forschungsfragen und Forschungsziele' formulierten Forschungsfragen Stellung genommen und mit Aspekten aus der Literatur, d.h. den technologischen Möglichkeiten aktueller Hard- und Software, sowie aktuellen Beispielen bereits heute verfügbarer Anwendungen erläutert.

Forschungsfrage I: Welche technischen Voraussetzungen und Herausforderungen sind spezifisch für die Integration von haptischem Feedback in medizinische Augmented Reality-Anwendungen?
Die Vorstellung der Hardware für haptisches Feedback hat gezeigt, dass es zahlreiche Möglichkeiten gibt, haptisches Feedback in Form von vibrotaktilem und Force Feedback darzustellen. Die klassische Form der Simulatoren, die bereits seit den 70er Jahren im Einsatz ist und in immer weiteren Bereichen für die Ausbildung eingesetzt wird, unterstützt haptisches Feedback, ist aber für einen sehr speziellen Anwendungsfall konzipiert und kann in der Regel auch nur diesen bedienen (siehe '3.2.2.5 Simulatoren'. Demgegenüber steht die Hardware, die nahezu anwendungsübergreifend und variabel eingesetzt werden kann, da ihre Funktion erst durch die Software und die Art der Ansteuerung bestimmt wird. Neben Controllern mit vibrotaktilem Feedback, die bereits in den meisten HMDs enthalten sind (siehe '3.2.2.1 Controller'), finden sich hierfür Kleidungsstücke wie Westen und Ganzkörperanzüge (siehe '3.2.2.3 Kleidung mit haptischem Feedback') und insbesondere Datenhandschuhe (siehe '3.2.2.2 Datenhandschuhe'), die beide Arten des haptischen Feedbacks wiedergeben können.
Datenhandschuhe sind für die weitere Forschung am interessantesten, da sie sowohl wenig verwendet werden als auch mit der Möglichkeit, beide Formen haptischen Feedbacks wiederzugeben, den interessantesten Ansatz bieten. Es gibt verschiedene Modelle in einer breiten Preisklasse und Verfügbarkeit, so dass mit der richtigen Konfiguration ein skalierbares Lernsetup für eine ganze Gruppe erstellt werden kann.
Auf der anderen Seite steht die Hardware zur Darstellung der Augmented Reality-Anwendung. Hardwareseitig kann hier unterschieden werden zwischen einer Smartphone-basierten Anwendung, bei der das Smartphone-Display als AR-Interface fungiert (siehe '3.2.1.2 Smartphones'), der jungen Technologie der AR-Kontaktlinsen, die noch nicht erprobt ist, aber in Zukunft ungeahnte Möglichkeiten und Integrierbarkeit in den Alltag bietet (siehe '3.2.1.3 Kontaktlinsen') und vor allem den Head-Mounted Displays (siehe '3.2.1.1 Head-Mounted Displays').
Zwar ist die Anwendung mit einem Smartphone deutlich zugänglicher, da Smartphones weitaus verbreiteter sind als AR-Brillen, jedoch ist die technische Umsetzung bzw. die grafische Darstellung schlechter als bei dedizierten AR-HMDs. Zudem wird bei der Nutzung von Smartphone-basierter AR, sofern keine Kopfhalterung vorhanden ist, eine Hand zum Halten des Gerätes benötigt und kann nicht zur Bedienung und Interaktion mit den virtuellen Modellen genutzt werden.
Für die Integration von Hardware mit haptischem Feedback in AR-Anwendungen sind einige technische Voraussetzungen zu beachten. An erster Stelle steht hier die Unterstützung und Verfügbarkeit des jeweiligen Plugins der haptischen Hardware, sofern die Programmierung mit einer Engine angestrebt wird. Für eine native Implementierung ist eine direkte Kommunikation (meist via Bluetooth) entsprechend der Schnittstellendefinition der Hardware notwendig.
Datenhandschuhe verfügen über keine eigene Positionserkennung im Raum, da sie selbst nur die Position der Finger relativ zu sich selbst kennen. Daher ist es notwendig, mit Hilfe eines Trackingsystems die Position des Handschuhs zu erfassen und in der eigenen Anwendung darzustellen. Dies kann über externe Tracker, wie z.B. einen Vive Tracker und das SteamVR Plugin funktionieren, wenn das HMD Plugin die gleichzeitige Nutzung nicht ausschließt [56].

Unabhängig von externen Trackern kann die Position des eigenen Controllers des HMDs erfasst werden. Ist der Controller fest mit dem Datenhandschuh verbunden, kann diese Position mit einem Offset versehen und im Raum erkannt werden. Der Controller fungiert in diesem Fall als Tracker [52].
Die bisher wenig genutzten Möglichkeiten der natürlichen Interaktion mit den eigenen Händen in Handschuhen bieten große Vorteile für Lernanwendungen [51]. Durch Handtracking und haptisches Feedback kann der Benutzer virtuelle Objekte wie physische Objekte anfassen und mit ihnen arbeiten. Daraus ergibt sich eine weitere Voraussetzung für eine medizinische AR-Anwendung mit haptischem Feedback: Die Interaktion mit virtuellen Modellen muss natürlich/intuitiv sein und reale Handlungsabläufe abbilden. Medizinische AR-Anwendungen können dazu genutzt werden, das Sichtfeld um zusätzliche Informationen zu erweitern, ohne den eigentlichen Handlungsablauf zu stören oder zu beeinträchtigen (siehe '3.3.2 Medizinische Augmented Reality-Anwendungen'). Dieser Vorteil muss bei der Planung und Umsetzung der Anwendung berücksichtigt werden. Im Vergleich zu medizinischen VR-Anwendungen fehlt zudem, dass medizinische Handlungsabläufe möglichst realitätsnah abgebildet werden, um die Übertragbarkeit des Gelernten in den späteren Alltag zu erleichtern (siehe '3.3.4 Medizinische Virtual Reality-Anwendungen').

Forschungsfrage II: Lässt sich haptisches Feedback mittels Datenhandschuhen mit heutigen Methoden in eine AR-Anwendung integrieren? Wie sieht ein aktueller Prototyp einer solchen AR-Anwendung mit haptischem Feedback aus?
Diese Forschungsfrage kann nicht mit Beispielen aus dem aktuellen Stand der Technik belegt werden, da es schlichtweg keine Augmented Reality-Anwendungen mit haptischem Feedback mittels Datenhandschuhen gibt. Wenn überhaupt, geht die Integration nicht über eine technische Demonstration des Herstellers hinaus[6]. Die meisten Beispiele für haptisches Feedback in medizinischen Augmented Reality-Anwendungen sind hochspezialisierte Anwendungen, die nur einen Anwendungsfall abdecken und nur für diesen Zweck eingesetzt werden können. Darüber hinaus würden diese Anwendungen, obwohl sie früher als Augmented Reality bezeichnet wurden, heute eher in die Kategorie des erweiterten Live Feeds fallen (siehe '3.3.4 Medizinische Virtual Reality-Anwendungen' und '3.3.2 Medizinische Augmented Reality-Anwendungen').
Es gibt keine allgemeinen AR-Anwendungen, die einen breiteren Einsatz ermöglichen und nicht nur auf einen bestimmten Anwendungsfall abzielen. Insbesondere die Integration von haptischem Feedback erlaubt immer nur eine genau vordefinierte Anwendung, in der Regel die Simulation eines physischen Gerätes, das entweder nicht vorhanden ist oder sich an einem anderen Ort befindet (siehe '3.3.3 Augmented Reality-Anwendungen mit haptischem Feedback'). In Anlehnung an die KI-Forschung, die Künstliche Intelligenz in schwache (KI, die nur genau einen Anwendungsfall abdeckt) und starke (KI, die anwendungsunabhängig agiert und an den Anwendungsfall angepasst werden kann) unterteilt, würde in diesem Fall von schwachen Augmented Reality-Anwendungen gesprochen werden.
Die Literaturrecherche hat auch gezeigt, dass es viele ältere Quellen, d.h. Quellen, die vor 2015 erschienen sind, gibt, die sich mit dem Thema AR, VR in medizinischen Anwendungen beschäftigen. In der heutigen Zeit ist die Entwicklung der Technologie so rasant, dass innerhalb von nur fünf Jahren die Technologie bereits als veraltet gilt. Dies ist zum Teil auf das Moore'sche Gesetz zurückzuführen und zum Teil auf das allgemeine Interesse in diesen Bereichen, das vor allem durch Meta, ehemals Facebook, vorangetrieben wird [58].
Eine prototypische Integration haptischer Elemente in eine medizinische AR-Anwendung für ein HMD unter Berücksichtigung der Anforderungen an medizinische Software könnte zeigen, ob die aktuelle Technologie in der Lage ist, diesen Anwendungsfall abzubilden. Derzeit existiert noch kein solcher Prototyp und die Beantwortung dieser Forschungsfrage erfordert eine Anforderungserhebung und Implementierung.

Forschungsfrage III: Inwieweit ist die Haptik in Augmented Reality-Anwendungen für medizinische Lehranwendungen akzeptabel und realistisch genug, um eine Übertragbarkeit auf reale Anwendungs-

[6] Wobei auch hier die meisten technischen Demonstrationen VR-Anwendungen sind.

szenarien zu gewährleisten und eine erfolgreiche Umsetzung der erlernten Handlungen in die reale Behandlungspraxis zu ermöglichen? Wie beeinflusst dies die Nutzererfahrung?

Heutige Simulationen dienen oft dazu, einen bestimmten medizinischen Sachverhalt realitätsnah, aber sicher und kontrolliert darzustellen. Die Simulation beeinflusst den Handlungsablauf nicht und dient der Verbesserung des Ablaufs. Simulatoren bilden den realen Sachverhalt, z. B. einen medizinischen Eingriff oder die korrekte Handhabung eines medizinischen Instruments, ab und erweitern ihn um Rückmeldungen (z. B. in Form von haptischen oder akustischen Reizen) (siehe '3.2.2.5 Simulatoren').

Diese Forschungsfrage kann unter Berücksichtigung anderer aktueller Anwendungen in kleinere Forschungsfragen unterteilt werden, deren Beantwortung neue Erkenntnisse in Bezug auf diese Frage liefern könnte. Eine wichtige Forschungsfrage wäre beispielsweise, inwieweit AR in Kombination mit haptischem Feedback das Verständnis komplexer anatomischer Strukturen verbessern kann. Hier kann untersucht werden, ob die räumliche Darstellung von Organen und Geweben in AR den Lernprozess erleichtert und das haptische Feedback eine präzisere Wahrnehmung ermöglicht.

Eine weitere interessante Frage, die sich daraus ergibt, ist, wie AR und haptisches Feedback zur Simulation medizinischer Eingriffe eingesetzt werden können. Inwieweit können Studierende durch diese Technologien realistische Situationen erleben und ihre Fähigkeiten verbessern, bevor sie direkt am Patienten arbeiten? Ein entwickelter Simulator muss im Hinblick auf den Lernerfolg bzw. die Vorbereitung auf den späteren Einsatz im Alltag, die Übertragbarkeit, evaluiert werden.

Kapitel 4

Konzeption der Augmented Reality-Anwendung

Dieses Kapitel befasst sich mit den Anforderungen an eine medizinische AR-Anwendung mit haptischem Feedback. Aus den Information unterschiedlicher Quellen (Literatur, Experteninterviews und Forschungsarbeiten) wird ein Anforderungskatalog erstellt, welche für die Implementierung und Evaluation verwendet werden kann. Die Abdeckung der aufgelisteten Anforderungen soll bei der Beantwortung der Forschungsfragen eine maßgebliche Rolle einnehmen.

4.1 Anforderungserhebung aus technischer Sicht

Zu Beginn der Arbeit dieser Dissertation steht die Anforderungserhebung. Hierbei geht es darum Kriterien und Themen vor Beginn von Studien und Erhebungen zu definieren, nach denen geforscht wird. Es werden Ziele definiert, die Demonstratoren und Testanwendungen erfüllen sollen, um die wissenschaftlichen Fragestellungen zu beantworten. Zunächst müssen die Kriterien definiert werden, die ein Demonstrator allgemein erfüllen muss. Anschließend kann auf das spezielle Anwendungsgebiet, die Verwendung in der Medizinlehre, eingegangen werden.
Eine Grundlegende Anforderung an den Demonstrator ist, dass er ohne Abstürze lauffähig ist. Die Verwendung der Software muss ohne den Entwickler, bzw. technische Unterstützung, möglich sein. Demnach muss die Bedienung innerhalb der Software erklärt oder so intuituv sein, dass es keiner Erklärung bedarf. Des Weiteren müssen auch alle Funktionen, die im finalen Prototypen enthalten sind, funktionieren. Während der Entwicklung können zusätzliche Funktionen in Betracht gezogen werden, die die Verwendung der Software verbessern oder erleichtern. Ist es aufgrund dieser Funktionen nicht möglich, die eigentliche Anwendung sinnvoll durchzuführen, müssen die Funktionen wieder entfernt werden.
Ein großer Fallstrick der Softwareentwicklung ist die *Usability*. Usability steht für die Benutzbarkeit und das intuitive Gefühl bei dem Verwenden einer Anwendung. Ist eine Software nicht mit dem Ziel der Benutzbarkeit durch einen Endnutzer, der möglicherweise ein völlig anderes Verständnis der Anwendung und des Anwendungsfalls der Software hat, entwickelt worden, so besitzt sie eine schlechte Usability. Softwareentwickler sollten sich in die Lage des Anwenders versetzten und versuchen, dass die Software so bedient werden kann, wie der Endnutzer es sich wünscht und vorstellt. Um herauszufinden, wie Endnutzer ihre Software bedienen wollen und werden, sollte zu Beginn des Projekts, im Ramen einer Anforderungserhebung, festgestellt werden, welche Funktionen für den Nutzer besonders sinnvoll sind und wie er intuitiv vor hat, diese zu bedienen oder in der Software zu erreichen. Diese Analyse kann während der Entwicklung als Orientierung dienen, und die Nutzer sollten regelmäßig befragt werden, ob die Entwicklung und Nutzung in ihrem Interesse verläuft.
Der nächste Punkt ist die Qualität des Codes. Gute Software sollte dokumentiert sein und so geschrieben sein,

dass Entwickler, die nicht am schreiben des Codes beteiligt waren, diesen verstehen und daran weiterarbeiten können. Ein *Blackbox-Prinzip* kann dazu führen, dass nur die Eingaben und Ausgaben einer Software, nicht ihre eigentliche Funktionsweise, verstanden werden können. Diese Software kann nur schwer gewartet, weiterentwickelt oder verbessert werden. Ein Vorteil, aus technischer Sicht, ist ein modularer, wiederverwendbarer Aufbau. In der Softwareentwicklung wird von *weicher Programmierung* gesprochen. Es werden Variablen und Funktionen verwendet, um wiederkehrende Prozesse zusammenzufassen und eine Konkatenation dieser ergibt den Programmablauf.
Das mag banal klingen, ist aber gerade bei medizinischen Anwendungen von besonderer Bedeutung. Medizinische Anwendungen werden in der Regel von nicht technisch versierten Anwendern genutzt und erfordern eine ständige Anpassung an sich ändernde und erweiternde Anforderungen. Wenn die Software mit diesem Gedanken entwickelt wurde und eine Erweiterung leicht möglich ist, erleichtert dies die Implementierung und erhöht die Langlebigkeit und Aktualität der Software.
Der letzte Punkt, der gerade in medizinischen Anwendungen besonders wichtig ist, ist die Sicherheit der Anwendung. Sofern Patienten oder Patientendaten involviert sind, muss die Software sicher gegenüber Dritten entwickelt sein und die Software darf keinesfalls zu Patientenschaden führen. Im Falle einer Lehranwendung, kommt die Software (in der Regel) nicht mit dem Patienten in Kontakt. Dennoch können patientenbezogene Daten verwendet werden, welche per Definition besonders schützenswert sind. Darüber hinaus müssen die Lehrprozesse vollständig und korrekt sein, damit die Ausbildung angehender Mediziner konform mit dem Curriculum abläuft.

4.2 Anforderungserhebung aus Experteninterviews

Neben den Anforderungen aus der Literatur sollte das Expertenwissen durch (teilstandardisierte) leitfadengestützte Interviews abgebildet werden. Dieses Interviewmodell wurde gewählt, da es durch seine Vorstrukturierung den Fokus des Interviews klar vorgibt. Dennoch dienen die Fragen mehr der Orientierung und die Experten können ihre Fachkompetenz auf ihre Weise in das Gespräch einbringen. Der Gesprächsfluss sollte dynamisch vom Allgemeinen zum Speziellen verlaufen und die Fragen sollten so formuliert sein, dass der Gesprächspartner möglichst offen und ausführlich antworten kann. Sind Fragen bereits beantwortet, können diese übersprungen oder modifiziert werden (vgl. hierzu [163]).
Der Aufbau eines leitfadengestützten Interviews folgt in der Regel folgendem Schema: Es beginnt mit Fragen zum Hintergrund des Experten, um seine Rolle besser interpretieren und seine Antworten gewichten zu können.[1] Außerdem sollte das Thema des Interviews erläutert und Interesse daran geweckt werden.
Im Hauptteil des Experteninterviews sollen offene, aufeinander aufbauende Fragen gestellt und auf die Ausführungen des Experten eingegangen werden. Die Fragen sollten thematisch geordnet sein und der Wechsel zwischen den Themen sollte nicht zu abrupt erfolgen, damit sich der Gesprächspartner auf das eigentliche Thema konzentrieren kann.
Abschließend können Bewertungsfragen gestellt werden, die sich auf die Einschätzung eines Sachverhalts durch den Experten beziehen. Auch ein Beispiel in Verbindung mit einem Szenario oder einem Gedankenexperiment ist ein guter Abschluss, um herauszufinden, wie der Experte auf einen Einblick reagieren würde und wie er zuvor definierte Konzepte bewerten würde.

[1] Z.B. sind medizinische Fragen an einen Arzt anders zu gewichten als an eine Person ohne Bezug zum Gesundheitssystem

Als Leitfaden für die Konzeption eines Experteninterviews empfiehlt Cornelia Helfferich die „SPSS-Methode“ [164]. Die Abkürzung steht für:

- Sammeln (S)
  Zunächst sollen alle Fragen, die für das Thema relevant sein könnten, gesammelt werden.
- Prüfen (P)
  Danach werden die Fragen auf Relevanz geprüft, zusammengefasst und (falls erforderlich) umformuliert.
- Sortieren (S)
  Im dritten Schritt sollen die Fragen sortiert und zu thematischen Blöcken zusammengefasst werden.
- Subsummieren (S)
  Zuletzt werden die Fragen zusammengefasst (engl. summarize). Hierbei gilt es darauf zu achten, dass die Fragen aufeinander aufbauen und von allgemeinen zu spezielleren Themen reichen. Außerdem wird die Reihenfolge der Fragenblöcke aus dem Schritt „Sortieren“ festgelegt.

4.2.1 Konzeption des Fragebogens für die Experteninterviews

Der Fragebogen ist in vier Teile gegliedert. Im ersten Teil wird der Experte zu seinem Hintergrund und seiner Beziehung zum SkillsLab sowie zu seiner Meinung über die Bedeutung und den Stellenwert des SkillsLab im Medizinstudium befragt. Die Fragen beginnen allgemein und führen zu konkreten Problemen bei der aktuellen Umsetzung des SkillsLab.
Im zweiten Teil geht es um das Thema Augmented Reality. Zunächst werden die bisherigen Erfahrungen des Experten mit Augmented Reality- Anwendungen speziell im medizinischen Kontext erfragt. Die Fragen beginnen mit dem Thema AR im Allgemeinen und richten sich im Laufe des Interviews immer mehr auf medizinische und pädagogische Inhalte.
Der letzte Fragenblock beinhaltet Fragen zum Thema haptisches Feedback. Abschließend soll der Zusammenhang zwischen Augmented Reality und haptischem Feedback hergestellt werden. Der Experte soll seine Meinung über das Potential von Augmented Reality in Verbindung mit haptischem Feedback in der medizinischen Lehre abgeben.
Am Ende des Fragebogens wird die Meinung des jeweiligen Experten zu einem (fiktiven) Szenario abgefragt. Wie bereits bei der Durchführung von leitfadengestützten Experteninterviews beschrieben, wird dem Experten die Möglichkeit gegeben, über den Tellerrand hinaus zu blicken und sein Wissen in einem Gedankenexperiment zu bündeln. Der vollständige Fragebogen befindet sich im Anhang (siehe ’9.2 Leitfadengestütztes Expertentinterview’).

4.2.2 Ergebnisse der Experteninterviews

Die Transkripte der Experteninterviews wurden mit der Software (MAXQDA) ausgewertet und mit einem angelegten Schema kategorisiert. Die Auswertung lässt sich durch ein Kodierschema dein einzelnen Fragen zuordnen. Der Buchstabe steht für den Namen des Interviewpartners (P für Frau Dorothea Protte, F für Herrn Prof. Dr. med. Nabeel Farhan und T für Herrn H.P. Hilco Theeuwes MD, MSc.) und die Zahl steht für die Fragennummer, bzw. ein S steht für das Szenario. Im folgenden Kapitel wird zunächst jedes Experteninterview einzeln ausgewertet und im Anschluss mit den Ergebnissen der anderen in Bezug gesetzt, sodass dieses Kapitel mit einer Gesamtauswertung und einem einheitlichen Meinungsbild der Experten endet.

4.2.2.1 Experte 1 – Frau Dorothea Protte

Im ersten Teil des Interviews zum Thema „Medizinlehre – SkillsLab“ stellte sich Frau Protte als ärztliche Koordinatorin des SkillsLab Bonn und als Lehrende dort vor und hat an der eigentlichen Gründung mitgearbeitet (P 1) [165]. Die

Relevanz für die medizinische Lehre sieht sie als groß an, um das Verständnis und Lernen innerhalb ihrer angewandten Vier-Stufen-Methode im geschützten Raum zu verbessern und damit so die Studierenden nicht direkt am Patienten üben müssen, sondern sie grundlegende Fähigkeiten erstmal im SkillsLab an Modellen üben können (P 2-4). In der Nutzung von anatomisch korrekten Modellen in der Lehre sieht sie den großen Vorteil, auf Leichenspenden verzichten zu können, merkt aber an, dass diese Modelle im präklinischen Bereich für das Verständnis des grundsätzlichen Aufbaus des menschlichen Körpers besser geeignet sind als in der Weiterbildung, bei der von Patient zu Patient verschiedene Dinge im Vordergrund stehen(P 6). Grundsätzliche Probleme liegen ihrer Ansicht nach, in passenden Räumlichkeiten, da das SkillsLab sehr viel Platz bedarf, und einem relativ hohen und schlecht abschätzbaren Ressourcenaufwand in der Durchführung für bestimmte Verbrauchsmaterialien durch variierende Gruppengrößen (P 5+6). Frau Protte kennt durch ihre enge Arbeit in der Gründung des SkillsLab Bonn, ihrer Lehre dort und durch Besuche auf Fachkonferenzen, bei der Durchführung aufkommende Problematiken und kann in diesem Themengebiet auf persönlichen Erfahrungen basierend auf die Fragen antworten.
Im Themengebiet „Augmented Reality“ hat Frau Protte bislang keine Erfahrungen und Berührungspunkte (P 8). Als wichtig empfindet sie dennoch, dass die Anwendungen einen Sinn für die Lehre haben und sie nicht wie in anderen Anwendungsgebieten für spielerische Zwecke genutzt werden. Die Studierenden sollen durch die Augmented Reality verbesserte Simulation von Szenarien hinsichtlich Realitätsnähe ein gutes Handling für den späteren Arbeitsalltag entwickeln (P 10). Dies geschieht dadurch, dass die Studierenden in der Simulation durch z.B. die Einblendung von Listen eine Hilfestellung erhalten und so die einzelnen Punkte abarbeiten und dadurch besser lernen können. Dennoch merkt Frau Protte an, dass insbesondere die Checklisten mehr zur Unterstützung im Lernprozess dienen, um die Fähigkeiten zu verbessern, da in der Realität der Arzt natürlich keine Checkliste eingeblendet bekommt, nach der er dann arbeiten kann (P 11+12).
Im dritten Themengebiet „haptisches Feedback“ hat Frau Protte bereits Erfahrungen mit einem Laparoskopie-Simulator gemacht, bei dem die Studierenden über Haptik und Bild sehr genaues Feedback erhalten. Dabei findet sie gut, dass eine Simulation durchgeführt werden kann, die sonst nur mithilfe eines Patienten durchführbar wäre und auch, dass der Verschleiß an Material so deutlich geringer ausfällt(P 14+15). Sie hebt hervor, dass bei der Erweiterung des Feedbacks der Haptik um konkretere Handlungsanweisungen sehr großes Potenzial für die Lehre besteht (P 16).
Bei Betrachtung des abschließenden Szenarios, dass jeder Student zu Beginn seines Studiums eine Augmented Reality-Brille und ein Paar haptische Handschuhe erhält, sieht Frau Protte den Vorteil darin, dass auch so vermehrt auf Körperspenden in den Präparierkursen verzichtet werden kann und die Studierenden durch z.B. die Einrichtung eines „SkillsLab ToGo“ ortsunabhängig und praktisch lernen können (P S)

4.2.2.2 Experte 2 – Prof. Dr. med. Nabeel Farhan

Prof. Dr. med. Nabeel Farhan merkte schon bei der Beantwortung der ersten Frage die Relevanz des SkillsLab für das Medizinstudium an [166]. Schon ab dem ersten Semester findet für Medizinstudierende das SkillsLab statt und zieht sich durch das gesamte Studium (F 1). Somit könnten AR-Anwendungen die Lehre früh unterstützen und verbessern. Außerdem hat das SkillsLab eine hohe Relevanz, da das theoretische Wissen durch Simulationen praktisch vermittelt werden kann (F 2+3). Aber um eine problemlose Vermittlung der Lehrinhalte zu gewährleisten, müssen die genutzten Modelle im SkillsLab der Realität entsprechen und anatomisch korrekt sein (F 5+6).
Präzise und realitätsnahe AR-Anwendungen können, laut Farhan, die Qualität des SkillsLab verbessern und die Probleme vermindern. Die verbesserte Darstellung der Anatomie und der Strukturen kann das Lernen stark verbessern, da dieses Vorwissen für Operationen sehr wichtig ist und der Umgang bereits früh gelernt werden müsse (F 8-10). Mit Blick auf die Corona-Pandemie, in welcher Kontakte teilweise stark eingeschränkt werden mussten, kann in dieser Zeit das SkillsLab nicht in vollem Ausmaß stattfinden, da ein wichtiger Teil der Kontakt zu den Studierenden und den Betreuenden ist (F 5). Mit AR-Inhalten können zudem Situationen trainiert werden, welche in der Realität

nicht in demselben Umfang darstellen könnte. Als Beispiel wird das sterile Händewaschen genannt, wobei Stellen markiert werden, welche noch nicht desinfiziert sind. Außerdem können durch AR Materialkosten reduziert werden, welche sonst zu Übungszwecken benötigt werden. Zudem würde vermehrtes Üben mit Desinfektionsmittel die Haut beschädigen, wohingegen die Arbeit mit AR risikofrei ist. Zusätzliche Informationen, welche in das Sichtfeld der Studierenden projiziert wird, können zudem das Fachwissen verfestigen und durch Einblendung von Hinweisen das praktische Übung erleichtern (F 11+12).
Zu Beginn des dritten Abschnitts weist Farhan darauf hin, dass bei der Nutzung von AR-Inhalten zwar die Technik erlernt werden kann, doch da es keine Objekte gibt, welche berührt werden können, dies nicht denselben Effekt hat, wie die Nutzung von Modellen in der Realität (F 13). Eine mögliche Lösung dieses Problems kann haptisches Feedback sein. Objekte können angefasst werden und verschiedene Situationen können eingeübt werden, wodurch die Lehre von AR-Inhalte die Realität besser widerspiegelt und als realistischer wahrgenommen werden kann (F 15+17). Zusätzliche Informationen in Form von Vibrationen oder akustischem Feedback können dabei Sachverhalte verdeutlichen, beispielsweise, dass in der Simulation ein wichtiges Gefäß geschnitten wurde. Dabei können Informationen wie Handlungsanweisungen eingeblendet werden, welche Vorgehensweise des Studierenden beeinflusst und diesen sinnvoll unterstützt (F 15+16).
Würde zu Beginn des Studiums jeder Studierende eine Augmented Reality-Brille und ein Paar haptische Handschuhe erhalten, könnten die Studierenden von zu Hause die theoretischen Inhalte praktisch trainieren. So können AR-Anwendungen und haptisches Feedback die medizinische Ausbildung verbessern und theoretische Inhalte von Anfang an in die Praxis umsetzen, wodurch Medizinstudierende besser verstehen, wie Theorie und Praxis zusammenhängen (F S).

4.2.2.3 Experte 3 – H.P. (Hilco) Theeuwes MD, MSc.

Aufgrund von technischen Problemen sind die ersten 4 Minuten der Aufzeichnung des Interviews verloren gegangen. Aus diesem Grund startet das Transkript erst mit der Beantwortung der vierten Frage. Als Interviewpartner dient Herr Theeuwes vom „Erasmus Medical Center“ (kurz: *EMC*) in Rotterdam [167].
Die derzeitige Lehrstrategie besteht darin, verschiedene Methoden für verschiedene Studierendengruppen von verschiedenen Ärzten zu verwenden. Dadurch wird gewährleistet, dass unterschiedliche Fachgebiete von den jeweiligen Experten an ein wechselndes Publikum vermittelt werden können. So lernen Studierende höherer Semester bei denselben Ärzten in unterschiedlichen Kursen und Konstellationen unterschiedliche Inhalte. Zur Unterstützung dieser Lernkonzepte werden neue Technologien eingesetzt. Theeuwes möchte in Zukunft die Vorteile einer solchen Lernstrategie testen, zum Beispiel den Einsatz von 3D-Druck, um besser mit haptischem Feedback arbeiten zu können. (F4).
Zu den aktuellen Problemen des EMC gehört der Umbau des Krankenhauses und der Universität. Dies führt zu Stopps in der Umstellung, Weiterentwicklung und Veränderung des SkillsLab. Ein weiteres Problem ist, wie in vielen Bereichen, die finanzielle Lage. Durch eine externe Finanzierung könnte die finanzielle Lab Dieses Problem soll durch externe Finanzierung erleichtert werden, um die Durchführung und Implementierung des SkillsLab. Herr Theeuwes betont das die derzeitige Situation nicht ideal ist und sich auf kurze Sicht nicht ändern lässt (F5).
In den Niederlanden werden menschliche Präparate für eine besondere Art der Lehre verwendet. Herr Theeuwes betont den hohen Mehrwert, merkt aber auch an, dass dies nicht für alle Studierenden in allen Situationen/Kursen notwendig ist. Medizinstudierende sollten mit Humanpräparaten arbeiten und diese Form der Lehre mindestens einmal erlebt haben. Ärzte aus nicht operierenden Fachrichtungen könnten stattdessen diese Modelle verwenden. Damit kann der Bedarf an menschlichen Präparaten reduzieren und die vorhandenen Ressourcen anders verteilt werden (F6).
Die Umsetzung des SkillsLab am EMC unterscheidet sich von den klassischen SkillsLabs und dem SkillsLab in Siegen. Das SkillsLab besteht aus einer Kombination von Anatomielabor, Simulationszentrum und dem eigentlichen

SkillsLab. Die laufenden Kosten für das SkillsLab setzen sich aus Verbrauchsmaterialien, Chemikalien, Kühlschränken, Gefriergeräten und Luftfilteranlagen zusammen. Hinzu kommen die Kosten für das Gebäude, d.h. die Heizkosten im Winter und die Kosten für die Klimaanlage im Sommer. Auch hier wird ein Sponsor um Hilfe gebeten und in Zukunft werden Mittel aus dem Bereich Forschung und Entwicklung zur Verfügung stehen (F7). Augmented Reality wird bereits im Krankenhaus des EMC mit einer Microsoft HoloLens Brille z.B. zur Operationsplanung eingesetzt. Im Curriculum ist der Einsatz noch nicht vorgesehen. Herr Theeuwes wünscht sich, dass diese Anwendungen im neu errichteten Innovationslabor für die Lehre kombiniert und eingesetzt werden (F8).

Einer der wichtigsten Aspekte und Merkmale von Augmented Reality ist laut Herrn Theeuwes das haptische Feedback. Dies verbessert seiner Meinung nach den Lernerfolg, da durch das Anfassen eine andere Wirkung auf das Gehirn erzielt wird und durch den Einsatz mehrerer Sinne mehr Lerninhalte von den Studierenden behalten werden können. Er ist der Meinung, dass die Kombination der verschiedenen Lernmethoden bzw. Sinne ein optimaler Lernweg ist (F9).

Der Einsatz von Augmented Reality im medizinischen Alltag beschränkt sich am EMC Rotterdam derzeit auf die bereits erwähnte HoloLens-Brille und einige 3D-Monitore. Diese werden laut Herrn Theeuwes zur Visualisierung von Frakturen und zur Visualisierung von anatomischen Defekten und Anomalien verwendet. Über die Einsatzmöglichkeiten ist er sich noch nicht ganz sicher, denn er betont, dass er den wahren Wert noch nicht ganz kennt und hofft, dass zukünftige Anwendungen das Potenzial von AR voll ausschöpfen werden (F10).

Hinsichtlich des Einsatzes von Augmented Reality in der medizinischen Ausbildung ist sich Herr Theeuwes sehr sicher. Für ihn ist es fast ein „Muss“, denn er betont, dass kein Weg daran vorbeiführt. Die Frage, die er sich erneut stellt, ist die „Wie“ und „Wo“ dies am besten umgesetzt werden kann. Er ist fest davon überzeugt, dass Augmented Reality den Unterricht unterstützen kann. Dabei argumentiert er den „Wie“-Ansatz damit, dass jeder Studierende Informationen, die auf verschiedenen Ebenen auf ihn einwirken, im Gehirn anders verarbeitet. Um für jeden Studierenden den bestmöglichen Lernprozess zu gestalten, ist er bereit, die Menge an menschlichen Präparaten zu reduzieren. All dies soll im neuen Innovationslabor in den nächsten Jahren besser erforscht werden (F11).

Herr Theeuwes ist der Ansicht, dass jahrelange Erfahrung und ein guter Ansatz nicht durch mehr Informationen auf dem Bildschirm kompensiert werden können. Es komme auch darauf an, in welcher Phase sich der Benutzer befinde. Er äußert die Befürchtung, die Studierenden zu überfordern. Er ist aber auch davon überzeugt, dass eine bestimmte Gruppe von Menschen mit einer solchen Erweiterung gut zurechtkommen würde und es für sie durchaus von Vorteil sein kann, möglichst viele Informationen präsentiert zu bekommen. Er äußert seine Meinung hier sehr überlegt und vorsichtig und auch hypothetisch, da er der Meinung ist, dass das EMC Rotterdam noch nicht so weit ist (F12).

Anschließend stellt Herr Theeuwes ein bereits in der Praxis angewandtes Beispiel vor, bei dem mittels Augmented Reality Werkzeuge, Maschinen und die Arbeitsumgebung vorab visualisiert werden können. Durch den Vergleich mit einer Kontrollgruppe konnte ein enormer Effekt festgestellt werden. Herr Theeuwes stimmt der Frage ausdrücklich zu (F13).

Der letzte Abschnitt des Interviews, Haptical Feedback, wurde von Herrn Theeuwes aus Zeitgründen nur in kurzen Sätzen beantwortet. Herr Theeuwes sagte, dass haptisches Feedback einer der Grundpfeiler beim Erlernen der Grundfertigkeiten sei. Es sei ein sehr wesentliches Element beim Erlernen der Grundfertigkeiten. Er ist auch der Meinung, dass es bei einigen Verständnis- und Anwendungsfragen helfen kann (F14 und 15). Herr Theeuwes ist der Meinung, dass das Hinzufügen der Temperatur einen großen Unterschied machen würde und nicht unterschätzt werden sollte. Aber auch eine Rückmeldung über den Druck auf die Fingerspitzen beim Greifen kann hilfreich sein. Diese Formen des Feedbacks sollten vorhanden sein, da sonst das Erlernen der motorischen Fähigkeiten erschwert werden könnte, da sich Simulatoren anders verhalten als die Realität (F16).

Die Abhängigkeit der Studierenden darf bei der Betrachtung des Einsatzes von Augmented Reality in der Ausbildung nicht unterschätzt werden. In diesem Zusammenhang betont Herr Theeuwes noch einmal die Individualität eines jeden Lernenden. Er ist der Meinung, dass es sich um ein sehr wichtiges Werkzeug für den Unterricht handelt und

erklärt, dass es Situationen aufzeigen kann, die normalerweise nicht zugänglich wären. Er betont auch das Fehlen des Geruchssinns. Insbesondere der Umgang mit menschlichen Präparaten habe einen individuellen Geruch, mit dem die angehenden Ärzte vertraut sein und lernen müssten, damit umzugehen. Er ergänzt noch die Bedeutung der neuen Möglichkeiten im Gegensatz zur klassischen Ausbildung durch Vorlesungen, Bücher oder Präsentationen und bekräftigt seinen Standpunkt mit der Aussage, dass diese Anwendung die Zukunft sei (F17 und Scenario).

4.2.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Zusammenfassend sieht Frau Protte ein großes Potential in der Integration von AR und haptischem Feedback in die Lehre, um Lernen ortsunabhängiger und ohne großen materiellen oder körperlichen Aufwand durchführen zu können und hat trotz der eher geringen Erfahrung in diesem Bereich klare Vorstellungen, wie Anwendungsmöglichkeiten aussehen könnten. SkillsLab, Augmented Reality und haptisches Feedback können insgesamt eine realitätsnähere Lehre ermöglichen, die die Studierenden besser auf ihr späteres Berufsleben vorbereitet. Herausforderungen bestehen noch darin, die Geräte, Anwendungen und Räume für ein SkillsLab flächendeckend für Studierende und Lehrende verfügbar zu machen und zu klären, welche Anwendung von AR oder haptischem Feedback genau an welcher Stelle des Studiums und in welchen Lehrveranstaltungen eingesetzt werden soll. [165]
Herr Farhan macht im Interview deutlich, dass AR-Inhalte und haptisches Feedback wünschenswert sind und eine deutliche Verbesserung für die medizinische Lehre und das SkillsLab darstellen können. Es können nicht nur Probleme wie Distance Learning gelöst werden, sondern auch der Lernerfolg, die Realitätsnähe und die Umsetzung der theoretischen Inhalte in die Praxis verbessert werden und den Studierenden neue Einblicke und andere Sichtweisen auf die Lerninhalte ermöglicht werden. [166]
Auch Herr Theeuwes befürwortet den Einsatz von Augmented Reality mit haptischem Feedback. Er äußert den Wunsch, eine solche Technologie durch „realitätsnahe“ Funktionen zu verbessern, die den Umgang mit realen Patienten veranschaulichen. Er ist der Meinung, dass die notwendigen Funktionen und Möglichkeiten der derzeitigen AR-Anwendung nicht an die reale Lehre mit menschlichen Präparaten heranreichen bzw. diese nicht vollständig ersetzen können. Andererseits betont er die Chancen für die Studierenden durch neue Ansätze in der Lehre und wünscht sich, dass dies im bald fertiggestellten Innovationslabor weiter erforscht wird. Zusammenfassend lässt sich eine positive und optimistische, wenn auch kritische Haltung dieses Experten zum Thema ableiten. Herr Theeuwes und das EMC stehen dem Thema Augmented Reality in der medizinischen Ausbildung offen und innovationsbereit gegenüber. [167]
Die Einschätzungen der Experten deuten auf eine grundsätzlich positive Einstellung zum Thema „Augmented Reality mit haptischem Feedback in der medizinischen Lehre“ hin. Einige Erfahrungen wurden bereits gesammelt und finden sich bereits im medizinischen Alltag wieder. Der Umgang mit dieser Technologie muss in die Ausbildung integriert werden, damit angehende Ärzte keine Berührungsängste mit der alltäglichen Anwendung haben.

4.3 Anforderungskatalog

Ein Anforderungskatalog ist die detaillierte Funktionsbeschreibung dessen, was ein Produkt können muss. Er wird zu Beginn einer Softwareauswahl oder Softwareentwicklung erstellt und fasst die Anforderungen an das betreffende Softwaresystem präzise zusammen. Der Anforderungskatalog ist in der Regel eine Funktionsliste und dient der Dokumentation sowie der Unterstützung der Kommunikation mit den Softwareherstellern bzw. Softwareentwicklern. Zu Beginn einer Softwareentwicklung wird in einer Anforderungsanalyse festgelegt, welche Funktionen die Anwendung erfüllen soll. Diese Anforderungen werden im Anforderungskatalog festgehalten und an die Entwickler bzw. Softwareanbieter weitergegeben. In späteren Phasen des Softwareauswahlprozesses wird ein Lastenheft erstellt, das die Gesamtanforderungen innerhalb eines Projektes umfasst. Im späteren Pflichtenheft wird die geplante Umsetzung, insbesondere die Interpretation des Lastenheftes, dargestellt.

Aus den Anforderungen an gute Software, dem Anwendungsfall, der vorhandenen Literatur und den Experteninterviews kann ein Anforderungskatalog erstellt werden, der alle Anforderungen an den Demonstrator dieser Arbeit vereint und zusammenfasst. Dieser Anforderungskatalog wird im folgenden Kapitel behandelt und vorgestellt. Der Anforderungskatalog gliedert sich in *harte Faktoren*, bestehend aus technischen Anforderungen, Konventionen und Restriktionen, und *weiche Faktoren*, mit dem Fokus auf den Benutzer (insbesondere den Lernenden).

4.3.1 Harte Faktoren

- **Augmented Reality-Anwendung:**

  Für den Einsatz von Augmented Reality anstatt Virtual Reality gibt es viele Gründe. Diese werden im Kapitel '4.4 Technologieauswahl' diskutiert. Darüber hinaus existiert bereits eine ähnliche VR-Anwendung zur Digitalisierung des SkillsLab mit einem ähnlichen Ansatz (siehe '3.3.4 Medizinische Ausbildung mit Virtual Reality: VIREED').

- **Haptisches Feedback:**

  Haptisches Feedback soll dazu dienen, virtuelle Elemente für den Benutzer „greifbar zu machen". Im Idealfall bietet der Handschuh unterschiedliche Rückmeldungen für eine realitätsnahe Erfahrung. Verschiedene Formen des haptischen Feedbacks können verwendet werden, um zwischen Objekten und Oberflächenbeschaffenheiten zu unterscheiden.

- **Kongruenz von Visuellem und Haptischem:**

  Der Benutzer soll bei der Nutzung der Anwendung das Gefühl haben, dass das Gesehene greifbar ist. Die Reize der beiden Sinne müssen aufeinander abgestimmt sein und ein stimmiges Gesamtbild ergeben. Das haptische Feedback muss dem entsprechen, was der Nutzer in AR sieht.

- **Erweiterbarkeit:**

  Die Software sollte so entwickelt werden, dass es möglich ist, die Anwendung später zu erweitern oder bestehende Funktionen zu verbessern. Im Falle des SkillsLab sollte es möglich sein, neue Stationen und Aufgaben zu einem späteren Zeitpunkt hinzuzufügen.

- **Sicherheit der (Patienten-) Daten:**

  Die Software sollte keine Zugriffsmöglichkeiten für Dritte bieten. Sofern nicht anders erforderlich, muss die Anwendung ohne Internetverbindung lauffähig sein.

- **Fingertracking:**

  Zur intuitiven Bedienung soll die Anwendung neue Funktionen des Handschuhs mit haptischem Feedback nutzen. Eine dieser Funktionen ist das Fingertracking, d.h. die Erkennung der Position der Finger.

- **Ortsunabhänhikeit:**

  Die Anwendung muss an jedem beliebigen Ort mit der erforderlichen Hardware durchführbar sein. Das bedeutet, dass sie nicht an einen bestimmten Raum gebunden sein darf, wie z.B. ein physisches SkillsLab in einer Universität. Die Studierenden müssen die Möglichkeit haben, das virtuelle Training von zu Hause aus zu absolvieren.

- **Zeitunabhängigkeit:**

  Die Studierenden sollten die Möglichkeit haben, die Anwendung so oft zu verwenden, wie sie möchten. Außerdem sollten die Aufgaben unabhängig voneinander auswählbar und wiederholbar sein.

4.3.2 Weiche Faktoren

- **Intuitive Bedienung:**

  Die Anwendung soll für Studierende im medizinischen Bereich (insbesondere Medizin und medizinnahe Studiengänge) zugänglich sein. Entsprechend den Anforderungen ist eine Bedienung auch für Nicht-Informatiker oder wenig technikaffine Nutzer anzustreben.

- **Studierendenzentriertes Lernen:**

  Der Lernende muss im Mittelpunkt der Anwendung stehen. Er soll selbstständig navigieren und die Anwendung bedienen können. Eventuelle Fragen oder Probleme müssen von ihm selbst gelöst werden können, so dass er nach einer kurzen Einführung in der Lage ist, die Anwendung zu bedienen.

- **Selbsterklärende Menüs:**

  Die Navigation durch die Menüs zu den einzelnen Aufgaben muss ohne zusätzliche Hilfe möglich sein. Die Sortierung und Strukturierung muss verständlich und intuitiv sein.

- **Vermittlung aller Lernkompetenzen:**

  Die Anwendung muss in der Lage sein, bestimmte Lernkompetenzen einheitlich und reproduzierbar zu vermitteln. Jeder Nutzer soll unter den gleichen Voraussetzungen das selbe Wissen vermittelt bekommen. Die Anwendung dient als Erweiterung des bestehenden SkillsLab (z.B. durch zusätzliche Informationen und neue Ansätze der Kompetenzvermittlung) und nicht primär als Ersatz.

- **Sequenzielle Durchführung:**

  Die einzelnen Aufgaben sollten nacheinander bearbeitet werden, so dass genau erkennbar ist, an welcher Stelle beim nächsten Durchgang wieder angesetzt werden muss. Diese Form des Ablaufs kommt auch den curricularen Vorgaben der medizinischen Ausbildung näher.

4.3.3 Funktionen

- **Menü zur Navigation durch die SkillsLab Stationen:**

  Die Navigation zwischen den einzelnen Stationen des digitalen SkillsLab soll über ein Menü erfolgen, das bei Bedarf um neue Stationen erweitert werden kann.

- **Virtuelle Repräsentation aller SkillsLab Stationen:**

  Jede Station des klassischen SkillsLab soll virtuell dargestellt werden. Der Studierende soll die Möglichkeit haben, eine Station auszuwählen und dann alle Übungen dieser Station an einem Ort zu finden.

- **Unterschiedliche Aufgaben an einer Station:**

  Die Aufgaben, die im klassischen SkillsLab angeboten werden, sollen digitalisiert werden und eine virtuelle Repräsentation erhalten. Die Aufgaben einer Station sollen (mit geringem Aufwand) erweiterbar sein.

- **Trainings und Prüfungsmodus:**

  Die Aufgaben sollen neben einem Übungsmodus zum selbstständigen Lernen auch einen Prüfungsmodus enthalten, damit das erworbene Wissen direkt aus der Anwendung heraus abgefragt werden kann.

4.4 Technologieauswahl

In dieser Arbeit wird hauptsächlich auf Augmented Reality mit der Brille Magic Leap One und haptisches Feedback mit den SenseGloves Nova fokussiert. Um zu dieser Wahl der Technologie zu kommen, mussten einige Faktoren berücksichtigt werden, die im folgenden Kapitel näher erläutert werden.

Augmented Reality oder Virtual Reality
In der Programmierung unterscheiden sich die beiden Technologien nicht allzu sehr. Der wesentliche Unterschied besteht darin, dass bei der Programmierung von Augmented Reality die Farbe Schwarz für Transparenz verwendet wird. Da bei AR-Anwendungen der Hintergrund der Anwendung immer die reale Welt ist, wird eine schwarze Umgebung (transparenter Hintergrund) verwendet. Dies spart Zeit und Implementierungsaufwand, da kein Hintergrund modelliert werden muss. Außerdem hat der Benutzer genügend Orientierungspunkte in der realen Welt, so dass er weniger unter Motion Sickness leidet und Entfernungen und Größenverhältnisse zwischen virtuellen und realen Objekten besser einschätzen kann (siehe '2.1 Augmented Reality').
Aus diesen Gründen und weil Augmented Reality in Verbindung mit haptischem Feedback in der aktuellen Forschung weit weniger präsent ist, wurde diese Technologie für diese Arbeit ausgewählt.

Head-Mounted Display oder Smartphone
Die Frage, ob ein Head-mounted Display (z.B. AR-Brille) oder ein Smartphone zur Darstellung der AR-Elemente verwendet werden soll, schließt sich direkt an die Frage nach der Wahl der Technologie und vor dem eigentlichen Beginn des Entwicklungsprozesses an. Ein Smartphone bietet den Vorteil der breiten Verfügbarkeit, die bei einer AR-Brille in dieser Form nicht gegeben ist. Dagegen stehen die eingeschränkten Funktionen im Bereich der Benutzereingabe und des Benutzerfeedbacks. Zudem ist der Nutzer bei der Verwendung eines Smartphones entweder gezwungen, das Smartphone in einer Hand zu halten, oder er benötigt eine eigene Konstruktion, um das Smartphone vor den Augen zu befestigen. Smartphones verfügen zudem über keine weiteren Eingabegeräte wie Controller (siehe '2.1.2.1 Smartphone Apps').
Ein Head-mounted Display erleichtert die Nutzung von Augmented Reality, da der Benutzer beide Hände frei hat, um mit der Anwendung zu interagieren. Die Anwendung kann spezifischer an die Zielplattform/-hardware angepasst werden und somit leistungsfähiger sein (siehe '3.2.1.1 Head-Mounted Displays').
Als Zielplattform wurde daher die „Magic Leap One" gewählt. Sie bietet ein Stand-alone AR-Erlebnis mit einem Controller, der in der Lage ist, haptisches Feedback in Form von Vibrationen zu erzeugen (siehe '3.2.1.1 Magic Leap One und Magic Leap 2').

Native Programmierung der Anwendung oder Programmierung der Anwendung mit einer Engine
Nach der Festlegung auf eine Darstellungstechnologie und eine Zielplattform musste die Entscheidung getroffen werden, ob der Prototyp nativ oder mit Hilfe einer Engine programmiert werden soll. Die Vorteile der nativen Programmierung, wie z.B. die hohe Anpassbarkeit an die Anforderungen, erfordern im Gegenzug viel Hintergrundwissen und viel Zeit für die komplexe Programmierung und Fehlerbehebung (siehe hierzu Kapitel '2.1.2.2 Native Programmierung').
Durch den Einsatz einer Game Engine kann viel Zeit gespart werden, da ein Großteil der Arbeit, die allein dafür aufgewendet werden muss, dass die App auf dem Zielgerät läuft, wegfällt. Online-Ressourcen wie Dokumentationen, APIs und Tutorials helfen bei der Programmierung, da sich Probleme sehr oft auf einfache Grundfunktionen zurückführen und mit diesen Mitteln lösen lassen. Ähnliche Lösungen in anderen Fachgebieten bieten Vorlagen und helfen bei kreativen Lösungsansätzen und *Best-Practice-Lösungen* sparen nochmals Zeit und Aufwand. (siehe auch Kapitel '2.1.2.3 Game Engines')

Für diese Arbeit wurde die Unreal Engine 4 in der Version 4.26 ausgewählt, da sie durch die Integration der Lumin Engine die Möglichkeit bietet, AR-Anwendungen für die Magic Leap one zu generieren. Alle Funktionen der AR-Brille können gesteuert und genutzt werden.

Haptisches Feedback durch das Darstellungsgerät selbst oder durch einen dedizierten Aktor
Es gibt zahlreiche Möglichkeiten, dem Benutzer einer Augmented Reality-Anwendung haptisches Feedback zu geben. Neben eigenständigen Lösungen wie Datenhandschuhen, Kleidungsstücken und Armbändern (siehe Kapitel '3.2.2 Haptische Hardware') bieten die meisten Darstellungsgeräte eine eigene Lösung für haptisches Feedback. Werden AR-Elemente mit Hilfe eines Smartphones dargestellt, kann die Vibrationsfunktion (durch verschiedene Muster und Intensitäten) genutzt werden, um dem Nutzer ein haptisches Feedback in Form von Tactile Feedback zu geben (siehe '2.2.1.1 Tactile Feedback'). Da das Feedback in diesem Fall nicht unabhängig vom Display erzeugt werden kann, sind die möglichen Anwendungsbereiche begrenzt.
Head-mounted Displays bieten in der Regel mit eigenen Controllern eine Form des haptischen Feedbacks, da diese, ähnlich wie Smartphones, über ein vibrotactiles Feedback verfügen. Der Vorteil dieser Controller ist nun, dass sie unabhängig vom Display bewegt werden können und unabhängig davon haptisches Feedback geben. So kann z.B. die Kollision des Controllers mit virtuellen Objekten durch Vibration dargestellt werden (siehe '3.2.2.1 Controller').
Um zusätzlich eine weitere Form des haptischen Feedbacks, das Force Feedback (siehe '2.2.1.2 Force Feedback'), anbieten zu können, ist derzeit ein anderer Aktor notwendig. Dies kann ein Datenhandschuh mit einem Seilzugsystem sein, so dass dieser in der Lage ist, die Bewegung der Finger durch das Spannen des Seils zu begrenzen (siehe '3.2.2.2 Datenhandschuhe').
Für diese Arbeit wurde der Datenhandschuh „SenseGlove Nova“ ausgewählt, da er derzeit der einzige Handschuh auf dem Markt ist, der haptisches Feedback in Form von taktilem und Force Feedback unterstützt und damit in der Unreal Engine in Verbindung mit der Lumin Engine für AR-Anwendungen geeignet ist. Alle anderen Handschuhe bieten entweder kein Force Feedback oder sind auf andere Schnittstellen angewiesen, die nicht gleichzeitig mit der Lumin Engine nutzbar sind (siehe '3.2.2.2 Datenhandschuhe') [56].

4.5 Vorstellung des finalen Konzepts der Anwendung

Um in der medizinischen Lehre sinnvoll eingesetzt werden zu können, muss das Anwendungskonzept alle Anforderungen des Anforderungskatalogs erfüllen. Im folgenden Kapitel wird das neue Kurskonzept und das Softwarekonzept vorgestellt und speziell auf die Änderungen zum aktuellen SkillsLab eingegangen.
Das Grundkonzept besteht darin, den medizinischen Kurs SkillsLab mit den modernsten Methoden der Augmented Reality zu digitalisieren. Die Erweiterung soll zum einen eine Verbesserung der Vermittlung von Handlungsabläufen und zum anderen die Vermittlung zusätzlicher Inhalte durch neue Möglichkeiten der Augmented Reality in Verbindung mit haptischem Feedback bieten.
Die streng algorithmische Struktur medizinischer Handlungsabläufe lässt sich gut in Software umsetzen. Über To-Do-Listen, Checklisten und Aufgabenpunkte kann dem Lernenden sein aktueller Stand in der Aufgabe sowie die folgenden und bereits erledigten Aufgaben angezeigt werden. Augmented Reality bietet nun die Möglichkeit, diesen Fortschritt im Sichtfeld des Nutzers zu visualisieren. So weiß der Lernende jederzeit, an welcher Stelle er sich in der Aufgabe befindet, welche Schritte er bereits erledigt hat und was noch vor ihm liegt. Außerdem kann er so den Stand seiner Fähigkeiten einschätzen, indem er sieht, wie gut er mit den ihm gestellten Aufgaben zurechtkommt.
Die Augmented Reality-Anwendung soll mit einer Kalibrierung beginnen. Diese soll helfen, den Ausführungsort zu erkennen und die virtuellen Elemente direkt vor den Benutzer zu projizieren, so dass die Anwendung ortsunabhängig genutzt werden kann. Anschließend soll das Hauptmenü geladen und vor den Benutzer in den realen Raum projiziert werden. Die Menüpunkte sollen den einzelnen Stationen des klassischen SkillsLab nachempfunden sein und dahinter

alle Aufgaben der einzelnen Stationen bündeln. Nach Auswahl der Station und der Aufgabe soll der Benutzer zwischen Übungs- und Prüfungsmodus wählen können. Er soll ohne Hilfe eines Tutors durch die Menüs navigieren können. Die Navigation soll mit einem Laserpointer zur Auswahl, vergleichbar mit dem Hauptmenü einer Augmented Reality-Brille, und zur Bestätigung durch Drücken eines Knopfes erfolgen.
Der Aufbau jeder Station ist so zu wählen, dass alle Lernziele der einzelnen Aufgaben erreicht werden können. Der Einsatz von haptischem Feedback zur Unterstützung des Lernprozesses soll im Vordergrund stehen und einen Mehrwert gegenüber Augmented Reality-Anwendungen ohne haptisches Feedback bieten. Nach Abschluss einer Aufgabe soll der Lernende die Möglichkeit haben, diese beliebig oft zu wiederholen, um sein Wissen zu festigen und die Übung zu trainieren. Patientendaten innerhalb der Anwendung müssen geschützt und für Dritte unzugänglich sein. Sofern nicht zwingend erforderlich, muss die Anwendung ohne Internetverbindung lauffähig sein. Abschließend ist auf die Erweiterbarkeit der Anwendung einzugehen. Die Anwendung soll zukunftssicher entwickelt werden, so dass sie von Entwicklern um neue Stationen, Aufgaben und Funktionen erweitert werden kann.

Kapitel 5

Implementierung des Demonstrators

In diesem Abschnitt wird erläutert, wie der für die Evaluation verwendete Demonstrator entworfen wurde und wie dieser mit Hilfe der Unreal Engine 4 umgesetzt wurde. Die Basis der Anwendung stellt eine Augmented Reality-Anwendung einer Projektgruppe von Studierenden der Universität Siegen dar, welche unter der Betreuung von Prof. Brück und Christian Gießer die Anwendung *SkillsLab* entwickelt haben. Über die Laufzeit von einem Jahr (01.01.2021 bis 31.12.2022) entwickelte diese Gruppe aus Studierenden die medizinische Augmented Reality-Anwendung „SkillsLab+“. Bei dieser Anwendung handelt es sich um eine digitale Version des SkillsLab der Universität Siegen (siehe ’2.3.2 Beschreibung und Vorstellung des SkillsLab der Universität Siegen’). Jede Station hat eine virtuelle Nachbildung erhalten, sodass sich die Handlungsabläufe in AR trainieren lassen und Studierende durch die Einblendung zusätzlicher Inhalte mehr Informationen erhalten, als bei der Arbeit mit konventionellen Phantomen. Die in diesem Kapitel verwendeten Präfixe in den Bildunterschriften geben an, aus welcher Quelle das Bild stammt und wie es zu betrachten ist. Diese Präfixe sind:
UE – Die Programmierumgebung des Unreal Engine Editors.
ML – Aufnahmen durch das Sichtfeld der Magic Leap AR-Brille.

5.1 Unreal Engine – Terminologie

Da in dieser Arbeit mit der Unreal Engine 4 gearbeitet wurde, wird im folgenden Kapitel die Terminologie und die allgemeine Darstellung des Programmcodes als visuelle Knoten vorgestellt. Der große Vorteil dieser Programmierweise ist, dass auch Fachfremde die Programmthermologie (mit etwas Übung) verstehen können und das Programm im Vergleich zur konventionellen Programmierung relativ einfach erweitert werden kann.

Aufbau des Unreal Engine Editor

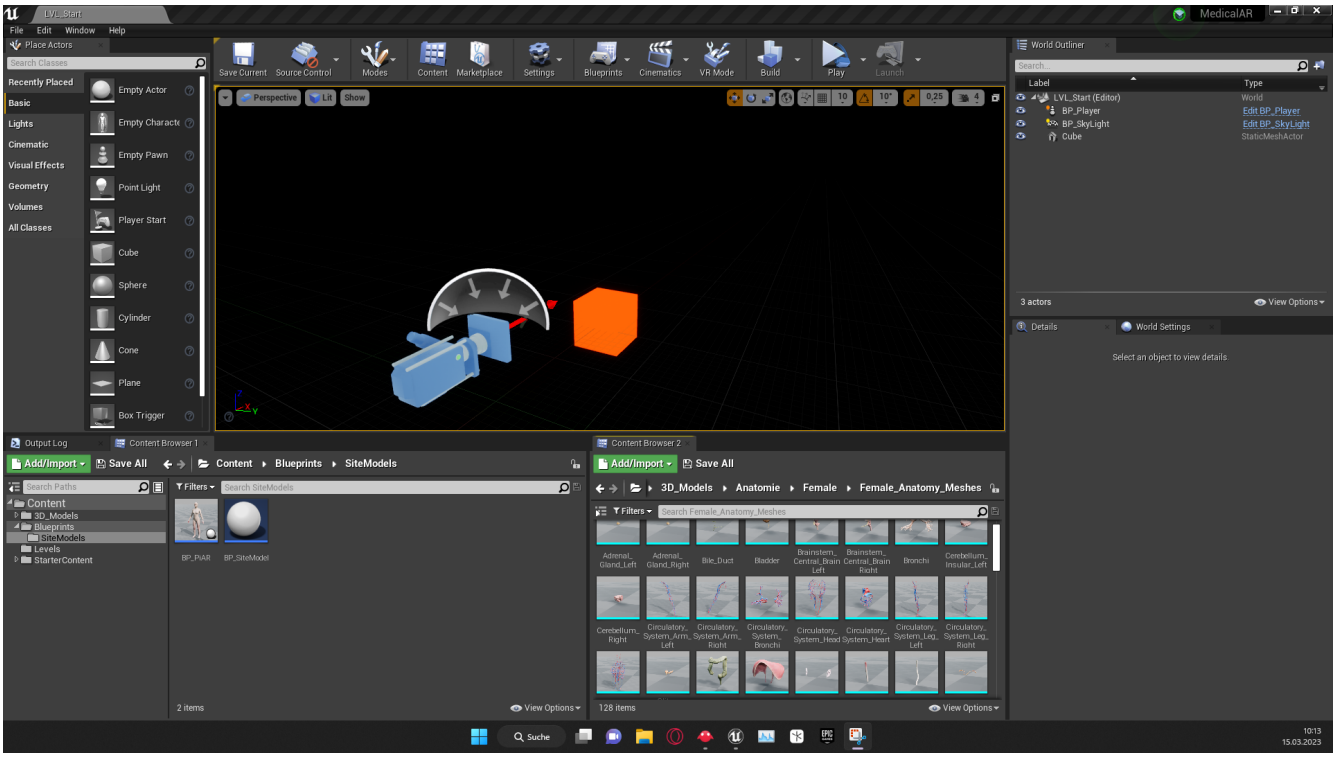


Abbildung 5.1: UE – Haupmenü des Editors

Die Integrierte Entwicklungsumgebung (kurz: *IDE*) der Unreal Engine ermöglicht die Programmierung von Anwendungen sowohl für Desktop-PCs als auch für mobile Systeme, wie z.B. die Magic Leap. Die 'Abbildung 5.1' zeigt den Editor, in dem die Anwendung zusammengestellt wird. In der Mitte (leicht orange umrandet) sind alle Objekte (in diesem Fall eine Kamera, eine orangener Würfel und vier Pfeile) und ihre Anordnung in der aktuellen Anwendung dargestellt. Hier befinden sich alle Objekte wie Gegenstände, Lichtquellen und auch der Charakter des Nutzers, der mit den virtuellen Objekten interagiert und an die Bewegung der Magic Leap-Brille gekoppelt ist. Die genaue Funktionsweise wurde bereits in den Kapiteln '2.1.2.3 Game Engines' und '3.3.1 Allgemeine Augmented Reality-Anwendungen' beschrieben. Dennoch soll hier kurz erwähnt werden, dass sich bei einer Vorwärtsbewegung des Benutzers auch seine virtuelle Repräsentation vorwärts bewegt. Auf diese Weise werden Position und Orientierung der Objekte beibehalten, so dass der Benutzer mit den virtuellen Objekten interagieren kann, als ob sie tatsächlich vor ihm stünden, und sich durch die virtuelle Anwendung bewegen kann, die wiederum durch AR in sein Sichtfeld projiziert wird.
Auf der linken Seite des Anwendungsfensters befinden sich eine Liste primitiver Formen (z.B. Würfel, Zylinder, Kugeln), die als Platzhalter in der Anwendung dienen oder zu komplexeren Strukturen zusammengesetzt werden können. Ein Beispiel hierfür ist der orange Würfel in der Mitte der Anwendung (vgl. 'Abbildung 5.1').
Am unteren Rand befindet sich der *Content Browser*. Dieser ist eine Bibliothek aller Objekte, die in der Anwendung platziert werden können. Beispiele sind anatomische Strukturen wie Organe oder Untersuchungswerkzeuge wie ein Stethoskop. Außerdem befinden sich hier die Inhalte der installierten Plugins, also fremder Code, der in die Applikation eingebunden werden kann.
Auf der rechten Seite befindet sich die hierarchische Struktur der aktiven Ebenen. Es ist wichtig zu wissen, dass, wenn Objekte miteinander in Beziehung stehen, die untergeordneten Objekte (genannt *Children oder Kinder*) immer die Position und Orientierung der übergeordneten Objekte (genannt *Parent oder Eltern*) übernehmen.

Die untergeordneten Objekte werden in das Koordinatensystem des übergeordneten Objekts übertragen. So ist es z.B. möglich, ein übergeordnetes Objekt „respiratory system“ zu erstellen und die einzelnen Komponenten, wie z.B. die einzelnen Lungenflügel (*Lung_Right* und *Lung_Left*), als untergeordnete Objekte darunter zu legen bzw. anzuhängen. Bei einer Bewegung des Elternobjektes *respiratory system* bewegen sich alle darunterliegenden Strukturen entsprechend mit (vgl. 'Abbildung 5.2').

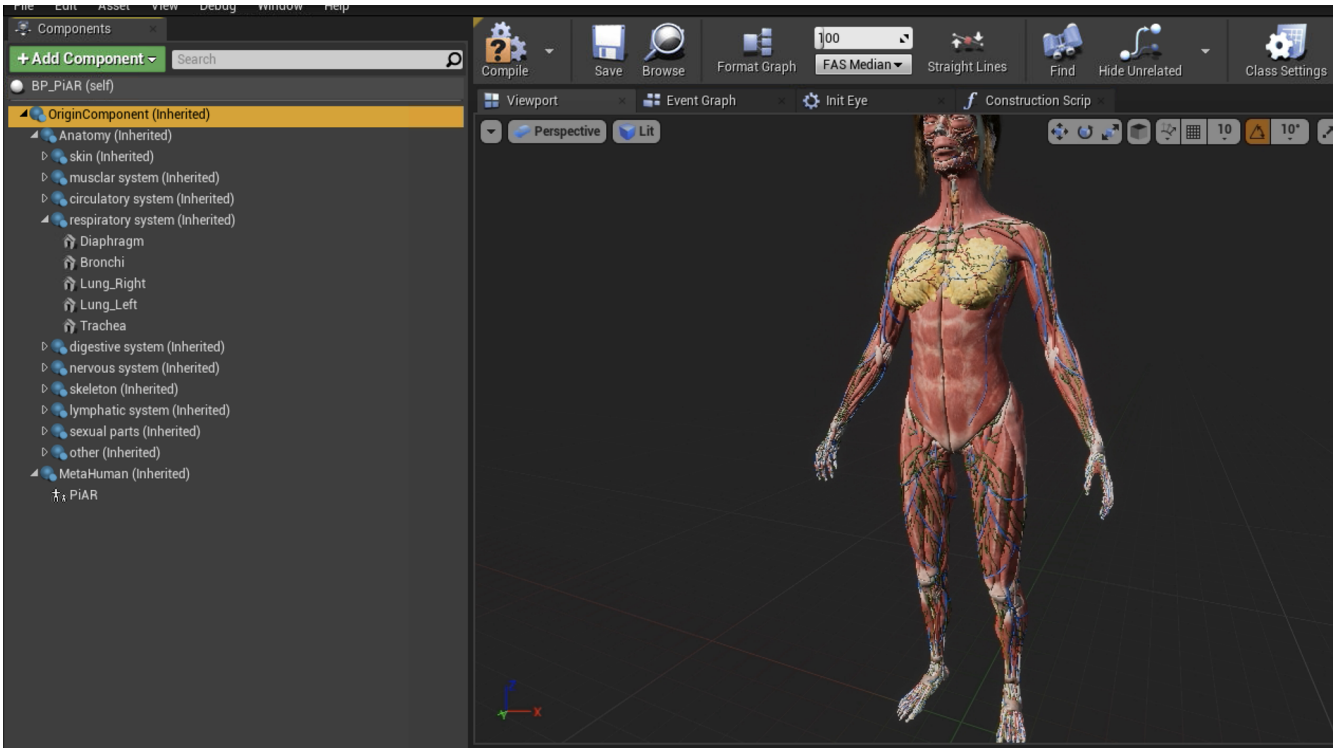


Abbildung 5.2: UE – Hirarchischer Aufbau von Objekten im Editor

Visual Scripting

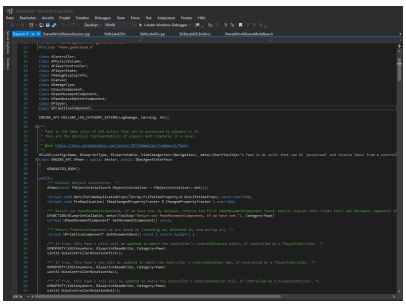
Das Visual Scripting System der Unreal Engine wird als „Blueprint ®“ bezeichnet und stellt eine umfassende Methode zum Schreiben von Programmcode dar. Es basiert auf der Verwendung einer knotenbasierten Schnittstelle innerhalb des Unreal-Editors zur Generierung von Programm-Komponenten. Ähnlich wie bei gängigen Skriptsprachen besteht der Zweck darin, objektorientierte Klassen oder Objekte innerhalb der Engine zu beschreiben.

Dieses System bietet eine Vielseitigkeit und Leistungsfähigkeit, die es Nichtprogrammierern (wie Designern) und Programmierern ermöglicht, auf ein nahezu vollständiges Spektrum von Konzepten und Werkzeugen zuzugreifen, die in anderen Entwicklungsumgebungen selbst implementiert werden müssten. Darüber hinaus enthält die C++ – Implementierung der Unreal Engine Blueprint-spezifische Annotationen, die es Programmierern ermöglichen, Basissysteme zu erstellen, auf denen andere Entwickler aufbauen können. Entwickler können Programmteile zur Verfügung stellen, auf die Designer zurückgreifen können, ohne den Code verstehen zu müssen (Blackbox-Prinzip). Da die Blueprints auf C++ basieren, ermöglichen sie auch eine objektorientierte Programmierung mit Klassen (genannt *Blueprint-Klasse*), Objekten (genannt *Blueprint-Instanz*), Vererbung und Polimorphie. Datenkapselung und Sichtbarkeit werden dadurch erreicht, dass einzelne Blueprints standardmäßig nicht auf die Daten anderer Blueprints zugreifen können, so dass z.B. Variablen nur lokal verfügbar und klassenspezifisch sind.

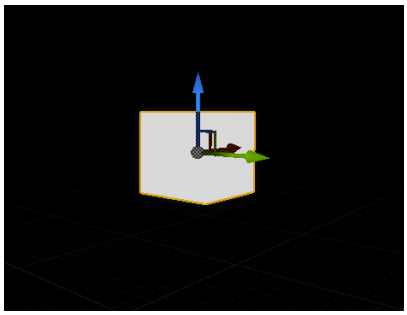
Die 'Abbildung 5.3' veranschaulicht den Zusammenhang zwischen Programmcode und Blueprints. Auf der linken Seite befindet sich der Blueprint-Knoten, mit dem Entwickler in der Unreal Engine arbeiten. Dieser wird während des Kompiliervorganges in C++ Code übersetzt und kann ab hier als solcher betrachtet (und ggf. auch verändert)

werden. Im nächsten Schritt (rechts) wird der C++-Code in maschinenlesbaren Code übersetzt, der dann wieder als Magic Leap-Anwendung auf einem Desktop-PC oder einem mobilen System ausgeführt werden kann.

(a) Blueprint Knoten



(b) C++ Code



(c) Ergebnis in der Anwenduung

Abbildung 5.3: Schaubild des Kompiliervorgangs in der Unreal Engine 4

Programmcode in Unreal — Ein Knoten

Klassen werden in der Unreal Engine als einzelne *Blueprint Knoten* dargestellt. Ein Blueprint Knoten besteht aus einem eindeutigen Namen, über den er aufgerufen wird, Eingängen auf der linken Seite, über die Daten und Benutzereingaben empfangen werden können, verstecktem Programmcode innerhalb des Knotens und Ausgängen auf der rechten Seite, die zum nächsten Blueprint führen können (vgl. 'Abbildung 5.4').

Das visuelle Skriptsystem arbeitet viel mit Farbcodierung. Variablen desselben Typs haben dieselbe Farbe, ebenso wie Ein- und Ausgänge, die nur für einen bestimmten Typ vorgesehen sind. Zusätzlich zur Farbe zeigt die Form der Bluprint Knoten an, für welche Art von Funktion sie zuständig sind. Knoten, die Variablen setzen oder lesen, sind oval und in der Farbe der Variablen, Funktionen zur Ablaufsteuerung wie Schleifen und Abfragen sind grau und quadratisch mit abgerundeten Ecken.

Programmablauf und Flusskontrolle — Verbindungen

Entsprechend der Farbcodierung sind Programminitiierungspunkte (genannt *Event*) rot und haben keine Eingänge auf der linken Seite. Die Leserichtung der Unreal Engine ist von links nach rechts und vom Eingang eines Knotens über einen Knoten und dessen Ausgang zum Nächsten. Das Ende eines Programmabschnitts oder eines Aufrufs ist erreicht, wenn es keine Verbindungen mehr (auf der rechten Seite) zu einem anderen Knoten gibt. Dieses Fortschreiten, von Knoten zu Knoten, erfolgt getaktet und im Gleichschritt durch die gesamte Anwendung und dauert immer einen Frame[1] lang.

Zur Steuerung des Flusses stehen dem Entwickler alle gängigen Programmierkonstrukte wie Schleifen, Bedingungssequenzen etc. zur Verfügung. Jede Struktur hat ihren eigenen Bluprint und wird wie jeder andere Knoten in einer Sequenz verwendet (vgl. 'Abbildung 5.4').

Da die Bluprints durch die Kapselung nicht auf die Ressourcen eines anderen Bluprints zugreifen können, muss eine Kommunikation zwischen den Bluprints eingerichtet werden. Dies kann entweder direkt über Klassenaufrufe und Casting (vgl. 'Abbildung 5.4', CastTo in blau) oder indirekt über Broadcast-Benachrichtigungen (sog. *EventDispatcher*, vgl. 'Abbildung 5.4', mit orangener Umrandung) erfolgen. Jeder Knoten kann auf eine Broadcast-Nachricht warten und mit eigenem, angepasstem Code darauf reagieren (Prinzip eines EventListeners).

[1]Ein Frame ist ein in der endgültigen (ausgeführten) Anwendung dargestelltes Bild und wird in FPS, d.h. Frames pro Sekunde, berechnet. Anwendungen haben im Durchschnitt 60 Frames pro Sekunde und das menschliche Auge kann ab etwa 24 FPS ein flüssiges Bild wahrnehmen.

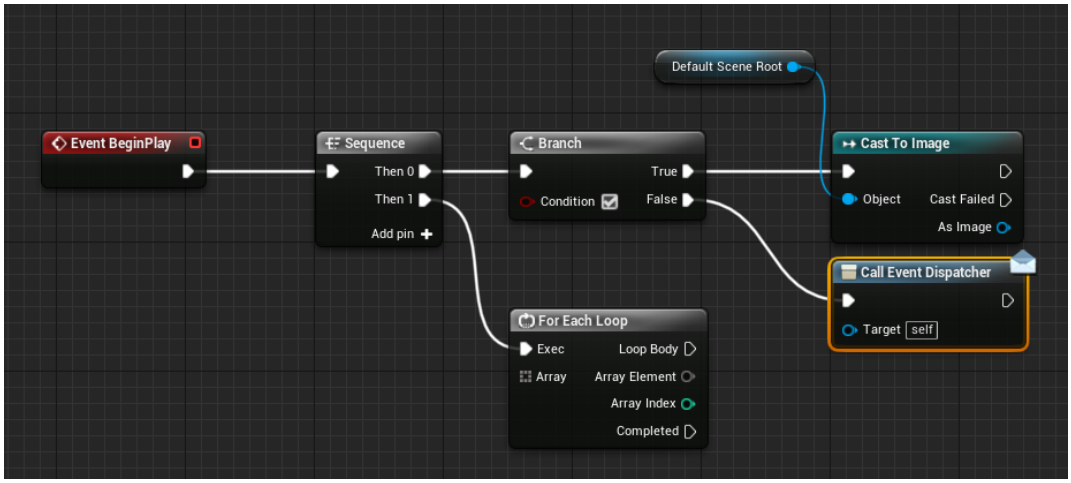


Abbildung 5.4: UE – Beispielprogrammablauf in der Unreal Engine

Beziehung zwischen Blueprints — Levels in der Unreal Engine

Der Begriff *Level* wird in der Unreal Engine verwendet, um eine mit Objekten in Beziehung stehende Umgebung zu beschreiben. Er stammt aus der Welt der Videospiele, wo jedes Level ein neuer Abschnitt mit Objekten und der Spielfigur ist. Jedes Menü, Untermenü, jede Aufgabe und jede Prüfung wird als eigenständiges Level implementiert. Jedes Level verfügt über eine virtuelle Beleuchtung, die alle Objekte je nach Position der virtuellen Lampe einen Schatten werfen lässt und einen *PlayerController*, der die Position und Aktionen des Spielers im Level übernimmt und verarbeitet.

5.1.1 Vorstellung der wichtigsten Blueprints

Da Blueprints in der Unreal Engine die Repräsentation von Klassen sind und somit den eigentlichen Programmcode beinhalten, werden in diesem Kapitel die wichtigsten Blueprints zusammengefasst und vorgestellt. Die wichtigsten Funktionen, wie z.B. die Wiedergabe des haptischen Feedbacks, wurden bereits im vorherigen Kapitel erklärt und werden daher nur erwähnt und nicht näher beschrieben.

Level Blueprint

Jedes Level hat einen *Levelblueprint*. Der Levelblueprint ist der Ort für den Level-spezifischen Code. Hier werden die einzelnen Aufgaben zusammengestellt und die Reihenfolge der Ausführung festgelegt. Der Levelblueprint wird immer dann verwendet, wenn sich etwas in einem Level von den anderen unterscheidet und nur in diesem Level benötigt wird. Dies kann z.B. der Fall sein, wenn in einer Aufgabe zusätzliche Hintergrundgeräusche oder zusätzlicher Text angezeigt werden sollen. In 'Abbildung 5.5' ist ein Ausschnitt eines typischen Levelblueprints einer SkillsLab Station zu sehen. Die einzelenen Aufgaben werden aneinander gereiht und sequenziell durchgeführt.

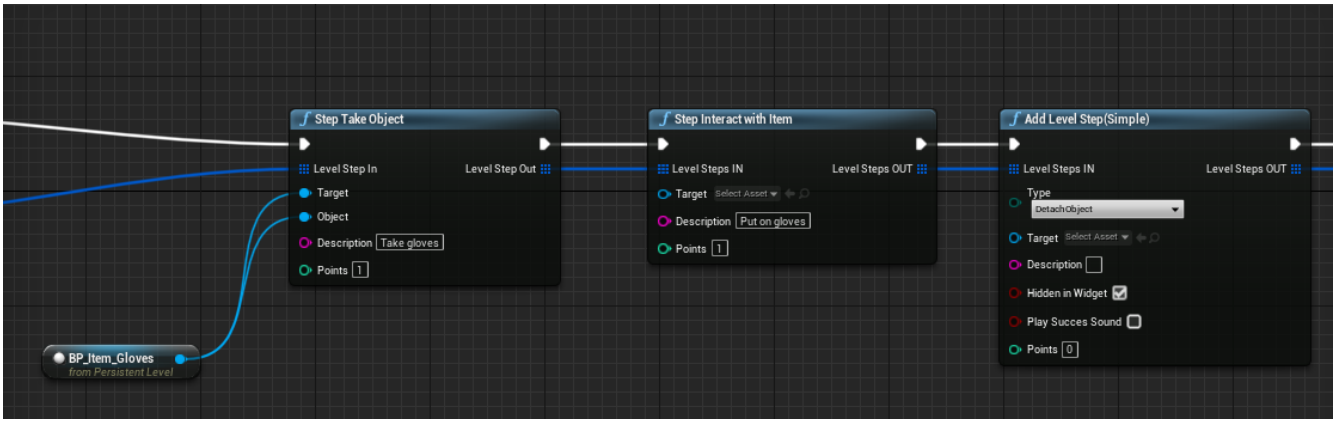


Abbildung 5.5: UE – Levelblueprint

Blueprint-Pawn

Eine besondere Art von Blueprints sind die *Pawn*-Blueprints. Sie sind in der Lage, Steuerkommandos vom Spieler zu empfangen und darauf zu reagieren. Sie enthalten den Programmcode für alles, was direkt von der Magic Leap kommt und für die Bewegung und Interaktion mit anderen Objekten benötigt wird. Eine Besonderheit von AR und VR-Anwendungen ist, dass zusätzlich ein *Motion Controller Pawn* verwendet wird, um die Bewegungsinformationen der Brille und des Controllers auszulesen. Normalerweise werden Anwendungen mit Tasten, Joysticks, Maus oder Tastatur bedient. Die zusätzliche Bewegungssteuerung erfordert diese Anpassung. Eine weitere Besonderheit ist die Integration des *SenseGlove Pawn* zur Steuerung des Datenhandschuhs. Über diesen Pawn werden die Bewegungsinformationen der Finger verarbeitet und es kann mit Programmcode darauf reagiert werden.

BPItem

Jeder virtuelle Gegenstand hat als Oberklasse *BPItem*. Diese Klasse definiert Standardfunktionen, die jede Unterklasse erbt und anpassen muss. Eine dieser Funktionen ist die Funktion *Interact*. Wird diese aufgerufen, muss das jeweilige Objekt mit seiner spezifischen Funktion reagieren. So ist z.B. bei dem Gegenstand „Sprühflasche“ die Sprühfunktion mit der Bewegung des Sprühkopfes und der Erzeugung eines Sprühnebels an diese Funktion gebunden, während bei der Spritze derselbe Aufruf die Bewegung des Kolbens und die Entnahme der Flüssigkeit im Inneren bewirkt.

BlueprintFunctionLibrary

Einige Funktionen sind universell einsetzbar und benötigen keinen zugehörigen Blueprint. Zum Beispiel mathematische Funktionen, wie die Berechnung des Abstands zwischen zwei Objekten. Diese Funktionen werden in einer Funktionssammlung, der *Library*, zusammengefasst. Jeder Blueprint kann auf diese Funktionen zugreifen und sie verwenden, als wären sie in ihm selbst definiert. Sie können jedoch nur in der Funktionssammlung selbst angepasst und geändert werden.

Game Instance

Wie bei den Funktionen gibt es auch für Variablen einen gemeinsamen, globalen Speicherort. Die *Game Instance* speichert global zugängliche Variablen, die auch über Level hinweg eindeutig und jederzeit verwendbar sind. Typischerweise werden an dieser Stelle der Spielstand, die Ursprungsposition des virtuellen Raumkoordinatensystems oder Benutzereingaben gespeichert.

5.1.2 Kurzdarstellung der wichtigsten Events

In diesem Abschnitt werden die wichtigsten Events, die in den meisten Blueprints auf die eine oder andere Weise verwendet werden, kurz vorgestellt und anhand eines Beispiels näher erläutert. Diese Events sind standardmäßig in jedem Blueprint (außer den Blueprint-Librarys, also den Funktionssammlungen) vorhanden und decken die meisten Einstiegspunkte des Programms ab.

Event Begin Play

Dieses Event wird immer zu Beginn des Levels aufgerufen, sobald der Blueprint vollständig geladen ist. Das bedeutet, dass der folgende Code der Erste ist, der im Level ausgeführt wird. Dieser Blueprint wird verwendet, um Programmcode auszuführen, der nur einmal verwendet wird, oder um Programmcode auszuführen, der das Level vorbereitet. Beispielsweise können an dieser Stelle Dateien geladen, Objekte neu positioniert, Referenzen gesetzt oder aus vorherigen Levels übernommen werden. In 'Abbildung 5.6' wird die Referenz auf die Game Instance gesetzt und der Startpunkt der Applikation angepasst und gesetzt (mit *SetWorldLocationAndRotation*).

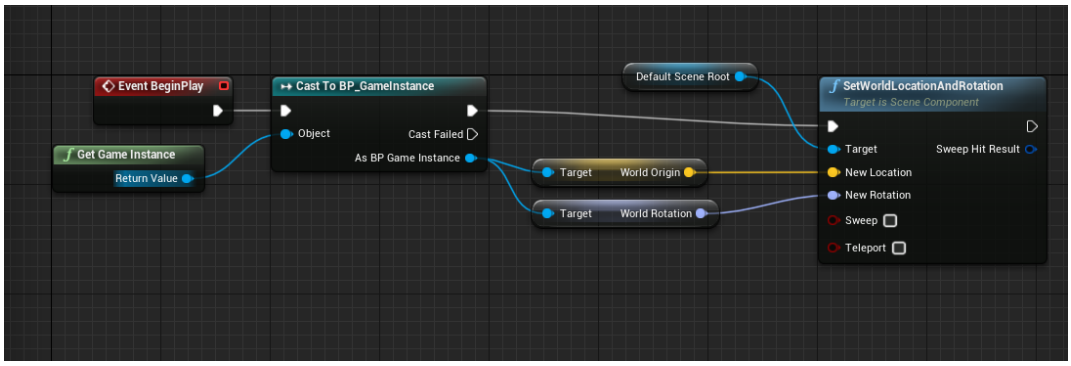


Abbildung 5.6: UE – Event Begin Play

Event Tick

Das *Event Tick* wird im Gegensatz zum *Event Begin Play* bei jedem Frame aufgerufen. Damit ist es das Ereignis, das am häufigsten und am echtzeitnächsten aufgerufen wird. Über den Ausgang *Delta Seconds* kann die Zeit (in Millisekunden) seit dem Start der Anwendung ermittelt werden. Damit können Zeitberechnungen durchgeführt werden. Ein Beispiel für einen Aufruf über dieses Event ist die Aktualisierung einer Anzeige (vgl. 'Abbildung 5.7', der rechte Knoten heißt *Refresh*).

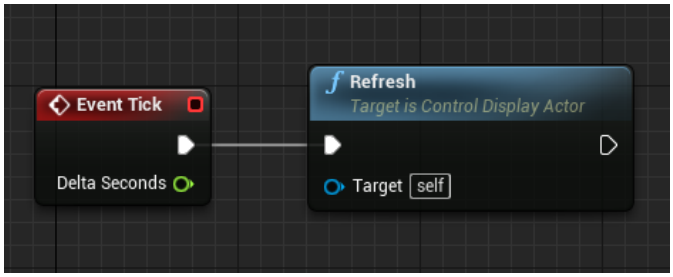


Abbildung 5.7: UE – Event Tick

Event Begin / End Overlap

Diese beiden Events fragen permanent ab bzw. überwachen die aktuelle Ebene, ob Kollisionen zwischen zwei Objekten auftreten. Jedes Event überwacht immer ein bestimmtes Objekt auf Kollisionen mit anderen Objekten. Sobald eine

solche Kollision erkannt wird, wird das Event ausgelöst und ausgegeben, womit kollidiert wurde (der Kollisionspartner wird über den Ausgang *Other Actor* ausgegeben). Berührt z.B. das Objekt *Skalpell* die Haut, kann dies ein *Event Begin Overlap* auslösen (vgl. 'Abbildung 5.8', hier wird der Text „Collision detected“ ausgegeben). Im Event ist hinterlegt, dass die Haut mit einem Skalpell kollidiert ist und durch eine Abfrage danach kann entsprechend reagiert werden, z.B. durch eine rötliche Färbung der Haut.

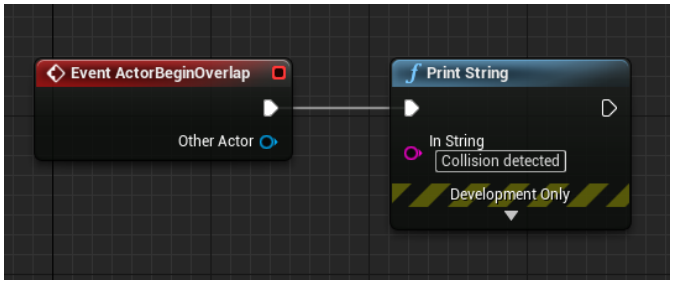


Abbildung 5.8: UE – Event Begin / End Overlap

5.2 Betriebsmodi der Hardwarekomposition

Um die Anwendung dem Benutzer bestmöglich präsentieren zu können, ist eine gute Zusammenstellung aktueller Hardware erforderlich. Die entworfene Anwendung unterstützt verschiedene Modi, abhängig von der verfügbaren Hardware, so dass Benutzer die Anwendung verwenden können, auch wenn sie nicht über die gesamte Hardware verfügen. Die Modi können in drei Stufen unterteilt werden:

Minimal: Zum Ausführen der Anwendung ist lediglich eine Magic Leap Augmented Reality-Brille erforderlich (vgl. 'Abbildung 5.9'). Das haptische Feedback ist auf den Magic Leap Controller beschränkt und die Performance kann je nach Detailgrad der dargestellten Modelle variieren. Andere AR-Brillen könnten mit einigen hardwarespezifischen Anpassungen ebenfalls verwendet werden, dies ist in der aktuellen Implementierung noch nicht umgesetzt. In diesem Modus läuft die Anwendung auf der AR-Brille und benötigt keinen leistungsstarken Computer.

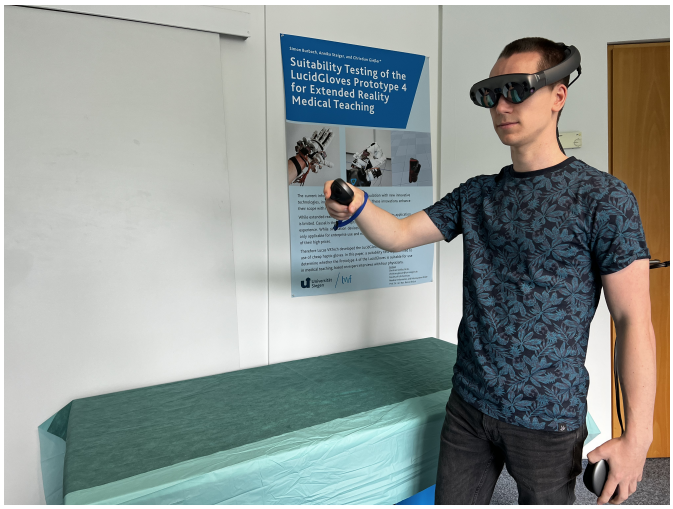


Abbildung 5.9: Konzept – Minimal

Standard: Zusätzlich zur Magic Leap-Brille werden SenseGlove Nova-Handschuhe verwendet, um haptisches und taktiles Feedback zu liefern (vgl. 'Abbildung 5.10'). Die Verbindung der Hardware erfolgt über einen leistungsfähigen Computer, der auch das AR-Bild generiert. Ein Vorteil neben dem verbesserten Feedback für den Benutzer ist,

dass der Computer mehr Rechenleistung hat als die Brille alleine und die Bildqualität dadurch besser ist. Die Anpassbarkeit an andere Augmented Reality Brillen ist auch hier gegeben. Ein Austausch der Datenhandschuhe ist nicht so einfach möglich, da die Nutzung ein spezielles Plugin voraussetzt und die Implementierung des haptischen Feedbacks erneut (angepasst an die neuen Datenhandschuhe) durchgeführt werden müsste.[2]

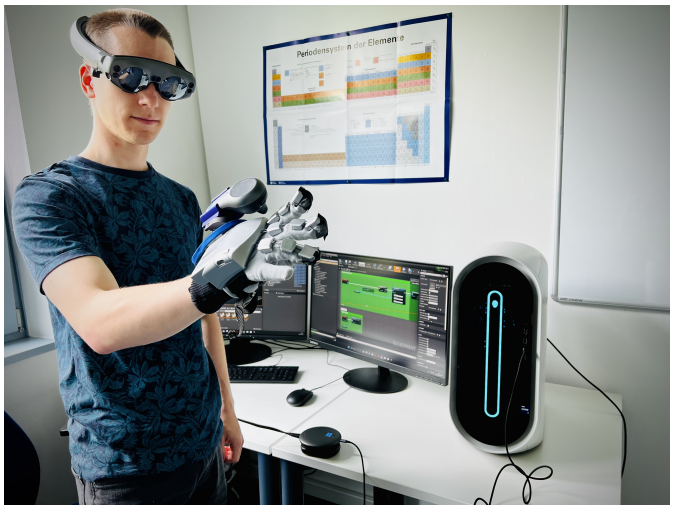


Abbildung 5.10: Konzept – Standard

Erweitert: Im Idealfall ist es möglich, dass sich die Handschuhe direkt (z.B. über Bluetooth) mit dem Magic Leap verbinden und somit der PC als Verbindungselement überflüssig wird (vgl. 'Abbildung 5.11'). Ein weiterer Vorteil dieses Modus ist die Kabellosigkeit, da sowohl die Magic Leap als auch die SenseGloves Nova über einen Akku verfügen. In diesem Modus ist genau diese Konfiguration der Hardware notwendig, da alle Elemente aufeinander abgestimmt sein müssen. Die Kommunikation der einzelnen Schnittstellen (AR-Brille und Datenhandschuhe) kann zumindest in dieser Konfiguration nicht allgemein und hardwareunabhängig erfolgen, da es keinen allgemein gültigen Standard für die Wiedergabe von haptischem Feedback gibt. Für Augmented Reality-Brillen besteht die Möglichkeit, den OpenXR Standard zu unterstützen. Diese Form der Anwendungsbereitstellung nennt sich *Spatial Computing*[3] und ist fast schon mit der aktuellen Hardware Kombination aus Magic Leap One und SenseGloves möglich. Der direkte Nachfolger Magic Leap 2 sollte jedoch aufgrund seiner Hardwarespezifikation dazu in der Lage sein.

[2]Die Qualitätsverbesserung ergibt sich aus einer höheren Auflösung und einer höheren Bildwiederholrate.

[3]Ein multidisziplinärer Ansatz, der die Integration von Hardware, Software und Daten nutzt, um eine interaktive und immersive Umgebung zu schaffen, in der digitale Informationen nahtlos in den physischen Raum eingebettet werden und eine neue Ebene der Mensch-Computer-Interaktion ermöglichen.

Abbildung 5.11: Konzept – Erweitert

5.3 Vorstellung SkillsLab+

Wie bereits zu Beginn des Kapitels (siehe '5 Implementierung des Demonstrators') erläutert ist die Basis der Anwendung für den Demonstrator ist die medizinische Augmented Reality-Anwendung SkillsLab+. Die Anwendung wurde nach dem Model-View-Controller Muster implementiert und ermöglicht somit den späteren Austausch oder die Erweiterung einzelner Komponenten. Ziel der Anwendung ist es, den medizinischen Praxiskurs SkillsLab zu digitalisieren und unabhängig von Ort, Zeit und Verfügbarkeit von medizinischen Modellen und Materialien durchführbar zu machen. Ein Ausschnitt der Anwendung aus AR-Sicht ist in 'Abbildung 5.12' abgebildet.
Die Anwendung wurde mit der Unreal Engine 4.26 für die AR-Brille Magic Leap One entwickelt und anschließend um haptische Elemente für den SenseGlove Nova erweitert. In den folgenden Unterkapiteln wird die Anwendung vorgestellt und auf die Bedienung eingegangen.

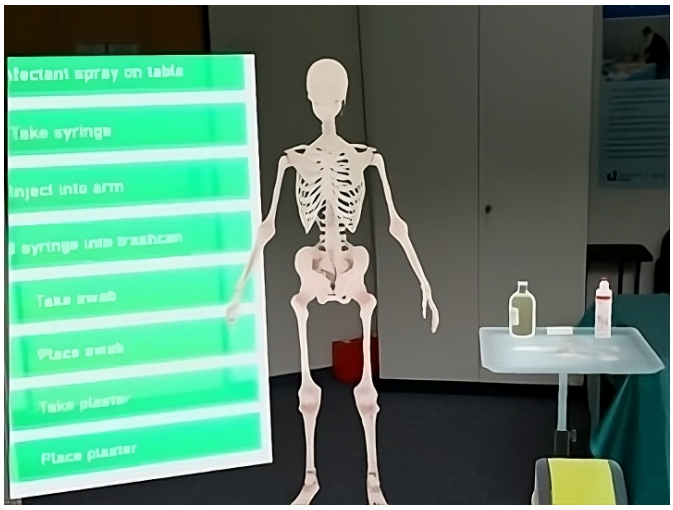


Abbildung 5.12: ML – SkillsLab+

5.3.1 Aufbau des Hauptmenüs und der Aufbau der Navigation

Im Hauptmenü wird jede Station als eigener Menüpunkt dargestellt, der aus dem Stationsnamen und einem 3D-Modell besteht. Die Navigation erfolgt über einen Laserpointer, der vom Controller aus auf die Modelle gerichtet und zur

Auswahl der Menüpunkte verwendet wird. Wie in 'Abbildung 5.13' dargestellt, schweben die Menüpunkte in der physikalischen Welt und sind an ihrer Position fixiert. Bewegt sich der Benutzer um sie herum, bleiben sie an ihrer Position. Die Menüpunkte können leicht erweitert werden, so dass neue Stationen hinzugefügt werden können. Zum Vergleich ist in 'Abbildung 5.15' die Levelstruktur im Unreal Editor und in 'Abbildung 5.13' das gleiche Hauptmenü durch die AR-Brille dargestellt.

Unter jedem Menüpunkt verbirgt sich ein Untermenü der jeweiligen SkillsLab Station. In 'Abbildung 5.13' ist beispielsweise das Untermenü der *Arm-Station* dargestellt. Über diese Menüpunkte gelangt der Benutzer zu den Übungs- und Prüfungslevels Intramuskuläre Injektion und Venenzugang legen.

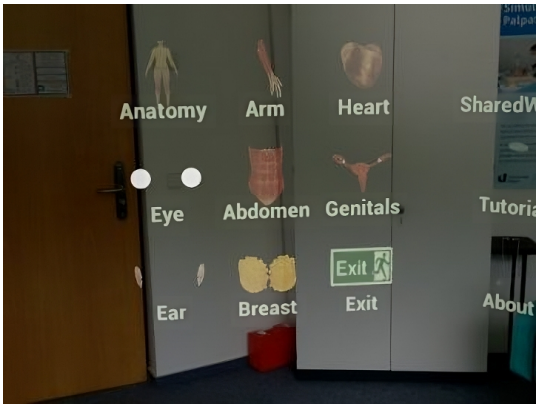


Abbildung 5.13: ML – Hauptmenü

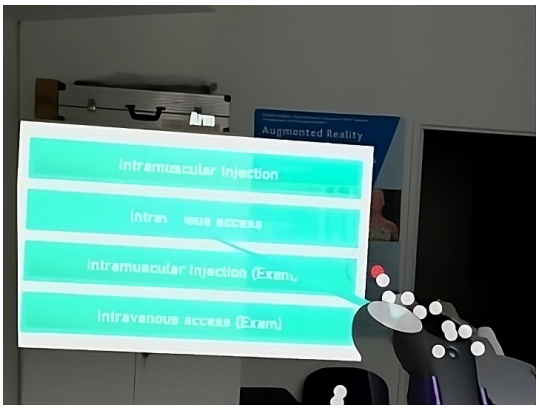


Abbildung 5.14: ML – Untermenü am Beispiel der Arm-Station

Abbildung 5.15: UE – Hauptmenü

5.3.2 Aufbau eines Levels

Das eigentliche Training finden in getrennten Levels statt, nachdem diese über die Menüs ausgewählt wurden. Der Aufbau ist prinzipiell immer gleich, unterscheidet sich jedoch in der Zusammensetzung bzw. Zusammenstellung der Objekte, je nach benötigtem Material. 'Abbildung 5.17' zeigt den Vergleich zwischen dem Aufbau eines Levels im Editor (links) und der Ansicht durch die AR-Brille (rechts).

Abbildung 5.16: UE – Auskultationsstation

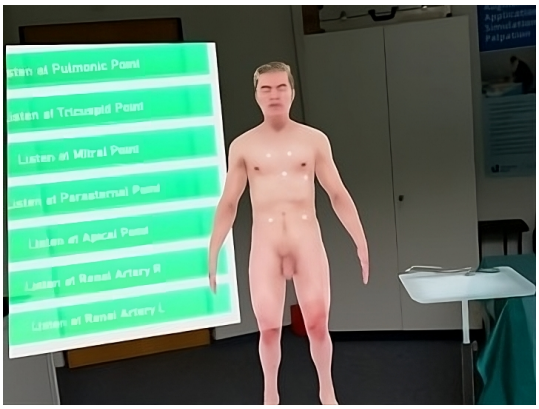
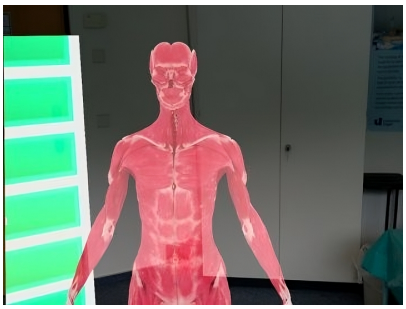
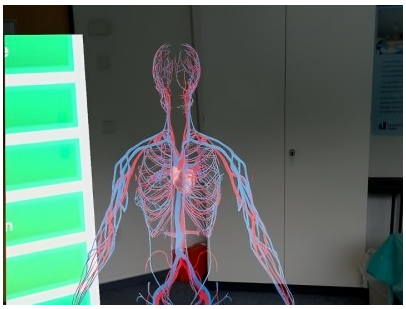


Abbildung 5.17: ML – Auskultationsstation

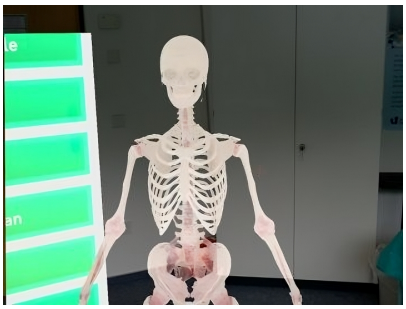
Vor dem Benutzer steht das anatomische Modell eines Menschen (männlich oder weiblich, je nach Station und Aufgabe). Alle Strukturen sind übereinandergelegt, nach anatomischen System gegliedert und in der richtigen Position (vgl. 'Abbildung 5.2'). Sobald der Benutzer das Modell betritt, kann er es durch Kopfbewegung Schicht für Schicht aufschneiden und so das Innere des Modells betrachten und zunächst verborgene Strukturen erkennen. Durch Drücken vorderen (oberen) Knopfes auf dem Controller (genannt *Bumper*) kann der Benutzer die *XRay-Vision*, eine Funktion zum Umschalten zwischen den einzelnen Schichten (z.B. Muskeln, Knochen oder Nerven), nutzen, um noch mehr Informationen zu erhalten (vgl. 'Abbildung 5.18').



(a) Muskeln



(b) Blutgefäße



(c) Skelett

Abbildung 5.18: ML – X-Ray-Vision

Zusätzlich wird bei jedem Druck auf den Bumper eine Variable, die die Nummer des aktuellen Schicht speichert, um eins inkrementiert. Grundsätzlich werden alle Schichten auf unsichtbar gesetzt (im Knoten *set Visibility* auf *false*, also falsch) und dann nur die Sichtbarkeit der aktuell ausgewählten Schicht wieder auf sichtbar (im zweiten Knoten *set Visibilty* der Schicht auf *true*, also wahr). Zuletzt müssen die Widerstände der Modelle so eingestellt werden, dass nur die sichtbaren anatomischen Strukturen der aktuellen Schicht Kollisionen mit anderen Objekten verursachen können. Dies geschieht im letzten Knoten der 'Abbildung 5.19' im Knoten *New Overlaps*.

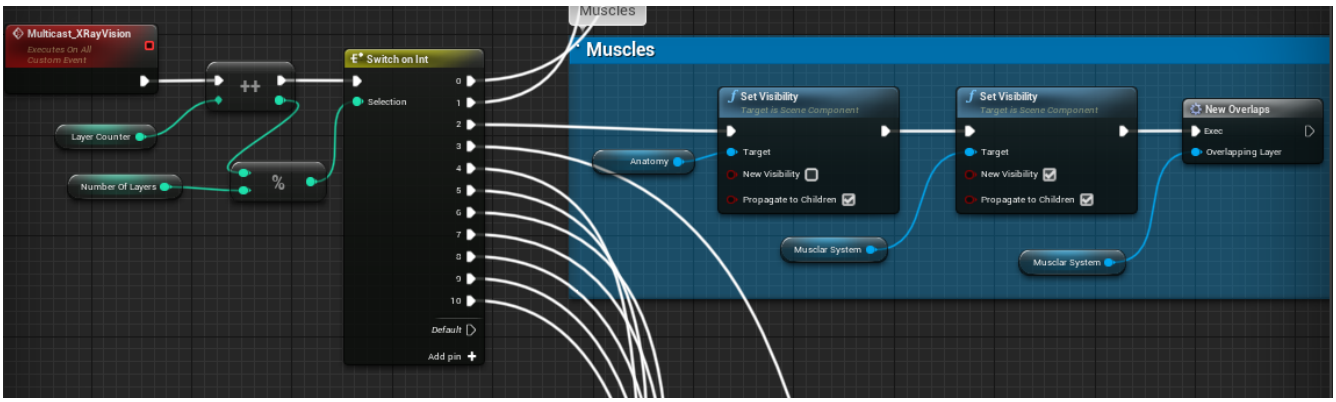


Abbildung 5.19: UE – Implementierung der XRay-Vision

Auf der linken Seite befindet sich die To-Do-Liste mit allen Aufgaben, die der Benutzer nacheinander ausführen muss, um die Aufgabe der Station abzuschließen (vgl. 'Abbildung 5.20'). Jeder Menüpunkt (genannt *Task*) wird grün umrandet, wenn er an der Reihe ist und grün ausgefüllt, wenn er erledigt ist. Zusätzlich ertönt ein Bestätigungssignal, wenn die Aufgabe erfolgreich abgeschlossen wurde, und ein Warnsignal, wenn ein Fehler gemacht wurde. Alle Aufgabentypen, wie z.B. das Aufnehmen eines Gegenstandes oder das Finden einer anatomischen Struktur, sind durch eine flexible Programmierung vordefiniert und implementiert. Im Falle einer Erweiterung kann eine neue Station zusammengestellt werden, indem die Aufgabe in Tasks zerlegt und diese im entsprechenden Level (speziell im *Level Blueprint*) aneinandergereiht werden. Alle möglichen Tasks sind in 'Abbildung 5.21' abgebildet.

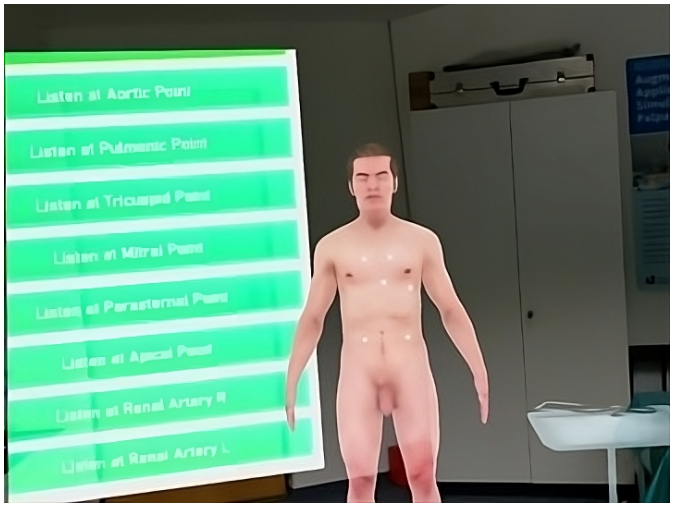


Abbildung 5.20: ML – To-Do-Liste

Auf der rechten Seite befindet sich ein Beistelltisch (genannt *Rondel*) mit Gegenständen, die zur Bearbeitung der Aufgabe benötigt werden. Die Objekte ordnen sich automatisch auf dem Tisch an und zusätzliche Objekte können als Distraktoren platziert werden (vgl. 'Abbildung 5.22'). Die Gegenstände können mit dem Eingabegerät des Nutzers (Controller oder Datenhandschuh) aufgenommen werden und verbinden sich mit diesem, so dass sie immer an der gleichen Position auf dem Controller angezeigt werden. Technisch gesehen wird das Objekt Teil des Controllers (es wird zu einer *Child*-Komponente) und in dessen Koordinatensystem übertragen.

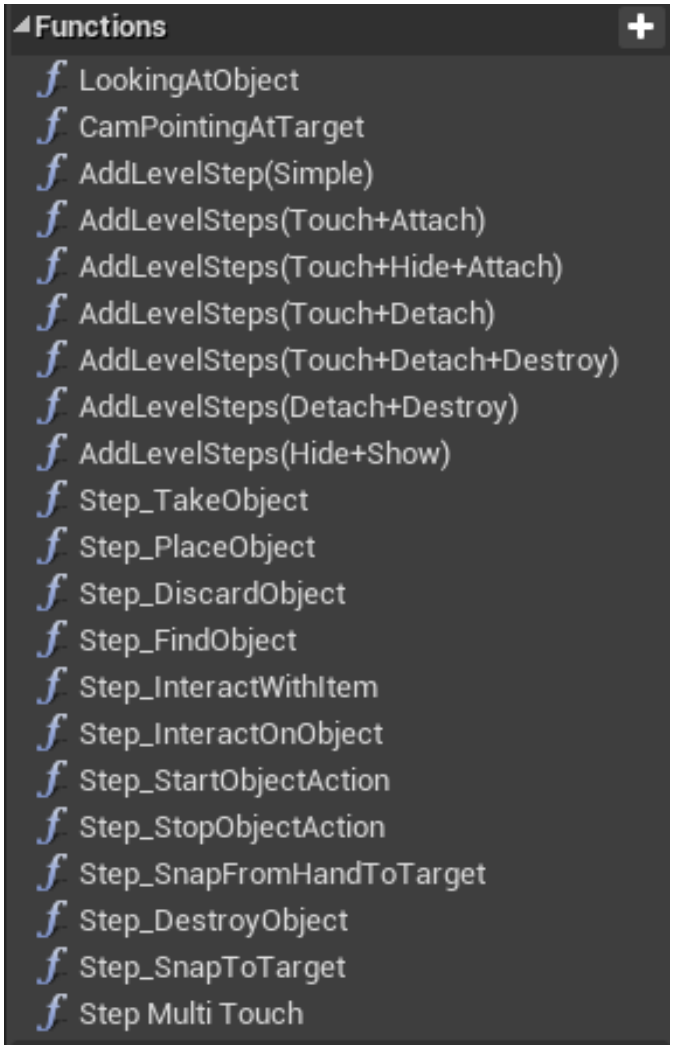
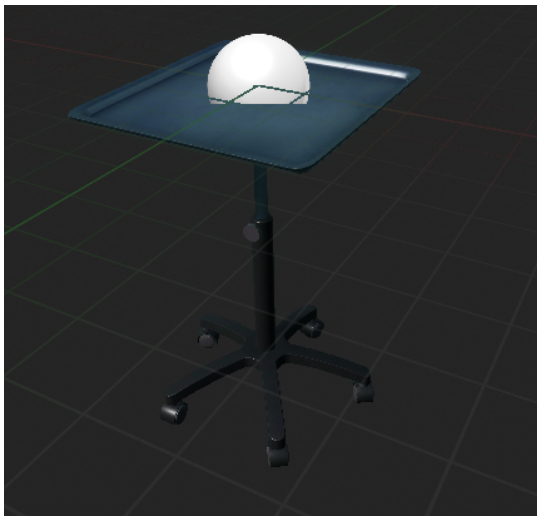


Abbildung 5.21: UE – Liste aller möglichen Tasks

(a) ML – Magic Leap Ansicht



(b) UE – Editor Ansicht

Abbildung 5.22: Werkzeugrondel

5.3.3 Tastenbelegung des Controllers

Der Magic Leap Controller wird zur Steuerung der SkillsLab+ Anwendung verwendet. Der Controller wird in der rechten Hand gehalten, seine Position im Raum verfolgt und in die virtuelle Umgebung übertragen. Im minimalen Betriebsmodus ist er die einzige Eingabequelle.
Die 'Abbildung 5.23' zeigt die Position und Bezeichnung der Tasten des Controllers. Auf der Oberseite befindet sich die *Home*- bzw. *Back-Taste*. Damit kann der Benutzer eine Programmebene oder ein Menü zurückgehen und eine andere Aufgabe oder Station auswählen. Ebenfalls auf der Oberseite befindet sich das Touchpad, mit dem Objekte gedreht und bei einigen Stationen eine Zoomfunktion genutzt werden kann.
An der Vorderseite befindet sich der *Bumper*, mit dem die XRay-Vision verwendet werden kann. Darunter befindet sich der *Trigger*, der allgemein zum Bestätigen oder Verwenden von Objekten verwendet wird. Er entspricht dem linken Mausklick am Computer.

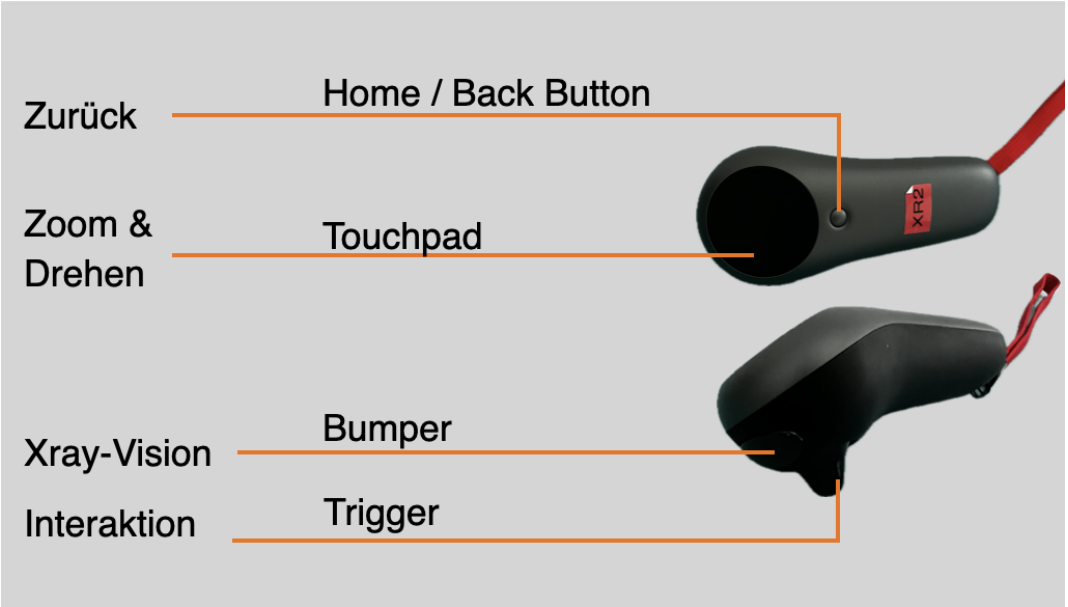


Abbildung 5.23: Tastenbelgung des Controllers

5.3.4 Programmablauf

Im Folgenden wird der Programmablauf vom Start über die Durchführung einer Aufgabe an einer Station bis zum Ende mit dem Beenden der Anwendung aufgezeigt. Zu Beginn wird die Bodenhöhe kalibriert, damit alle Objekte auf dem Boden platziert werden können. Danach folgt das Hauptmenü, in dem der Benutzer eine Station auswählen kann. Wählt der Benutzer eine Station aus, gelangt er in deren Untermenü, in dem er sich für eine bestimmte Aufgabe, den Prüfungsmodus oder den Übungsmodus entscheiden kann. Der Prüfungsmodus unterscheidet sich vom Aufgabenmodus dadurch, dass die To-Do-Liste nicht angezeigt wird und der Benutzer die Aufgaben selbstständig in der richtigen Reihenfolge bearbeiten muss.
Nachdem eine Aufgabe ausgewählt wurde, beginnt das Level zu laden und baut sich vor dem Benutzer auf. Das anatomische Modell ist entweder das eines Mannes oder das einer Frau, je nachdem, welche Aufgabe gerade ausgeführt wird. So wird z.B. beim Brust-Screening immer das weibliche Modell und beim Untersuchen der Prostata immer das männliche Modell angezeigt. Die To-Do-Liste lädt alle Aufgaben der Aufgabe und markiert die erste Aufgabe mit einem grünen Rahmen. Auf der rechten Seite steht der Tisch bereit, auf dem die benötigten Werkzeuge angeordnet sind.

Der Benutzer kann nun mit der Ausführung der Aufgabe beginnen. Je nach Aufgabe muss er mit dem anatomischen Modell, mit den Werkzeugen oder mit beidem interagieren. Die Reihenfolge und der Inhalt der Tasks entsprechen dem Erwartungshorizont der jeweiligen SkillsLab Station, so dass das erlernte Wissen (theoretisch) transferiert werden kann. Wenn alle Tasks abgeschlossen sind und die Aufgabe damit beendet ist, kann der Benutzer durch Drücken des Home-Buttons zum Hauptmenü zurückkehren und durch Drücken des EXIT-Knopfes im Hauptmenü die Anwendung beenden.

5.4 Integration der Hardware in die Unreal Engine

In diesem Kapitel werden die Schnittstellen zur Hardware vorgestellt und erläutert, wie diese integriert wurden. Außerdem wird auf die Besonderheiten der Hardware und die Fallstricke bei der Verwendung mehrerer Hardwarekomponenten eingegangen.

5.4.1 Augmented Reality-Brille: Magic Leap One

Die AR-Brille Magic Leap One verwendet das Betriebssystem LumenOS und bietet eine Schnittstelle zur Unreal Engine. Für die Integration ist es notwendig, dass das LuminOS-Plugin, insbesondere dessen SDK-Version, mit der Version der Unreal Engine kompatibel ist. Tatsächlich ist immer nur eine SDK-Version mit einer Unreal Engien-Version kompatibel. Für diese Implementierung wurde die SDK Version v0.26.0 und die Unreal Engine Version 4.26 gewählt.

Innerhalb der Unreal Engine wird die Magic Leap wie ein Plugin angesteuert und bietet zusätzliche (hardwarespezifische) Einstellungsmöglichkeiten. An dieser Stelle kann verwaltet werden, welche Rechte die App auf der Brille erhalten soll (z.B. ob sie die Kamera nutzen darf oder Internetzugang erhält), mit welchem Bild (sog. *Icon*) die App im Hauptmenü der Magic Leap dargestellt wird und die Zertifikate des Entwicklers müssen an dieser Stelle hinterlegt werden. Damit signiert der Entwickler die App, versichert, dass er ein zertifizierter Magic Leap Entwickler ist und die App kann eindeutig einem Entwickler zugeordnet werden, wenn die App z.B. Schadsoftware enthält.

Die Entwicklung einer AR-Anwendung für Magic Leap erfolgt genau nach dem gleichen Prinzip wie die Entwicklung einer VR-Anwendung in der Unreal Engine. Es muss lediglich darauf geachtet werden, dass der Hintergrund jeder Anwendung schwarz bleibt, da Schwarz in AR-Anwendungen transparent dargestellt wird und an dieser Stelle die physische Welt zu sehen ist. Dies ist alles, was für den minimalen Betriebsmodus erforderlich ist.

5.4.2 Datenhandschuhe: SenseGlove Nova

Die Integration des Datenhandschuhs SenseGlove Nova ist für die weiteren Betriebsmodi notwendig, da über diesen das haptische Feedback ausgegeben werden kann. Für die Anbindung an die Unreal Engine wird ebenfalls ein Plugin, das SenseCom Plugin, benötigt. Dieses ermöglicht dem Entwickler auf die Blueprints zur Steuerung des Handschuhs zuzugreifen und über diese das haptische Feedback wiederzugeben, ein virtuelles Modell des Handschuhs darzustellen und die Position der Finger auszulesen.

Um den SenseGlove Nova drahtlos mit einem Computer zu verbinden, wird zusätzlich die eigenständige Anwendung SenseCom benötigt (vgl. 'Abbildung 5.24'). Nach dem Start der Anwendung wird eine Bluetooth-Verbindung zu den Datenhandschuhen aufgebaut und eine erste Kalibrierung kann durchgeführt werden. Dazu wird einer der Handschuhe getragen und die Finger sollen zwischen Faust und offener Hand wechseln. Dadurch wird die maximale Zugseillänge des Handschuhs ermittelt, die für eine geballte Faust (voller Zug) und eine offene Hand (minimaler Zug) benötigt wird. Kleine Hände benötigen weniger Zugseillänge als große, daher wird bei ihnen die Faust früher erkannt.

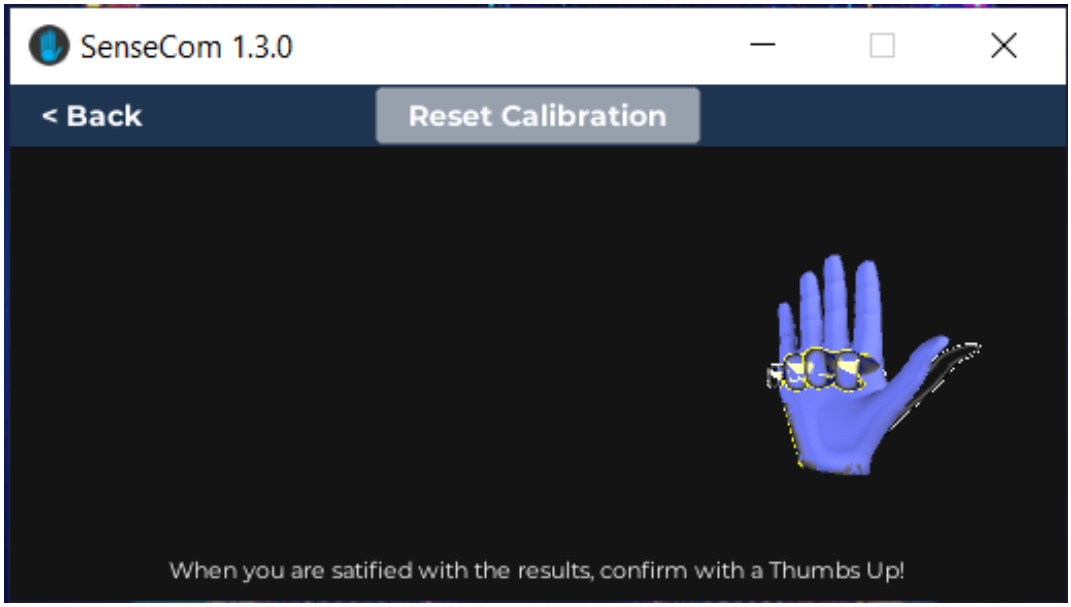


Abbildung 5.24: Oberfläche der Verbindungssoftware SenseCom

Die Aktionen, die beim Drücken einer Taste auf dem Controller ausgeführt werden, wurden auf die vom Datenhandschuh erkannten Gesten übertragen. Wird die tiefe Beugungsgeste erkannt, bei der nur der Zeigefinger zum Drücken einer Taste verwendet wird (sogenannte *Fingergeste*), löst diese Geste die gleiche Aktion aus, die auch der Magic Leap Controller auslösen würde (vgl. 'Abbildung 5.25'). Auf der linken Seite ist in rot das Ereignis dargestellt, das die beiden Ereignisse verbindet (genannt *InputAction MagicLeapTriggerR*). Dieses Ereignis wird jedes Mal aufgerufen, wenn die Fingergeste erkannt wird. Wird die Geste erkannt, wird über *Trigger Action Pressed*, also das Drücken der Taste, der obere Pfad ausgewählt. Wird die Geste nicht mehr erkannt oder beendet, wird der untere Pfad mit *Trigger Action Released*, also dem Loslassen der Taste, ausgeführt. Nach beiden Möglichkeiten werden jeweils alle Blueprints (per Broadcast) benachrichtigt (dargestellt durch das Briefsymbol am rechten Knoten), die auf diese Aktion reagieren können (die einen entsprechenden EventListener haben).

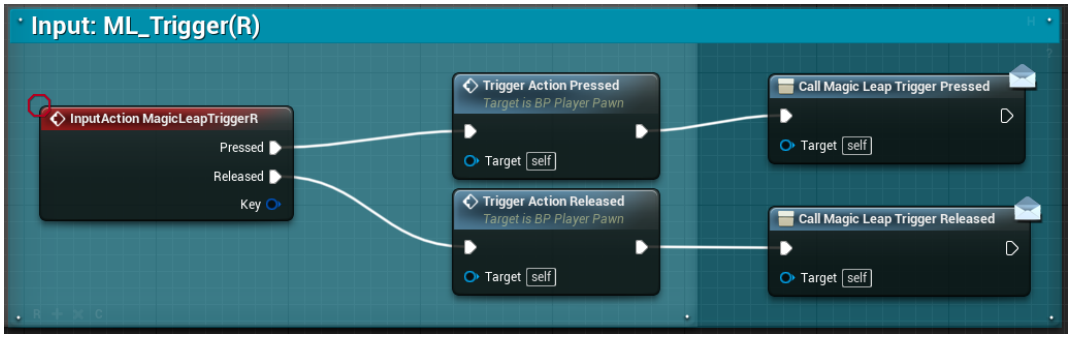


Abbildung 5.25: UE – Zuweisung der Knöpfe und Gesten zur selben Aktion

Ein weiteres Beispiel für eine Funktion, die vorher mit dem Controller ausgeführt wurde und nun auf den Datenhandschuh übertragen werden muss, ist der Laserpointer zur Auswahl von Menüobjekten. In diesem Fall wurde der Startpunkt des Laserstrahls vom Controller auf die Handfläche verlegt. Die Bestätigung der Auswahl erfolgt, wie bereits beschrieben, durch Beugen des Zeigefingers und Auslösen der Fingergeste (vgl. 'Abbildung 5.26').

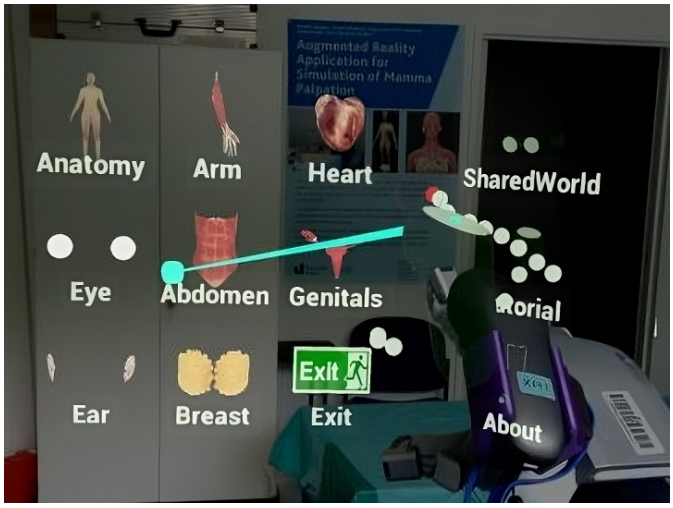


Abbildung 5.26: ML – Laserpointer zur Navigation

Die Erkennung der Position des Handschuhs im Raum ist durch den Handschuh selbst nicht möglich, da er hierfür keine Positionserkennung besitzt. Um dennoch seine Position, insbesondere relativ zur AR-Brille und damit zur Position des Nutzers, erkennen und verfolgen zu können, wurde auf der Oberseite des Handschuhs eine 3D-gedruckte Halterung für den Controller von Magic Leap angebracht (vgl. 'Abbildung 5.27'). Da der Controller in den Betriebsmodi Standard und Erweitert nicht benötigt wird, da die Benutzereingabe vollständig über den Handschuh abgebildet wird, kann er zur Erkennung der Position des Handschuhs im Raum verwendet werden. Da das Magic Leap One HMD die Position des Controllers jederzeit verfolgen kann (über ein magnetisches Erkennungsverfahren) und der Controller immer fest mit dem Handschuh verbunden ist, d.h. sich nicht unabhängig vom Handschuh bewegt, kann die Position des Handschuhs mit einem kleinen Versatz (sog. *Offset*) bestimmt werden.

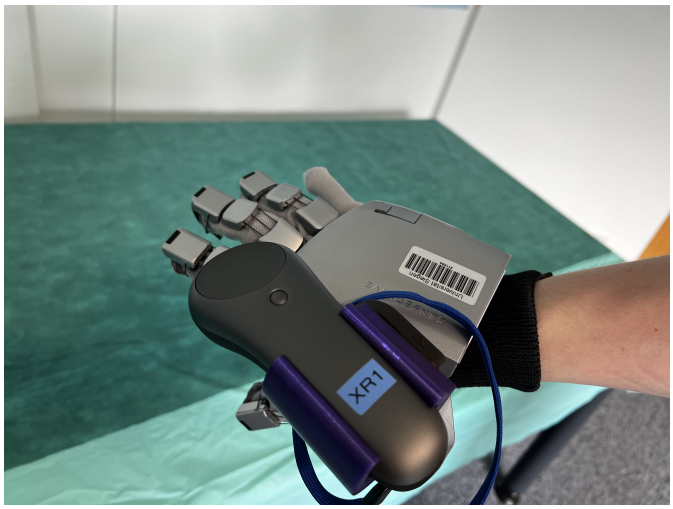


Abbildung 5.27: Controllerhalterung des Magic Leap Controllers auf dem SenseGlove Nova

5.5 Integration haptischer Elemente

Um die Immersion zu fördern, die Interaktion zu erleichtern und das Gefühl zu vermitteln, virtuelle Objekte berühren zu können, wird haptisches Feedback eingesetzt. Der Datenhandschuh SenseGlove Nova kann sowohl Force Feedback als auch vibrotaktiles Feedback darstellen. An jeder Stelle im Programm, an der es zu Kollisionen, Berührungen und

Interaktionen mit Objekten kommt, wird dies durch eine Form der Rückmeldung ergänzt.

Die Funktionsweise ist unabhängig von der Art des haptischen Feedbacks, lediglich der verwendete Knoten entscheidet über das Feedback. Zuerst wird ein *Muster* erstellt und anschließend muss dieses an den Handschuh übergeben werden, damit dieser das Muster *abspielt*. Dementsprechend wird der Knoten *Send Haptics* für haptisches Feedback und *Send Vibration* für vibrotaktiles Feedback verwendet.

'Abbildung 5.28' zeigt, wie ein solches Signal erzeugt wird. In diesem Beispiel soll die Vibration an jedem Finger mit einer Intensität von 100% wiedergegeben werden. Der Knoten *Make Buzz Command* erzeugt ein Vibrationsmuster. Auf der linken Seite hat er für jeden Finger einen Eingang, der einen Wert von 0 bis 100 annimmt und die Stärke der Vibration (in Prozent) darstellt. Als Ausgabe wird ein Vibrationsmuster (in diesem Fall mit dem Namen *Buzz Command 100*) erzeugt und gespeichert.

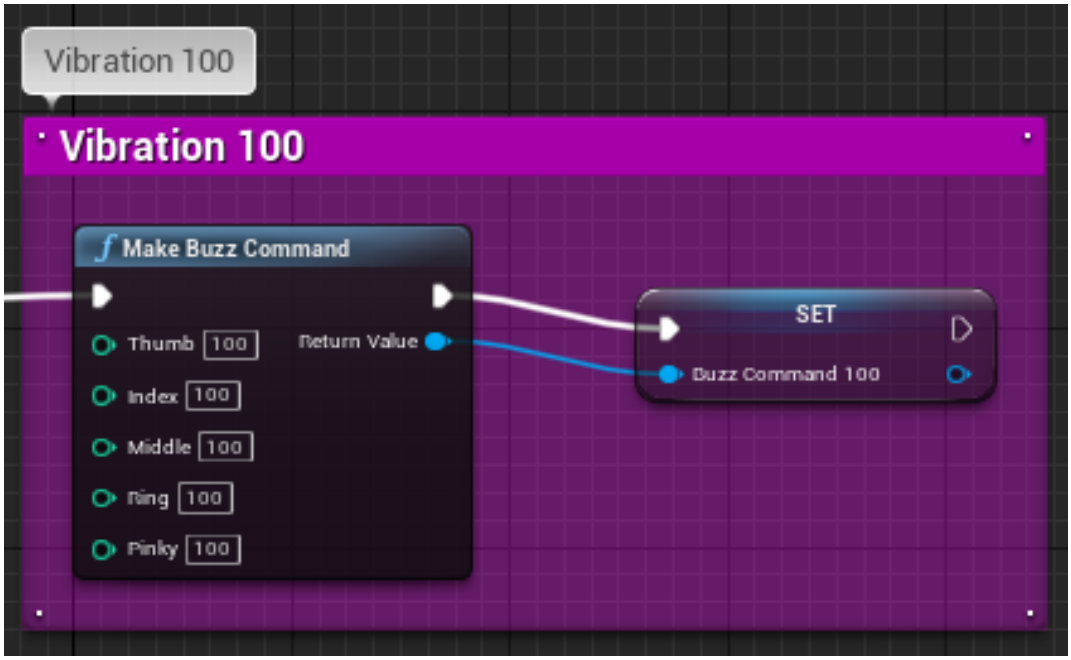


Abbildung 5.28: UE – Beispiel für die Erstellung eines Vibrationssignals / Vibrationsmusters

Ein einmal erstelltes Muster muss nicht unbedingt direkt auf dem Handschuh wiedergegeben werden. Es können beliebig viele Muster vordefiniert und gespeichert werden. Zum Ausführen oder Abspielen eines Musters wird, wie in 'Abbildung 5.29' grün dargestellt, zunächst geprüft, ob das Muster gültig ist, d.h. auch ein Signal enthält und nicht leer ist, und dann über den Knoten *Send Haptics* für haptisches Feedback bzw. *Send Vibration* für Vibrationsfeedback gesendet. Diese Knoten stammen aus dem SenseGlove Plugin und wurden speziell für die Rückmeldung entwickelt.

Um Vibration oder Force Feedback zu stoppen, wird ähnlich vorgegangen (vgl. 'Abbildung 5.29' in blau). Zuerst wird geprüft, ob die Handschuhreferenz (*My Glove* in blau) gültig ist, d.h. ob ein Handschuh angeschlossen ist und dann wird mit *Stop Vibration* bzw. *Stop Haptics* die Rückmeldung gestoppt. Technisch gesehen gibt es keinen Unterschied zwischen einem Muster, das für jeden Finger den Wert Null sendet, und diesem Stoppbefehl. Soll nur ein Finger mit dem Feedback gestoppt werden, muss ein entsprechendes Muster gesendet werden, bei dem dieser Finger kein Feedback erhält. Ein gezieltes Stoppen einzelner Finger ist auf andere Weise nicht möglich.

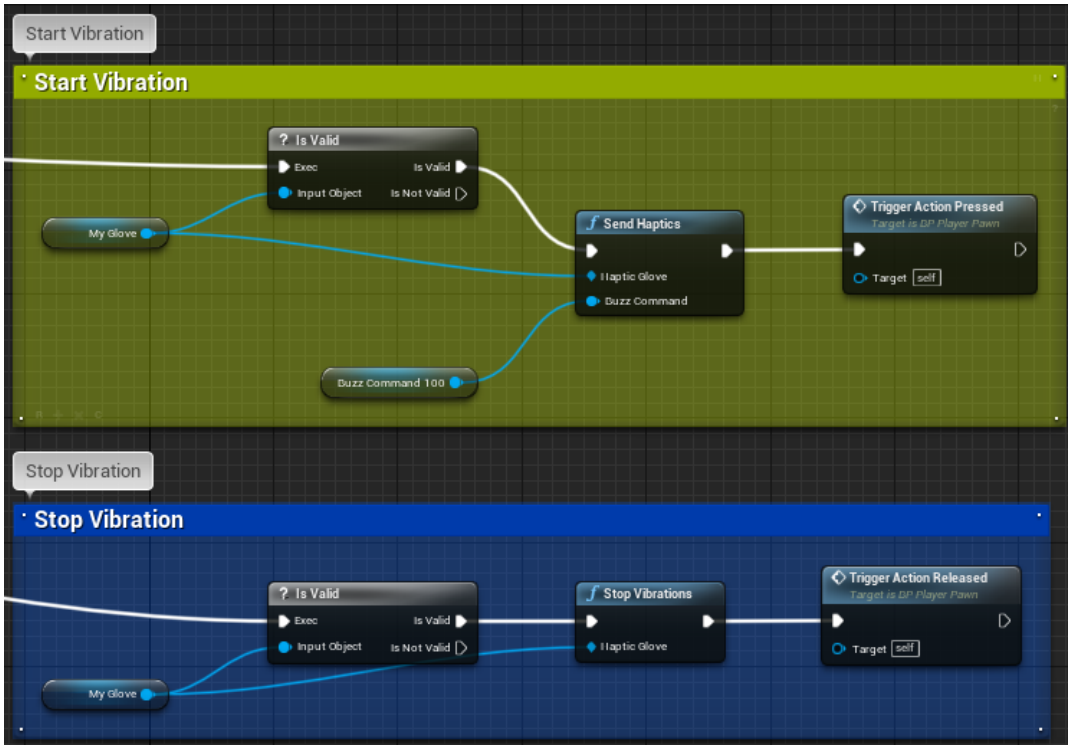


Abbildung 5.29: UE – Starten und Stoppen des haptischen Feedbacks

Um zu erkennen, wann welches Muster auf dem Handschuh gesendet werden soll, werden sogenannte Kollisionskugeln oder *Collision Spheres* verwendet, die eine Berührung oder Kollision erkennen. Diese Kollisionskugeln sind wie in 'Abbildung 5.30' auf dem Datenhandschuh verteilt und erzeugen ein Ereignis (genannt *On Component Begin Overlap* gefolgt von dem Namen / der Position der Kugel), sobald sie eine Kollision erkennen und ein Ereignis (genannt *On Component End Overlap* gefolgt von ihrem Namen), wenn die Kollision beendet ist. Zur besseren Anpassung an die Form der Finger sind die Kugeln gestreckt und werden eher als (weiße) Zylinder dargestellt, die die Form der einzelnen Fingerglieder haben.

Jeder Finger ist mit diesen Kollisionskugeln ausgestattet, die laufend abfragen, ob etwas mit ihnen in Berührung kommt. Um eine Erkennung der anderen Finger untereinander zu verhindern, ist der gesamte Handschuh von dieser Erkennung ausgenommen. Die haptische Rückmeldung durch die Berührung der einzelnen Finger erfolgt durch das reale Gefühl an den Fingern, wenn diese sich berühren. Darüber hinaus ist keine haptische Rückmeldung (über den Handschuh) erforderlich. Dies geschieht durch eine Abfrage, ob das berührte Objekt der Handschuh selbst ist (in 'Abbildung 5.31' mittig als *Cast to BP PlayerPawn SenseGlove* dargestellt). Fällt dieser Test negativ aus, kann davon ausgegangen werden, dass es sich nicht um den Handschuh handelt.

Sobald nun ein Ball ein Event erzeugt (vgl. 'Abbildung 5.31' oben) und es sich wie beschrieben nicht um den Handschuh handelt, kann eine Variable (in diesem Beispiel auf 100) gesetzt werden, so dass ein haptisches Feedback ausgegeben werden soll. Wird die Berührung beendet (vgl. 'Abbildung 5.31' unten) und das entsprechende Event ausgelöst, wird erneut geprüft, ob nicht der Handschuh selbst die Berührung beendet und der Wert auf Null gesetzt.

Abbildung 5.30: UE – Kollisionserkennung auf dem Datenhandschuh

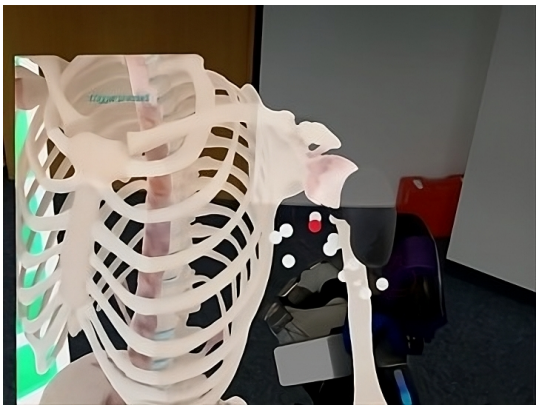


Abbildung 5.31: ML – Kollisionserkennung und Anpassung der Intensität des haptischen Feedbacks

Damit das haptische Feedback für alle Finger gleichzeitig angepasst wird und nur dort auftritt, wo tatsächlich eine Kollision mit einem virtuellen Objekt stattfindet, wird in jedem Frame das Event *PlayCustomHapticFeedback* aufgerufen. Dieses Event liest die Werte der durch die Kollisionskugeln gesetzten Variablen aus und erzeugt daraus ein haptisches Muster (in 'Abbildung 5.32' mit *Make Force Feedback Command* und *Make Buzz Command* bezeichnet). Diese Muster werden dann mit *Send haptics* (in derselben Abbildung ganz rechts) in jedem Frame erneut an den Handschuh gesendet. Mit dem Knoten *My Glove* (blau, oben rechts) kann ausgewählt werden, auf welchem Handschuh das haptische Feedback wiedergegeben werden soll, wenn mehrere Handschuhe mit der Anwendung verbunden sind (z.B. rechts und links).

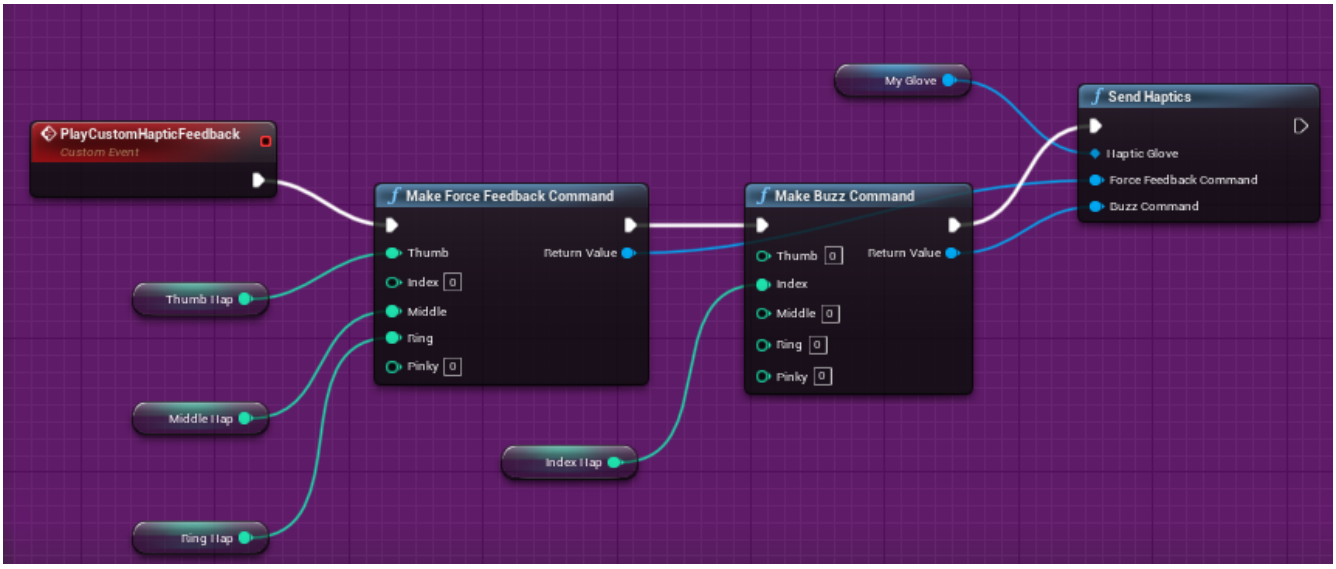


Abbildung 5.32: UE – Senden des haptischen Feedbacks an den Handschuh

Damit nicht jedes Modell das gleiche haptische Feedback erzeugt, gibt es ein sogenanntes *Tag-System*. Jeder Schicht wird ein bestimmter *Tag* (dt.: Bezeichnung oder Aufkleber) zugeordnet, der innerhalb des Programms abgefragt werden kann. Jeder *Tag* gibt Auskunft über die Dauer (in Sekunden), die Intensität (in Prozent von 0 bis 100) und

die Art der haptischen Rückmeldung (vibrotaktil, force oder beides), die für dieses Objekt optimal wäre. Für ein Objekt wie die Desinfektionsflasche, welche hart und unnachgiebig ist, hat der Tag folgende Eigenschaften: Dauer: 1; Intensität: 100; Art: force
An der Stelle, an der die Kollision erkannt wird, kann zusätzlich abgefragt werden, ob das Objekt, mit dem der Handschuh kollidiert ist, einen Tag besitzt. Ist dies der Fall, kann das haptische Feedback entsprechend der drei Eigenschaften angepasst werden, um haptisch unterscheidbare Objekte zu erzeugen.

5.6 Bezug zum Anforderungskatalog aus technischer Sicht

In diesem Kapitel wird aus technischer Sicht auf den Anforderungskatalog Bezug genommen. Es wird zunächst geprüft, ob die Anforderungen theoretisch erfüllbar sind und ob die Umsetzung den Anforderungskatalog ausreichend erfüllt hat. Der Übersicht halber werden die Faktoren in Form einer Liste dargestellt, in der sie kurz genannt werden und anschließend dazu Stellung genommen wird.

Harte Faktoren

- **Augmented Reality-Anwendung:** Das SkillsLab+ ist eine medizinische Augmented Reality-Anwendung, die mit aktuellen Methoden und Best-Practice-Lösungen in Unreal Engine 4 umgesetzt wurde (siehe '5.4.1 Augmented Reality-Brille: Magic Leap One' und '5.3 Vorstellung SkillsLab+').
- **Haptisches Feedback:** Haptisches Feedback in Form von vibrotaktilem Feedback und Force Feedback dient der Immersion und der Rückmeldung, ob virtuelle Objekte berührt werden (siehe '5.5 Integration haptischer Elemente').
- **Kongruenz von Visuellem und Haptischem:** Bei einer visuellen Kollision zweier Objekte wird ein Ereignis ausgelöst, auf das in der Regel mit einer haptischen Rückmeldung reagiert wird (siehe '5.5 Integration haptischer Elemente')
- **Erweiterbarkeit:** Durch weiche Programmierung ist es möglich, neue SkillsLab Stationen im Hauptmenü, neue Aufgaben zu bestehenden Stationen und neue Tasks in Aufgaben hinzuzufügen (siehe '5.3.2 Aufbau eines Levels').
- **Sicherheit der (Patienten-) Daten:** Zertifikate stellen sicher, dass der Programmcode keine Schadsoftware enthält. Die Rechteverwaltung verhindert den Zugriff auf andere als die benötigten Daten und ein verweigerter Internetzugang verhindern die Kommunikation außerhalb des eigenen Netzwerks (siehe '5.4.1 Augmented Reality-Brille: Magic Leap One').
- **Fingertracking:** Die Erkennung der Positionen der Finger wird für die Steuerung der Anwendung genutzt (siehe '5.4.2 Datenhandschuhe: SenseGlove Nova').
- **Ortsunabhängigkeit:** Die Anwendung bietet mehrere Modi, von denen zwei eine ortsunabhängige Ausführung der Anwendung ermöglichen, da außer einer AR-Brille und einem SenseGlove Nova Datenhandschuh keine Hardware benötigt wird (siehe '5.2 Betriebsmodi der Hardwarekomposition').
- **Zeitunabhängigkeit:** Die Reihenfolge, in der die Aufgaben bearbeitet werden, wird vom Lernenden bestimmt. Es gibt keine Vorgabe dazu, wie oft eine Aufgabe maximal wiederholt werden darf (siehe '5.3.4 Programmablauf').

Weiche Faktoren

- **Intuitive Bedienung:** Die Bedienung orientiert sich an aktuellen AR-Anwendungen mit einem Hauptmenü zur Auswahl der Station, Untermenüs zur Auswahl der konkreten Aufgabe und einer Steuerung mit der eigenen Hand durch Positionserkennung der Hand und einzelner Finger (siehe '5.3.4 Programmablauf').
- **Studierendenzentriertes Lernen:** Der Benutzer bestimmt selbst, welche Aufgabe er zu welchem Zeitpunkt ausführt. Es sind keine Informationen und Erklärungen von außen notwendig, um die Anwendung durchführen zu können (siehe '5.3.3 Tastenbelegung des Controllers').
- **Selbsterklärende Menüs:** Die Menüpunkte entsprechen den Stationen im SkillsLab und die Namen der Aufgaben entsprechen den Aufgaben im physischen SkillsLab (siehe '5.3.1 Aufbau des Hauptmenüs und der Aufbau der Navigation').
- **Vermittlung aller Lernkompetenzen:** Die Erwartungshorizonte der SkillsLab Stationen bilden die Grundlage für die einzelnen Schritte, die in jeder Aufgabe erfüllt werden müssen und als Menüpunkte (Tasks) in der To-Do-Liste angezeigt werden (siehe '5.3.2 Aufbau eines Levels').
- **Sequenzielle Durchführung:** Alle Menüpunkte einer Aufgabe müssen in der richtigen Reihenfolge, nacheinander abgearbeitet werden, um den nächsten Menüpunkt freizuschalten (siehe '5.3.2 Aufbau eines Levels').

Funktionen

- **Menü zur Navigation durch die SkillsLab Stationen:** Die Anwendung verfügt über ein Hauptmenü, zur Stationsauswahl, Untermenüs, zur Aufgabenauswahl und eine To-Do-Liste, die die aktuelle Task anzeigt (siehe '5.3.2 Aufbau eines Levels').
- **Virtuelle Repräsentation aller SkillsLab Stationen:** Jede in '2.3.2 Beschreibung und Vorstellung des SkillsLab der Universität Siegen' vorgestellte Station ist mit mindestens einer Aufgabe im SkillsLab+ virtuell repräsentiert (siehe '5.3.2 Aufbau eines Levels').
- **Unterschiedliche Aufgaben an einer Station:** Fast alle Stationen bieten mehrere verschiedene Aufgaben an. Die Arm-Station bietet beispielsweise das Legen eines venösen Zugangs und die Oberarminjektion an (siehe '5.3.1 Aufbau des Hauptmenüs und der Aufbau der Navigation').
- **Trainings und Prüfungsmodus:** Einige Stationen bieten neben dem Trainingmodus auch einen Prüfungsmodus an, bei dem die To-Do-Liste ausgeblendet ist und der Lernende die Reihenfolge der Handlungsschritte selbst kennen muss (siehe '5.3.1 Aufbau des Hauptmenüs und der Aufbau der Navigation').

Kapitel 6

Evaluation des Demonstrators

Der im vorhergehenden Kapitel vorgestellte Demonstrator wurde im Laufe der Arbeiten in drei Studien unter verschiedenen Gesichtspunkten evaluiert. In den folgenden Unterkapiteln wird jede Studie einzeln vorgestellt. Dabei wird auf das Durchführungskonzept, die Teilnehmer und die verwendeten Fragebögen eingegangen. Am Ende des Kapitels werden die Ergebnisse präsentiert und in Zusammenhang gebracht.

6.1 Methodik der Evaluationen

Um den tatsächlichen Mehrwert von haptischem Feedback in medizinischen Augmented Reality-Anwendungen festzustellen, sollen drei unabhängige, aber aufeinander aufbauende Evaluationen durchgeführt werden. Zur Evaluation der Anwendung wurde zeitgleich mit dem Durchführen des konventionellen SkillsLab die Anwendung „SkillsLab+“ als eigenständige Station angeboten. In zwei Durchläufen wurden zunächst die Machbarkeit und im darauf folgenden Jahr der Lernerfolg bzw. eine mögliche Steigerung des Lernerfolgs untersucht.
Bei der Durchführung wurde auf die Einhaltung der aktuell geltenden Hygienemaßnahmen geachtet, d.h. jeder Proband wurde dazu angehalten, seine Hände zu desinfizieren und Einweghandschuhe zu tragen. Nach jedem Durchlauf wurden die AR-Brille und die Handschuhe gereinigt und desinfiziert. Die Studien wurden mit Studierenden des Studiengangs Digital Biomedical and Health Sciences (DBHS) und Ärzten aus den lokalen Krankenhäusern durchgeführt. Es wurde mit Fragebögen, nach der Durchführung, und dem Vergleich der Prüfungsergebnisse sowie Erfahrungsberichten gearbeitet.

6.1.1 Methodik der ersten Evaluation des Demonstrators

Die Durchführung fand am Ende der Vorlesungszeit des Sommersemesters im August 2022 statt. Die Teilnahme an dieser Evaluation war freiwillig und wirkte sich in keinster Weise auf die Bewertung der Studierenden aus. Der Fragebogen wurde digital angeboten und Studierende konnten mit ihrem Smartphone durch das Einscannen eines QR-Codes zur Bearbeitung gelangen, wie bei jeder anderen SkillsLab Station auch. Der gesamte Versuchsaufbau dient einer Machbarkeitsstudie und wird als Blindstudie (mit einfacher Verblindung) durchgeführt. Die Studierenden kennen den Versuchsaufbau nicht und führen das SkillsLab+ wie eine ganz notmale SkillsLab Station aus. Es soll innerhalb der Durchführung des normalen SkillsLab durch einen Fragebogen herausgefunden werden, ob die Erweiterung des SkillsLab um virtuelle Elemente der Augmented Reality in Verbindung mit haptischem Feedback funktioniert und durchführbar ist. Der potenzielle Mehrwert in Bezug auf Lernerfolg und Motivation wird in einer Folgestudie erfasst. Dieser Versuchsaufbau dient dazu, den Studierenden die aktuellen Möglichkeiten der Augmented Reality näher zu bringen und herauszufinden, wie ihre Meinung zu einem eigenständigen System wie dem SkillsLab+ ist. Das SkillsLab+ soll das eigentliche SkillsLab nicht ersetzen, sondern um ein Selbststudium erweitern. Ziel ist es,

dass Studierende vorab mit dem SkillsLab+, welches sowohl AR als auch haptische Elemente besitzt, einen ersten Einblick in die Materie bekommen und sich bereits vor dem Training in Präsenz mit den Handlungsabläufen vertraut machen. Die Einblendung zusätzlicher Elemente soll diesen Prozess unterstützen und mehr Informationen liefern als anatomisch korrekte Modelle (oder Phantome) geben können.

Aus dieser Überlegung heraus ist der folgende Versuchsaufbau entstanden. Das SkillsLab+ wird wie eine der anatomischen SkillsLab-Stationen (z.B. Injektionsarm oder Tastuntersuchung der Brust, '2.3.2 Beschreibung und Vorstellung des SkillsLab der Universität Siegen') in die Rotation integriert. Jede Studierendengruppe hat, wie bei jeder anderen Station auch, 30 Minuten Zeit, um das SkillsLab+ auszuprobieren. Im Gegensatz zu den anderen Stationen wurde das SkillsLab+ von jedem Studierenden zweimal durchlaufen. Beim ersten Mal bekam jeder Studierende eine AR-Brille und konnte das SkillsLab+ in seinem eigenen Tempo durchlaufen. Beim zweiten Durchlauf bekam die Gruppe eine AR-Brille und einen Datenhandschuh, da zum Zeitpunkt der Durchführung nicht mehr Hardware zur Verfügung stand. Die Gruppe hatte nun erneut 30 Minuten Zeit, das SkillsLab+ mit dem Datenhandschuh auszuprobieren. Im Anschluss an den Test wurden die Studierenden gebeten, einen Fragebogen auszufüllen und ihre Eindrücke aufzuschreiben.

Beschreibung der Teilnehmer

Die Teilnehmer waren Studierende der Lebenswissenschaftlichen Fakultät, welche größtenteils im dritten Semester den Studiengang DBHS studieren. Dieser Studiengang besitzt drei Schwerpunkte und beschäftigt sich, als medizinnaher Studiengang, mit Themen wie Digitalisierung, Laborarbeit und dem deutschen Gesundheitssystem. An der Auswertung teilgenommen haben 94 Teilnehmer, doch nicht jeder hat jede Frage beantwortet (da die Teilnahme freiwillig war), weswegen sich die maximale Stimmenzahl in der Evaluation der Fragen unterscheidet.

Die Teilnehmer dieser Studie können einen Technik Bias aufweisen, da sie aufgrund ihrer Erfahrungen, Überzeugungen oder möglicher Vorurteile bestimmte Erwartungen oder Annahmen über die verwendete Technologien haben, die ihre Wahrnehmung und Bewertung beeinflussen. Dies kann dazu führen, dass sie bestimmte Funktionen oder Eigenschaften der Augmented Reality bevorzugen oder ablehnen, ohne objektive oder sachliche Gründe dafür zu haben. Es ist nicht auszuschließen, dass einige Teilnehmer allein durch ihren digitalen Studiengang und dem damit verbundenen Vorwissen und dem Interesse an moderner Technik einen Technik Bias aufweisen können. Wenn ein Technik Bias vorliegt, können die Ergebnisse einer Studie verzerrt sein und falsche Schlussfolgerungen zulassen. Es ist daher wichtig, bei der Planung und Durchführung von Studien darauf zu achten, dass Technik Bias minimiert wird und dass die Teilnehmer neutral und unvoreingenommen sind, weswegen zu Beginn des Fragebogens der Kenntnisstand aktueller Technologien abgefragt und in der Auswertung berücksichtigt wird.

Abbildung 6.1: Durchführung der ersten Evaluation mit Studierenden

Konzeption des Fragebogens

Der Fragebogen wurde mit Hilfe der Online-Umfrageanwendung LimeSurvey erstellt und besteht aus insgesamt drei Hauptteilen azuma[168]. Diese sind wiederum in Unterkapitel unterteilt, die verschiedene Themenbereiche des SkillsLab abdecken. Es wurde eine siebenstufige Bewertungsskala verwendet, von 1 - „Stimme überhaupt nicht zu“ über 4 - „Stimme weder zu noch lehne ab“ bis 7 - „Stimme voll und ganz zu“. Zusätzlich gibt es die Möglichkeit, sich der Stimme zu enthalten und keine Antwort zu geben. Dies ist insbesondere im Hinblick auf die folgenden Abbildungen mit Balkendiagrammen zur Ergebnisdarstellung von Bedeutung, da hier die Enthaltungen aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht als Balken dargestellt werden und somit die Summe der abgegebenen Antworten von der Gesamtzahl der Teilnehmer abweichen kann. Eine druckbare Version, die sich im Design von dem digitalen Fragebogen unterscheidet befindet sich im Anhang (’9.3 1. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2022’).
Der erste Teil (bestehend aus Teil A, siehe Fragebogen ’9.3 1. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2022’) befasst sich mit allgemeinen Hintergrundinformationen zum Teilnehmer, d.h. seinem Vorwissen zu Augmented Reality und seinen bisherigen Erfahrungen im Umgang mit Augmented Reality.
Darauf aufbauend folgen im zweiten Teil die Fragen aus zwei standardisierten Fragebögen, dem Presence/Presence Questionnaire (PQ)[169] (Teil B, siehe Fragebogen ’9.3 1. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2022’) und dem Igroup presence questionnaire (IPQ)[170] (Teil C, siehe Fragebogen ’9.3 1. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2022’). Die Auswertungen dieser Fragebögen dienen dazu, die Anwendung und die intuitive Bedienbarkeit der Anwendung statistisch signifikant zu erfassen. Diese wissenschaftlich erprobten Fragebögen wurden ursprünglich für die Arbeit mit Virtual Reality-Anwendungen entwickelt, aufgrund der großen Nähe zu Augmented Reality-Anwendungen wurden sie dennoch für diese Evaluation verwendet. Die AR-Elemente werden wie bei einer VR-Anwendung über ein HMD eingeblendet. Da die Evaluation der Standardfragebögen im Bereich VR deutlich weiter fortgeschritten ist und es diverse Publikationen gibt, die auf diese Standardfragebögen zurückgreifen, wurde aus Gründen der Vergleichbarkeit auf spezielle AR-Fragebögen verzichtet. Die VR-Fragebögen wurden an die leicht veränderten Bedingungen von AR-Anwendungen angepasst, so dass nicht von einer virtuellen Umgebung, sondern von virtuellen Elementen gesprochen wird. Die in den Fragebögen adressierten Themen Immersion, Präsenz und Realitätsnähe spielen in einer AR-Umgebung die gleiche Rolle wie bei VR-Anwendungen, so dass es nur wenige Unterschiede in der Auswertung gibt. Dennoch wurden die Unterschiede zwischen AR und VR bei der Auswertung berücksichtigt.

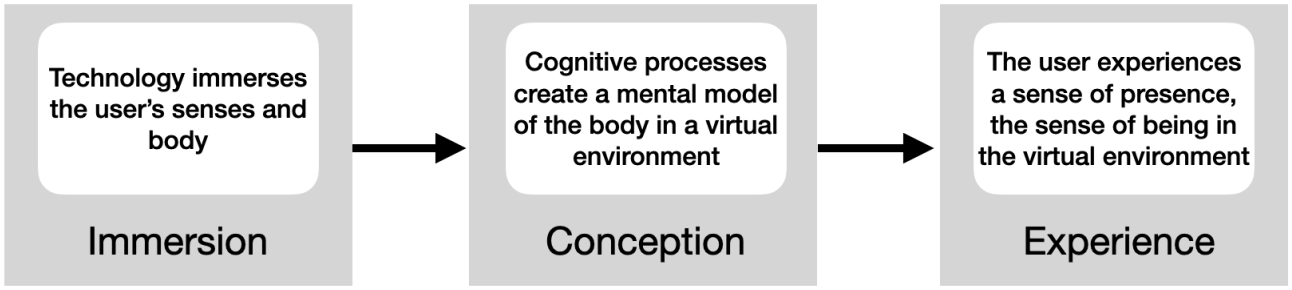


Abbildung 6.2: Das Schaubild der Präsenzkomponeten des Strukturgleichungsmodellierung (SEM) [171]

In zwei Studien zu je 246 und 300 Teilnehmern konnte der IPQ Presence Questionaire evaluiert werden. Das Schaubild ’Abbildung 6.2’ zeigt die drei Schwerpunkte, die Präsenzkomponenten des Strukturgleichungsmodellierung (SEM). Der

erste Schwerpunkt, die Immersion, beschreibt beschreibt das Eintauchen in eine virtuelle Umgebung oder Erfahrung, die so realistisch oder überzeugend ist, dass die Nutzer das Gefühl hatten, tatsächlich anwesend oder Teil davon zu sein. Der zweite Schwerpunkt, Auffassung oder Wahrnehmung, bezieht sich auf die individuelle Interpretation oder Meinung einer Person über eine Situation, ein Ereignis oder ein Objekt, die durch ihre Wahrnehmungen, Erfahrungen und Überzeugungen beeinflusst wird. Der dritte und letzte Schwerpunkt, die Erfahrung, beschreibt das Erleben von Ereignissen, Handlungen oder Zuständen, die eine Person während ihres Lebens gemacht hat und die ihr Wissen, Verständnis und Fähigkeiten beeinflussen.
Der Presence Fragebogen ist so aufgebaut, dass er Fragen zu diesen Bereichen stellt und die Erfahrung des Nutzers/der Nutzerin genau abbildet. Er besteht aus 29 Fragen, aufgeteilt in vier Kategorieren. Zunächst wird darauf eingegangen, wie involviert sich der Benutzer in die Anwendung fühlt. Es wird herausgefunden, ob er lediglich stiller Beobachter, wie bei einem Film, ist oder ob dieser aktiv in das Geschehen eingreifen kann und ob seine Handlungen Folgen haben, beispielsweise, wenn auf das Drücken eines Knopfes ein Ereignis folgt. Die zweite Kategorie befasst sich damit, wie gut die Sinne des Benutzers angesprochen werden. Kann er Objekte anfassen, Details und Geräusche erkennen, sowie die Geräuschquelle lokalisieren? Im dritten Abschnitt zielt der Fragebogen auf die Immersion und die Anpassung des Benutzers an die gestellten Aufgaben ab. Dieser Abschnitt ist besonders wichtig, da hiermit herausgestellt wird wie immersiv eine Anwendung ist und wie intuitiv sie sich, besonders von unerfahrenen Nutzern ohne Einweisung, bedienen lässt. Im letzten Abschnitt wird überprüft, wie gut der Benutzer mit Interfaces und der Benutzbarkeit dieser zurecht kam.
Der kürzere Fragebogen der Igroup presence questionnaire (IPQ) besteht aus 14 Fragen und teilt sich auch in drei Kategorien auf. Der erste Abschnitt erfragt vom Anwender, wie präsent er sich in der Umgebung gefühlt hat. Abschnitt zwei zielt, wie der erste Abschnitt des Presence Fragebogens auf die Involvierung des Benutzers in die künstliche geschaffene Welt ab. Der letzte Abschnitt befasst sich mit der Wahrnehmung der Anwendung durch den Nutzer und dem Realismus, dem die Anwendung entspricht. Es wird herausgestellt, ob die Anwendung glaubhaft ist und ob der Anwender mit dieser wie mit der Echten interagieren kann.
Der dritte Teil befasst sich mit allgemeinen Fragen zu Benutzung des SkillsLab+ und den ersten Eindrücken nach der Verwendung. Besonderer Fokus wird hierbei außerdem auf den Vergleich zum realen SkillsLab (z.B. bei der Vorbereitung der Durchführung der einzelnen Stationen) und den AR-Funktionen, welche nicht im realen SkillsLab möglich sind, wie die X-Ray-Vision, bei der sich die einzelnen anatomischen Strukturen/Schichten durchschalten lassen (Teil D, siehe Fragebogen '9.3 1. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2022'). Im Anschluss an die allgemeinen Fragen wird speziell auf die einzelnen virtuellen Stationen des SkillsLab+ eingegangen und auf die besonderen Funktionen, die durch die Erweiterung mit Augmented Reality-Methoden notwendig werden (Teil E, siehe Fragebogen '9.3 1. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2022'). Jede Station wird hierbei zunächst allgemein (für sich stehend) betrachtet und anschließend mit Betrachtung ihrer Besonderheit evaluiert. Im Anschluss daran (Teil F, siehe Fragebogen '9.3 1. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2022') wurden Fragen speziell zum haptischem Feedback und der Verwendung der Datenhandschuhe gestellt. Das haptische Feedback sollte allgemein und im Vergleich zu keinem, sowie dem Feedback, welches der Controller liefert, bewertet werden.
Am Ende des Fragebogen (Teil G, siehe Fragebogen '9.3 1. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2022') wurde den Teilnehmern durch Freitextfelder zusätzlich die Möglichkeit gegeben, ihre eigene Meinung zu den folgenden Fragen abzugeben:

- Was hat Ihnen an der Anwendung besonders gut gefallen?
- Was hat Ihnen nicht so gut gefallen?
- Was können wir im SkillsLab+ noch verbessern?

6.1.2 Methodik der zweiten Evaluation des Demonstrators

Die zweite Evaluation wurde mit einer anderen Gruppe von Teilnehmern durchgeführt, um weitere Erkenntnisse zu gewinnen und einen anderen Aspekt zu evaluieren. Auch diese Studie wird als Blindstudie durchgeführt, d.h. den Teilnehmern wird vor dem Ausfüllen des Fragebogens nicht mitgeteilt, worauf sie bei der Durchführung achten sollen. Im Gegensatz zur Machbarkeitsstudie des ersten Demonstrators geht es bei dieser Evaluation um die Sichtweise der praktizierenden Ärzte. Diese sollen den Demonstrator testen und ihre Meinung zum aktuellen Stand dieser medizinischen Augmented Reality-Anwendung mit haptischem Feedback abgeben. Von dieser Zielgruppe wird erwartet, dass sie keinen oder nur einen geringen Technologie-Bias aufweist, der das Ergebnis und die Meinung über die Software in der ersten Teilnehmergruppe beeinflusst haben könnte. Im Folgenden werden die Teilnehmer, die Methodik der Evaluation und das Design des Fragebogens erläutert.

Beschreibung der Teilnehmer

Die Teilnehmer dieser Studie sind ausgebildete Ärzte aus den Bereichen Neurochirurgie, Innere Medizin und Onkologie. Der Test wurde mit 31 Ärzten auf freiwilliger Basis durchgeführt. Die Studie begann für jeden Teilnehmer individuell mit der Durchführung des Demonstrators, d.h. mit der Augmented Reality-Anwendung des SkillsLab+. Die Durchführung erfolgte in Kombination mit dem Datenhandschuh (SenseGlove Nova), der sowohl für die Navigation durch die Menüs als auch für die Durchführung aller Aufgaben und Übungen verwendet wurde. Die Besonderheiten der Technologie, d.h. das haptische Feedback und das Fingertracking, wurden dabei besonders hervorgehoben. Die Teilnehmer konnten die Anwendung beliebig lange testen, Aufgaben wiederholen und die Reihenfolge der Stationen selbst bestimmen. In 'Abbildung 6.3' ist der Ablauf dargestellt.

Abbildung 6.3: Durchführung der zweiten Evaluation mit Ärzten

Konzeption des Fragebogens

Im Anschluss an die Durchführung sollte jeder Teilnehmer einen Fragebogen ausfüllen, der aus Multiple-Choice- und Freitextfragen besteht. Der Fragebogen ist im Detail wie folgt aufgebaut und befindet sich in einer druckbaren Version im Anhang ('9.4 2. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2023').

Die Fragen wurden auf einer fünfstufigen Skala von „1: keine Erfahrung, keine Berührungspunkte“ als niedrigste bzw. ablehnendste Antwortmöglichkeit bis „5: sehr viel Erfahrung, fast tägliche Nutzung“ als volle Zustimmung und Akzeptanz beantwortet.

Der Fragebogen für diese Bewertung besteht aus vier Teilen. Der erste Teil (Teil A) dient der Erfassung des Hintergrundes der Teilnehmerinnen und Teilnehmer und der Klärung bereits vorhandener Vorkenntnisse sowie dem Ausschluss eines Technologiebias. Auch das Alter der Teilnehmer spielt für die Akzeptanz des Systems und damit für die Bewertung eine Rolle.

Der zweite Teil (Teil B) umfasst den Augmented Reality-Teil der Anwendung. Fragen zur Darstellung und zum

Mehrwert dieses Mediums versuchen den Stellenwert zu erfassen. Grundlage ist wiederum der IPQ-Fragebogen, der bereits in Kapitel '6.1.1 Konzeption des Fragebogens' vorgestellt wurde.
Der dritte Teil (Teil C) beschäftigt sich mit dem Hauptaspekt dieser Evaluation. Es wird versucht, den Mehrwert haptischen Feedbacks in Augmented Reality-Anwendungen zu quantifizieren. Fragen nach der Realitätsnähe der Anwendung und speziell der Kombination von AR und haptischem Feedback versuchen hier Antworten zu finden. Die Fragen wurden dem Fragebogen von Capello et al. entnommen und ins Deutsche übersetzt. Die Publikation mit dem Titel „Continuous supplementary tactile feedback can be applied (and then removed) to enhance precision manipulation" untersucht, ob kontinuierliches haptisches Feedback die Präzision feiner Manipulationsbewegungen verbessern kann.[1] [36]
Der letzte Abschnitt (Teil D) befasst sich mit der Relevanz und den möglichen Einsatzgebieten von medizinischen Augmented Reality-Anwendungen mit haptischem Feedback in der medizinischen Ausbildung. Dazu werden die Teilnehmer gebeten, eine Einschätzung über die zukünftige Nutzbarkeit abzugeben. Darüber hinaus wird in einem zweiten Fragenblock die Übertragbarkeit des Gelernten in den späteren Berufsalltag thematisiert.

6.1.3 Methodik der dritten Evaluation des Demonstrators

Die dritte Evaluation hat das Ziel der Messung des tatsächlichen Lernerfolgs des Demonstrators im Vergleich zur konventionellen Lernmethode, das heißt ohne zusätzliches Augmented Reality-Training mit haptischem Feedback. Der Kurs „Klinische Untersuchung SkillsLab" des Studiengangs DBHS der Universität Siegen ist sehr gut für diese Evaluation geeignet. Im Verlauf des Kurses geht es für die Studierenden darum, alle Stationen des Siegener SkillsLab zu durchlaufen (siehe dazu '2.3.2 Beschreibung und Vorstellung des SkillsLab der Universität Siegen'). Da diese Veranstaltung lediglich eine Studienleistung, das heißt der Studierende kann entweder bestehen oder nicht bestehen, und keine Prüfungsleistung, welches mit einer Endnote verbunden wäre, ist, besteht kein Problem darin die Teilnehmer in zwei Gruppen einzuteilen und nur eine Gruppe mit der SkillsLab+ Anwendung zusätzlich zu schulen. Diese Form des AB-Test oder auch Randomized controlled trial (kurz: *RCT*) soll die Auswirkung der Veränderung (Variante B: Lehre unterstützt durch Training mit AR und haptischem Feedback) auf die Endnote im Vergleich zum Ausgangszustand (Variante A: Konventionelles Training) aufzeigen. Dabei wird die Gruppe von Studierenden nach dem Zufallsprinzip der Variante A und eine andere Gruppe der Variante B zugeordnet. Anschließend werden die Ergebnisse der beiden Gruppen verglichen, um festzustellen, ob Variante B eine signifikante Verbesserung gegenüber Variante A bewirkt hat. Dies dient dazu, fundierte Entscheidungen über Design- und Lernstrategien zu treffen. Als Vergleichskriterien sollen hierbei die Leistung der Studierenden, d.h. ihre Abschlussnoten, und die subjektive Wahrnehmung der Vorbereitung untersucht werden. Beide Kriterien werden im Folgenden erläutert. Der Versuchsaufbau gleicht einer Doppel-blind Studie, da weder die Teilnehmer wissen, dass sie an einer Studie teilnehmen oder was geprüft wird, und die Prüfer nicht wissen, welche Teilnehmer vorab das SkillsLab+ besucht haben.
Zur objektiven Bestimmung des Lernerfolgs wird die Prüfung mit einem Notensystem (dem Bewertungsschema der Universität Siegen von 1.0, als Bestnote, bis 4.0, als schlechteste, aber immer noch bestandene Note, und 5.0, für nicht bestanden) versehen und die Studierenden bekommen ab einer 4.0 den Kurs als bestanden angerechnet. Die Prüfung besteht aus hierbei zwei Teilen: einer mündlichen Prüfung von ca. 30 Minuten, in der theoretische Fragen zur Durchführung aller Stationen gestellt werden, und einer praktischen Prüfung, bestehend aus der Durchführung einer zufällig ausgewählten physischen Station. Der Erwartungshorizont jeder Station wird hier als Prüfungsgrundlage verwendet, sodass die Wissensabfrage reproduzierbar und jeder Studierender mit dem selben Bewertungsschema geprüft wird.

[1] Die Ergebnisse zeigen, dass die Probanden, die das haptische Feedback erhielten, signifikant präzisere Bewegungen ausführen konnten als die Probanden ohne Feedback. Interessanterweise blieb das verbesserte Leistungsniveau auch nach dem Entfernen des haptischen Feedbacks erhalten. Die Autoren schlagen vor, dass diese Ergebnisse für die Entwicklung von Prothesen und Robotikanwendungen genutzt werden können, um die feinmotorischen Fähigkeiten von Menschen zu unterstützen. [36]

Die relative Note wird daraus berechnet, dass die Anzahl der richtigen Antworten mit der Anzahl der richtig durchgeführten praktischen Schritte addiert wird. Die Summe daraus wird ins Verhältnis zur maximalen Anzahl der Fragen gesetzt. Ab 50% gilt die Prüfung als bestanden und von hier an stufft sich das Ergebnis in fünf Prozent Schritten von der 4,0 zur 1,0. Ein Beispiel: Hat ein Prüfling im theoretischen Prüfungsteil 12 von 20 Fragen und im praktischen Prüfungsteil 12 von 20 Verfahrensschritten richtig ausgeführt, so erhält er mit 24 von 40 Punkten die Gesamtnote 3,3.
Die Note wird nicht an das Prüfungsamt weitergeleitet und dient lediglich der Internen Auswertung dieser Studie. Die Prüfer wussten nicht, welche Studierenden vorab das SkillsLab+ verwendet haben und kennen demnach nicht die Gruppenzugehörigkeit der Prüflinge. Den Prüflingen wurde nicht gesagt, dass das zusätzliche Training einer Auswertung dient und ihnen wurde nicht mitgeteilt, dass nicht alle Studierende das SkillsLab+ verwendet haben. Dank dieser Unwissenheit, bzw. dieser Doppelt-Blind-Studie sollen folgende Vorteile für die Auswertung erzielt werden:

1. Minimierung des Einflusses von Vorurteilen und Erwartungen von Teilnehmern und Forschern auf die Ergebnisse.
2. Verbesserung der Validität und Zuverlässigkeit der Studie.
3. Reduzierung von Verzerrungen und Fehlern, die aus der bewussten oder unbewussten Manipulation der Daten durch Forscher oder Teilnehmer resultieren könnten.
4. Erhöhung der Vertrauenswürdigkeit der Studienergebnisse und damit der Relevanz für die praktische Anwendung.

Neben den tatsächlichen und messbaren Ergebnissen soll zusätzlich die subjektive Einschätzung der Studierenden erfasst werden. Bei dieser Testung geht es um das Gefühl, auf die Prüfung vorbereitet zu sein und den Lerninhalt verstanden zu haben. Zur Erfassung der subjektiven Einschätzung wird ein Fragebogen konzipiert und mit allen Teilnehmern verwendet. Der Aufbau wird im folgenden Kapitel beschrieben (siehe '6.1.3 Konzeption des Fragebogens').

Beschreibung der Teilnehmer

Die Teilnehmer sind, wie in der ersten Evaluation des 1. Demonstrators (siehe '6.1.1 Beschreibung der Teilnehmer' auch, Studierende des Bachelor Studiengangs DBHS der Lebenswissenschaftlichen Fakultät und Studierende des Master Studiengangs Medizinische Informatik der naturwissenschaftlich technischen Fakultät der Universität Siegen. Die Teilnahme an der Evaluation und der Ausfüllung des Fragebogens ist freiwillig und die Studierende haben jederzeit die Möglichkeit sich zu enthalten und Fragen zu überspringen. Die Anzahl der Teilnehmer beläuft sich bei dieser Testung auf 58[2].
Insgesamt ergibt sich aus der Teilnehmerzahl eine Aufteilung in zwei Gruppen: Die erste Gruppe mit 28 Teilnehmern, die zusätzlich zum normalen SkillsLab mit dem SkillsLab+ trainiert haben und die zweite Gruppe mit 30 Teilnehmern, die als Kontrollgruppe dient und nur das normale SkillsLab durchlaufen hat. Die Ergebnisse der beiden Gruppen können miteinander verglichen werden, um festzustellen, ob die Gruppe mit zusätzlichem SkillsLab+ Training einen signifikant höheren Lernerfolg erzielt hat. Darüber hinaus wird mit dem Fragebogen untersucht, ob sich die Teilnehmer des SkillsLab+ besser auf die Prüfung vorbereitet fühlen, also einen subjektiven Mehrwert wahrnehmen.

Konzeption des Fragebogens

Wie zuvor wurden die Teilnehmenden im Anschluss an die Erprobung gebeten einen Fragebogen auszufüllen. Dieser freiwillige Fragebogen aus Multiple Choice Fragen und Freitextfragenbefindet sich in einer eine druckbaren Version im Anhang ('9.5 3. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Lernerfolg 2023').

[2]Eingangs meldeten sich 77 Studierende für den Kurs an, doch nur 57 haben am Ende die Prüfung absolviert.

Die Konzeption des dritten Fragebogens orientiert sich am ersten und zweiten. Dieser Fragebogen besteht aus vier Teilen, von dem im ersten (Teil A) vergleichbar zum ersten Fragebogen der Hintergrund der Teilnehmer erfasst wird. Dieser Abschnitt dient insbesondere dazu, den Kenntnisstand der Teilnehmer zum Thema Augmented Reality und haptischem Feedback abzufragen. Im zweiten Teil (Teil B) dienen die Fragen des Presence questionnaire (IPQ) der igroup dazu die Präsenz und Immersion der Teilnehmenden abzufragen [171]. In dieser Umfrage erfolgt es, im Vergleich zur ersten Evaluation, etwas kürzer aus, da das Ziel dieser Studie einen anderen Fokus hat. Im dritten Abschnitt versucht der Fragebogen den Nutzen und die Erfahrungen der Nutzer abzubilden. Fragen zum Realismus und dem Mehrwert in der Anwendung werden gestellt. Dieser Abschnitt des Fragebogens ist Teil des Fragebogens (Teil C) von Cappello et al, bei dem es um die Notwendigkeit von haptischem Feedback in Anwendungen geht [36]. Der Fragebogen endet mit einem Abschnitt (Teil D) zu den Themen Übertragbarkeit, Integration und Anwendbarkeit. Dieser Teil gleicht dem Abschluss aus der vorherigen Studie.

6.2 Studienergebnisse

In den folgenden Unterkapiteln werden die Ergebnisse der vorgestellten Studien dargestellt und bewertet. Nach der Einzelauswertung wird ein Gesamtfazit gezogen und auf den Anforderungskatalog eingegangen. Dabei wird der Soll- mit dem Ist-Zustand verglichen und es werden erstmals weitere Umsetzungsvorschläge für zukünftige Arbeiten aufgezeigt.

Die Auswertung der ersten Evaluation mag detaillierter erscheinen als die nachfolgenden. Dies liegt daran, dass die Anwendung nach den Ergebnissen des ersten Proof of Concept verbessert und erweitert wurde. Die zweite und dritte Evaluation dienten letztlich der konkreten Bewertung und der Frage nach dem Lernerfolg sowie der Integrierbarkeit in die medizinische Lehre.

6.2.1 Auswertung des ersten Demonstrators

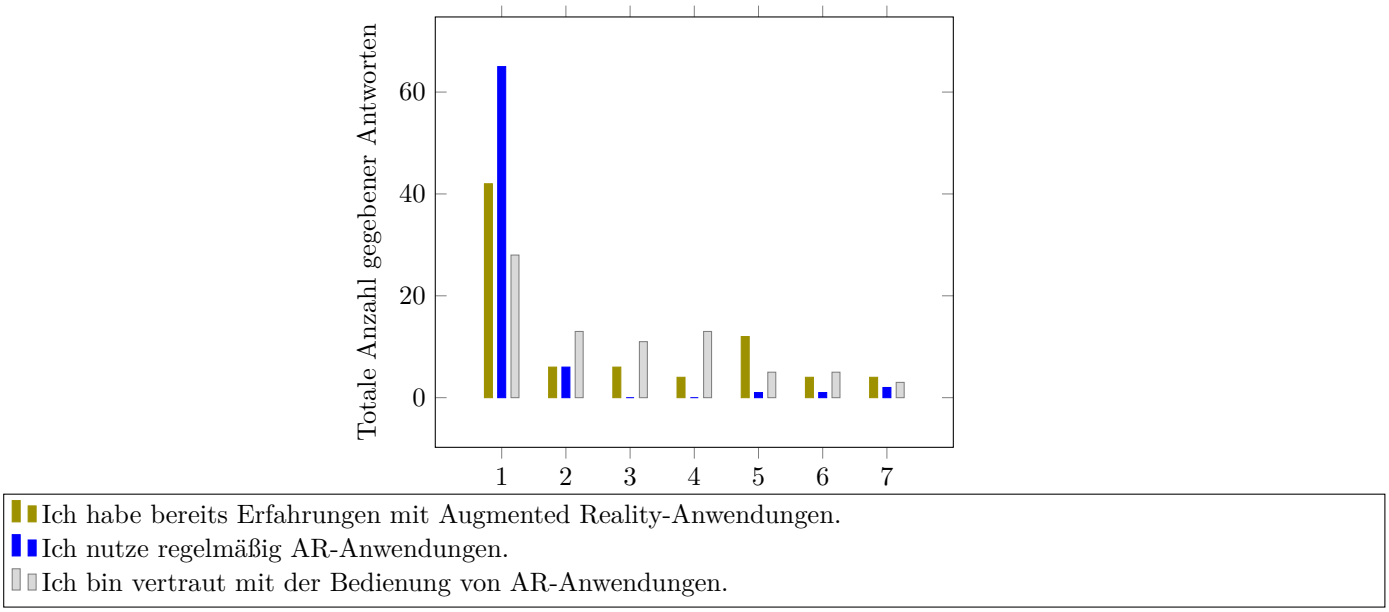


Abbildung 6.4: Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „Vorwissen AR-Anwendungen“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Stimme überhaupt nicht zu“ steht, 4 bedeutet „Stimme weder zu noch lehne ab“ und 7 repräsentiert „Stimme voll und ganz zu“

Die Auswertung der ersten Machbarkeitsstudie erfolgt anhand des Fragebogens und ist abschnittsweise gegliedert. Die Ergebnisse wurden bereits in einer Veröffentlichung vorgestellt und separat publiziert ('3.1 SkillsLab+ – Proof of Concept for Medical Augmented Reality Teaching Application with Haptic Feedback [52], IEEE Educon in Kuwait 2023'). Da die Auswertung in diesem Paper verkürzt und zusammengefasst erfolgte wird in diesem Kapitel nochmal die komplette Auswertung durchgeführt.
Es beginnt mit dem ersten Abschnitt des Fragebogens (Teil A: Vorwissen AR-Anwendungen). In diesem Teil des Fragebogens wird abgefragt, wie sich das Vorwissen der Studienteilnehmer im Bereich von AR-Anwendungen zusammensetzt und wie groß dieses ist. Hierfür wurden verschiedene Fragen gestellt, um die individuellen Kenntnisse der Teilnehmer zu ermitteln. Die Fragen beziehen sich auf die bisherigen Erfahrungen, die Regelmäßigkeit der Nutzung und die Vertrautheit mit der Bedienung. Eine Auswahl dieser Fragen ist in 'Abbildung 6.4' aufgeführt.
Mehr als die Hälfte der befragten Studierenden (ca. 50%, d.h. 42 von 70) hat noch keine Erfahrung mit AR-Anwendungen. Nur 8 Personen (6 oder mehr) haben bereits Kenntnisse in diesem Bereich. Von den 79 Befragten nutzen nur 3 Studierende (6 oder mehr) regelmäßig AR-Anwendungen. Die meisten Studierenden (fast 90%, d.h. 71 von 79 mit einer Bewertung von 2 oder niedriger) nutzen AR-Anwendungen selbst nicht regelmäßig. Bei der Frage nach der Vertrautheit mit der Bedienung von AR-Anwendungen ist die Verteilung gleichmäßiger, auch wenn rund 50% (41 von 79 mit einer Bewertung von 2 oder niedriger) angeben, nicht mit der Bedienung von AR-Anwendungen vertraut zu sein.

Teil B: Presence Questionnaire

Im nächsten Teil der Analyse geht es um den Presence Questionnaire (Teil B: PQ). In der nachfolgenden Grafik ('Abbildung 6.5') werden die Ergebnisse von drei spezifischen Fragen aus dem Abschnitt „Presence Questionnaire (PQ)“ dargestellt. Diese Fragen veranschaulichen besonders gut die Verteilung der Ergebnisse dieses Abschnitts.

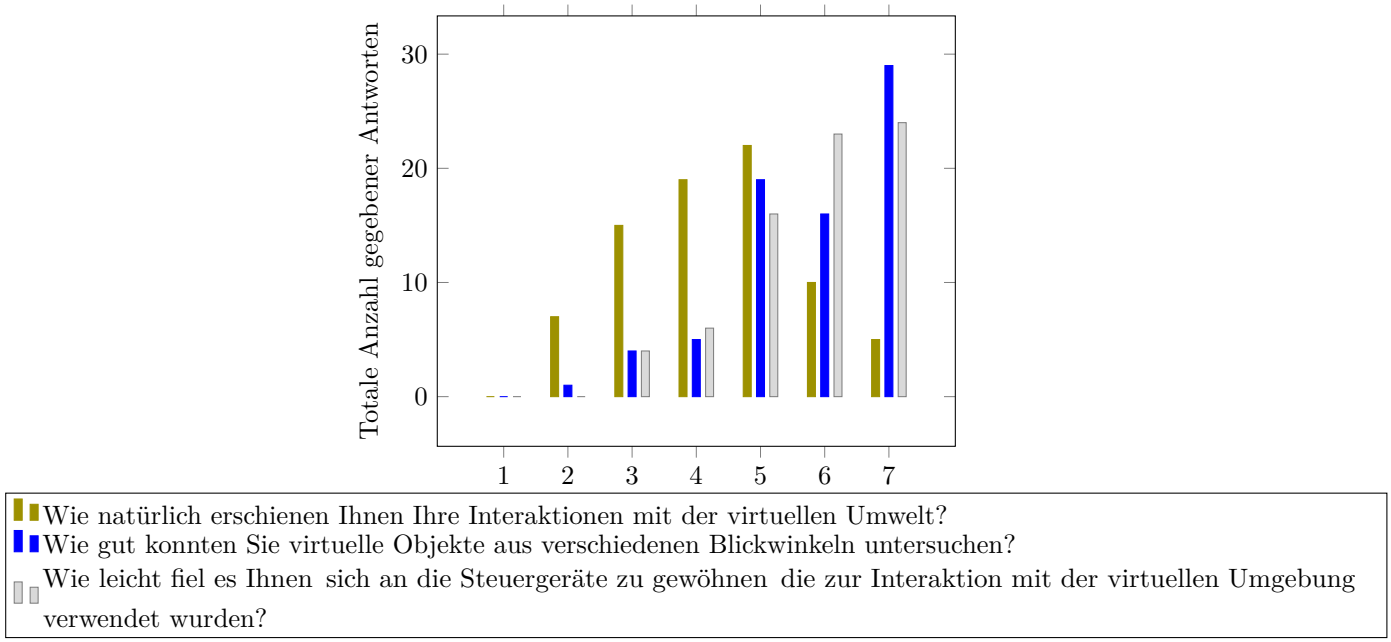


Abbildung 6.5: Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „Presence Questionnaire (PQ)“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Überhaupt nicht“ steht, 4 bedeutet „Neutral“ und 7 repräsentiert „Sehr gut“

Die Umfrageergebnisse zur Frage „Wie natürlich erschienen Ihnen Ihre Interaktionen mit der virtuellen Umgebung?“ zeigen eine annähernde Normalverteilung. Es gibt nur wenige Stimmen im unteren Bereich (7 mit einer Bewertung von 2 oder weniger) und im oberen Bereich (15 mit einer Bewertung von 6 oder mehr) der Bewertungsskala. Die

meisten Studierenden (56) bewerten ihre Interaktionen im mittleren Bereich der Skala.
Ein wichtiger Aspekt der SkillsLab AR-Anwendung ist die Möglichkeit, virtuelle Objekte aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten und untersuchen zu können. Die meisten Studierenden (45 mit einer Bewertung von 6 oder höher) geben an, dass sie die virtuellen Objekte besonders gut aus verschiedenen Blickwinkeln untersuchen können. Nur ein Befragter bewertet diese Erfahrung im unteren Bereich (1 oder niedriger) der Bewertungsskala.
Fast 60% (47 von 79 mit einer Bewertung von 6 oder höher) der Befragten gaben an, dass sie sich sehr leicht an die Bedienelemente gewöhnen konnten, die zur Interaktion mit der virtuellen Umgebung verwendet wurden. Im Vergleich dazu befinden sich ca. 30% (26 von 79 zwischen 3 und 5) der Teilnehmenden im neutralen Bereich und es gab keine einzige Stimme im unteren Bereich (2 oder weniger). Sechs Teilnehmende beantworteten diese Frage nicht.

Teil C: IPQ

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Befragung im Kapitel „IPQ“ des Fragebogens dargestellt. Der IPQ ist ein standardisierter Presence Questionnaire, der von der Igroup entwickelt wurde und hauptsächlich im VR-Bereich eingesetzt wird. Die 'Abbildung 6.6' zeigt drei ausgewählte Fragen aus dem Kapitel „IPQ“ des Fragebogens und deren Ergebnisse. Die ausgewählten Fragen sollen insbesondere den Kontrast zu einer VR-Anwendung verdeutlichen, da es bei einer AR-Anwendung um die Integration der realen Umgebung und nicht um deren Ausblendung geht.

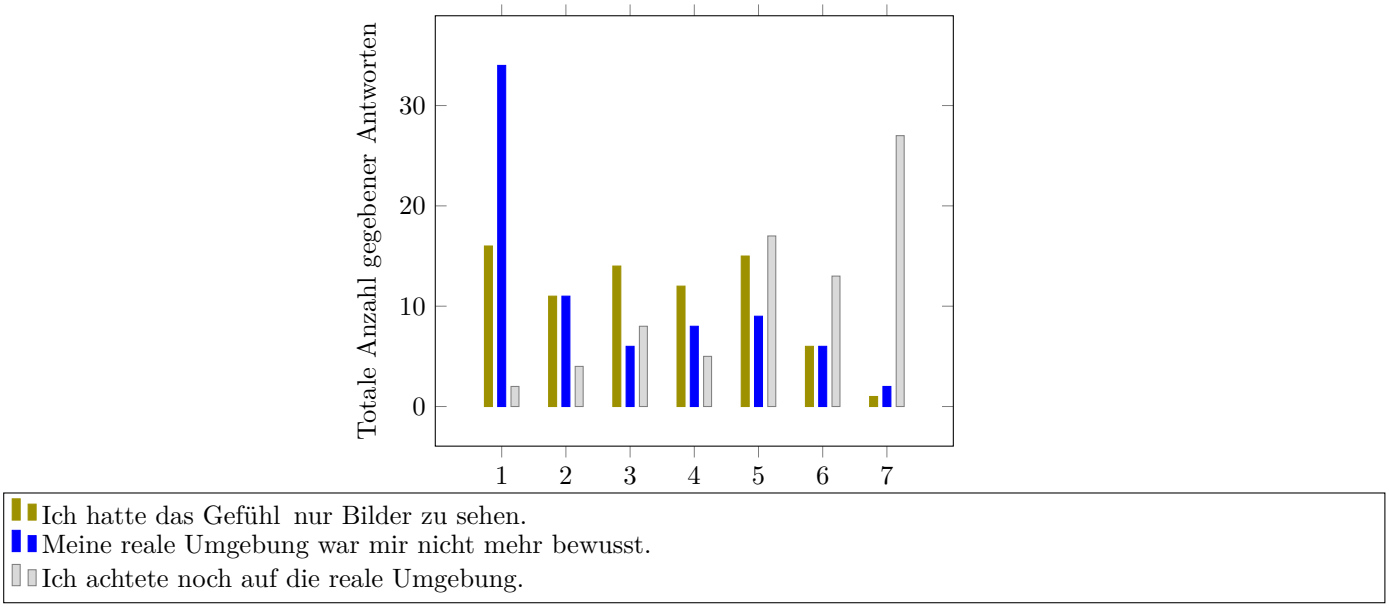


Abbildung 6.6: Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „IPQ“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Stimme überhaupt nicht zu“ steht, 4 bedeutet „Stimme weder zu noch lehne ab“ und 7 repräsentiert „Stimme voll und ganz zu“

Wenige Studierende (7 mit 6 oder höher) gaben an, dass sie das Gefühl hatten, nur Bilder zu sehen, während die Mehrheit der Teilnehmenden auf der restlichen Skala (1-5) lag. In Bezug auf die Wahrnehmung ihrer realen Umgebung gaben 45 Teilnehmende an, sich ihrer Umgebung bewusst zu sein, während 30% (23 von 79) im mittleren Bereich der Skala lagen und nur 8 Studierende angaben, nicht mehr auf ihre Umgebung zu achten. Bei dieser Frage gaben ca. 50% (40 von 79) der Teilnehmenden an, auf ihre reale Umgebung zu achten, während ca. 40% (30 von 79) im mittleren Bereich lagen und nur 6 Studierende angaben, nicht mehr auf ihre Umgebung zu achten.

Teil D: SkillsLab+

Es folgt eine Zusammenfassung der Ergebnisse des Abschnitts *Allgemeine Fragen zum SkillsLab+* in Form des Balkendiagramms in 'Abbildung 6.7'. Dieser Abschnitt folgt keinem Standardfragebogen und wird daher eigenständig,

d.h. ohne Auswertungsschema, ausgewertet. Die ausgewählten Fragen spiegeln die allgemeine Meinung zum Thema Lehre / Integration in die Lehre wider.

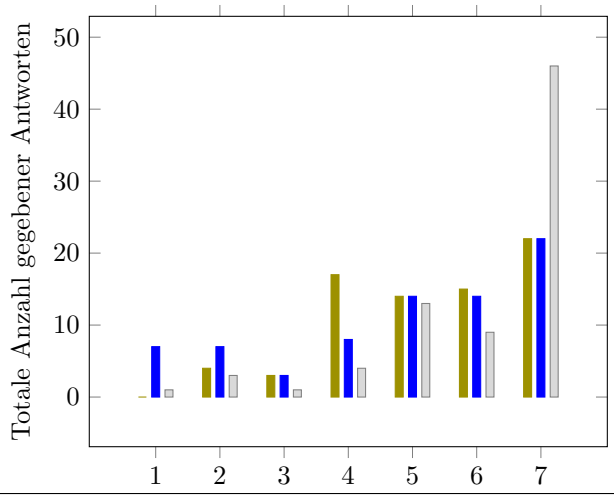


Abbildung 6.7: Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „Allgemeine Fragen SkillsLab+“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Stimme überhaupt nicht zu“ steht, 4 bedeutet „Stimme weder zu noch lehne ab“ und 7 repräsentiert „Stimme voll und ganz zu“

Vier der im Rahmen der Evaluation befragten Teilnehmer bewerteten das SkillsLab+ als nicht sehr hilfreich bei der Vor- und Nachbereitung der SkillsLab-Inhalte und ordneten sich damit im unteren Bereich der Skala ein (2 oder niedriger). Insgesamt empfanden jedoch die meisten Befragten (34 Teilnehmer) eine mittlere Unterstützung (zwischen 3 und 5) und 37 Teilnehmer bewerteten das SkillsLab+ positiv (6 oder höher), was insgesamt eine leichte Tendenz zur positiven Bewertung zeigt. Etwas kritischer beurteilten die Befragten den Einsatz des SkillsLab+ im Fernunterricht. Etwa 20% der Befragten (14 von 79) fanden den Einsatz des SkillsLab+ im Fernunterricht nicht sinnvoll (2 oder niedriger). 30% (25 von 75) hatten eine neutrale Einstellung (zwischen 3 und 5) und 45% (36 von 79) fanden den Einsatz des SkillsLab+ im Fernunterricht sinnvoll und hilfreich (6 oder höher). Besonders bemerkenswert ist, dass sich fast 70% der befragten Studierenden (55 von 79) einen Einsatz des SkillsLab+ in der medizinischen Lehre vorstellen können und nur 25% (18 von 79) eine neutrale Einstellung (zwischen 3 und 5) dazu haben, während etwa 5% (4 von 79) den Einsatz des SkillsLab+ in der medizinischen Lehre als nicht sinnvoll erachten (2 oder niedriger).

Teil E: SkillsLab+ Stationen

In diesem Teil der Evaluation werden für jede Station spezifische Fragen zum SkillsLab+ gestellt. Ziel dieser Fragen ist es, die digitalen Stationen des SkillsLab+ mit den klassischen Stationen des SkillsLab zu vergleichen und deren Umsetzung zu bewerten.

Dieser Teil des Fragebogens besteht aus allgemeinen Fragen, die für alle acht Stationen identisch sind, sowie aus stationsspezifischen Fragen, die sich auf die Umsetzung bestimmter Funktionen der jeweiligen Station beziehen. Einige Ergebnisse der Station Arm werden exemplarisch dargestellt, während die Ergebnisse aller anderen Stationen und des gesamten Fragebogens in die Gesamtauswertung einfließen.

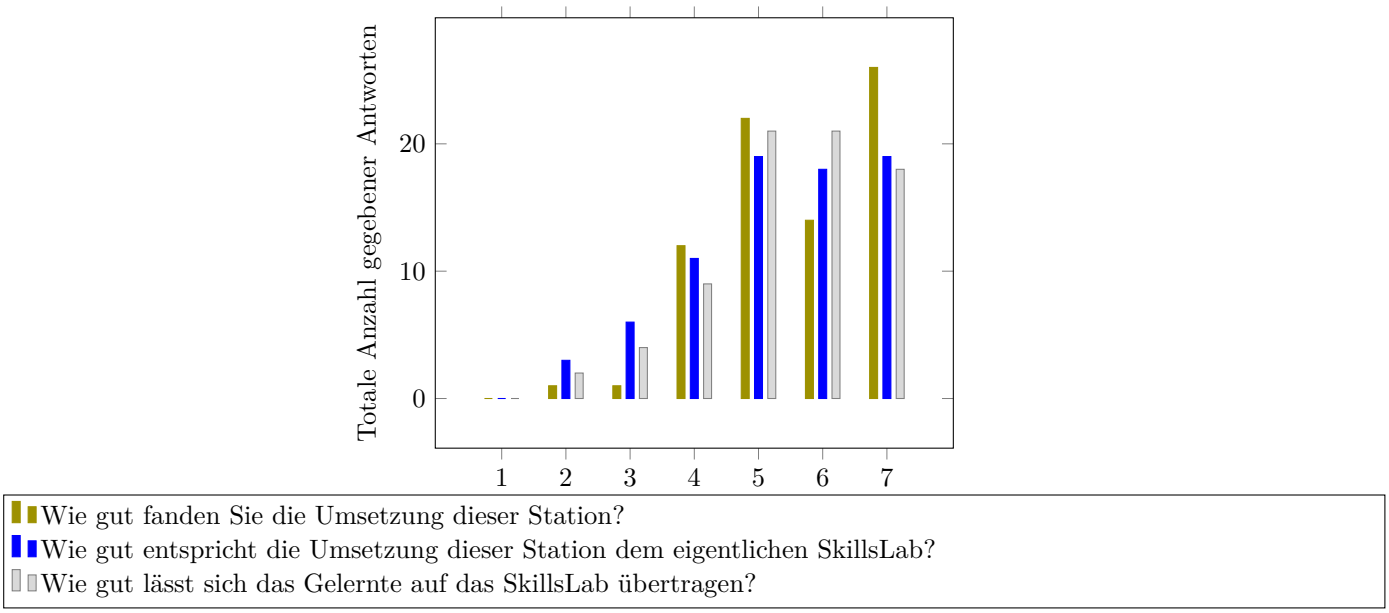


Abbildung 6.8: Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „Stationenspezifische Fragen – Arm Station“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Überhaupt nicht“ steht, 4 bedeutet „Neutral“ und 7 repräsentiert „Sehr gut“

Die ’Abbildung 6.8’ zeigt die Ergebnisse einer Umfrage mit drei Fragen zur Umsetzung der Station Arm. Die erste Frage war allgemein und lautete: „Wie gut fanden Sie die Umsetzung dieser Station?“ Die Antworten für die Station Arm waren positiv, da etwa 50% der Teilnehmer (40 von 79 mit einer Bewertung von 6 oder höher) die Umsetzung als sehr gut bewerteten. 45% (35 von 79 zwischen 3 und 5) bewerteten die Umsetzung neutral, wobei die meisten (22) auf der positiveren Seite der Skala (5 oder höher) lagen. Nur eine Person bewertete die Umsetzung als nicht gelungen (2 oder schlechter). Die zweite Frage zielte darauf ab, die digitale Station mit der entsprechenden klassischen Station im SkillsLab zu vergleichen. Auch hier war die Tendenz sehr positiv, denn insgesamt 37 Teilnehmer bewerteten die digitale Station als gute Abbildung der klassischen Armstation (6 oder höher). Weniger als 5% (3 von 79 mit 2 oder weniger) fanden sie überhaupt nicht gelungen. Die letzte Frage zielte darauf ab, wie gut die Teilnehmer die gelernten Inhalte aus dem klassischen SkillsLab übertragen konnten. 39 Teilnehmer gaben an, dass sie das Gelernte sehr gut übertragen konnten, während 34 Teilnehmer eher neutral waren und 2 im negativen Bereich lagen.

Teil F: Haptisches Feedback

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Umfrageergebnisse für den Bereich „haptisches Feedback“. Die beiden Modi, Vibrotaktiles Feedback durch den Controller der Magic Leap One (vgl. ’Abbildung 6.9’) und dem Vibrotaktilen und Force Feedback des SenseGlove Nova (vgl. ’Abbildung 6.10’).
Die ’Abbildung 6.9’ zeigt, dass die Anzahl der Antworten auf die Frage nach der Umsetzung des haptischen Feedbacks im Controller einer Normalverteilung ähnelt. 21 Teilnehmer bewerteten die Umsetzung als sehr gut (6 oder höher), 47 bewerteten sie im mittleren Bereich zwischen 3 und 5, während 5 Teilnehmer die Umsetzung als nicht gelungen ansahen. Die Ergebnisse bei der Frage nach den verschiedenen Vibrationsmustern des Reglers ähneln ebenfalls einer Normalverteilung, mit Ausnahme eines starken Anstiegs bei der sechsten Stufe der Skala. Fast 30% der Teilnehmer bewerteten die verschiedenen Vibrationsmuster mit einer 6 auf der Skala, was eine leicht positive Tendenz zeigt. Die Normalverteilung findet sich auch bei der letzten Frage zum haptischen Feedback des Magic Leap Controllers wieder, die darauf abzielt, inwieweit sich die Teilnehmer durch das haptische Feedback bei der Bedienung der Anwendung unterstützt gefühlt haben.

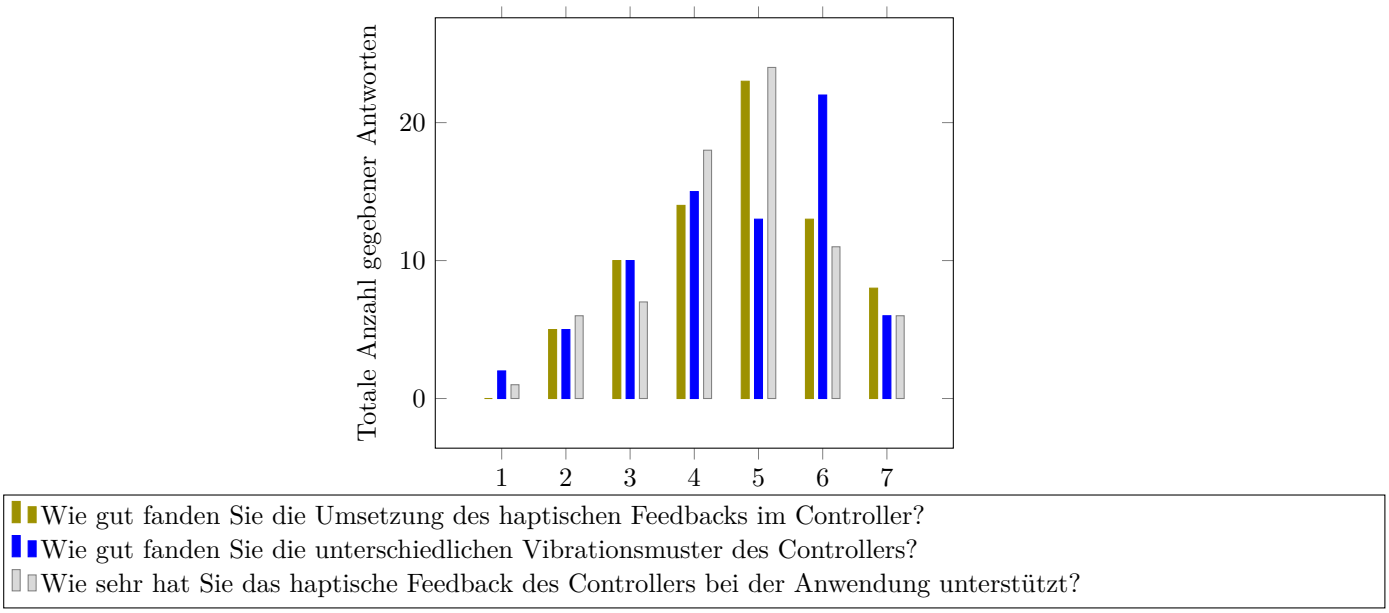


Abbildung 6.9: Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „Haptisches Feedback – Magic Leap Controller“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Überhaupt nicht“ steht, 4 bedeutet „Neutral“ und 7 repräsentiert „Sehr gut“

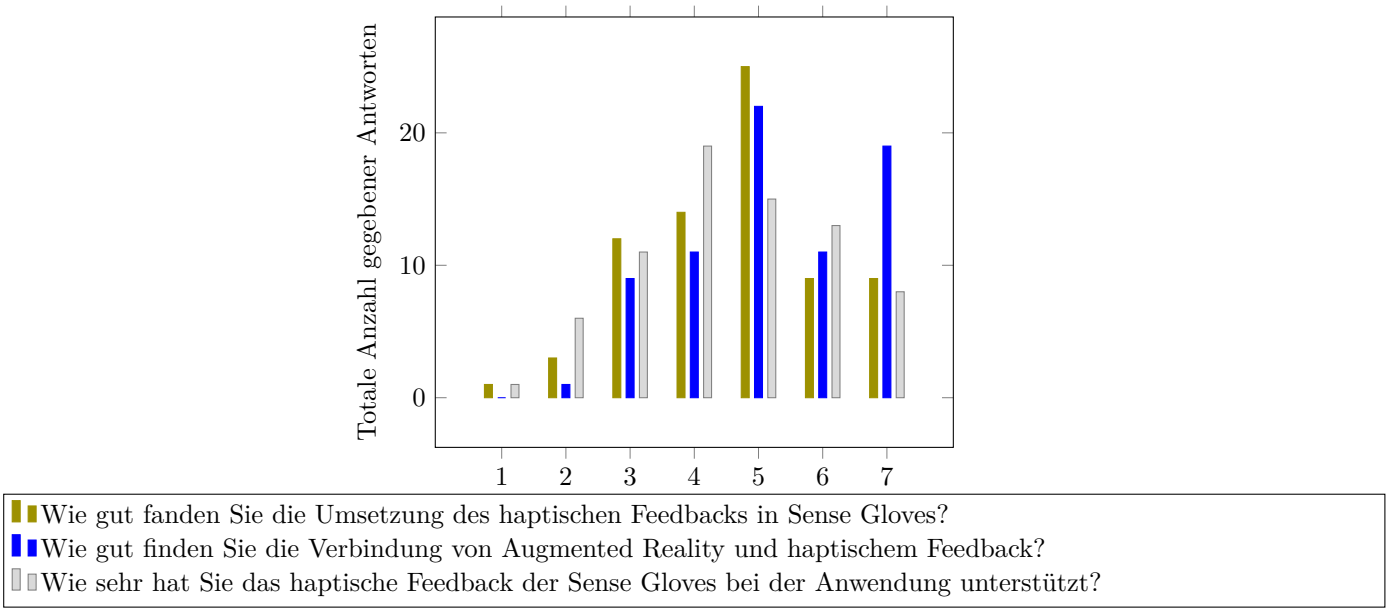


Abbildung 6.10: Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „Haptisches Feedback – SenseGlove“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Überhaupt nicht“ steht, 4 bedeutet „Neutral“ und 7 repräsentiert „Sehr gut“

Die in 'Abbildung 6.10' dargestellte Grafik zeigt, dass die Antworten auf die Frage nach der Anwendung des haptischen Feedbacks mit dem SenseGlove einer Normalverteilung ähneln. Es gibt jedoch einen signifikanten Ausreißer bei der fünften Stufe der Bewertungsskala mit 25 von 79 Antworten. Auch bei der Frage nach der Bewertung der Kombination von Augmented Reality und haptischem Feedback zeigen sich Tendenzen einer Normalverteilung, mit Ausnahmen bei der fünften und siebten Stufe, die 22 bzw. 19 Antworten erhielten. Der fünfte Schritt wird zwar als neutral bewertet, kann aber dennoch als positiv interpretiert werden. Insgesamt kann eine positive Resonanz auf die

Kombination von Augmented Reality und haptischem Feedback durch den SenseGlove festgestellt werden. Auch die Antworten zur Unterstützung durch das haptische Feedback sind annähernd normalverteilt mit einer Tendenz zum Positiven. Dies zeigt sich in 21 Antworten im oberen Bereich (6 oder höher) und 7 Antworten im unteren Bereich (2 oder niedriger).

Teil G: Feedback

In diesem Abschnitt wird das Feedback der Studienteilnehmer aus den Freitextantworten vorgestellt. Die Teilnehmer wurden gebeten, verschiedene Fragen individuell zu beantworten. Die Antworten wurden sinnvoll zusammengefasst und als Kernpunkte für die Evaluation präsentiert.
Eine weitere Frage an die Studierenden ist: „Was hat Ihnen an der Anwendung besonders gut gefallen?“. Die Kernaussagen der Antworten sind die Folgenden:

- **Die technische Umsetzung ist performant und gut gelungen** Die Studierenden loben die Durchführung und die technische Umsetzung. Vor allem die Kombination aus klassischem SkillsLab und SkillsLab+ kommt gut an.
- **Detaillierte Bilder und anatomische Modelle:** Besonders gut kam der 3D-Einblick in die Anatomie des menschlichen Körpers und die realistische Darstellung dessen an.
- **Einfache Bedienung und Handhabung** Die Abläufe werden anschaulich dargestellt und verdeutlicht. Die Studierenden heben die einfache Bedienung der Anwendung, die umfassende Vermittlung von anatomischem Wissen sowie die einfache Simulation vieler verschiedener Krankheitsbilder ohne großen Aufwand hervor.
- **Interaktive Modelle** Die Greifbarkeit und Interaktion mit den einzelnen Modellen wie beispielsweise den Spritzen stellen die Studierenden besonders heraus.
- **Gutes haptisches Feedback** Sowohl die Vibration des Magic Leap Controllers als auch das haptische Feedback des SenseGlove werden positiv hervorgehoben. Besonders hervorzuheben ist die Unabhängigkeit in der Bewegung der einzelnen Finger mit dem SenseGlove.
- **Zusätzliche Informationen durch X-Ray-Vision** Die Visualisierung der einzelnen Schichten des Körpers (Muskeln, Skelett, Blutkreislauf, etc.) hat ein sehr gutes Verständnis für die Abläufe und den menschlichen Körper vermittelt.

Die Studierenden sind mit der technischen Umsetzung der Anwendung zufrieden und loben die Performance. Besonders positiv hervorgehoben wird die detaillierte Darstellung von anatomischen Modellen und die realistische 3D-Ansicht des menschlichen Körpers. Die einfache Nutzung und Bedienung der Anwendung wird von den Studierenden positiv bewertet. Die Vermittlung von anatomischem Wissen und die Simulation von verschiedenen Krankheitsbildern wird als einfach und verständlich empfunden. Die Interaktion mit den einzelnen Modellen, insbesondere die Möglichkeit, Spritzen zu greifen, wird als positiv wahrgenommen. Das haptische Feedback sowohl des Magic Leap Controllers als auch des SenseGloves wird positiv hervorgehoben, insbesondere die Unabhängigkeit der Fingerbewegungen beim SenseGlove. Die Visualisierung der einzelnen Schichten des Körpers durch die X-Ray-Vision wird als hilfreich empfunden und hat zu einem besseren Verständnis der Abläufe im menschlichen Körper beigetragen.
Die Frage, die genauer betrachtet wurde ist: „Was können wir im SkillsLab+ noch verbessern?“. Auch hier sind im Folgenden die zusammengefassten Kernaussagen der Studierenden aufgelistet:

- **Weiterentwicklung und Verbesserung der Integration des haptischen Handschuhs** um die Steuerung der Anwendung und die Interaktion mit den Modellen noch realistischer und intuitiver zu gestalten.

- **Sprachbefehle** Diese unterteilt sich in Spracheingabe und Sprachausgabe. Spracheingabe meint dabei beispielsweise, dass der Nutzer Sprachanweisungen an den Patienten geben kann, wie *Setzen Sie sich bitte hin.*. Zum anderen meint es Sprachausgabe, die die derzeitige To-Do-Liste durch Sprachanweisungen ersetzt und der Nutzer den nächsten Schritt gesagt bekommt.

- **Animationen und Demonstration der Übungen** Diese würden zusätzlich das Verständnis für die Abläufe erhöhen und den Einstieg in die Anwendung erleichtern.

- **Erhöhung der Varianz durch echte Krankheitsbilder** Einbettung von weiteren medizinischen Stationen und realen Krankheitsbildern, um nicht nur an Musterbeispielen sondern realen Fällen lernen zu können.

Eine mögliche Weiterentwicklung wäre die Integration des haptischen Handschuhs, um die Steuerung der Anwendung und die Interaktion mit den Modellen noch realistischer und intuitiver zu gestalten. Sprachbefehle könnten die Anwendung noch benutzerfreundlicher machen. Dabei könnte der Nutzer Sprachanweisungen an den Patienten geben oder durch Sprachausgabe den nächsten Schritt gesagt bekommen. Animationen und Demonstrationen der Übungen könnten das Verständnis für die Abläufe erhöhen und den Einstieg in die Anwendung erleichtern. Durch die Einbindung von realen Krankheitsbildern und weiteren medizinischen Stationen könnte die Varianz der Anwendung erhöht werden, um nicht nur an Musterbeispielen, sondern an realen Fällen zu lernen.

6.2.1.1 POC – Machbarkeit zusammengefasst

In diesem Abschnitt wird anhand der vorherigen Präsentation der Umfrageergebnisse (in Abschnitt 'Abbildung 6.2.1') eine Zusammenfassung und abschließende Interpretation präsentiert. Zusammenfassend haben die meisten der teilnehmenden Studierenden wenig bis keine Erfahrung mit AR-Anwendungen und nutzen diese nicht regelmäßig. Sie sind auch nicht vertraut mit der Bedienung von AR-Anwendungen. Die meisten Studierenden fanden es positiv, dass sie Objekte und menschliche Modelle aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten konnten und gewöhnten sich leicht an die Bedienung der Steuergeräte. Ein Großteil der Teilnehmenden war sich der realen Umgebung bewusst und achtete darauf. Dies ist positiv zu bewerten, da das Auftreten von Motion Sickness dadurch gehemmt wird. Die Benutzer haben genügend sichtbare Referenzpunkte im realen Raum, was zu unterschiedlichen Sinneswahrnehmungen führt.
Die Auswertung der allgemeinen Fragen zum SkillsLab+ ergab, dass die Studierenden sich in der Vor- und Nachbereitung der medizinischen Inhalte des SkillsLab unterstützt fühlten. Obwohl es kritische Stimmen zum Einsatz des SkillsLab+ in der Distanzlehre gab, überwiegt der positive Anteil, und es scheint denkbar, dass das SkillsLab+ generell in der Distanzlehre eingesetzt werden kann, damit jeder in seinem eigenen Tempo und individuell von Zuhause aus lernen kann. Die Studierenden reagierten positiv auf den möglichen Einsatz des SkillsLab+ in der Medizinlehre. Es wird vermutet, dass die Studierenden einen geführten und betreuten Einsatz des SkillsLab+ in der Medizinlehre bevorzugen, mit einer Aufsichtsperson, die die Durchführung begleitet. Möglicherweise liegt dies daran, dass viele Studierende keine Vorkenntnisse im Umgang mit AR-Technologien haben und es daher für sie schwierig erscheint, sich zu Hause eigenständig mit der Technik auseinanderzusetzen. Es ist notwendig, diese These im weiteren Verlauf entsprechend weiter zu verfolgen und zu untersuchen.
Die Bewertung der stationspezifischen Fragen ergibt größtenteils ein positives Feedback. Ziel war es, die digitalen Stationen des SkillsLab+ und die klassischen Stationen des SkillsLab zu vergleichen und die Umsetzung der einzelnen Features zu bewerten. Die Fragen wurden dabei individuell auf die Umsetzung jedes Features der jeweiligen Station abgestimmt. Im Allgemeinen sind die digitalen Stationen und das SkillsLab+ bei den Studierenden gut angekommen. Es sollte jedoch erwähnt werden, dass das Ziel der Projektgruppe bei der Entwicklung eines Proof of Concept lag. Daher ist die Vielfalt und der Realismus jeder einzelnen Station und der gesamten Anwendung noch ausbaufähig und nicht vollständig ausgereift.

Es gibt unterschiedliche Meinungen zum Vibrationsfeedback des Magic Leap Controllers. Die verschiedenen Muster und Intensitäten der Vibration sollen helfen, Anomalien oder Unterschiede in Strukturen zu erkennen. Generell bevorzugen die Studierenden den haptischen Handschuh gegenüber der Steuerung mit dem Controller. Dies liegt vermutlich daran, dass die Bedienung mit dem Handschuh realitätsnäher, intuitiver und damit insgesamt besser ist, insbesondere bei Stationen wie der Abdomen-Station oder der Brust-Station, wo das Abtasten der menschlichen Modelle wichtig ist. Die Antworten auf die Freitextfragen der Studierenden zeigen, dass es weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Anwendung gibt. Zusammenfassend hat den Studierenden die AR-Anwendung SkillsLab+ gut gefallen, und sie haben vom spielerischen Lernen und dem einfachen Einstieg in die Anwendung profitiert, was dazu beigetragen hat, dass sie die medizinischen Inhalte und die Diagnose- und Therapieabläufe des SkillsLab besser verstehen.

6.2.2 Auswertung des zweiten Demonstrators

Die zweite Studie wurde ebenfalls mit Hilfe eines Fragebogens nach einer Demonstration der Anwendung durchgeführt. Ziel dieser Studie ist wiederum eine Machbarkeitsstudie, diesmal jedoch, im Gegensatz zur ersten, aus Sicht der späteren Anwender, der Ärzte. Diese sollen durch die Beantwortung des Fragebogens herausfinden, ob die Arbeit mit der AR-Anwendung für ihren späteren Arbeitsalltag geeignet ist. Die Anwendung soll den Umgang mit modernen Techniken im Arbeitsalltag erleichtern, da das dazu notwendige Wissen über die Handhabung/Bedienung bereits erlernt oder in ähnlicher Form dargestellt wurde.

Zu Beginn des Fragebogens (Teil A) wurden allgemeine Angaben der Teilnehmer abgefragt, um die Antworten besser zueinander in Beziehung setzen und Tendenzen bzw. Zusammenhänge aufzeigen zu können. Bei den Teilnehmern handelte es sich um Ärzte, die sich etwa gleichmäßig auf die Altersgruppen 26 bis 34 Jahre und 35 bis 44 Jahre verteilten. Einzelne Teilnehmer gehörten der Altersgruppe > 45 Jahre an, so dass die Teilnehmer ein gutes Spektrum der praktizierenden Ärzte repräsentieren. Auch die Verteilung zwischen männlichen und weiblichen Teilnehmern ist in etwa gleich. Die Fachgebiete der Ärzte sind mit Neurologie, Neurochirurgie, Onkologie und Allgemeinmedizin etwas breiter gestreut. Außerdem nahmen einige Krankenpfleger und Krankenschwestern der Intensivstation an der Studie teil.

Fragenblock 1

Der erste Fragenblock (A4) „Schätzen Sie bitte Ihre Vorerfahrungen in den folgenden Bereichen ein“ dient der Profilierung der Teilnehmer hinsichtlich Technikaffinität und Vorerfahrungen. In einigen Fällen (9 von 31) waren die Teilnehmer bereits mit Augmented Reality-Anwendungen vertraut und 7 kannten auch medizinische AR-Anwendungen. Ein Anwendungsfeld könnte die Neurochirurgie sein, in der AR zur Operationsplanung und intraoperativ eingesetzt wird.

Beim Umgang mit haptischem Feedback sieht es hingegen anders aus: 7 der Teilnehmer mit einem Wert >3 gaben überhaupt an, schon einmal Kontakt und Erfahrungen mit haptischem Feedback gemacht zu haben, und der Umgang mit Datenhandschuhen ist für die Teilnehmer Neuland, denn fast alle (5 von 31 antworteten mit Nein) gaben an, noch nie mit Datenhandschuhen zu tun gehabt zu haben.

Die letzten beiden Fragen des Fragebogens beschäftigen sich mit der medizinischen Ausbildung und dem Kenntnisstand über das SkillsLab. Hier zeigt sich, dass die jüngeren Teilnehmer tendenziell mehr mit digitalen Lernmethoden gearbeitet haben (20 von 25 der Altersgruppe <45) als die höheren Altersgruppen (2 von 6 der Altersgruppe >45). Die anschließende Frage nach dem Wissen über das SkillsLab bestätigt diesen Eindruck, da die Erfahrungen der Jüngeren noch nicht so weit zurückliegen wie die der Älteren. Das Wissen über das SkillsLab sowie die dort vermittelten Lehrmethoden sind noch etwas präsenter.

Fragenblock 1

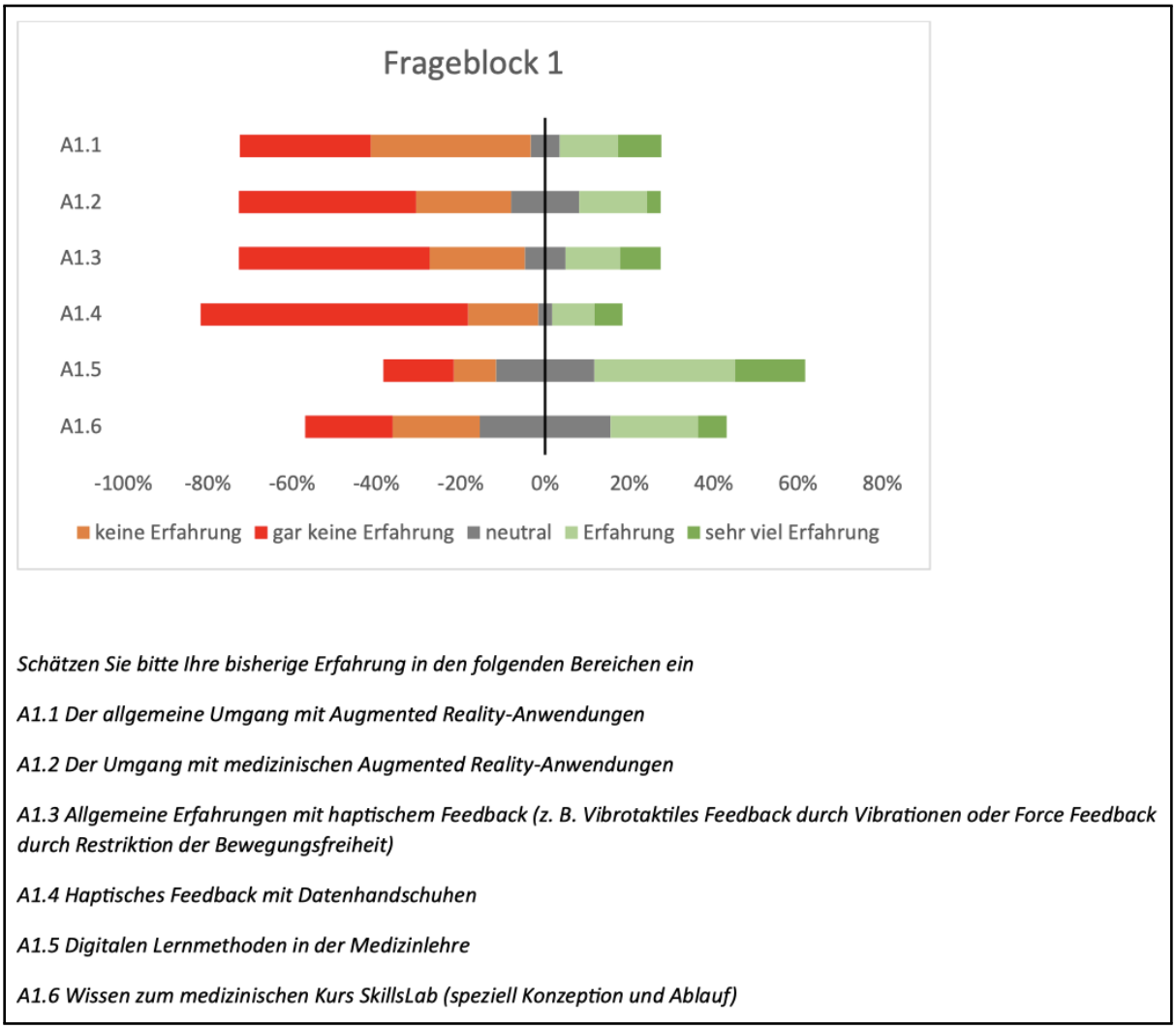


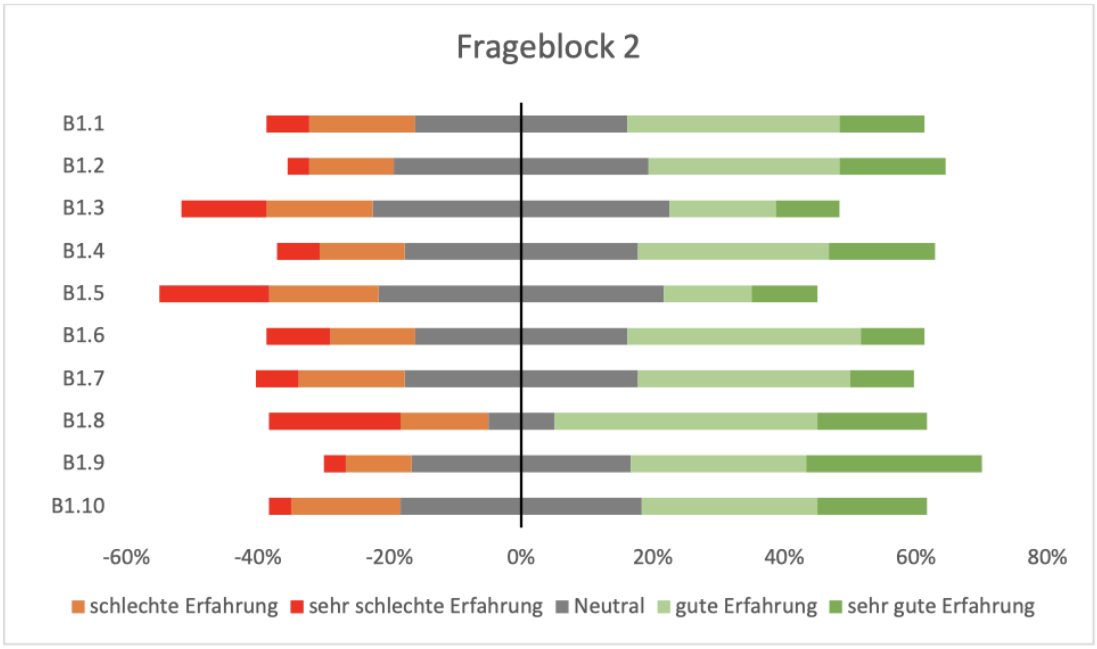
Abbildung 6.11: Fragenblock 1: „Schätzen Sie bitte Ihre bisherige Erfahrung in den folgenden Bereichen ein.“

Fragenblock 2

Nachdem die allgemeinen Daten und der Hintergrund der einzelnen Teilnehmer abgefragt wurden, beginnt in Teil B des Fragebogens die Bewertung der Anwendung. Die erste Frage, wie gut die Ereignisse kontrolliert werden konnten, wurde sehr gemischt beantwortet. Die Ergebnisse zeigen einen Mittelwert von 3,3 und einem Median von 3. Dies deutet auf eine unterschiedliche Wahrnehmung der Erwartungen der Teilnehmer hin. Wahrscheinlich haben die Teilnehmer einen realistischeren Umgang mit den virtuellen Elementen erwartet. Die Ergebnisse der ersten Frage dieses Themenblocks in Kombination mit den Ergebnissen der folgenden Fragen („Wie reagierte die virtuelle Umgebung/die virtuellen Elemente auf die von Ihnen initiierten (oder durchgeführten) Aktionen? “ und „Wie natürlich erschien Ihnen die Interaktion mit der virtuellen Umgebung/den virtuellen Elementen?“) mit einem Mittelwert von 3,4 und 2,9 und einem Median von 3, so wird die Hypothese bestätigt.

Die nächsten drei Fragen bezogen sich auf die Interaktion mit den virtuellen Objekten, wie gut sich diese durch den Raum bewegen ließen und wie gut die Ergebnisse vorhersehbar waren. Alle diese Fragen wurden ähnlich und vergleichsweise niedrig mit Mittelwerten um 2,8 und Medianwerten um 3 bewertet. Eine Erklärung dafür könnte das frühe Stadium des haptischen Feedbacks und das ungewohnte Gefühl beim Greifen der virtuellen Objekte sein. Diese

These wird in Teil C wieder aufgegriffen.
Die Fragen nach der Beanspruchung der Sinne und der Konzentration auf die Umgebung und die Aufgabe bezogen sich auf die Immersion der Teilnehmer. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass es Teilnehmer gibt, die sich voll und ganz auf die Anwendung einlassen konnten und mit 4 und 5 (13 von 31) die höchste Antwort gaben, aber auch Teilnehmer, die eher skeptisch waren und mit weniger als 3 (7 von 31) antworteten. Dies kann auf das individuelle Empfinden der Teilnehmer zurückgeführt werden. Die Teilnehmer mit mehr Vorwissen empfanden die Anwendung tendenziell als weniger immersiv, so dass hier von einem Mangel an Erfahrung und Vergleichbarkeit ausgegangen werden kann.
Die letzten beiden Fragen in Teil A bezogen sich auf die Steuerung der Anwendung und die Konsistenz der Informationen (visuell, auditiv und taktil). Diese Fragen werden zusammen bewertet, da die Ausgabe von Informationen immer eine Reaktion auf die Eingaben des Benutzers ist. Die Bewertungen dieser Fragen liegen im mittleren Bereich (mit Mittelwerten von 3,1 für die erste und 2,7 für die zweite Frage und einem Median von 3 bei beiden Fragen). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Bedienkonzept möglicherweise überdacht werden muss. Der derzeitige Ansatz sieht vor, dass die Handgriffe denen in der Praxis nachempfunden sind. Möglicherweise ist der Detaillierungsgrad nicht hoch genug, so dass kleine Abweichungen als störend empfunden werden und die Immersion unterbrechen. Ein weiterer Punkt könnte die generelle Interaktion mit einem Datenhandschuh sein. Das Gefühl, mit einem Datenhandschuh zu arbeiten, ist definitiv anders als mit sterilen Einweghandschuhen. Sie sind größer und auch sperriger. Vor allem das Gewicht ist ein entscheidender Faktor, der sich vor allem bei längerem Gebrauch negativ bemerkbar macht. Dies geht auch aus einigen Angaben in Feld B2 (weitere Anmerkungen und Feedback) hervor. Die Kommentare gelten sinngemäß: Der visuelle Eindruck würde durch eine bessere Verschmelzung von Virtuellem und Realem verbessert.



Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit der Anwendung ein:

B1.1 Wie sehr konnten Sie die Ereignisse kontrollieren?

B1.2 Wie reagierte die virtuelle Umgebung/die virtuellen Elemente auf die von Ihnen initiierten (oder durchgeführten) Aktionen?

B1.3 Wie natürlich erschienen Ihnen Ihre Interaktionen mit der virtuellen Umwelt/den virtuellen Elementen?

B1.4 Wie überzeugend war Ihr Gefühl, dass sich virtuelle Elemente durch den Raum bewegen?

B1.5 Inwieweit stimmten Ihre Erfahrungen in der virtuellen Umgebung/mit den virtuellen Objekten mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?

B1.6 Konnten Sie vorhersehen, was als nächstes als Reaktion auf die von Ihnen durchgeführten Aktionen passieren würde?

B1.7 Wie stark wurden Ihre Sinne bei diesem Erlebnis beansprucht?

B1.8 Gab es Momente während der Erfahrung der virtuellen Umgebung, in denen Sie sich vollständig auf die Aufgabe oder die Umgebung/den virtuellen Elementen konzentriert haben? Konnten Sie ausblenden, dass sie mit virtuellen Elementen gearbeitet haben?

B1.9 Wie leicht fiel es Ihnen, sich an die Steuergeräte zu gewöhnen, die zur Interaktion mit der virtuellen Umgebung/den virtuellen Elementen verwendet wurden?

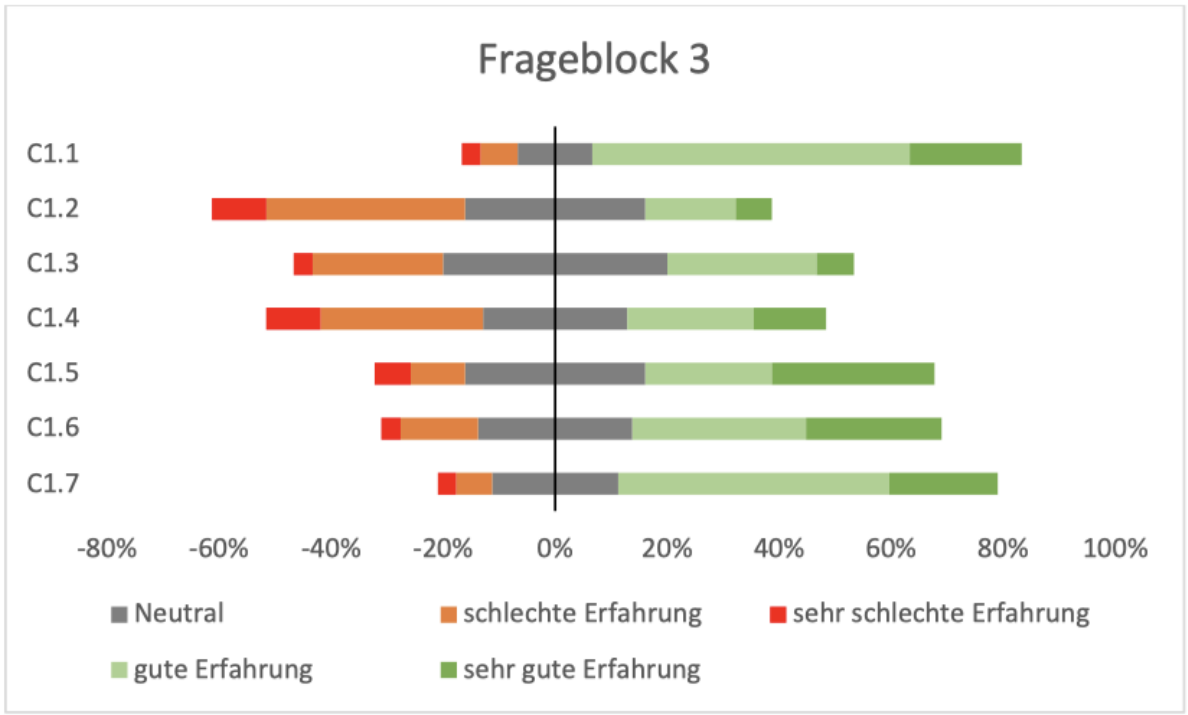
B1.10 Waren die Informationen, die durch die verschiedenen Sinne in der virtuellen Umgebung vermittelt wurden (z. B. Sehen, Hören, Tasten), konsistent?

Abbildung 6.12: Fragenblock 2: „Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit der Anwendung ein.“

Fragenblock 3

Der dritte Teil des Fragebogens (Teil C) befasst sich konkret mit dem haptischen Feedback durch den Datenhandschuh. Zunächst wird mit der ersten Frage die Basis ohne haptisches Feedback mit der Frage „Wie sehr haben Sie sich auf das visuelle Feedback verlassen?“, erfasst. Hier antworteten die Teilnehmer mit einem Mittelwert von 3,9 und 4 im Median, also sehr hoch. Dies bedeutet, dass zumindest die AR-Anwendung der Übung sinngemäß folgt und korrekt auf den Benutzer reagiert.

Der Eindruck, dass das haptische Feedback die Interaktion mit physischen Objekten nicht realistisch wiedergeben kann, bestätigt sich bei der nächsten Frage. Mit einem Durchschnittswert von 2,8 schneidet das haptische Feedback vor allem im Vergleich zum visuellen Feedback schlechter ab und ist verbesserungswürdig. Ein Vergleich zwischen der Interaktion mit einem virtuellen Objekt und seinem physischen Pendant lässt die Ärzte vermutlich zu dem Schluss kommen, dass die Technik noch nicht in der Lage ist, das Gefühl des physischen Objektes zu reproduzieren.
Der letzten Fragen in diesem Teil des Fragebogens befasst sich mit der allgemeinen Erfahrung mit Haptik und dem Vertrauen in die Technik, dass sie bei der Bewältigung der Aufgabe, in diesem Fall der Durchführung einer SkillsLab-Station, helfen kann. Insgesamt liegt die Erfahrung mit dem haptischen Feedback mit einem Mittelwert von 3,2 und einem Median von 3 im mittleren Bereich. Bei der Frage nach der Kontaktkraft ergibt sich mit 3,4 ein positiver Wert. Das Gefühl des Widerstandes konnte aus Sicht der Ärzte relativ gut vermittelt werden.
Dies steht in einem gewissen Kontrast zu den eher positiven Ergebnissen der ersten Studie. Dennoch fiel es den Teilnehmern relativ leicht, die Aufgabe zu lösen, was darauf schließen lässt, dass sie die gestellten Aufgaben verstanden und mit den gegebenen Möglichkeiten eine mögliche Lösung gefunden haben. Die Aufgaben waren machbar und nicht zu abstrakt.
Die letzte Frage „Wie einfach war es, die Aufgabe zu bewältigen?“ wurde mit 3,8 im Druchschnitt und mit 4 im Median bewertet. Dies deutet auf eine gute Menüführung und ein plausibles Feedback, d.h. eine plausible Reaktion auf die Aktionen der Probanden hin.



Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit dem haptischen Feedback der Anwendung ein:

C1.1 Wie sehr haben Sie sich auf das visuelle Feedback verlassen?

C1.2 Wie realistisch war die haptische Rückmeldung?

C1.3 Inwieweit waren das haptische und das visuelle Feedback kongruent (stimmten überein)?

C1.4 Wie einfach war es, die Kontaktkraft zu kontrollieren?

C1.5 Wie positiv war Ihre Erfahrung im Allgemeinen?

C1.6 Wie groß war Ihr Vertrauen in das haptische Feedback?

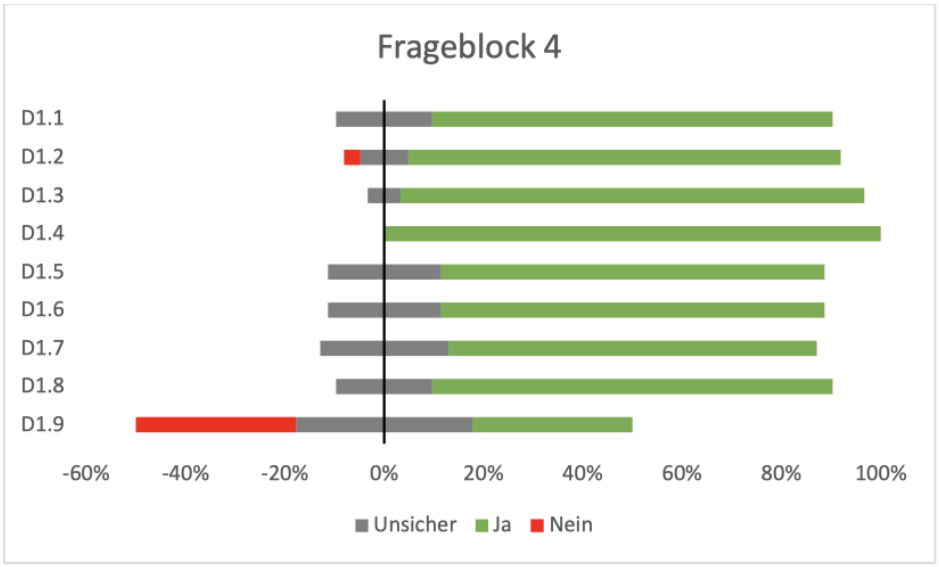
C1.7 Wie einfach war es, die Aufgabe zu bewältigen?

Abbildung 6.13: Fragenblock 3: „Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit dem haptischen Feedback der Anwendung ein.“

Fragenblock 4

Der letzte Teil des Fragebogens bezieht sich auf haptisches Feedback in der medizinischen Ausbildung und die Übertragbarkeit in den Arbeitsalltag. Dieser Block soll eher den Nutzen und die Anwendbarkeit postulieren, als die Anwendung zu bewerten. Neben der spezifischen Integrierbarkeit des SkillsLab+ geht es allgemein um den Einsatz dieser neuen digitalen Methoden und deren Nutzen für den späteren Arbeitsalltag eines Arztes. Da diese Fragen in einer dreistufigen Skala (ja/unsicher/nein) zu beantworten waren und die Fragen durch Aussagen ersetzt wurden, erfolgt die Auswertung etwas anders und zusammenfassender. Sofern nicht anders angegeben, beziehen sich die Angaben immer auf die Anzahl der mit „Ja“ abgegebenen Antworten.

Der erste Fragenblock begann mit der Aussage „Ich glaube, dass Augmented Reality mit haptischem Feedback...“ und die Teilnehmer antworteten auf die folgenden Aussagen wie folgt: Auf die Aussage, dass AR mit haptischem Feedback in der medizinischen Lehre eingesetzt werden sollte und den Lernerfolg positiv beeinflusst, wurde sehr stark zugestimmt (25 von 31 mit Ja und 6 mit Unsicher), zusätzlich dazu wurde die nächste Frage, ob es anatomisches Wissen besser vermitteln kann als herkömmliche Methoden, ebenfalls positv beantwortet (26 mit Ja, 4 mit Unsicher von 31). Dies könnte darauf hindeuten, dass sich die Teilnehmer gut vorstellen können, in Zukunft auf bereits etablierte Methoden zu aufzubauen und zusätzlich mit den neuen digitalen AR-Methoden zu lernen. Diese Vermutung bestätigt sich, wenn die Frage, ob es bestehende Lernkonzepte erweitern und verbessern kann, mit 30 von 31 Ja-Stimmen beantwortet wird. Die neue Möglichkeit, Wissen in 3D direkt im Blickfeld des Nutzers so zu vermitteln, dass er es auch anfassen und damit natürlich interagieren kann, sollte dennoch als Erweiterung und nicht als Ersatz der bisherigen Methoden verstanden und genutzt werden.
Um dieses Argument zu untermauern, werden die Antworten auf die weiteren Fragen dieses Fragenblocks dargestellt. Die Fragen zur Verbesserung in Richtung Studierendenzentrierung („die Stationen im SkillsLab virtuell abbilden können, so dass ein individuelles (studierendenzentriertes) Lernen möglich ist.“), zu den Möglichkeiten der Distanzlehre („das SkillsLab digitalisieren kann, so dass die Studierenden von zu Hause aus lernen können“), zur besseren Vorbereitung („den Studierenden helfen kann, sich besser auf das SkillsLab vorzubereiten. “) und Nachbereitung („Studierenden helfen kann, die Lerninhalte des SkillsLab besser nachzuarbeiten und das Gelernte zu festigen“) wurden sehr positiv bewertet (jeweils mindestens 23 von 31) und die Teilnehmer können sich diese Lernszenarien gut vorstellen.
Um noch einmal auf das Argument des Ersatzes des SkillsLab zurückzukommen: Die letzte Aussage („mit dem SkillsLab+ kann man das physische SkillsLab ersetzen.“) wurde als einzige deutlich negativer beantwortet als die anderen (nur 10 mal ja und 10 mal nein). Dies könnte auf die tatsächliche Umsetzung zurückzuführen sein, die durch die derzeitige Hard- und Software begrenzt ist. Dies könnte sich mit fortschreitender Technologie ändern.



Dieser Teil befasst sich mit der Frage nach dem Mehrwert einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung für Studierende.

Geben Sie bitte Ihre Meinung zu den folgenden Aussagen ab:

D1.1 in der Medizinlehre eingesetzt werden sollte und den Lernerfolg positiv beeinflusst.

D1.2 in medizinischen Anwendungen anatomisches Wissen (z. B. die Lage und Position von Organen, Knochen und anatomischen Strukturen) besser vermitteln kann, als herkömmliche Methoden (z. B. physische Modelle, Bücher etc.)

D1.3 und die Möglichkeit, die Software nachträglich erweitern zu können, viel Potenzial bietet.

D1.4 bestehende Lernkonzepte erweitern und verbessern kann.

D1.5 die Stationen im SkillsLab virtuell abbilden können, sodass ein individuelles Lernen (studierendenzentriert) möglich ist.

D1.6 das SkillsLab digitalisieren kann, sodass Studierende von zu Hause aus lernen können.

D1.7 Studierenden helfen kann, sich besser auf das SkillsLab vorzubereiten.

D1.8 Studierenden helfen kann, die Lerninhalte des SkillsLabs besser nachzubearbeiten und das gelernte Wissen zu festigen.

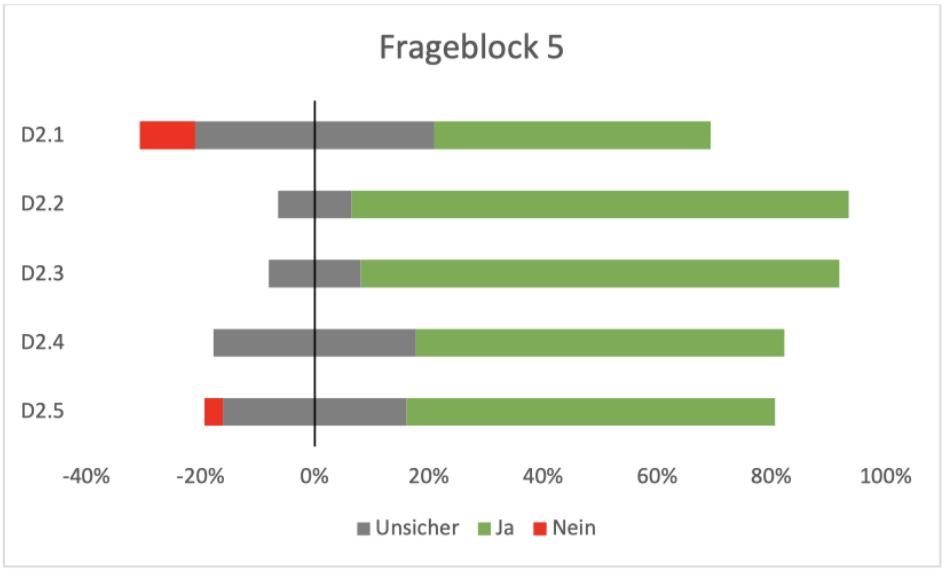
D1.9 mit dem SkillsLab+ das physische SkillsLab ersetzen kann.

Abbildung 6.14: Fragenblock 4: „Mehrwert einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung für Studierende."

Fragenblock 5

Der zweite Fragenblock und damit der Abschluss der Auswertung der zweiten Studie endet mit folgenden Aussagen und wiederum einer dreistufigen Antwortskala: „Ich denke, dass das vermittelte Wissen einer medizinischen Augmented Reality (wie SkillsLab+) mit haptischem Feedback..."

Ein großer Anteil der Teilnehmer ist davon überzeugt (15 von 31 Teilnehmern), dass das vermittelte Wissen in den Arbeitsalltag eines Arztes übertragen werden kann und auch den Arbeitsalltag erleichtern bzw. den Umgang mit der Technik verbessern kann (27 von 31 Teilnehmern). Dies könnte dadurch geschehen, dass die Einarbeitungszeit in neue Technologien verkürzt wird, die Bedienung bereits im Studium erlernt wird und nicht von Grund auf neu erlernt werden muss (20 von 31 stimmen dieser Aussage zu). Eine letzte Schlussfolgerung, die sich aus den Ergebnissen des Fragebogens ziehen lässt, ist, dass die Ärzte der Aussage zustimmen, dass die Ausbildung die Hemmschwelle vor der Nutzung neuer Technologien senken kann, also die Technologieoffenheit fördern kann (20 von 31).



Dieser Teil befasst sich mit der Frage nach der Übertragbarkeit des in einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung gelernten Wissens in den zukünftigen Alltag.

Geben Sie bitte Ihre Meinung zu den folgenden Aussagen ab:

D2.1 ... in den Arbeitsalltag eines Arztes/einer Ärztin übertragen werden kann.

D2.2 ... den Studierenden besser auf die Arbeit und den Einsatz neuer Technologien vorbereitet.

D2.3 ... die Hemmung vor dem Gebrauch neuer Technologien reduzieren kann.

D2.4 ... den Arbeitsalltag erleichtert/den Gebrauch der Technik verbessern kann.

D2.5 ... die Einarbeitungszeit in neue Technologien reduzieren kann.

Abbildung 6.15: Fragenblock 5: „Übertragbarkeit des in einer medizinischen Augmented RealityAnwendung gelernten Wissens in den zukünftigen Alltag.“

6.2.2.1 POC – Machbarkeit zusammengefasst

Die Ergebnisse der zweiten Studie zeigen ein ähnliches Bild hinsichtlich der Anwendbarkeit und Zukunft von Augmented Reality und haptischem Feedback in medizinischen Lehranwendungen. Obwohl die Ärzte tendenziell weniger Kontakt mit AR und haptischem Feedback hatten, halten sie es für sinnvoll, diese Technologien in die Lehre zu integrieren. Der aktuelle Stand der Technik erlaubt noch keine so realitätsnahe Implementierung, die das physische SkillsLab ersetzen könnte. Dennoch ist es ein richtiger und wichtiger Schritt in Richtung einer digitalen und technologieoffenen Medizin. Im Folgenden werden die Hintergründe der Teilnehmer und die Ergebnisse der Studie zusammengefasst und verkürzt dargestellt.

Die Teilnehmer dieser Studie kamen aus unterschiedlichen Disziplinen und gehörten verschiedenen Altersgruppen an. Ebenso war ihr Kenntnisstand bezüglich Augmented Reality, insbesondere in medizinischen Anwendungen, unterschiedlich und es gab wenig bis keine Berührungspunkte mit haptischem Feedback, insbesondere mit Datenhandschuhen.

Die Augmented Reality-Anwendung SkillsLab+ konnte das reale SkillsLab überzeugend virtuell abbilden, die Teilnehmenden konnten adäquat mit den virtuellen Objekten umgehen und die Lernsituation erwies sich als aufgabenadäquat. Da der Fokus dieser Studie auf dem Zusammenspiel von Augmented Reality und haptischem

Feedback lag, wurden verschiedene Aufgaben im SkillsLab durchgeführt, um die Auswirkungen dieser Kombination auf die Wahrnehmung und Interaktion der Teilnehmer zu untersuchen. Die Ergebnisse zeigen gute Ansätze für den Einsatz beider Technologien und Weiterentwicklungspotential, insbesondere im Bereich der Kontextsensitivität. Das Gefühl des Widerstandes wird durch das Zurückhalten der Finger und nicht durch den Druck eines Objektes ausgelöst, was sich derzeit noch anders anfühlt. Das haptische Feedback sollte in dieser Form nicht zu spezifisch erwartet werden. Es sollte nicht erwartet werden, dass das Gefühl in den Händen beim Greifen einer virtuellen Desinfektionsflasche dasselbe ist wie bei einer physischen Desinfektionsflasche, während die Kontaktkraft, d. h. die reine Unterscheidung zwischen Widerstand und keinem Widerstand, überzeugend ist. Diese Unterschiede in der Darstellbarkeit von Objekten sind mit der heutigen Hardware noch nicht möglich. Diese These wird vor allem durch die Ergebnisse der Fragen zur Interaktion mit den virtuellen Objekten aus Teil B und die Ergebnisse aus Teil C bestätigt. Alle virtuellen Objekte werden in ihrer physischen Form im ärztlichen Alltag benötigt. Sie sind genau die richtigen, um einen Vergleich zu haben und um diesen Vergleich bewerten zu können.
Ebenso wertvoll für die Bewertung sind die Meinungen zu den Fragen nach dem Mehrwert für die medizinische Lehre. Die Ergebnisse zum positiven Einfluss auf die medizinische Lehre, insbesondere bei der Vor- und Nachbereitung, sprechen für eine Integration von Augmented Reality in die allgemeine Lehre. Dies ist explizit als Integration und nicht als Substitution gedacht, da der aktuelle Stand der Technik nur dies rechtfertigt. Dennoch könnte in (Pandemie-)Zeiten, in denen Präsenzlehre nicht oder nur eingeschränkt möglich ist, auf diese Methoden zurückgegriffen werden, so dass die praktische Lehre weiterhin gewährleistet werden kann.
Darüber hinaus wurden bestimmte Designprinzipien identifiziert, die bei der Integration dieser Technologien berücksichtigt werden sollten, um optimale Ergebnisse zu erzielen. Die Aktionen sollten so realitätsnah wie möglich sein, um die spätere Übertragbarkeit in den Alltag zu erleichtern. Die Teilnehmer sind davon überzeugt, dass eine spätere Integration des Wissens in den Arbeitsalltag möglich ist und dass das Training auf den Umgang mit neuen (digitalen) Methoden vorbereiten und die Einarbeitungszeit verkürzen kann.
Die Studie liefert somit wertvolle Erkenntnisse für die zukünftige Entwicklung und Anwendung von Technologien, die die physische und virtuelle Welt verschmelzen lassen, um die Vorteile beider Welten zu nutzen.

6.2.3 Auswertung des dritten Demonstrators

Die folgende Auswertung beschäftigt sich mit der Aufbereitung der Daten zum Testverfahren des SkillsLab+, welches am 09.06.2023 im Rahmen einer Studienleistung an der Universität Siegen im Studiengang Digital Biomedical and Health Sciences durchgeführt wurde. Die Studierenden konnten das SkillsLab+ testen und wurden anschließend gebeten, einen Fragebogen auszufüllen.
Der Fragebogen gliedert sich in sechs Frageblöcke, die mit Hilfe eines Balkendiagramms erläutert und zusammengefasst werden. Dieser Diagrammtyp wurde gewählt, da er für die Art der Fragen am besten geeignet ist, da er keine klaren Aussagen macht und die Ergebnisse visuell darstellt. Die Ergebnisse werden eher als Korrelationen denn als Kausalzusammenhänge dargestellt. Die Interpretation der Ergebnisse liefert die Grundlage für die Ableitung von Trends oder Tendenzen, die wiederum die Basis für weitere Untersuchungen bilden können.
Bei vier von sechs Fragenblöcken wurde die für den IPQ typische Fragetechnik verwendet, bei der die Zustimmung zu den Fragen auf einer Skala von eins bis fünf angegeben wird. Um die Diagramme übersichtlicher zu gestalten, wurde eins mit ßtimme überhaupt nicht zuünd fünf mit ßtimme voll und ganz zu"gleichgesetzt. Die restlichen beiden Fragenblöcke konnten mit ja/nein/unsicher beantwortet werden. Die Antwortmöglichkeiten sind in den Diagrammen dargestellt.
Der Trennstrich steht für eine neutrale Meinung oder Aussage (bei 0%). Die Antworten auf der linken Seite stehen für ein negatives Gefühl oder eine eher negative Meinung, die Antworten auf der rechten Seite für eine positive Meinung. Die Prozentzahlen mit positivem Vorzeichen stehen für die Gesamtzahl der positiven Antworten, d.h. Antworten größer 3, die Prozentzahlen mit negativem Vorzeichen für Antworten kleiner 2. Die Gesamtlänge der

einzelnen Diagrammlinien entspricht immer 100% der in diesem Bereich abgegebenen Antworten.

Insgesamt wurden 32 Studierende befragt, von denen sich zehn dem männlichen und 22 dem weiblichen Geschlecht zugehörig fühlen. Das Alter liegt bei 31 Studierenden unter 25 Jahren (17 bis 25 Jahre) und bei einem Studierenden zwischen 26 und 34 Jahren, alle Studierenden befinden sich im zweiten Fachsemester und die Befragung wurde in deutscher Sprache durchgeführt.

Im Folgenden werden die Auswertungen der Fragenblöcke aufgeschlüsselt und einzeln betrachtet. Außerdem werden die Zusammenhänge und die Auswirkungen auf den SkillsLap+ beschrieben. Es folgen die Ergebnisse der Nachbetrachtung und eine abschließende Zusammenfassung der Ergebnisse.

Fragenblock 1

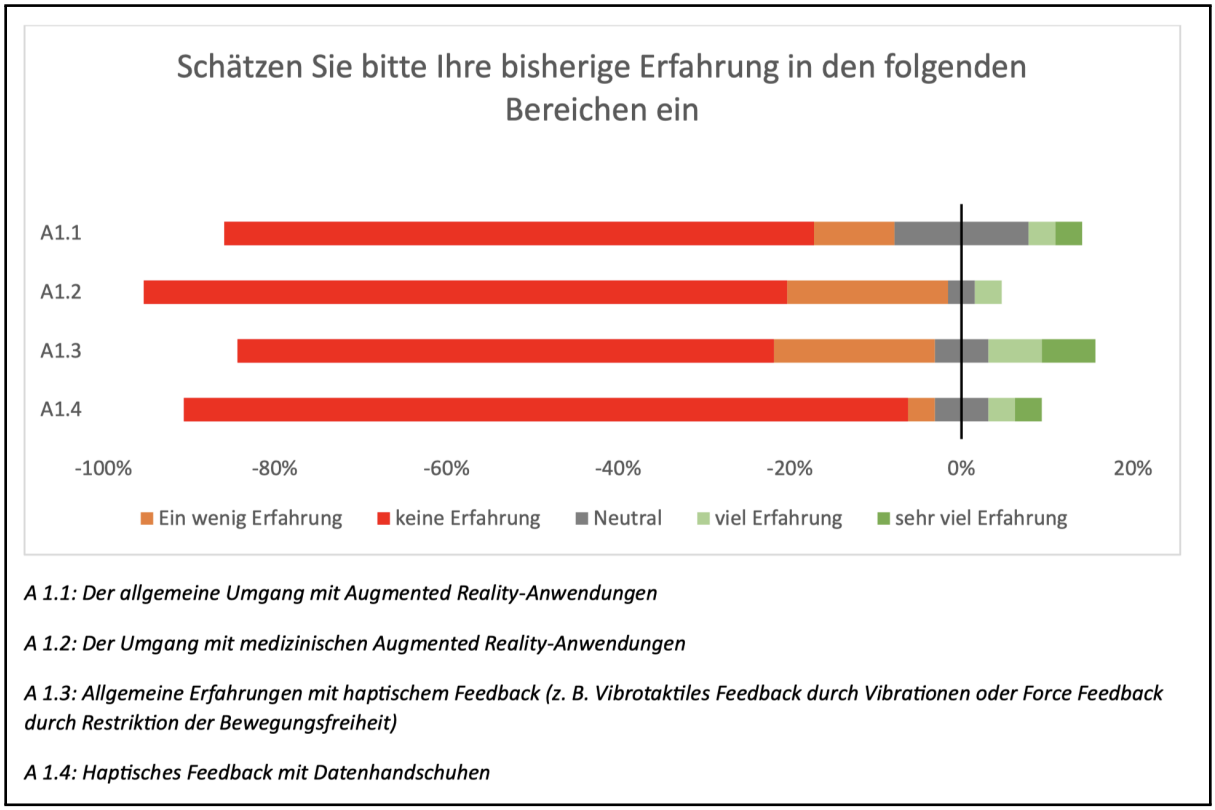


Abbildung 6.16: Fragenblock 1: „Schätzen Sie bitte Ihre bisherige Erfahrung in den folgenden Bereichen ein.“

Der erste Fragenblock beschäftigt sich mit der Frage nach den bisherigen Erfahrungen der Studierenden mit Augmented Reality oder haptischem Feedback. Generell zeigt die Auswertung, dass nur wenige Studierende vor der Nutzung der SkillsLab+ Anwendung Erfahrungen mit Augmented Reality oder haptischem Feedback gemacht haben. Insbesondere Erfahrungen mit medizinischen Anwendungen sind kaum vorhanden und nur 8% gaben an, neutrale bis maximal viel Erfahrung zu haben. Eine Ausnahme zeigt sich bei Frage #3, bei der unter haptischem Feedback z.B. vibrotaktiles Feedback verstanden wird. Dies könnte daran liegen, dass viele Controller von Spielkonsolen bereits haptisches Feedback in Videospielen bieten und unterstützen. Darüber hinaus wird deutlich, dass die Mehrheit der Studierenden (ca. 70%) angibt, noch keine Erfahrungen damit gemacht zu haben (vgl. 'Abbildung 6.16').

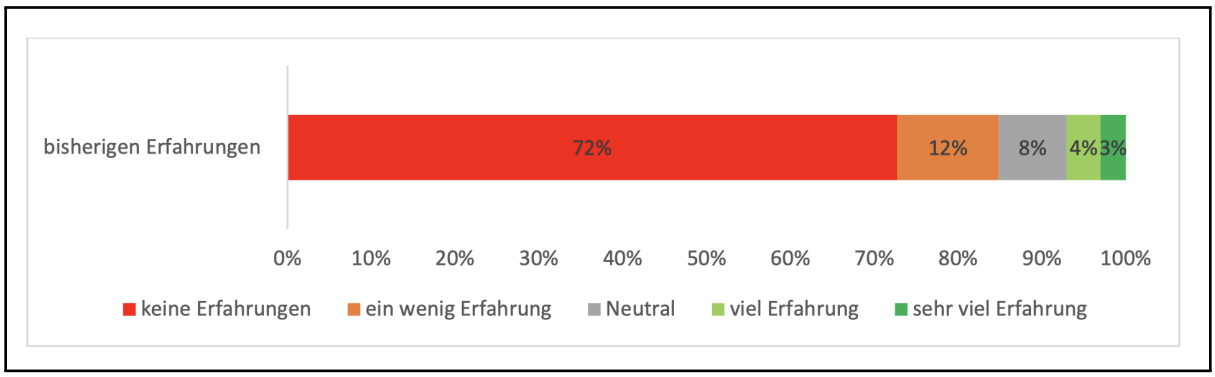


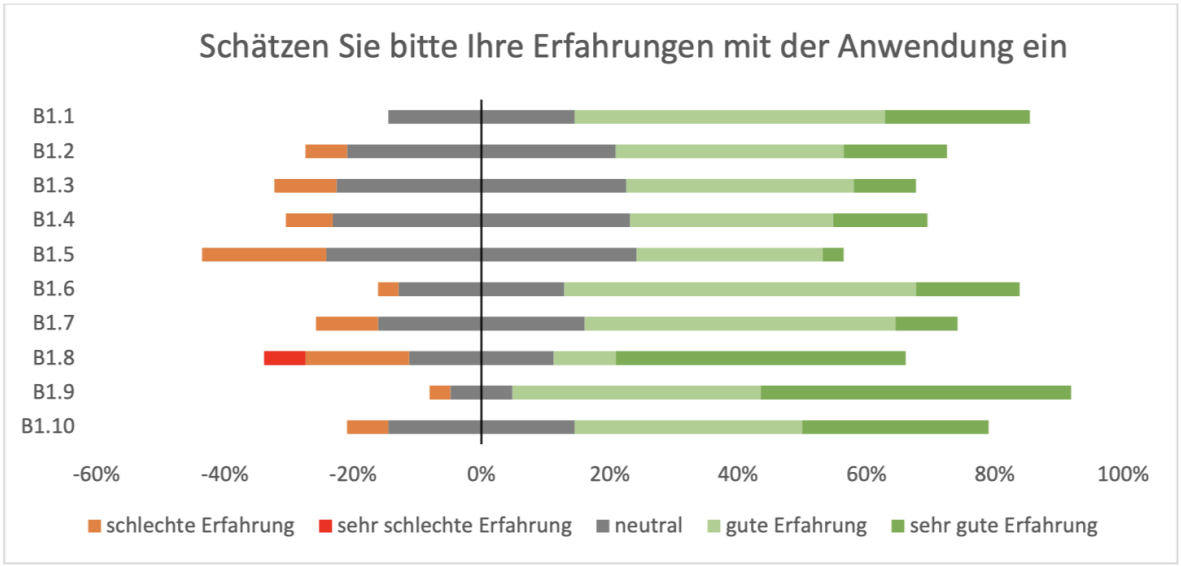
Abbildung 6.17: Fragenblock 1: „Schätzen Sie bitte Ihre bisherige Erfahrung in den folgenden Bereichen ein.“

Ob diese erste Einschätzung einen Einfluss auf die Nutzung der Technologie hat, wird in Frage #2 näher untersucht. Um eine umfassendere Aussage über die bisherigen Erfahrungen machen zu können, folgt ein weiteres Diagramm, das die bisherigen Ergebnisse zusammenfasst. Dazu werden die Prozentwerte der einzelnen Antworten genommen und der Mittelwert gebildet. Auch in diesem Diagramm wird deutlich, dass die Mehrheit (ca. 70%) keine Vorerfahrungen mit Augmented Reality oder haptischem Feedback hat. Etwas Erfahrung haben ca. 12%, neutral ca. 8%, viel Erfahrung ca. 4% und sehr viel Erfahrung ca. 3% (vgl. 'Abbildung 6.17').

Fragenblock 2

Der zweite Fragenblock bezieht sich auf die Erfahrungen mit der Anwendung (vgl. 'Abbildung 6.18'). Die Studierenden werden nach der Erprobung des SkillsLab+ befragt. Die Auswertung zeigt, dass die Mehrheit die Erfahrungen mit dem SkillsLab+ als positiv bewertet. Eine sehr schlechte Erfahrung (ca. 5%) zeigt sich bei der Frage #8, ob es während des Erlebens der virtuellen Umgebung Momente gab, in denen sich die Studierenden ganz auf die Aufgabe oder die Umgebung/virtuellen Elemente konzentriert haben. Konkret geht es um die Frage, ob sie die Tatsache, dass sie mit virtuellen Elementen arbeiten, ausblenden können. Die Auswertung des ersten Fragenblocks zeigt bereits, dass es Studierende gibt, die bisher wenig Erfahrung mit Augmented Reality oder haptischem Feedback haben. Daraus lässt sich schließen, dass es einzelne Studierende gibt, die sich nicht vollständig auf die Anwendung einlassen können. Im Durchschnitt zeigt sich, dass nur wenige Studierende (ca. 10%) schlechte Erfahrungen mit dem SkillsLab+ gemacht haben. Dieser Durchschnitt errechnet sich aus der Anzahl der negativen Stimmen pro Frage geteilt durch die Anzahl der Fragen.
Die Auswertung zeigt auch, dass viele Studierende, die bisher keine Erfahrungen mit Augmented Reality oder haptischem Feedback gemacht haben, trotzdem sehr gute Erfahrungen mit dem SkillsLab+ machen können. Die Fragen #1-10 zeigen mit Ausnahme der Frage #8 keine (0%) sehr schlechten Erfahrungen. Im Durchschnitt, der wie bei den negativen Erfahrungen in Frage #8 berechnet wird, geben mehr als die Hälfte (ca. 60%) positive Erfahrungen an. Bei Frage #1 zeigt das Diagramm neben keinen sehr schlechten Erfahrungen auch keine schlechten Erfahrungen, woraus sich ergibt, dass 15 (ca. 50%) sehr gute und sieben (ca. 20%) sehr gute Erfahrungen angegeben haben. Daraus ergeben sich 22 positive Antworten, was 70% entspricht. Dies bedeutet, dass die Studierenden ihre Ergebnisse im SkillsLap+ sehr gut kontrollieren können. Auch die Fragen #2, #4 und #6-10 zeigen jeweils mehr als 50% gute Erfahrungen und weniger als 25% negative Erfahrungen.
Die aufgeführten Fragen zusammen mit den guten Ergebnissen zeigen, dass die Studierenden gute erste Erfahrungen mit dem SkillsLap+ gemacht haben. Die Frage #6 zeigt ebenfalls 22 (ca. 70%) positive Erfahrungen, was bedeutet, dass die Studierenden gut vorhersehen können, was als nächste Reaktion auf die von ihnen durchgeführten Aktionen passieren würde. Ebenso zeigt die Auswertung, dass es den Studierenden sehr leicht fiel, sich an die Bedienelemente zu gewöhnen, die für die Interaktion mit der virtuellen Umgebung/den virtuellen Elementen verwendet wurden.

Dieses Ergebnis zeigt die Frage #9, auf die 27 (ca. 90%) positive Antworten gegeben wurden.



B1.1: Wie sehr konnten Sie die Ereignisse kontrollieren?

B1.2Wie reagierte die virtuelle Umgebung/die virtuellen Elemente auf die von Ihnen initiierten (oder durchgeführten) Aktionen?

B1.3 Wie natürlich erschienen Ihnen Ihre Interaktionen mit der virtuellen Umwelt/den virtuellen Elementen?

B1.4 Wie überzeugend war Ihr Gefühl, dass sich virtuelle Elemente durch den Raum bewegen?

B1.5 Inwieweit stimmten Ihre Erfahrungen in der virtuellen Umgebung/mit den virtuellen Objekten mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?

B1.6 Konnten Sie vorhersehen, was als nächstes als Reaktion auf die von Ihnen durchgeführten Aktionen passieren würde?

B1.7 Wie stark wurden Ihre Sinne bei diesem Erlebnis beansprucht?

B1.8 gab es Momente während der Erfahrung der virtuellen Umgebung, in denen Sie sich vollständig auf die Aufgabe oder die Umgebung/den virtuellen Elementen konzentriert haben? Konnten Sie ausblenden, dass sie mit virtuellen Elementen gearbeitet haben?

B1.9 Wie leicht fiel es Ihnen, sich an die Steuergeräte zu gewöhnen, die zur Interaktion mit der virtuellen Umgebung/den virtuellen Elementen verwendet wurden?

B1.10 Waren die Informationen, die durch die verschiedenen Sinne in der virtuellen Umgebung vermittelt wurden (z. B. Sehen, Hören, Tasten), konsistent?

Abbildung 6.18: Fragenblock 2: „Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit der Anwendung ein.“

Fragenblock 3

Der dritte Fragenblock beschäftigt sich mit der Frage nach dem Mehrwert einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung für die Studierenden. Die Auswertung zur Erfahrung mit dem haptischen Feedback zeigt erneut, dass die Mehrheit der Studierenden positive Erfahrungen sammeln konnte (vgl. 'Abbildung 6.19'). Insgesamt zeigt die Auswertung nur einmal eine sehr schlechte Erfahrung bei Frage #7, zur Einfachheit der Aufgabenbewältigung. Dies lässt sich mit den Vorerfahrungen begründen, die im Fragenblock eins betrachtet wurden. Dort wird deutlich, dass die Studierenden wenig Vorerfahrung haben und daher nicht zu erwarten ist, dass jeder Studierende die Aufgaben ohne Probleme bewältigen kann. Trotz der wenigen Vorerfahrungen konnten jedoch neun (ca. 30%) Studierende von guten und 13 (ca. 45%) von sehr guten Erfahrungen berichten.
Daraus ergibt sich, dass 22 (ca. 70%) gute Erfahrungen bei der Bewältigung der Aufgaben gemacht haben. Unterstützt wird dies durch die Auswertung der Frage #4 der, bei der es um die Kontrolle der Kontaktkraft geht. Hier gab es keine sehr schlechten Erfahrungen, 13 gute Erfahrungen und sieben sehr gute Erfahrungen. Da die Kontaktkraft für die Studierenden leicht zu kontrollieren ist, können die Aufgaben gut bewältigt werden.
Von besonderem Interesse ist die Frage #2, die sich mit dem realistischen haptischen Feedback beschäftigt. Das Interesse ergibt sich daraus, dass sich der sechste Fragenblock mit der Übertragbarkeit des in einer medizinischen Augmented Reality Anwendung erlernten Wissens in den zukünftigen Alltag beschäftigt und diese Frage vermutlich in direktem Zusammenhang mit einer möglichen Übertragbarkeit in den Alltag steht. Die Basis, die Voraussetzungen sind also gegeben.
Die Fragen #5 und #6 geben Aufschluss darüber, ob die Erfahrungen im Allgemeinen positiv sind und ob die Studierenden Vertrauen in das haptische Feedback haben. Aufgrund der bisherigen Beschreibungen der Ergebnisse ist zu erwarten, dass auch diese Fragen positiv beantwortet werden. Die Auswertung zeigt erwartungsgemäß keine sehr schlechte Erfahrung und nur bei Frage #6, die das Vertrauen in das haptische Feedback abfragt, 1 (ca. 5%) schlechte Erfahrung. Dementsprechend zeigt die Auswertung bei Frage #6 24 (ca. 80%) positive Antworten und bei Frage #5 26 (ca. 85%) positive Antworten. Auch die Fragen #1 und #3 zeigen eine positive Auswertung ohne „eher schlechte Erfahrungen“ und im Durchschnitt 21 (ca. 70%) positive Antworten bei Frage #1 und 17 (ca. 55%) positive Antworten bei Frage #3. Auch dies spricht für eine positive Erfahrung mit dem haptischen Feedback, da beide Fragen sich auf das haptische Feedback beziehen.

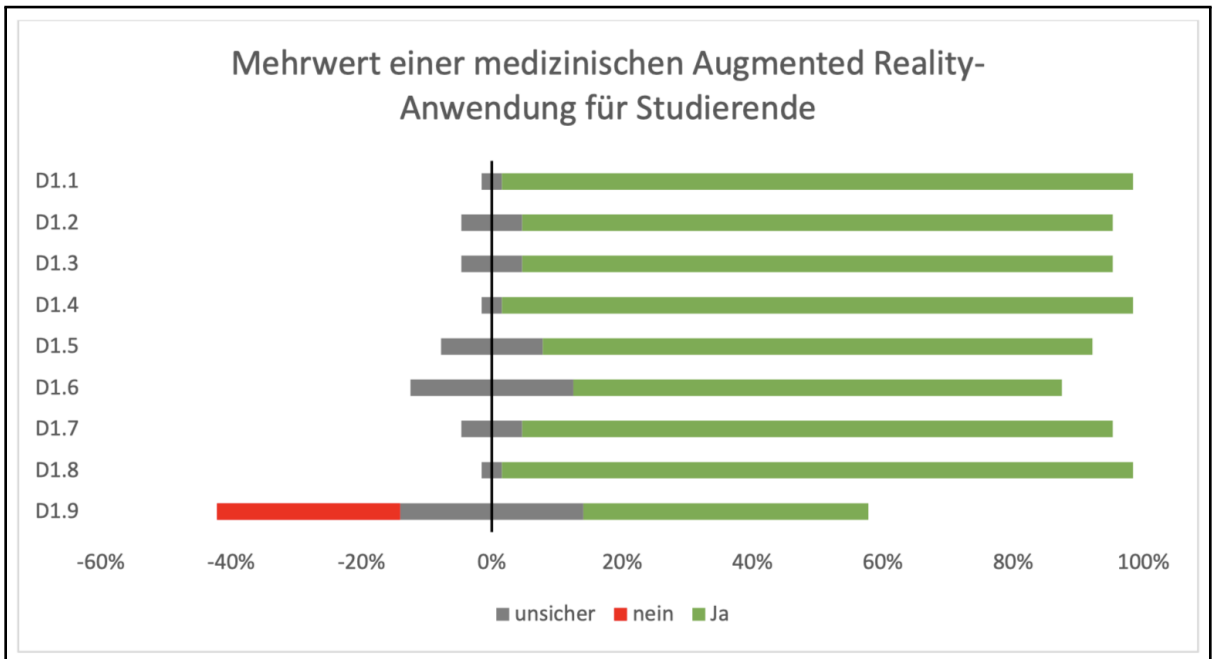
Abbildung 6.19: Fragenblock 3: „Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit dem haptischen Feedback der Anwendung ein.“

Fragenblock 4

Der vierte Fragenblock beschäftigt sich mit der Frage nach dem Mehrwert einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung für Studierende. Die Antworten zeigen bereits, dass sich dieser Fragenblock von den vorherigen unterscheidet, da nur die Antwortmöglichkeiten ja/nein/unsicher zur Verfügung stehen. Diese Art der Befragung gibt einen direkten Überblick darüber, ob die Studierenden einen Mehrwert in einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung sehen (vgl. 'Abbildung 6.20').

Die Auswertung zeigt, dass es ein sehr positives Feedback bezüglich des Mehrwerts einer medizinischen Augmented Reality Anwendung gibt. Lediglich bei der Frage #9, ob das SkillsLab+ das physische SkillsLab ersetzen kann, gibt es 9 negative Antworten (ca. 30%). Dieses Ergebnis zeigt, dass viele Studierende die physische Anwendung als nicht ersetzbar ansehen. Aus den vorherigen Frageblöcken geht jedoch hervor, dass dies nicht an der Anwendung SkillsLab+ liegt, sondern an der eigenen Präferenz der befragten Studierenden. Bei den Fragen #1-8 gibt es keine negativen Antworten, was für die Anwendung des SkillsLab+ spricht. Die Auswertung zeigt bei Frage #1, die sich mit dem positiven Einfluss von Augmented Reality mit haptischem Feedback in der medizinischen Lehre beschäftigt, nur 1 unsichere und 31 positive Antworten.

Die Frage #2 bestätigt, dass die befragten Studierenden dem SkillsLab+ einen höheren Mehrwert bei der Vermittlung von anatomischem Wissen zuschreiben als herkömmlichen Methoden wie z.B. Büchern. Dies könnte daran liegen, dass das SkillsLab+ eine realistischere und anschaulichere Darstellung der Anatomie bietet. Die Auswertung dieser Frage zeigt nur 3 unsichere Antworten (ca. 10%) und 29 (90%) positive Antworten. Es gibt keine negative Antwort. Diese positive Bewertung wird wiederum vor allem durch die Fragen #4 und #8 gestützt, die sich ebenfalls auf den Lernerfolg beziehen. Bei beiden Fragen zeigt die Auswertung keine negative Antwort und jeweils eine unsichere Antwort. Somit ergeben sich für beide Fragen 31 positive Antworten. Dies bedeutet, dass die Studierenden ihr bestehendes Wissen erweitern und verbessern können und dass die Anwendung den Studierenden helfen kann, die Lerninhalte des SkillsLabs besser nachzuarbeiten und das Gelernte zu festigen.
Die Auswertung der Frage #5 kann im Zusammenhang mit der Auswertung der Fragen #4 und #8 betrachtet werden. Die Auswertung, ob die Studierenden denken, dass Augmented Reality mit haptischem Feedback die Stationen im SkillsLab virtuell abbilden kann, so dass ein individuelles Lernen möglich ist, zeigt 27 (ca. 85%) positive Antworten. Durch das individuelle Lernen wird ein positiver Lernerfolg erwartet. Ebenfalls positive Ergebnisse in Bezug auf den individuellen Lernerfolg zeigt die Auswertung der Frage #6, die sich auf das Lernen zu Hause mit der Anwendung bezieht. Hier zeigt die Auswertung 24 (ca. 75%) positive Antworten und damit ein positives Ergebnis.



Ich denke, dass Augmented Reality mit haptischem Feedback ...

1. *in der Medizinlehre eingesetzt werden sollte und den Lernerfolg positiv beeinflusst.*
2. *in medizinischen Anwendungen anatomisches Wissen (z. B. die Lage und Position von Organen, Knochen und anatomischen Strukturen) besser vermitteln kann, als herkömmliche Methoden (z. B. physische Modelle, Bücher etc.)*
3. *und die Möglichkeit, die Software nachträglich erweitern zu können, viel Potenzial bietet.*
4. *bestehende Lernkonzepte erweitern und verbessern kann.*
5. *die Stationen im SkillsLab virtuell abbilden können, sodass ein individuelles Lernen (studierendenzentriert) möglich ist.*
6. *das SkillsLab digitalisieren kann, sodass Studierende von zu Hause aus lernen können.*
7. *Studierenden helfen kann, sich besser auf das SkillsLab vorzubereiten.*
8. *Studierenden helfen kann, die Lerninhalte des SkillsLabs besser nachzubearbeiten und das gelernte Wissen zu festigen.*
9. *mit dem SkillsLab+ das physische SkillsLab ersetzen kann*

Abbildung 6.20: Fragenblock 4: „Mehrwert einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung für Studierende."

Fragenblock 5

Der fünfte Fragenblock bezieht sich auf die Prüfungsvorbereitung mit der Anwendung SkillsLab+ in Verbindung mit haptischem Feedback (vgl. 'Abbildung 6.21'). Auf den ersten Blick zeigt die Auswertung dieses Fragenblocks zum ersten Mal eine größere negative Bewertung.
Die erste Frage bezieht sich darauf, ob sich die Studierenden durch die Anwendung besser auf die Prüfung vorbereitet fühlen. Die Auswertung zeigt 2 (ca. 5%) „trifft gar nicht zu“, 4 (ca. 15%) „trifft nicht zu“, 11 (ca. 40%) neutrale Antworten, 9 (ca. 30%) „trifft zu“ und 4 „trifft voll zu“ Antworten. Die 6 negativen Antworten (ca. 20%) lassen sich vermutlich durch die Kürze der Testanwendung oder eine leichte Skepsis der Anwendung gegenüber begründen. Die Auswertung zeigt mit 10 (ca. 35%) positiven Antworten dennoch eine gute Bewertung, die für die Anwendung SkillsLab+ in Bezug auf die Prüfungsvorbereitung spricht.
Die Auswertung der beiden Fragen zu den Handlungsabläufen der einzelnen Stationen zeigt mit 4 (ca. 15%) negativen und 16 (ca. 55%) positiven Antworten eine positive Auswertung, was wiederum für die Anwendung spricht. Die negativen Antworten können mit der ersten Frage beschrieben werden. Die Auswertung der drei Fragen zeigt 5 (ca. 20%) negative Antworten, davon keine im Bereich „trifft nicht zu“ und 16 (ca. 55%) positive Antworten. Dieses positive Ergebnis auf die Frage nach einem besseren Verständnis der Anatomie durch die Anwendung spiegelt sich im vierten Fragenblock wider.
Die Auswertung der Frage #4 nach dem Mehrwert des haptischen Feedbacks ergab 21 (ca. 70%) positive Antworten. Die positive Bewertung nach dem Mehrwert spiegelt sich im dritten Fragenblock wieder, in dem die Auswertung eine 63% positive Erfahrung mit dem haptischen Feedback der Anwendung zeigt. Hinzu kommt die Auswertung der Frage #5, die sich mit dem Mehrwert beschäftigt, die Anwendung mit der eigenen Hand zu steuern. Hier wurden 24 (ca. 80%) positive und 3 (ca. 5%) negative Antworten gegeben. Zusammenfassend zeigt die Auswertung, dass die Studierenden hier, wie auch im dritten Fragenblock, einen Mehrwert in der Anwendung mit dem haptischen Feedback und der Steuerung mit der eigenen Hand sehen.
Die Auswertung der Frage #6 ist sehr aussagekräftig für den gesamten Fragenblock. Die Frage zielt speziell auf die Möglichkeit ab, die Anwendung zu Hause als Prüfungsvorbereitung zu nutzen. Die Auswertung zeigt 2 (ca. 5%) Antwort im negativen Bereich, 10 (ca. 35%) neutrale Antworten, 17 (ca. 60%) Antworten im positiven Bereich. Dies zeigt, dass ca. 5% die Anwendung nicht zur Prüfungsvorbereitung nutzen würden und ca. 95% die Anwendung zur Prüfungsvorbereitung nutzen würden. Dieses Ergebnis zeigt sich ähnlich im vierten Fragenblock. Trotz der positiven Antworten im vierten Fragenblock, insbesondere bei Frage #7, bei der 90% angeben, dass Augmented Reality mit haptischem Feedback helfen kann, sich besser auf das SkillsLab vorzubereiten, geben bei Frage #7 in diesem Fragenblock nur 18 (ca. 60%) der Studierenden an, dass die Anwendung sie zum Lernen motiviert. Darüber hinaus zeigt die Auswertung, dass 5 (ca. 15%) Studierende nicht zum Lernen motiviert sind. Auch wenn diese Frage anders ausgefallen ist als die vorherigen Fragenblöcke es erwarten ließen, zeigt die Auswertung insgesamt, dass die Mehrheit der befragten Studierenden die Anwendung mit haptischem Feedback für die Prüfungsvorbereitung positiv bewertet.

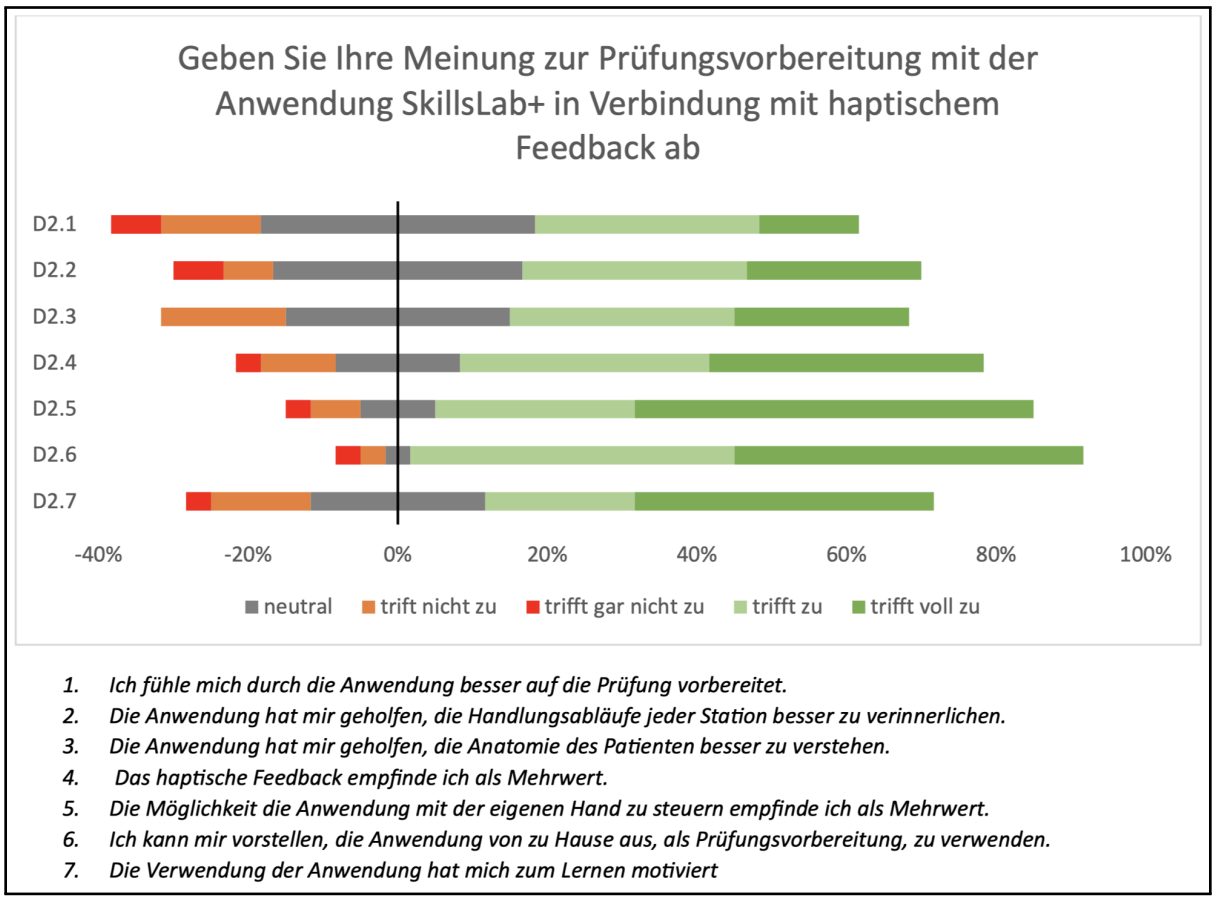


Abbildung 6.21: Fragenblock 5: „Geben Sie Ihre Meinung zur Prüfungsvorbereitung mit der Anwendung SkillsLab+ in Verbindung mit haptischem Feedback ab.“

Fragenblock 6

Der sechste Fragenblock beschäftigt sich mit der Frage nach der Übertragbarkeit des in einer medizinischen Augmented Reality Anwendung erlernten Wissens in den zukünftigen Alltag (vgl. 'Abbildung 6.22').

Dieser Fragenblock hat wiederum die Antwortmöglichkeiten ja/unsicher/nein und gibt einen guten Überblick über die positive Bewertung der Frage nach der Übertragbarkeit des in einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung gelernten Wissens in den zukünftigen Alltag.

Im dritten Fragenblock, Frage 2, zeigt die Auswertung eine positive Rückmeldung zum haptischen Feedback. Dieses positive Ergebnis zeigt sich auch in der Auswertung dieses Fragenblocks. Lediglich in Frage #1, bei der Frage nach der Integrierbarkeit in den Arbeitsalltag eines Arztes, zeigt sich lidiglich eine negative Antwort (ca. 5%). Diese negative Antwort kann auf den doch sehr komplexen Arbeitsalltag des medizinischen Personals zurückgeführt werden, der nur schwer in einer einzigen Anwendung erfasst werden kann. Abgesehen davon zeigt die Auswertung nach dem vermittelten Wissen über den Arbeitsalltag eines Arztes mit medizinischer Augmented Reality-Anwendungen jedoch überwiegend positive Antworten und damit einen guten Lernerfolg. Genauer betrachtet zeigt die Auswertung der Frage #2, ob die Studierenden durch das vermittelte Wissen einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung (wie dem SkillsLab+) mit haptischem Feedback besser auf die Arbeit und den Umgang mit neuen Technologien vorbereitet sind, ein zu fast 100% positives Ergebnis. Somit kann dem SkillsLab+ ein guter Lernerfolg und eine gute Vorbereitung auf den zukünftigen Arbeitsalltag zugeschreiben werden. Unterstützt wird dies durch die Auswertung von Frage #3, in der es um den Abbau von Hemmungen im Umgang mit neuen Technologien geht. Hier gibt es 1

(ca. 5%) neutrale und 31 (ca. 95%) positive Antworten.
Neben der reduzierten Hemmschwelle zeigt die Ausarbeitung zu Frage #5 auch, dass die Studierenden der Meinung sind, dass das vermittelte Wissen einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung mit haptischem Feedback die Einarbeitungszeit in neue Technologien verkürzen kann. Diese Aussage wird durch das Ergebnis der Frage #5 gestützt, da 29 (ca 90%) Studierende diese Frage mit ja und 3 (ca. 10%) mit neutral beantwortet haben.
Das gleiche Ergebnis liefert die Ausarbeitung der Frage #4 mit 29 (ca. 90%) positiven Antworten und 3 (ca. 10%) neutralen Antworten. Demnach sind die Studierenden der Meinung, dass das vermittelte Wissen die tägliche Arbeit erleichtert bzw. den Umgang mit der Technik verbessern kann. Insgesamt zeigt die Evaluation also eine positive Rückmeldung auf die Frage nach der Übertragbarkeit des in einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung erlernten Wissens in den zukünftigen Alltag.

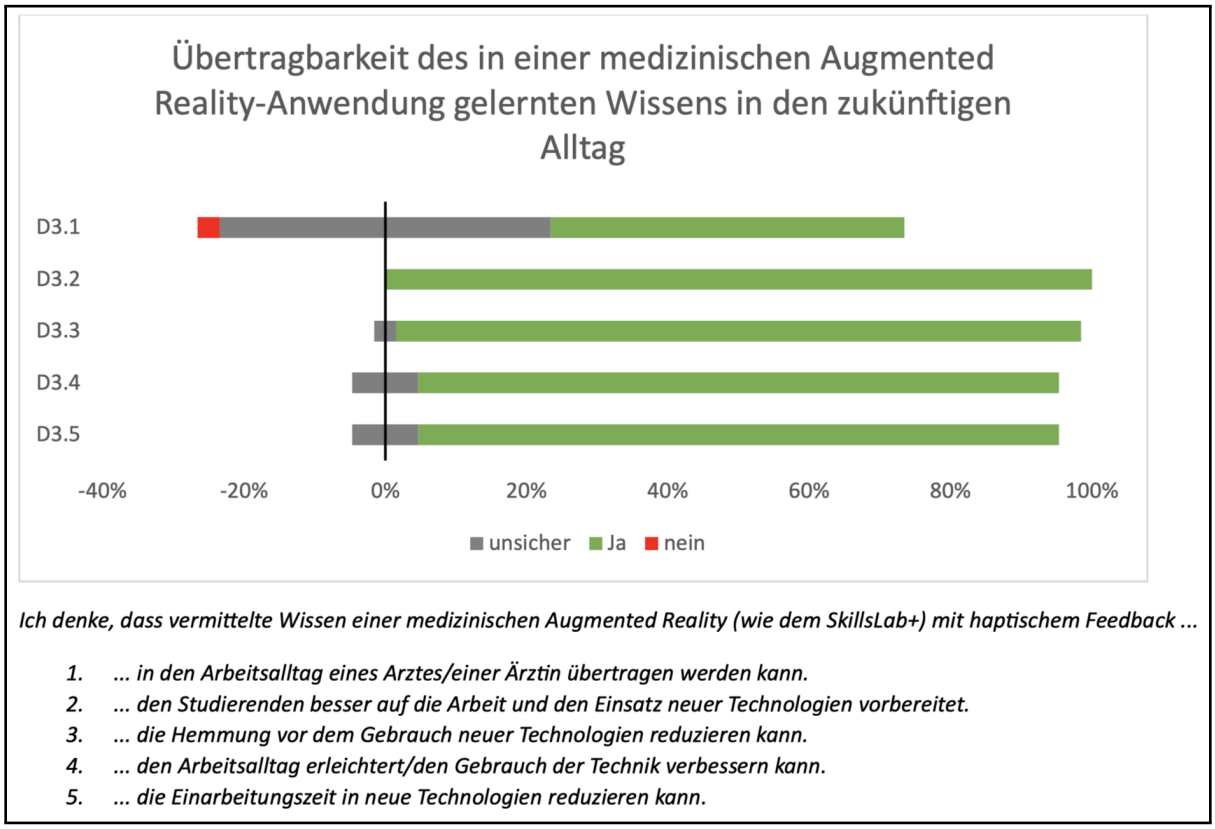


Abbildung 6.22: Fragenblock 6: „Übertragbarkeit des in einer medizinischen Augmented RealityAnwendung gelernten Wissens in den zukünftigen Alltag.“

6.2.3.1 RCT – Lernerfolg

Im Anschluss an die Erfahrungen mit dem SkillsLab+ und dem SkillsLab haben die Studierenden eine Prüfung abgelegt. Die Ergebnisse und die anschließende Auswertung werden in diesem Abschnitt in Form einer Auflistung und einer anschließenden Beschreibung dargestellt.
Von den ursprünglich 77 angemeldeten Studierenden legten 57 die Prüfung ab. Demnach sind 20 Studierende während des Semesters ausgeschieden oder haben sich am Ende entschieden, nicht an der Prüfung teilzunehmen. Von der Gesamtzahl der Studierenden hat etwa die Hälfte (28 von 57) das SkillsLab+ zusätzlich zum normalen SkillsLab absolviert.
Die Prüfungsergebnisse bestätigen, dass sich das SkillsLab+ positiv auf die Studierenden auswirkt. Der Notendurchschnitt der Studierenden, die das SkillsLab+ vor der Prüfung absolviert haben, liegt bei 1,1, der Notendurchschnitt

der Studierenden ohne SkillsLab+-Erfahrung bei 1,3. Der Lernerfolg wird auch im direkten Vergleich der schlechtesten Note deutlich, die bei den Studierenden mit SkillsLab+ bei 2,3 und bei den Studierenden ohne SkillsLab+ bei 3,3 liegt. Auch die Streuung der Noten zeigt ein positives Ergebnis für das SkillsLab+, da 19 Studierende mit Erfahrung und 14 ohne Erfahrung eine 1,0 erreicht haben. Eine eindeutige Mehrheit oder ein signifikanter Unterschied, ist zwar nicht gegeben, dennoch ist ein leichter Trend und eine positive Verschiebung der Notenverteilung erkennbar.
Die Auswertung der Ergebnisse des Fragebogens für das SkillsLab+ zeigt, dass die Studierenden zu Beginn wenig Erfahrung mit Augmented Reality oder haptischem Feedback hatten ('Abbildung 6.17' und 'Abbildung 6.19'). Durch die Anwendung konnten die Studierenden jedoch positive Erfahrungen mit Augmented Reality oder haptischem Feedback sammeln ('Abbildung 6.18' und 'Abbildung 6.22'). Sie konnten Vertrauen entwickeln und einen Mehrwert in der Anwendung erkennen ('Abbildung 6.20'. Dies ging so weit, dass die Studierenden leicht positive Lernerfolge durch die Anwendung erwarteten. Auch ein realistischer Bezug zum zukünftigen Alltag konnte von den Studierenden positiv erlebt werden. Darüber hinaus gewannen die Studierenden sogar Vertrauen in zukünftige medizinische Augmented Reality Anwendungen ('Abbildung 6.21'). Am Ende konnten die Studierenden in einem Abschlusstest sehr gute Ergebnisse vorweisen.

6.2.4 Gesamtfazit der Studienergebnisse

Unter Berücksichtigung aller Studienergebnisse lassen sich folgende Erkenntnisse ableiten. Um zunächst die Teilnehmer der Studien zusammenzufassen, kann in allen Studien festgestellt werden, dass die Teilnehmer wenig bis keine Erfahrung mit Augmented Reality, insbesondere mit medizinischen Augmented Reality-Anwendungen haben. Insbesondere in Bezug auf haptisches Feedback, vor allem in Kombination mit einem Datenhandschuh, hatte kaum ein Teilnehmer Vorkenntnisse. Die Personengruppen, aus denen die Teilnehmer stammten, waren entweder Studierende aus dem medizinnahen Studiengang DBHS der Universität Siegen (siehe '6.1.1 Beschreibung der Teilnehmer' und '6.1.3 Beschreibung der Teilnehmer') oder Ärzte aus den umliegenden Krankenhäusern sowie niedergelassene Ärzte (siehe '6.1.2 Beschreibung der Teilnehmer'). Während der gesamten Studie traten keine Fälle von Motion Sickness auf, was einen Vorteil des Einsatzes von Augmented Reality zeigt.
Grundsätzlich lässt sich für die AR-Anwendung SkillsLab+ (mit und ohne Datenhandschuhe) sagen, dass die Integration von medizinischen Lehrinhalten in eine virtuell erweiterte Umgebung als positiv und als Mehrwert empfunden wird. Während die Ärzte die Realitätsnähe und Abbildung der Aufgaben als adäquat empfinden (siehe '6.2.2 Auswertung des zweiten Demonstrators'), finden die Studierenden die grafische Qualität, insbesondere die realitätsgetreue Darstellung, noch verbesserungswürdig (siehe '6.2.1 Auswertung des ersten Demonstrators' und '6.2.3 Auswertung des dritten Demonstrators'). Die Implementierung der Software erlaubt eine spätere Erweiterung und Ergänzung um neue Modelle. Die eigentliche Einschränkung ergibt sich jedoch aus der Hardwarekonfiguration, insbesondere der Auflösung und dem eingeschränkten Sichtfeld des Magic Leap One-HMDs.
Den größten Vorteil beim Einsatz des SkillsLab+ sehen die Studierenden in der Möglichkeit der Vor- und Nachbereitung der Lehrveranstaltung. Dies wird sowohl von den Studierenden (siehe '6.2.1 Auswertung des ersten Demonstrators' und '6.2.3 Auswertung des dritten Demonstrators') als sehr positiv als auch von den Ärzten als positiv bewertet, wobei einige eher unsicher sind und nicht voll zustimmten (siehe '6.2.2 Auswertung des zweiten Demonstrators'). Die Möglichkeiten sind eher als Ergänzung zur bisherigen Lehrmethode zu sehen und nicht als Ersatz. Die Technik kann im Gegensatz zum physischen Pendant orts- und zeitunabhängig eingesetzt werden. Dieser Vorteil kann dann zum Tragen kommen, wenn kein Präsenzunterricht möglich ist (z.B. an Feiertagen, in den Ferien oder während einer Pandemie mit Kontaktbeschränkungen).
Bezüglich des haptischen Feedbacks gibt es unterschiedliche Meinungen zu den beiden verwendeten Betriebsmodi (siehe '5.2 Betriebsmodi der Hardwarekomposition'). In der ersten Studie wird das haptische Feedback über den Magic Leap One-Controller eher mittelmäßig bewertet und die Studierenden bevorzugen die Verwendung des Datenhandschuhs. Insbesondere bei Palpations- und Auskultationsübungen ist die Verwendung der eigenen Hände

natürlicher und wird bevorzugt (siehe '6.2.1 Auswertung des ersten Demonstrators').
Die Bedienung des Datenhandschuhs erfordert eine kurze Einarbeitungszeit, ist aber schnell intuitiver als die Bedienung eines Controllers. Die Art des haptischen Feedbacks, die Genauigkeit der Wiedergabe, insbesondere die unterschiedlichen Stärken, müssen in Zukunft besser dargestellt werden, um dem realen Vorbild näher zu kommen (siehe '6.2.2 Auswertung des zweiten Demonstrators'). Die aktuelle Umsetzung reicht nicht aus, um das physische SkillsLab zu ersetzen (siehe '6.2.2 Auswertung des zweiten Demonstrators' und '6.2.3 Auswertung des dritten Demonstrators').
Zusammenfassend lässt sich aus den Untersuchungen festhalten, dass die Integration haptischer Elemente mittels Datenhandschuh in eine medizinische Augmented Reality-Anwendung gelungen ist. Eine signifikante Steigerung des Lernerfolgs konnte nicht festgestellt werden, jedoch ist ein positives (subjektives) Gefühl, besser auf die Prüfung vorbereitet zu sein, in der dritten Studie erkennbar. Eine Erhöhung der Sicherheit im Umgang mit medizinischen Geräten und Patienten konnte durch diese Studie nachgewiesen werden (siehe '6.2.3 Auswertung des dritten Demonstrators').

Kapitel 7

Diskussion

Das folgende Diskussionskapitel greift die Aspekte und Fragestellungen der Dissertation auf. Dabei sollen die unterschiedlichen Standpunkte, Sichtweisen und Interpretationen beleuchtet und kritisch hinterfragt werden. Beginnend mit dem aktuellen Stand der Durchführung des SkillsLabs, über eine Bewertung der Implementierung, bis hin zu einem Vergleich der erwarteten mit den tatsächlichen Ergebnissen. Abschließend werden Möglichkeiten der Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Gebiete und Szenarien beschrieben und ein abschließendes Mal auf die Forschungsfragen Bezug genommen.

7.1 Bezug zum Anwendungsgebiet: Grenzen des SkillsLab

Bei der derzeitigen Durchführung des SkillsLab gibt es einige Probleme und Einschränkungen bei der Anschaffung und Nutzung. Dies beginnt damit, dass die Phantome und Modelle während des Gebrauchs einem gewissen Verschleiß unterliegen. Modelle, wie z.B. der Injektionsarm, können nur eine gewisse Zeit verwendet werden, da sie während der Benutzung von Nadeln durchstochen werden, bevor sie ausgetauscht werden müssen. Allgemeine Verbrauchsmaterialien wie Katheter, Tücher, Handschuhe, Gleitmittel müssen regelmäßig nachbestellt werden, da sie nach einmaligem Gebrauch entsorgt werden müssen. Diese können zwar reduziert, aber nicht vollständig aus dem SkillsLab entfernt werden.
Zusätzlich zu den Wartungskosten sind die Anschaffungskosten für das Modell und neue Anwendungen/Fälle/Krankheiten hoch. Beispielsweise kostet der Auskultationstrainer SAM in der Anschaffung über 15.000 Euro [47] und ein Einsatz für das Modell Weibliches Becken ca. 500 Euro [172].
Die Durchführung des SkillsLab mit dem Stationsprinzip benötigt während der Durchführung viel Platz. Jede Station muss ihren eigenen Tisch und Arbeitsbereich haben, damit sich die Lernenden nicht gegenseitig stören oder ablenken. Auch die Aufbewahrung der Modelle, wenn das SkillsLab gerade nicht benötigt wird, erfordert Platz für die (teilweise sperrigen und/oder empfindlichen) Modelle.
Ein Nachteil, der sich gerade im Zusammenhang mit der aktuellen Corona-Pandemie gezeigt hat, ist, dass das SkillsLab für den Präsenzbetrieb konzipiert ist. Die Studierenden haben, abgesehen von der Vorbereitung und dem Einlesen der Materialien, nicht die Möglichkeit, das Training zu Hause durchzuführen und sind auf die Anwesenheit des Tutors angewiesen. Zudem ist es in der Regel nicht ohne weiteres möglich, eine Übung, z.B. die korrekte Verabreichung einer Impfung, beliebig oft zu wiederholen. Die Lernenden haben nur für die Dauer des SkillsLab die Möglichkeit, an und mit den Modellen zu arbeiten. Fühlt sich ein Lernender nach dem Kurs immer noch unsicher, kann er das Training nicht ohne weiteres wiederholen.
Der Einsatz der digitalen Anwendung SkillsLab+ in Kombination mit einem Datenhandschuh kann nicht alle Probleme behandeln und lösen, aber er kann zu ihrer Lösung und Reduzierung beitragen. Durch die rein digitale

Ausbildung kann der Verbrauch von Verbrauchsmaterialien vollständig reduziert werden. Alle Modelle, Geräte und Instrumente sind virtuell und verursachen keine Kosten und keinen Abfall. Außerdem kann jeder Studierende jede Übung beliebig oft wiederholen, ohne Verbrauchsmaterial zu verbrauchen. Auch die Anschaffungskosten werden reduziert, da für die Nutzung des SkillsLab+ eine AR-Brille und ein Paar Datenhandschuhe benötigt werden. Das System ist skalierbar und kann (zukünftig) um nahezu beliebig viele Stationen und Übungen an diesen Stationen erweitert werden. Außer den einmaligen Anschaffungskosten fallen keine weiteren Kosten an, mit Ausnahme von eventuellen virtuellen Modellen von Geräten oder anatomischen Strukturen. Neben den Kosten kann auch das Platzproblem gelöst werden. Das SkillsLab+ ermöglicht ein ortsunabhängiges Training und ist somit nicht auf einen vorbereiteten Raum angewiesen. Die Durchführung erfolgt in einem kompakten Bereich, vergleichbar mit einer einzelnen SkillsLab-Station. Es ist so, als würde jede SkillsLab Station nacheinander auf einem Tisch aufgebaut. Der Platzbedarf für die Lagerung der Modelle entfällt ebenfalls, da nur ein kleiner Koffer für die Lagerung benötigt wird.

7.2 Bewertung der Implementierung von Augmented Reality mit haptischem Feedback

Das folgende Kapitel befasst sich mit den Grenzen und Problemen, die bei der Implementierung des SkillsLab+ in Verbindung mit dem Datenhandschuh SenseGlove Nova aufgetreten sind. Einige Probleme erfordern eine Weiterentwicklung und Erweiterung der Software oder einen Austausch der Hardware durch modernere (leistungsfähigere) Modelle. Generell gilt, dass neuere Hardwaremodelle die Einschränkungen der aktuellen Generation beseitigen und immer bessere und realistischere Anwendungen ermöglichen. Ein Wechsel/Upgrade der Engine, in der die Anwendung programmiert wurde, kann ebenfalls zu einer Verbesserung der Qualität und Nutzbarkeit führen. Auf die Grenzen und Probleme folgt eine Bewertung der Software und Hardware, die für die aktuelle Implementierung verwendet wird.

7.2.1 Grenzen und Probleme der Implementierung

Während der Implementierung traten einige Probleme und entsprechende Lösungsstrategien auf, auf die in diesem Kapitel besonders eingegangen wird. Zunächst gab es keine direkte Schnittstelle zwischen dem SenseGlove, der Unreal Engine und der Magic Leap One. Die softwaretechnische Integration der Hardware erfolgte über die Unreal Engine und deren Schnittstellen. Jede Hardwarekomponente verfügt über eine eigene Schnittstelle, die zwar unabhängig voneinander implementiert werden kann, aber in manchen Fällen zu Problemen führen kann. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn zwei Schnittstellen exklusiv auf die gleiche Ressource zugreifen wollen. Im Folgenden werden die Herausforderungen der einzelnen Softwarekomponenten dargestellt und zueinander in Beziehung gesetzt. Die einzelnen Komponenten werden auf ihre Eignung geprüft und Empfehlungen für zukünftige Entwicklungen gegeben.
Die Lösung für die Anbindung aller Hardwarekomponenten besteht in der Anpassung der generischen Integration des SenseGlove Plugins, das direkt von der Firma SenseGlove zur Verfügung gestellt wird, an die Version 4.26 der Unreal Engine. Das Hauptproblem dieser Integration ist der gegenseitige Ausschluss des SenseGlove Plugins und des SteamVR Plugins. Das SteamVR Plugin hätte die Positionserkennung im Raum übernommen, da die „Vive-Tracker ®“ von „Valve“ verwendet werden konnte. Dieses Problem wurde schließlich umgangen, indem der Magic Leap Controller an der Oberseite des Handschuhs befestigt wurde, seine Position von der Brille selbst ermittelt und verfolgt wurde, ein gewisser Offset verwendet wurde und auf das SteamVR Plugin verzichtet wurde. [56]
Die Plugins des Datenhandschuhs „SenseCom“ und der AR-Brille „Magic Leap/LuminOS“ störten sich nicht gegenseitig und konnten parallel verwendet werden. Die native Nutzung von Brille und Datenhandschuh ist in dieser Konfiguration nicht möglich, da eine Anpassung des SenseCom-Plugins notwendig ist. Außerdem unterstützt die Magic Leap One kein Bluetooth Low Energy, das für die Verbindung mit dem SenseGlove Nova benötigt wird. Eine

Lösung für dieses Problem ist die Verwendung des Nachfolgers der Magic Leap One, der Magic Leap 2, oder der Umstieg auf die Oculus Quest Pro.

7.2.2 Bewertung der Hardware

Auf die Entwicklung der verwendeten Hardware wurde kein Einfluss genommen, da auf kommerziell erhältliche Geräte zurückgegriffen wurde. Jedes Gerät hat seine Möglichkeiten und Grenzen, auf die im Folgenden näher eingegangen wird.

Magic Leap One

Wie im Kapitel '6 Evaluation des Demonstrators' von den Testern der Anwendung bestätigt wurde, sind die Einschränkungen der Hardware auch den Nutzern negativ aufgefallen. Da es sich nur um eine Brille mit eingeschränktem Sichtfeld (kurz: *FoV*) handelt, werden die AR-Inhalte nicht im Vollbildmodus angezeigt. Dieser Einschränkung kann in Zukunft durch die Ausführung der Anwendung auf besserer Hardware entgegengewirkt werden. Die Verwendung der hardwareunabhängigen Game Engine *Unreal Engine 4* ermöglicht eine einfache Portierung auf eine andere Zielhardware, die (idealerweise) der Magic Leap One technisch überlegen ist. Beispielsweise bietet der direkte Nachfolger, die Magic Leap 2 Verbesserungen in jedem Bereich (siehe '3.2.1.1 Magic Leap One und Magic Leap 2').

SenseGlove

Auch der Datenhandschuh SenseGlove stößt hardwarebedingt an technische Grenzen. So kann er nur bedingt Unterschiede im Force Feedback darstellen. Die Unterscheidung zwischen hart und weich ist zwar technisch machbar, aber in welchem Ausmaß der spätere Nutzen für den Anwender deutlich wird, ist nur schwer zu prognostizieren. Zukünftige Modelle könnten die Anwendung verbessern, z.B. durch neue Methoden zur Erzeugung eines haptischen Feedbacks an den Benutzer (siehe hierzu '3 State of the Art'). Das vibrotaktile Feedback in Form von Vibrationen sollte erweitert werden und an allen Fingern verfügbar sein, nicht nur wie bisher an Daumen, Zeigefinger und Handrücken, und durch verschiedene Muster unterschiedliches Feedback liefern. Die Tatsache, dass der kleine Finger keine eigene Erkennung hat, stört zwar etwas die Immersion, behindert aber nicht die Anwendung bzw. die Erledigung der Aufgaben. Ebenso ist der Anschaffungspreis von ca. 5.000 €, je nach Verfügbarkeit, für das erzielte Ergebnis sehr hoch.
Ein hoher Detaillierungsgrad in der Darstellung der virtuellen Modelle, insbesondere in der Fühlbarkeit, ist wichtig, da sonst die Immersion verloren geht. Alle virtuellen Objekte werden in ihrer physischen Form im medizinischen Alltag verwendet. In der zweiten Studie haben die Ärzte genau diese Tatsache bemerkt (siehe '6.1.2 Methodik der zweiten Evaluation des Demonstrators'). Gerade sie haben einen Vergleich und können diesen bewerten (siehe '6.1.2 Beschreibung der Teilnehmer'). Da das Ergebnis der Studie zeigt, dass das vermittelte Gefühl noch zu stark vom physischen Objekt abweicht, besteht hier Verbesserungsbedarf. Zukünftige Modelle von Datenhandschuhen werden wahrscheinlich in der Lage sein, die Kraftrückkopplung in verschiedenen Härtegraden zu reproduzieren oder eine neue Technologie zu verwenden, die auf einem anderen Prinzip basiert. Dies könnte die Anwendung realistischer und auch plausibler machen, da sich virtuelle Objekte dann glaubwürdiger anfühlen.
Ein weiteres Problem ist die Reaktion auf unterschiedliche Benutzer. Die Schnittstelle des Handschuhs und seine Kalibrierung müssen in die Anwendung integriert werden. Unterschiedliche Handgrößen können dazu führen, dass der Handschuh auf eine falsche Größe kalibriert wird. Um dem entgegenzuwirken, wird derzeit ein Neustart der Anwendung oder des Handschuhs durchgeführt. Eine Lösung dieses Problems wäre die Integration der Kalibrierungsoption beim Start der Anwendung und aus dem Hauptmenü heraus.

7.2.3 Bewertung der entwickelten Software: SkillsLab+

Die um haptische Elemente erweiterte medizinische AR-Anwendung SkillsLab+ wurde in drei Studien von Studierenden und Ärzten getestet und die Ergebnisse im Kapitel '6.2.4 Gesamtfazit der Studienergebnisse' zusammengefasst. Basierend auf dieser Evaluation können nun die folgenden Schlussfolgerungen zum aktuellen Stand einer medizinischen Anwendung und deren Einfluss auf die titelgebende Deep Imersion gezogen werden.
Die Implementierung befindet sich auch mit der Integration des Datenhandschuhs auf dem Stand eines *Proof of Concept (PoC)*. Um diese Anwendung im regulären Lehrbetrieb anbieten zu können, müsste die Anwendung zunächst zur Produktreife gebracht werden. Die einzelnen Stationen müssten um weitere ergänzt und die bestehenden mit zusätzlichen Aufgaben versehen werden, damit das Angebot an Trainingsmaterial dem eines echten SkillsLab entspricht. Dies ist mit dem aktuellen Stand der Anwendung gut möglich, da die Programmierung modular erfolgte. Weitere Stationen, Objekte und Übungen können leicht hinzugefügt werden, da alle Funktionen (z.B.: Objekt aufnehmen, Objekt verwenden, Anatomische Struktur finden) bereits vordefiniert sind. Durch eine kleine Erweiterung an dieser Stelle könnte eine Schnittstelle implementiert werden, die genau diesen Prozess, eine neue Station oder eine neue Aufgabe anzulegen, erleichtert und so gestaltet ist, dass Nicht-Informatiker, d.h. die Ärzte oder Studierenden selbst, diese anlegen und verwalten können.
Ebenso wäre es immersionsfördernd und damit produktreif, wenn die Handschuhe ohne Computerverbindung mit der AR-Brille verbunden werden könnten (siehe '5.2 Betriebsmodi der Hardwarekomposition'). Die Magic Leap One kann die SkillsLab+-Anwendung selbstständig, d.h. ohne Verbindung zu einem Computer, berechnen. Lediglich für die gleichzeitige Nutzung von Datenhandschuhen und AR wird der Computer als Verbindungsschnittstelle benötigt. Die allgemeine Darstellungsqualität hingegen ist bereits heute auf einem Niveau, das eine Erweiterung des Physical SkillsLab als ersten Kontakt mit neuen Technologien, die in Zukunft eine immer wichtigere Rolle in der Medizin spielen werden, sinnvoll erscheinen lässt. Zudem ist die Akzeptanz auf Seiten der Studierenden sehr hoch (siehe '6.2.1 Auswertung des ersten Demonstrators' und '6.2.3 Auswertung des dritten Demonstrators') und die Ärzte betonen den Nutzen für die Vor- und Nachbereitung des Lernstoffes (siehe '6.2.3 Auswertung des dritten Demonstrators').

7.3 Vergleich zwischen Erwartungen und Ergebnissen

Zum Anforderungskatalog, auf den bereits im Kapitel '5.6 Bezug zum Anforderungskatalog aus technischer Sicht' aus technischer Sicht Bezug genommen wurde, wird im Folgenden unter Berücksichtigung der Studienergebnisse erneut Stellung genommen.

Harte Faktoren

Es konnte gezeigt werden, dass eine Augmented Reality-Anwendung durch haptisches Feedback erweitert werden kann (siehe '5.6 Bezug zum Anforderungskatalog aus technischer Sicht'). Aus Sicht der Experten (Mediziner) muss noch an der Kongruenz zwischen Visuellem und Haptischem gearbeitet werden, da es in der aktuellen Form noch nicht möglich ist, physikalische Objekte realitätsgetreu darzustellen bzw. nachzubilden (siehe '6.2.2.1 POC – Machbarkeit zusammengefasst'). Durch die weiche Programmierung und die strikte Trennung von Daten, Funktion und Darstellung (siehe '5.3 Vorstellung SkillsLab+') ist die Anwendung auch nach Abschluss der eigentlichen Programmierarbeiten relativ einfach erweiterbar.
Nachträglich können neue Stationen, neue Aufgaben und Prüfungen erstellt werden. Ebenso können bestehende Aufgaben um weitere medizinische Bilder und Falldaten (z.B. von Patienten aus lokalen Krankenhäusern) erweitert werden (siehe '5.6 Bezug zum Anforderungskatalog aus technischer Sicht'). Die Sicherheit der Daten, insbesondere der Patientendaten, ist zu jeder Zeit gewährleistet, da die Anwendung zum einen mögliche personenbezogene

Daten anonymisiert und zum anderen keine Internetverbindung nutzt. Es besteht keine Möglichkeit, Daten aus der Anwendung zu exportieren (siehe '5.6 Bezug zum Anforderungskatalog aus technischer Sicht').
Die Steuerung wechselt automatisch zwischen einer Eingabe über den Controller der Magic Leap und den Datenhandschuhen SenseGlove Nova, je nachdem, ob diese mit der Anwendung verbunden sind. Damit wechselt auch das Bedienschema automatisch von den Knöpfen des Controllers auf das Fingertracking des SenseGlove und ermöglicht zusätzlich über die Gestenerkennung die Erkennung von Greif- und Interaktionsgesten.
Die verschiedenen Betriebsmodi erlauben unterschiedliche Konfigurationen der Hardwarekomponenten, um die gleiche Anwendung auszuführen. Steht nur eine Magic Leap Brille zur Verfügung, ist ein orts- und zeitunabhängiges Arbeiten möglich (wobei sich das haptische Feedback in dieser Konfiguration auf den Magic Leap Controller beschränkt). Für den Standard-Modus ist ein Computer erforderlich, der die Verbindung zwischen der Anwendung, der AR-Brille und dem Datenhandschuh herstellt. Der erweiterte Modus erfordert einen Wechsel der Hardware und zusätzliche Implementierungsarbeiten und ist daher noch nicht verfügbar ('5.2 Betriebsmodi der Hardwarekomposition').

Weiche Faktoren

Die Implementierung des Datenhandschuhs wird von den Testern in den Studien im Vergleich zur Bedienung mittels Controller als intuitiver empfunden. Die Navigation durch die Menüs mittels Laserpointer bedarf keiner Erklärung und das „Anklicken" der Menüpunkte ist bereits aus ähnlichen XR-Anwendungen bekannt (siehe '6.2.1 Auswertung des ersten Demonstrators'). Da die gesamte Anwendung ohne externe Erklärungen oder Anleitungen auskommt und der Nutzer die Übungen in seinem eigenen Tempo und in der von ihm gewählten Reihenfolge durchführen kann, kann die Anwendung als studierendenzentriert bezeichnet werden.
Alle Aufgaben folgen den Erwartungshorizonten der SkillsLab-Stationen und bilden die Aufgaben so realitätsnah wie möglich ab. Ein Ersatz des physischen SkillsLab würde nach Meinung der Ärzte eine Steigerung der Realitätsnähe erfordern, die durch bessere Hardware und noch hochwertigere Modelle erreicht werden könnte (siehe '6.2.2 Auswertung des zweiten Demonstrators').

Funktionen

Das SkillsLab+ startet mit einem Hauptmenü, von dem aus alle Stationen aufgerufen werden können. Darunter befindet sich jeweils ein Auswahlmenü für die einzelnen Aufgaben. Die Aufgaben unterteilen sich in einen Prüfungsmodus, in dem zusätzliche Hinweise eingeblendet werden, und einen Standardaufgabenmodus. Jeder dieser Modi ist erweiterbar, so dass in Zukunft neue SkillsLab Stationen oder Aufgaben hinzugefügt werden können (siehe '5.3.2 Aufbau eines Levels'). Damit sind alle funktionalen Anforderungen erfüllt.

Allgemeine Interpretation der Ergebnisse

Abschließend kann eine wichtige Schlussfolgerung aus dem allgemeinen Studiendesign gezogen werden. Grundsätzlich sind die Studien aufgrund der relativ geringen Teilnehmerzahl (durch das relativ kleine N) eher als Tendenzen und erste Auswertungen zu verstehen. Die Auswertungen sollen lediglich eine Richtung aufzeigen, wie das tatsächliche Verständnis und die Akzeptanz solcher AR-Anwendungen mit haptischem Feedback aussehen. Bei diesem explorativen Ansatz könnte eher von einer Korrelation als von einer Kausalität gesprochen werden. Studien mit deutlich größeren Teilnehmerzahlen könnten zu einem anderen oder bestätigenden Ergebnis kommen. Diese Tatsache schmälert jedoch nicht den Erfolg des Proof of Concept, sondern ebnet den Weg für weitere Forschung in diesem Bereich. Bessere Technologien (Hard- und Software) könnten auf diesen Ergebnissen aufbauen und versuchen, einen Schritt weiter zu gehen. Sicher ist, dass digitale Methoden den ärztlichen Alltag in Zukunft erleichtern werden. In welcher Form und wie der Arzt damit umgehen wird, bleibt abzuwarten. Eine frühzeitige Schulung und die Schaffung erster

Berührungspunkte können dazu beitragen, dass die Bereitschaft steigt, diese Technik auch im eigenen Alltag zu nutzen.

7.4 Übertragbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse und Erfahrungen aus der Implementierung einer Anwendung mit Augmented Reality in Verbindung mit haptischem Feedback liefern neue Erkenntnisse, die auch außerhalb des Anwendungsbeispiels genutzt werden können.
Neben der medizinischen Ausbildung kann Augmented Reality mit haptischem Feedback in vielen Lehrszenarien eingesetzt werden. Überall dort, wo ein streng algorithmischer Handlungsablauf vermittelt werden soll, kann dieses Zusammenspiel von Visualisierung und Feedbacktechnologie eingesetzt werden. Die in der Medizin angewandten hohen Standards (Genauigkeit, Sicherheit und Reproduzierbarkeit) sind auf fast alle anderen Branchen übertragbar und werden dort teilweise bereits eingesetzt. Ein Beispiel außerhalb der Medizin ist die Automobilindustrie. Mechaniker können mit Hilfe von Augmented Reality zusätzliche Informationen auf ein vor ihnen stehendes Auto oder auf ein virtuelles Auto (oder Teile davon) projizieren lassen. Der Datenhandschuh könnte das Gefühl von Berührung oder Widerstand simulieren. Auch das Feedback von Werkzeugen könnte simuliert werden, über Kopfhörer könnten Geräusche abgespielt werden, die zum Feedback passen, und virtuelle Objekte könnten mit einem Röntgenblick „ durchleuchtet werden.
Bei der Übertragung auf andere Branchen sollte auf die jeweilige Zielgruppe geachtet werden. Die Untersuchungen dieser Arbeit wurden mit eher technikaffinen, jungen Probanden (Mediziner, Medizinstudierende) durchgeführt, die ohnehin die Zielgruppe der Anwendung darstellen. Daher können die Ergebnisse dieser Evaluation nicht verallgemeinert werden, sondern bedürfen jeweils einer Untersuchung mit eventueller Anpassung an die neue Zielgruppe.

7.5 Schlussbetrachtung

Zum Abschluss des Diskussionskapitel, wird nun noch einmal der Bezug zu den Forschungsfragen gezogen und eine finale Beantwortung dieser wird angestrebt. Des Weiteren wird darauf eingegangen, wie nach dieser Arbeit mit den Forschungsfragen verfahren werden kann und an welcher Stelle zukünftige Arbeiten anknüpfen könnten.

Forschungsfrage I: Welche technischen Voraussetzungen und Herausforderungen sind spezifisch für die Integration von haptischem Feedback in medizinische Augmented Reality-Anwendungen?
Der in Kapitel '4.3 Anforderungskatalog' vorgestellte Anforderungskatalog liefert spezifische Anforderungen, die aus technischer Sicht erfüllt werden müssen, um eine Augmented Reality-Anwendung zu realisieren, die den Methoden moderner AR-Anwendungen entspricht und die technischen Gegebenheiten (und Möglichkeiten) heutiger Hardware berücksichtigt. Haptisches Feedback in Form von vibrotaktilem und Force Feedback kann mit heutigen Methoden in eine AR-Anwendung integriert werden, sofern diese die Schnittstelle des Handschuhs implementiert. Zusätzlich muss bei der Verwendung einer Spiele-Engine darauf geachtet werden, dass die Plugins untereinander kompatibel sind und keine exklusiven Zugriffsrechte auf dieselben Ressourcen benötigen. Eine native Integration von Datenhandschuhen in beliebige AR-Anwendungen ist daher nicht möglich, da die Anforderungen des Plugins berücksichtigt werden müssen. Datenhandschuhe sind derzeit nicht in der Lage, eigenständig haptisches Feedback auf Basis virtueller Modelle zu generieren.
Eine weitere Voraussetzung ist, dass das Steuerungsschema ggf. angepasst werden muss, da z.B. der Einsatz von Datenhandschuhen den Einsatz eines Controllers obsolet macht. Fingertracking, die Position der Hand im Raum (z.B. um Objekte anzuklicken oder zu drücken) und ein Laserpointer zum Zeigen sind hier gute Alternativen, die zusätzlich die Immersion erhöhen können.

Forschungsfrage II: Lässt sich haptisches Feedback mittels Datenhandschuhen mit heutigen Methoden in eine AR-Anwendung integrieren? Wie sieht ein aktueller Prototyp einer solchen AR-Anwendung mit haptischem Feedback aus?

Der im Kapitel '5 Implementierung des Demonstrators' vorgestellte Demonstrator dient als Beispiel für die Implementierung einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung mit haptischem Feedback. Insbesondere die Verwendung eines Datenhandschuhs in AR stellt ein Novum dar und die Ergebnisse der Evaluationen zeigen, dass deutliches Verbesserungspotential (soft- und hardwareseitig) besteht. Die Studierenden empfinden das haptische Feedback als Vorteil in der AR-Anwendung, aber die Ärzte bemerken einen geringen Wettbewerb. Durch Personalisierung, z.B. durch Kalibrierung oder bessere Hardware, kann dieses Problem gelöst werden.

Der Balanceakt zwischen Performance und Echtzeitfähigkeit der Anwendung wird in Zukunft durch leistungsfähigere Hardware leichter zu bewältigen sein. Aus der Vielzahl der Möglichkeiten, die den Entwicklern heute zur Verfügung stehen, gilt es genau diese Lösung zu finden, die zwischen den Möglichkeiten abwägt und das bestmögliche Ergebnis liefert, ohne die Anforderungen aus dem Anforderungskatalog zu vernachlässigen und trotzdem zukunftssicher zu bleiben. Industriestandards wie weiche und damit anpassbare Programmierung erfordern, dass die Anwendung nicht zu sehr spezialisiert wird, sondern erweiterbar bleibt, um auch in Zukunft ihre Relevanz nicht zu verlieren. Auch hier wird auf Leistung verzichtet, um allgemeiner zu bleiben, um auch heute noch unbekannte zukünftige Anforderungen bewältigen zu können. Hinzu kommt, dass die Lösung mit begrenzten Ressourcen entwickelt wurde. Es stand nur ein begrenztes Budget zur Verfügung, da auch zukünftige Institutionen nicht über unbegrenzte Mittel für die Anschaffung und den Betrieb einer solchen lernunterstützenden Anwendung verfügen, eine begrenzte Entwicklungszeit, die zusätzlich durch die Corona-Pandemie eingeschränkt wurde und mit wenig Kontakt zu anderen Entwicklern verbunden war, und das Fehlen von Beispielen aus der Industrie, da AR in Verbindung mit Datenhandschuhen noch nie eingesetzt wurde.

Der wahre Wert dieser Integration wird sich wahrscheinlich erst dann zeigen, wenn die neuen Methoden ohne die derzeitigen Einschränkungen, sowohl durch technische Beschränkungen als auch durch fehlende Konzepte, die erst durch das Zusammenspiel neuer Technologien entstehen, eingesetzt werden können.

Forschungsfrage III: Inwieweit ist die Haptik in Augmented Reality-Anwendungen für medizinische Lehranwendungen akzeptabel und realistisch genug, um eine Übertragbarkeit auf reale Anwendungsszenarien zu gewährleisten und eine erfolgreiche Umsetzung der erlernten Handlungen in die reale Behandlungspraxis zu ermöglichen? Wie beeinflusst dies die Nutzererfahrung?

Die durchgeführten Studien haben gezeigt, dass haptisches Feedback in medizinischen Augmented Reality-Anwendungen bereits heute genutzt werden kann, um die Lehre zu verbessern bzw. in die Lehre integriert werden kann, um neue digitale Konzepte zu vermitteln. Ein vollständiger Ersatz bisheriger Lernszenarien ist jedoch noch nicht realisierbar. Dazu ist der Detailgrad des haptischen Feedbacks, also die Nachbildung von etwas Greifbarem, und die Kongruenz von haptischem Feedback und Augmented Reality noch nicht hoch genug. In diesem Fall kann noch nicht von Deep Immersion gesprochen werden, da die Teilnehmer noch nicht vollständig mit den virtuellen Objekten interagieren können, als wären es physische Objekte.

Die Echtzeitfähigkeit der Anwendung muss immer erhalten bleiben, sonst bricht die Immersion ab und das Empfundene bleibt nicht kongruent mit dem Gesehenen. Dies wird durch eine genaue Positionserkennung des Controllers und damit des Handschuhs unterstützt. Eine Verbesserung dieser Positionserkennung kann in Zukunft auch die Kongruenz und Immersion erhöhen.

Die Ergebnisse der dritten Studie zeigen, dass sich die Studierenden besser auf die Prüfung vorbereitet fühlten und auch etwas bessere Prüfungsergebnisse erzielten, was auf eine bessere Vorbereitung schließen lässt. Auch die Ärzte unterstützen diese These und befürworten eine Integration in die medizinische Lehre. Sie sehen in der Ergänzung zum klassischen Unterricht einen Mehrwert, raten aber von einer vollständigen Substitution zum jetzigen Zeitpunkt

ab. Eine Übertragbarkeit in den Arbeitsalltag können sich beide Probandengruppen vorstellen, wobei insbesondere die Ärzte einen Mehrwert im Abbau von Hemmschwellen im Umgang mit neuen Technologien sehen. Ebenso wird die Verkürzung der Einarbeitungszeit als Vorteil genannt.
Zusammenfassend kann die User Experience als positiv bewertet werden, wobei die Eindrücke der Zielgruppe (Studierende) besonders hoch sind. Diese Gruppe ist es, die den Umgang mit dieser Technologie lernen muss, um sie später im Alltag sicher nutzen zu können und zu wollen. Eine frühzeitige Schulung kann dazu beitragen.

Kapitel 8

Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde der Umgang mit haptischem Feedback in einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung am Beispiel des SkillsLab+ gezeigt. Im folgenden letzten Abschnitt dieser Arbeit werden alle Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und auf die Ausgangssituation sowie die eingangs formulierten Fragestellungen bezogen.

8.1 Zusammenfassung

Die medizinische Struktur Versorgung befindet sich im Wandel. Die in dieser Arbeit vorgestellte Integration von Augmented Reality und haptischem Feedback in medizinischen Anwendungen soll aktuelle Probleme des Gesundheitssystems adressieren und zu deren Bewältigung beitragen. Aktuell ist zu beobachten, dass eine immer größer werdende Anzahl an Patienten einer immer kleiner werdenden Anzahl an Leistungserbringern gegenübersteht, sei es durch Fachkräftemangel oder durch altersbedingtes Ausscheiden von Ärzten ohne entsprechenden Nachwuchs. Besonders im ländlichen Raum tritt dieses Problem auf. Der Trend zur Digitalisierung scheint hier die größten Potenziale zu bieten, der Problematik entgegenzuwirken, vor allem im Bereich der Dokumentation und der Entlastung der Ärzte durch den Wegfall von Doppeluntersuchungen und die Verlagerung von Arbeiten, die nicht zwingend von Ärzten durchgeführt werden müssen (siehe '1.1 Motivation').
Damit die Digitalisierung ihr volles Potenzial entfalten kann und nicht zu Mehrarbeit oder Frustration führt, muss sie auf Akzeptanz stoßen. Eine Grundlage dafür kann die frühzeitige Auseinandersetzung mit neuen digitalen Technologien sein. Dies erhöht die Bereitschaft, diese Technologien auch im späteren Arbeitsalltag zu nutzen (siehe '6.2.3 Auswertung des dritten Demonstrators').
Eine dieser modernen Technologien ist Augmented Reality. Durch die Einblendung von zusätzlichen Informationen in das unmittelbare Sichtfeld des Nutzers kann dieser mit virtuellen Strukturen lernen und nahezu jedes Lernszenario virtuell abbilden. Dies reduziert den Material-, Zeit- und Personalaufwand und senkt zudem die Anschaffungskosten für kostenintensive Modelle und Verbrauchsmaterialien (siehe '2.3 Anwendungsgebiet: SkillsLab'). Augmented Reality hat in der heutigen Form einen entscheidenden Nachteil gegenüber dem klassischen Training. Virtuelle Objekte sind nicht greifbar und die Interaktion mit ihnen beschränkt sich auf visuelle und akustische Eindrücke (siehe '2.1 Augmented Reality').
Nachdem die Grundlagen vorgestellt und die Vorteile der Immersion gegenüber der Virtuellen Realität aufgezeigt wurden, stellte sich die Frage, wie der Demonstrator umgesetzt werden sollte. Die Entscheidung fiel auf eine Implementierung mit Hilfe einer Game Engine, da hier die Vorteile der vorhandenen Schnittstellen zu allen Hardwarekomponenten und der einfacheren Programmierung gegenüber einer nativen Implementierung, die eine größere Anpassbarkeit, aber auch einen höheren Implementierungsaufwand bedeutet, zum Tragen kamen (siehe '4.4 Technologieauswahl').

Haptisches Feedback in Augmented Reality-Anwendungen wird derzeit nur selten in der Literatur erwähnt, und zudem wird die Implementierung oft mit der von VR verwechselt oder nicht klar getrennt. Die vorgestellten Anwendungen sind hochspezialisiert und dienen beispielsweise dem Training im Umgang mit Operationsrobotern (siehe '3.3.3 Augmented Reality-Anwendungen mit haptischem Feedback'). Diese hohe Spezialisierung und das fehlen einer generalisierten Anwendung könnte an der fehlenden Integration von Datenhandschuhen mit medizinischen Augmented Reality-Anwendungen liegen.

Datenhandschuhe haben gegenüber spezialisierten haptischen Aktoren den Vorteil, dass sie universeller einsetzbar sind und unterschiedliche Handlungsabläufe simulieren können. Darüber hinaus gibt es Modelle, die sowohl vibrotaktiles Feedback, z.B. zur Warnung durch Vibration, als auch Force Feedback, durch Einschränkung der Bewegung, um das Gefühl von etwas Greifbarem zu simulieren (siehe '2.2.1 Arten von haptischem Feedback') besitzen.

Nach der Beschreibung der Hard- und Software folgte als letztes Kapitel der Grundlagen das Anwendungsgebiet, in dem die Implementierung und die entwickelten Demonstratoren evaluiert werden sollten. Der Medizinerkurs SkillsLab dient dazu, erste praktische Handgriffe für Diagnosen, Behandlungen und den richtigen Umgang mit medizinischen Geräten zu vermitteln. Das SkillsLab funktioniert stationsbasiert, d.h. jeder Übung ist eine Station mit einem anatomisch korrekten Modell der zu untersuchenden Struktur und einem Tutor zugeordnet (siehe '2.3.2 Beschreibung und Vorstellung des SkillsLab der Universität Siegen'). Die Besonderheit dieses Kurses besteht darin, dass alle Materialien an einem Ort verfügbar sind und dass dieser Kurs (derzeit und während der Corona-Pandemie) nur als Präsenzkurs durchgeführt werden könnte. Dieses Problem wird noch dadurch verschärft, dass die Zeit, die jeder Studierende im SkillsLab verbringen kann, begrenzt ist und zusätzlich eine geschulte Begleitung (Tutor) erfordert. Abgesehen von einer Literaturrecherche ist es nicht möglich, den Kurs vorab zu Hause auszuprobieren und die Übungen einmal durchzuspielen.

Das in dieser Arbeit vorgestellte Konzept zielt darauf ab, die Vorteile von Augmented Reality mit haptischem Feedback in einer praktischen medizinischen Lehranwendung, dem SkillsLab, zu evaluieren, um festzustellen, ob der Einsatz in der medizinischen Lehre sinnvoll ist und die digitale Lehre verbessern könnte. Das Konzept sieht eine erweiterbare Anwendung vor, in der jede Station des SkillsLabs eine virtuelle Repräsentation erhält und jede Übung sequentiell und beliebig oft von jedem Studierenden mit einer AR-Brille und einem Paar Datenhandschuhen durchgeführt werden kann.

Als Grundlage für dieses Konzept dienen neben den Erkenntnissen aus der Literaturrecherche zu den technischen Grundlagen und dem Stand der Technik von AR-Anwendungen (siehe '3.3.1 Allgemeine Augmented Reality-Anwendungen'), AR-Hardware (siehe '3.2.1 Augmented Reality-Hardware') und Hardware für haptisches Feedback (siehe '3.3.3 Augmented Reality-Anwendungen mit haptischem Feedback') drei Experteninterviews mit Ärzten, die selbst einen engen Bezug zum SkillsLab und/oder Erfahrungen mit Augmented Reality, speziell in medizinischen Anwendungen, haben. Die Ergebnisse des leitfadengestützten Experteninterviews sprechen dafür, dass eine Digitalisierung und damit die Entkopplung von der Präsenzpflicht dieses Kurses sinnvoll ist (siehe '4.2 Anforderungserhebung aus Experteninterviews'). Das Ergebnis dieser Anforderungsanalyse ist ein Anforderungskatalog mit harten und weichen Faktoren, welche die geplante Anwendung erfüllen muss, um als adäquate Lösung für diesen Digitalisierungsansatz zu gelten (siehe '4.3 Anforderungskatalog'). Wichtige harte Faktoren sind beispielsweise die Kongruenz von visuellen AR-Objekten und taktiler haptischer Rückmeldung oder die Zeit- und Ortsunabhängigkeit der Umsetzung.

Für die Umsetzung des Konzepts wurde die Unreal Engine in der Version 4.26 als Programmierumgebung sowie die Magic Leap One als AR-Brille mit dem SenseGlove Nova als Datenhandschuh gewählt. Als Basis diente die Anwendung SkillsLab+, die um haptische Elemente erweitert wurde (siehe '4.4 Technologieauswahl'). Dadurch ist es möglich, virtuelle Objekte zu berühren, zu greifen und mit ihnen zu interagieren. So kann beispielsweise eine virtuelle Spritze in die Hand genommen und mit einem Impfstoff gefüllt werden. Die dazu notwendigen Bewegungen sind denen der physischen Welt nachempfunden. Der Bolzen der Spritze bewegt sich und erzeugt an den Berührungspunkten

mit dem Datenhandschuh ein restriktives Force Feedback.
Zur Evaluierung des Demonstrators wurden drei Studien durchgeführt. Die erste Studie dient als Proof of Concept und wurde mit Studierenden im Rahmen der Durchführung des eigentlichen SkillsLabs als eigene Station durchgeführt. Die Ergebnisse sprechen für den Einsatz und eine Akzeptanz auf Seiten der Studierenden (siehe '6.2.1 Auswertung des ersten Demonstrators'). Die zweite Studie wurde mit praktizierenden Ärzten aus den lokalen Krankenhäusern durchgeführt und sollte die Sichtweise der späteren Anwendung beleuchten. Die Ärzte waren sich einig, dass das Training mit diesem System den zukünftigen Ärzten die Anwendung im Alltag erleichtern und Hemmungen vor der Anwendung abbauen könnte (siehe '6.2.2 Auswertung des zweiten Demonstrators'). Die letzte Studie wurde wiederum mit Studierenden (eines späteren Jahrgangs) durchgeführt und zielte auf den Lernerfolg und das Gefühl ab, auf die Prüfung vorbereitet zu sein. Die Studie bestätigte zwar die Hypothese, dass das Training einen Mehrwert gegenüber rein konventionellem Training bietet, dieser Mehrwert ist jedoch gering. Aus den Ergebnissen lässt sich schließen, dass ein rein digitales Training mit den derzeitigen Methoden der AR und des haptischen Feedbacks noch nicht abbildbar ist, dies aber mit fortschreitender Technologie in Zukunft möglich sein wird (siehe '6.2.3 Auswertung des dritten Demonstrators').
Nach eingehender Betrachtung der vorliegenden Informationen und Erkenntnisse lässt sich abschließend festhalten, dass die Kombination von Augmented Reality und haptischem Feedback in der praktischen medizinischen Ausbildung zur Unterstützung des Distanzunterrichts eingesetzt werden kann. Eine Substitution der Präsenzlehre durch diese digitalen Methoden ist nach derzeitigem Stand der Technik noch nicht möglich, da noch kein Zustand von Deep Immersion erreicht wurde. Sie können aber als gute Ergänzung dienen, insbesondere wenn die Methoden der Präsenzlehre nicht zur Verfügung stehen. Darüber hinaus kann die subjektive Wahrnehmung des Lernstoffs und der Prüfungsvorbereitung verbessert und das gesamte Lernkonzept studierendenzentrierter gestaltet werden. Die Studierenden können das Tempo und die Anzahl der notwendigen Wiederholungen selbst bestimmen und somit in einem für sie angemessenen Arbeitstempo lernen (siehe '7.5 Schlussbetrachtung').

8.2 Ausblick und künftige Arbeiten

Die Zukunft der Medizin wird wahrscheinlich von zwei Faktoren bestimmt werden. Zum einen die personalisierte (maßgeschneiderte) Medizin und zum anderen die Unabhängigkeit von Ort und Zeit bzw. die Unabhängigkeit von physischen Arztbesuchen. Die Digitalisierung mit den Maßnahmen des BfArM (z.B. elektronische Patientenakte, Videosprechstunde und DiGA) wird helfen, diesen Trend weiter voranzutreiben. Die Nutzung von Patientendaten wird eine immer größere Rolle spielen und der Einsatz von KI wird unverzichtbar. Der richtige und effiziente Umgang mit diesen Methoden muss frühzeitig erlernt werden und eine Veränderung der Rollen im Gesundheitssystem ist notwendig. [173]
Um das in dieser Arbeit vorgestellte System in die medizinische Lehre integrieren zu können, sind noch einige Verbesserungen notwendig. Mögliche Ansätze und erste Verbesserungsvorschläge werden im folgenden Kapitel vorgestellt. Dabei wird vor allem auf die Hard- und Softwarekomponenten der in dieser Arbeit vorgestellten Anwendung eingegangen.

8.2.1 Ausblick: Hardware

Die verwendete Hardware entspricht dem heutigen Stand der Technik. Zukünftige oder teurere Hardware ermöglicht jedoch eine bessere Umsetzung der Applikation. Im Laufe der Implementierung wurden von den Herstellern beider Geräte Nachfolgemodelle angekündigt, die die Handhabung der Anwendung weiter verbessern könnten.
Ein weiterer genereller Aspekt, der die Handhabung des Datenhandschuhs und der Augmented Reality-Brille verbessern könnte, ist die vollständig kabellose Nutzung. Derzeit ist es nicht möglich die Datenhandschuhe (z.B. Senseglove Nova) nativ mit einer Augmented Reality-Brille (z.B. Magic Leap One) zu verbinden. Obwohl beide

Geräte Bluetooth-fähig sind, fehlt ein Treiber, ein Plugin oder eine Schnittstelle, um die Signale der Handschuhe an eine Anwendung weiterzuleiten. In Zukunft könnte die auf C++ basierende API des Magic Leap One genutzt werden, um selbst eine Schnittstelle zu den Senseglove Nova zu implementieren. Allerdings müsste für jedes Paar Handschuhe eine eigene Schnittstelle erstellt werden, da es (noch) keine einheitliche Softwareanbindung, ähnlich der Integration von VR-Brillen, für haptische Handschuhe gibt.

SenseGlove 2

Das bereits im Kapitel '3.2.2.2 SenseGlove 2' vorgestellte Nachfolgemodell kann die Bedienung bzw. Interaktion des Benutzers mit der Anwendung SkillsLab+ verbessern. Durch die Möglichkeit ein zusätzliches haptisches Feedback an der Handfläche zu erzeugen, kann ein besseres Greifgefühl simuliert werden. In Kombination mit einem anderen HMD könnte auch eine vollständig drahtlose Verbindung hergestellt werden. Alternativ könnte auch ein neues Modell eines Datenhandschuhs verwendet werden.

Magic Leap 2

Die Magic Leap 2 bietet im Vergleich zu ihrem Vorgänger einige Neuerungen, die den Komfort und die Anbindung an andere Hardware verbessern können. Neben der Unterstützung des XR-Standards, wodurch Apps, die diesen Standard unterstützen, nativ auf der Brille laufen, bietet sie einen neueren Bluetooth-Standard, um Datenhandschuhe drahtlos mit der Brille verbinden zu können. Darüber hinaus bieten die bessere Auflösung und das größere Sichtfeld ein realistischeres und glaubwürdigeres Bild im Vergleich zu den derzeit verwendeten Technologien (siehe '3.2.1.1 Magic Leap One und Magic Leap 2'.

Weitere Sinneseindrücke

Nachdem in dieser Arbeit die Integration von haptischen Elementen in Augmented Reality-Anwendungen gezeigt wurde, könnte die Integration von weiteren Sinneseindrücken wie Temperatur, Geruch oder eine Verfeinerung der Haptik durch Elemente wie Oberflächenbeschaffenheit (z.B. glatt und rau) erweitert werden. Einige Kleidungsstücke, die haptisches Feedback erzeugen können, wie der Teslasuit, sind auch in der Lage, Temperaturen zu simulieren. Diese Funktion befindet sich derzeit noch im Teststadium und es wird daran geforscht, würde aber neue Möglichkeiten für den Anatomieunterricht eröffnen. Beispielsweise könnte ein Student seine Hand auf die Stirn eines virtuellen Patienten legen, um zu fühlen, ob sie sich warm anfühlt. Gerüche aus dem Operationssaal könnten simuliert werden, um angehende Ärzte noch besser darauf vorzubereiten. Auch die Oberflächen virtueller Objekte könnten dargestellt werden, um ein noch realistischeres Training zu ermöglichen.

Hologramme

Eine der größten Einschränkungen von Augmented Reality und Augmented Reality Hardware ist derzeit, dass jeder Teilnehmer einen eigenen Zugang benötigt, z.B. über eine AR-Brille. Die in Filmen gezeigte Technologie der Hologramme hat einen großen Vorteil: Virtuelle Objekte werden in den gleichen Raum projiziert wie die physischen Objekte. Diese Objekte sind für jeden sichtbar und benötigen keine zusätzliche Hardware.
Eine Möglichkeit, Hologramme bereits heute zu nutzen, ist die Projektion eines Beamer-Bildes auf eine Nebel- oder Dampfwand. Die halbtransparente Oberfläche, die Wasserwand, lässt das Bild im Raum schweben. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung von Ventilatoren mit LEDs an den Rotorblättern, die je nach Position ein- und ausgeschaltet werden können und deren Farbe individuell bestimmt werden kann. So entsteht eine runde Fläche, die als Bildschirm genutzt werden kann. Die Farbe Schwarz bedeutet in diesem Fall, ähnlich wie bei Augmented Reality-Brillen, dass die Lampen aus sind und das Bild an dieser Stelle transparent ist.
Die Technik der Hologrammprojektion ist derzeit noch nicht so weit fortgeschritten, dass sie einen praktischen Nutzen für den Alltag oder den medizinischen Alltag bieten könnte. Abgesehen von vereinzelten Anwendungen zu Werbezwecken finden sich in der aktuellen Literatur keine weiteren Beispiele. Die Projektionen sind immer

zweidimensional, auch wenn sie auf eine unebene dreidimensionale Fläche treffen. Außerdem ist die Auflösung meist deutlich schlechter als bei Displays.

Integration realer Objekte

Reale Objekte können für AR-Anwendungen erkannt und mit einem virtuellen Gegenstück versehen werden. So kann mit ihnen interagiert und ein zusätzliches haptisches Feedback erzeugt werden. Wie bei der Reanimationsapplikation der Firma „Vireed“ können medizinische Modelle, sofern vorhanden, in die Anwendung integriert und z.B. durch die Einblendung von Handlungsempfehlungen, einer To-Do-Liste oder weiteren wissenswerten Informationen ergänzt werden.

Ebenso können 3D-gedruckte Objekte verwendet werden, um die Anwendung zu erweitern. Deren Position kann erkannt, erfasst und verfolgt werden, so dass weitere physische Objekte mit der virtuellen Anwendung interagieren können.

8.2.2 Ausblick: Software

Im Gegensatz zur Hardware, die ausgetauscht werden muss, kann die Software verbessert und erweitert werden. Neben der Möglichkeit, wieder von vorne anzufangen, bietet der modulare Aufbau und die Verwendung der Unreal Engine 4 als Spiele-Engine die Möglichkeit, später neue Funktionen hinzuzufügen und bestehende Funktionen zu erweitern.

Patientendaten

Eine Möglichkeit, die der Arbeit mit medizinischen Phantomen immer verwehrt bleiben wird, ist die Echtzeit-Integration von Patientendaten und die Generierung von 3D-Modellen daraus. Studierende könnten mit Hilfe von Patientendaten von sich selbst oder von Patienten verschiedene Krankheitsbilder und anatomische Unterschiede an Modellen erlernen. Ähnlich wie bei der Operationsplanung von Brainlab (siehe ’3.3.2 Operationsvorbereitung und -planung’) könnten die Studierenden statt mit „perfekten“ Modellen von Fall zu Fall mit kleinen Unterschieden konfrontiert werden und lernen, Anomalien von normalen Unterschieden zu unterscheiden. Aus diesen medizinischen Bilddaten könnten *Volumetric textures*, dreidimensionale Texturen erstellt werden. Je nachdem, wie das 3D-Modell „geschnitten“ wird, ergibt sich ein anderes Bild und die anatomischen Modelle könnten von innen korrekt dargestellt werden. Mit dieser Technik könnte das Modell eines Herzens aufgeschnitten werden und die Studierenden könnten die Struktur und z.B. die Herzklappen sehen. Dies könnte die Bildgebung und das Training dessen verbessern.

In Verbindung mit haptischem Feedback könnte dieser Sinn ebenfalls angesprochen werden und feine Unterschiede könnten im Lernszenario „ertastet“ werden. Strukturen, die gleich aussehen, können sich unterschiedlich anfühlen, was wiederum zu einer unterschiedlichen Bewertung führen kann. Ein Schritt in diese Richtung wäre die Weiterentwicklung des Brusttasters mit verbessertem haptischen Feedback, angepasst an einen Datenhandschuh [55].

Steuerung von Operationsrobotern

Das Training im Umgang mit Datenhandschuhen könnte die Nutzung und Integration weiterer moderner Technologien verbessern. Beispielsweise könnten Studierende ihre Kenntnisse im Umgang mit Datenhandschuhen nutzen, um moderne Operationsroboter zu steuern. Die Bedienung folgt ähnlichen Prinzipien und das Erlernen erfordert mehr Transferwissen als Grundlagenwissen. Die Hemmschwelle vor dem Einsatz könnte gesenkt und das Selbstvertrauen im Umgang gestärkt werden, da die Bedienung bereits (entfernt) bekannt ist.

Darüber hinaus können „Verbotszonen“ definiert werden, die der Benutzer nicht betreten darf. Dies könnte z.B. gesundes Gewebe sein. Nähert sich der Benutzer einer dieser Grenzen, könnte der Handschuh eine Rückmeldung geben, so dass der Benutzer spürt, wo die Grenzen sind.

Unreal Engine 5 und OpenXR

Durch den Einsatz der Spiele-Engine Unreal Engine 4 konnten einige Vorteile gegenüber einer nativen Entwicklung genutzt werden. Da auch die Entwicklung der Engine voranschreitet, bietet die Nachfolgeversion, die Unreal Engine 5, weiteres Potential für neue Entwicklungen. Darüber hinaus bietet die neueste Version einige Vorteile in den Bereichen Performance und Interoperabilität.
Ein großer Vorteil ist die Verwendung des OpenXR-Standards, der es ermöglicht, eine Anwendung auf jedem HMD zu verwenden, das diesen Standard unterstützt. Die Anwendung wäre nicht mehr an ein bestimmtes HMD gebunden. Wenn die Anwendung Multiplayer unterstützt, könnten sogar mehrere Brillen verschiedener Hersteller gemeinsam genutzt werden.

Multiplayer

Wie bereits im vorherigen Absatz erwähnt, könnte ein Multiplayer-Modus den Lernerfolg weiter steigern. Die Anwendung könnte eine Schüler-Lehrer-Situation simulieren oder Studierende könnten gemeinsam an einer Station üben. Dabei könnte jeder ein individuelles Paar Datenhandschuhe tragen und jeder würde sein eigenes haptisches Feedback erhalten, je nach Berührung und Interaktion. Eine Zeige- oder Markierungsfunktion könnte es den Teilnehmenden ermöglichen, besser mit den virtuellen Modellen zusammenzuarbeiten, um gemeinsam zum Ziel zu gelangen.

MetaHuman

Ein digitaler Tutor, ein *NPC*, in Form eines MetaHumans, der Unreal Engine, könnte den Unterricht unterstützen. Die Anweisungen der To-Do-Liste könnten durch Hinweise dieses Tutors ergänzt werden. Ebenso könnten Fragen an ihn gestellt werden und er könnte unterstützende Hinweise im Ablauf geben. Gegebenenfalls könnte er auch die Übung vorführen und die Handschuhe könnten das haptische Feedback der Hände des Tutors simulieren. [48]

Methoden der Künstlichen Intelligenz

Künstliche Intelligenz ermöglicht es Entwicklern, neue Inhalte auf bisher ungeahnte Weise zu generieren. Das Large Language Model (LLM) ChatGPT der „OpenAI“ bietet bereits heute eine natürlich wirkende textbasierte Kommunikation mit dem PC.
Die vorgestellte Idee des digitalen Tutors kann durch ein KI-System in die Lage versetzt werden, auf natürliche Sprache zu reagieren, kontextbezogen auf Fragen zu antworten und ggf. Schwächen und Unsicherheiten im Gespräch zu erkennen. Ein Text-zu-Sprache- und Sprach-zu-Text-Algorithmus müsste verwendet werden, um die gesprochene Anfrage des Studierenden in Text für die KI zu übersetzen und umgekehrt. Die Möglichkeit, natürlich klingende Sprache zu erzeugen, ist bereits heute gegeben, ebenfalls durch KI.
Eine weitere Möglichkeit ist die Integration direkt im Implementierungsschritt. KI kann den Programmierer dabei unterstützen, die Anwendung nach seinen Wünschen und Vorstellungen zu implementieren. Mit Hilfe von KI-basierten digitalen Assistenten können komplexe Implementierungen einfacher umgesetzt werden und auch Programmieranfänger können sinnvolle Ergebnisse erzielen. Ein Anwendungsfall wäre die Erweiterung des SkillsLab+ durch Programmieranfänger oder Ärztinnen und Ärzte. Die Entwicklungsumgebung könnte über eine KI-Schnittstelle die Anweisungen übernehmen und in Code übersetzen. So könnte der medizinische Anwendungsfall direkt von den Endanwendern ohne Hilfe von Informatikern und Informatikerinnen umgesetzt werden. Ebenso könnten Studierende in die Erweiterung mit eigenen Fällen und Anwendungsszenarien einbezogen werden.

Unterstützung der Rehabilitation von Patienten

Datenhandschuhe können in der Rehabilitation eingesetzt werden, um beispielsweise Schlaganfallpatienten zu helfen, ihre Muskeln zu trainieren oder Bewegungsabläufe neu zu erlernen. Ein Datenhandschuh, der bereits heute zu diesem Zweck eingesetzt werden kann, ist der in 'Abbildung 8.1' dargestellte markenlose Rehabilitation. Über ein

pneumatisches System kann die Bewegung der Hand gesteuert und beeinflusst werden. In Kombination mit einer AR-Anwendung lassen sich verschiedene Lernszenarien abbilden, so dass Patienten beispielsweise den Umgang mit Gefäßen, Werkzeugen oder Alltagsgegenständen üben und erlernen können. Der Umgang mit virtuellen Objekten bietet den Vorteil, dass der Trainierende alleine mit vielen verschiedenen Objekten interagieren kann, diese nicht herunterfallen, zerbrechen oder Flüssigkeiten verschütten können, wie es bei konventionellem Training der Fall wäre.

Abbildung 8.1: Datenhandschuh mit einer Reha-Anwendung

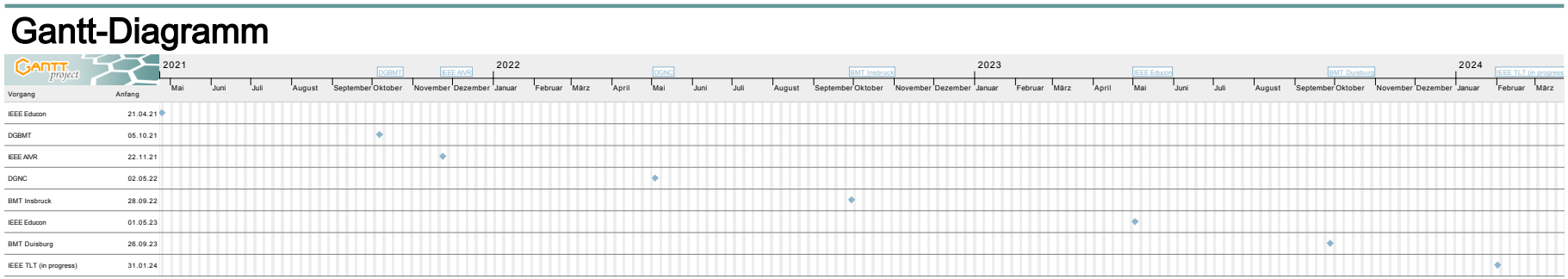
Spielelemente

Um die Motivation beim Lernen und Trainieren zu erhalten und zu steigern, könnten bestimmte Elemente aus Videospielen übernommen werden. Ein Punktesystem, das den Lernenden für die richtige Durchführung, die richtige Reihenfolge oder die Vermeidung von Kontaminationen belohnt, wäre ein solches System. Die Punkte könnten in einer Rangliste zusammengefasst werden und die Studierenden könnten um die höchste Auszeichnung konkurrieren. Ebenso wäre ein Zeitdruck über eine Stoppuhr motivierend, da dies auch eine Stresssituation simulieren und somit den Realismus erhöhen könnte. Die Studierenden könnten sich noch besser in die Trainingssituation hineinversetzen und durch das Ausblenden der Umgebung für noch mehr Immersion sorgen.

Kapitel 9

Anhang

9.1 Schaubild: Zeitlicher Verlauf der Konferenzen als Gantt-Chart



Konferenzen im Überblick

Konferenz	Beginn
IEEE Educon	21.04.21
DGBMT	05.10.21
IEEE AIVR	22.11.21
DGNC	02.05.22
BMT Insbruck	28.09.22
IEEE Educon	01.05.23
BMT Duisburg	26.09.23
IEEE TLT (in progress)	31.01.24

9.2 Leitfadengestütztes Expertentinterview

Experteninterview SkillsLab

Medizinlehre - SkillsLab	
Frage 1:	Wie sehen Ihre Berührungspunkte zum SkillsLab aus?
Frage 2:	Welche Relevanz hat das SkillsLab für die Medizinlehre?
Frage 3:	Was ist Ihnen bei der Lehre medizinischen Inhalte besonders wichtig?
Frage 4:	Wie sieht ihre übliche Lehrmethode aus?
Frage 5:	Wo liegen aktuelle Probleme in der Durchführung des SkillsLabs?
Frage 6:	Wie relevant sind anatomisch korrekte Modelle und Phantome für die Medizinlehre?
Frage 7:	Wie hoch schätzen Sie den Ressourcenaufwand für die Durchführung des aktuellen SkillsLabs (Zeit, Kosten, Personal, Material, Räumlichkeiten)?
Augmented Reality	
Frage 8:	Welche Berührungspunkte haben Sie mit Augmented Reality?
Frage 9:	Welche Eigenschaften sind bei einer Augmented Reality-Anwendung im Allgemeinen wichtig für Sie?
Frage 10:	Welche Erfahrungen haben Sie bisher mit Augmented Reality im Medizinischen Alltag und in der Medizinlehre gemacht?
Frage 11:	Sollte man Augmented Reality in der Medizinlehre einsetzen, wenn ja, in welcher Form?
Frage 12:	Sollten zusätzliche Informationen in das Sichtfeld des Studierenden eingeblendet werden?
Frage 13:	Lassen sich die gelernten AR-Inhalte auf den Alltag übertragen/übernehmen?
Haptisches Feedback	
Frage 14:	Sind Sie mit haptischem Feedback vertraut? In welcher Form haben Sie es schon verwendet?
Frage 15:	Könnte haptisches Feedback die Medizinlehre unterstützen?
Frage 16:	Im Bezug auf Augmented Reality und Haptik: Was für ein Feedback sollten Probanden während der Lehre erhalten und in welcher Form?
Frage 17:	Wie hoch schätzen Sie das Potential von Augmented Reality in Verbindung mit haptischem Feedback in medizinischen Lehranwendungen ein?
Szenario:	Stellen Sie sich vor, dass jeder Medizin Student zu beginn seines Studiums eine Augmented Reality-Brille und ein Paar Haptische Handschuhe erhält. In wie fern würde es das Medizin Studium beeinflussen?

9.3 1. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2022

Teil A: Vorwissen AR-Anwendungen

A1. Vorwissen AR-Anwendungen

	1 - Stimme überhaupt nicht zu	2	3	4 - Stimme weder zu noch lehne ab	5	6	7 - Stimme voll und ganz zu
Ich habe bereits Erfahrungen mit Augmented Reality-Anwendungen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich nutze regelmäßig AR-Anwendungen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich bin vertraut mit der Bedienung von AR-Anwendungen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich habe bereits Erfahrungen mit medizinischen AR-Anwendungen gesammelt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Teil B: PQ

B1. Einbindung

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie sehr konnten Sie die Ereignisse kontrollieren?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie reagierte die virtuelle Umgebung auf die von Ihnen initiierten (oder durchgeführten) Aktionen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie natürlich erschienen Ihnen Ihre Interaktionen mit der virtuellen Umwelt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie sehr wurden Sie von den visuellen Aspekten der virtuellen Umgebung einbezogen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie natürlich war der Mechanismus, der die Bewegung durch die virtuelle Umgebung steuerte?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie überzeugend war Ihr Gefühl, dass sich virtuelle Objekte durch den Raum bewegen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Inwieweit stimmten Ihre Erfahrungen in der virtuellen Umgebung mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie vollständig waren Sie in der Lage, die Umgebung mit Hilfe des Sehvermögens aktiv zu erkunden oder zu durchsuchen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie überzeugend war Ihr Gefühl, sich in der virtuellen Umgebung zu bewegen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut konnten Sie Objekte in der virtuellen Umgebung bewegen oder manipulieren?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie sehr waren Sie in die Erfahrung der virtuellen Umgebung eingebunden?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie einfach war es, Objekte durch physische Interaktion zu identifizieren, z. B. durch Berühren eines Objekts, Überfahren einer Oberfläche oder Anstoßen an eine Wand oder ein Objekt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

B2. Sensorische Wiedergabetreue

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie sehr haben Sie die auditiven Aspekte der virtuellen Umgebung einbezogen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut konnten Sie Geräusche identifizieren?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut konnten Sie Geräusche lokalisieren?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut konnten Sie die virtuelle Umgebung durch Berührung aktiv erkunden oder durchsuchen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie genau konnten Sie virtuelle Objekte untersuchen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut konnten Sie virtuelle Objekte aus verschiedenen Blickwinkeln untersuchen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

B3. Adaption / Immersion

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Konnten Sie vorhersehen, was als nächstes als Reaktion auf die von Ihnen durchgeführten Aktionen passieren würde?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie schnell haben Sie sich an die virtuelle Umgebung gewöhnt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut konnten Sie sich in der virtuellen Umgebung bewegen und mit ihr interagieren, als Sie das Erlebnis beendet hatten?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut konnten Sie sich auf die zugewiesenen Aufgaben oder erforderlichen Aktivitäten konzentrieren und nicht auf die Mechanismen, die zur Ausführung dieser Aufgaben oder Aktivitäten verwendet wurden?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie stark wurden Ihre Sinne bei diesem Erlebnis beansprucht?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Gab es Momente während der Erfahrung der virtuellen Umgebung, in denen Sie sich vollständig auf die Aufgabe oder die Umgebung konzentriert haben?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie leicht fiel es Ihnen, sich an die Steuergeräte zu gewöhnen, die zur Interaktion mit der virtuellen Umgebung verwendet wurden?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Waren die Informationen, die durch die verschiedenen Sinne in der virtuellen Umgebung vermittelt wurden (z. B. Sehen, Hören, Tasten), konsistent?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

B4. Interface Qualität

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie groß war die Verzögerung zwischen Ihren Aktionen und den erwarteten Ergebnissen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Inwieweit hat die Qualität der visuellen Darstellung Sie bei der Ausführung der zugewiesenen Aufgaben oder erforderlichen Aktivitäten beeinträchtigt oder abgelenkt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Inwieweit haben die Kontrollgeräte Sie bei der Ausführung der zugewiesenen Aufgaben oder bei anderen Tätigkeiten beeinträchtigt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Teil C: IPQ

C1. IPQ

	1 - Stimme überhaupt nicht zu	2	3	4 - Stimme weder zu noch lehne ab	5	6	7- Stimme voll und ganz zu
In der computererzeugten Welt hatte ich den Eindruck, dort gewesen zu sein.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich hatte das Gefühl, daß die virtuelle Umgebung hinter mir weitergeht.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich hatte das Gefühl, nur Bilder zu sehen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich hatte nicht das Gefühl, in dem virtuellen Raum zu sein.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich hatte das Gefühl, in dem virtuellen Raum zu handeln statt etwas von außen zu bedienen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich fühlte mich im virtuellen Raum anwesend.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie bewußt war Ihnen die reale Welt, während Sie sich durch die virtuelle Welt bewegten (z.B. Geräusche, Raumtemperatur, andere Personen etc.)?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Meine reale Umgebung war mir nicht mehr bewußt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich achtete noch auf die reale Umgebung.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Meine Aufmerksamkeit war von der virtuellen Welt völlig in Bann gezogen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie real erschien Ihnen die virtuelle Umgebung?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Teil D: SkillsLab+

D1. SkillsLab+

	1 - Stimme überhaupt nicht zu	2	3	4 - Stimme weder zu noch lehne ab	5	6	7 - Stimme voll und ganz zu
Mir hat die Durchführung des SkillsLab+ gefallen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich finde die digitale Umsetzung des SkillsLabs gelungen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Eine Durchführung des SkillsLab+ VOR dem Beginn des eigentlichen SkillsLabs erachte ich für sinnvoll / hilfreich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Eine Durchführung des SkillsLab+ NACH der Durchführung des eigentlichen SkillsLabs erachte ich für sinnvoll / hilfreich.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Das SkillsLab+ hat mich bei der Vorbereitung / Nachbereitung der Inhalte des SkillsLabs unterstützt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich finde das SkillsLab+ kann in vielen Aspekten noch verbessert und erweitert werden.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich kann mir einen Einsatz des SkillsLab+ im Distanzunterricht vorstellen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich erachte einen Einsatz des SkillsLab+ im Distanzunterricht für sinnvoll / hilfreich (z.B. während eines Lockdowns).	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich könnte mir einen Einsatz des SkillsLab+ in der Medizinlehre vorstellen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich könnte mir einen Einsatz des SkillsLab+ in Verbindung mit den haptischen Handschuhen in der Medizinlehre vorstellen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich empfand die Umsetzung des SkillsLab+ mit den haptischen Handschuhen als gelungen.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich fand das Feature der X-Ray Vision gut.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich empfand das Feature der X-Ray Vision als hilfreich und unterstützend bei der Durchführung der Anwendung.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Ich wusste zu jedem Zeitpunkt was ich als nächstes zu tun habe.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Mir wurden die Instruktionen innerhalb der Anwendung verständlich vermittelt.	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Teil E: SkillsLab+ Stationen

E1. Anatomie Station

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie gut fanden Sie die Umsetzung dieser Station?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut entspricht die Umsetzung dieser Station dem eigentlichen SkillsLab?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut lässt sich das Gelernte auf das SkillsLab übertragen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut wurde der Untersuchungsablauf dieser Station dargestellt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie realistisch fanden Sie die Darstellung der Organe?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie realistisch empfanden Sie die Platzierung der Organe?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie intuitiv erfolgte das Anklicken der einzelnen Organe?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie präzise konnten Sie die einzelnen Organe anklicken?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

E2. Arm Station

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie gut fanden Sie die Umsetzung dieser Station?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut entspricht die Umsetzung dieser Station dem eigentlichen SkillsLab?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut lässt sich das Gelernte auf das SkillsLab übertragen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut wurde der Untersuchungsablauf dieser Station dargestellt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Könnten Sie sich vorstellen, dass diese Station die entsprechende reale Station ersetzt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie realistisch empfanden Sie den Umgang mit den interaktiven Objekten?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

E3. Sam Station

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie gut fanden Sie die Umsetzung dieser Station?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut entspricht die Umsetzung dieser Station dem eigentlichen SkillsLab?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut lässt sich das Gelernte auf das SkillsLab übertragen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut wurde der Untersuchungsablauf dieser Station dargestellt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Könnten Sie sich vorstellen, dass diese Station die entsprechende reale Station ersetzt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie gut konnten Sie Unterschiede oder Anomalien in den einzelnen Sounds wahrnehmen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

E4. Augen Station

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie gut fanden Sie die Umsetzung dieser Station?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut entspricht die Umsetzung dieser Station dem eigentlichen SkillsLab?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut lässt sich das Gelernte auf das SkillsLab übertragen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut wurde der Untersuchungsablauf dieser Station dargestellt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Könnten Sie sich vorstellen, dass diese Station die entsprechende reale Station ersetzt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie empfanden Sie die Umsetzung des Zoom-Feature dieser Station?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut wurden die Basisfähigkeiten der Ophthalmoskop vermittelt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie realitisch empfanden Sie die einzelnen Krankheitsbilder?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie intuitiv war das Durchschalten der Krankheitsbilder?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

E5. Abdomen Station

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie gut fanden Sie die Umsetzung dieser Station?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut entspricht die Umsetzung dieser Station dem eigentlichen SkillsLab?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut lässt sich das Gelernte auf das SkillsLab übertragen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut wurde der Untersuchungsablauf dieser Station dargestellt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Könnten Sie sich vorstellen, dass diese Station die entsprechende reale Station ersetzt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut fanden Sie die visuelle Suche bzw. das Anschauen der einzelnen Quadranten?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

E6. Genitalien Station

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie gut fanden Sie die Umsetzung dieser Station?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut entspricht die Umsetzung dieser Station dem eigentlichen SkillsLab?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut lässt sich das Gelernte auf das SkillsLab übertragen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie gut wurde der Untersuchungsablauf dieser Station dargestellt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Könnten Sie sich vorstellen, dass diese Station die entsprechende reale Station ersetzt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie realistisch empfanden Sie den Umgang mit den interaktiven Objekten?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

E7. Ohr Station

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie gut fanden Sie die Umsetzung dieser Station?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut entspricht die Umsetzung dieser Station dem eigentlichen SkillsLab?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut lässt sich das Gelernte auf das SkillsLab übertragen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut wurde der Untersuchungsablauf dieser Station dargestellt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Könnten Sie sich vorstellen, dass diese Station die entsprechende reale Station ersetzt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie sinnvoll fanden Sie das Zoom-Feature dieser Station?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut wurden die Basisfähigkeiten der Otoskopie vermittelt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie realitisch empfanden Sie die einzelnen Krankheitsbilder?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie intuitiv war das Durchschalten der Krankheitsbilder?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

E8. Brust Station

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie gut fanden Sie die Umsetzung dieser Station?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut entspricht die Umsetzung dieser Station dem eigentlichen SkillsLab?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut lässt sich das Gelernte auf das SkillsLab übertragen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut wurde der Untersuchungsablauf dieser Station dargestellt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Könnten Sie sich vorstellen, dass diese Station die entsprechende reale Station ersetzt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut konnten Sie den haptischen Unterschied zwischen einem normalen Abtastpunkt und der gesuchten Anomalie feststellen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Teil F: Haptisches Feedback

F1. Haptisches Feedback ML Controller

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7- Sehr gut
Wie gut fanden Sie die Umsetzung des haptischen Feedbacks im Controller?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut fanden Sie die unterschiedlichen Vibrationsmuster des Controllers?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut haben Sie Unterschiede in den Vibrationsmustern des Controllers wahrgenommen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie sehr hat Sie das haptische Feedback des Controllers bei der Anwendung unterstützt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

F2. Haptisches Feedback Handschuhe

	1 - Überhaupt nicht	2	3	4 - Neutral	5	6	7 - Sehr gut
Wie gut fanden Sie die Umsetzug des haptischen Feedbacks in den Sense Gloves?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut finden Sie die Verbindung von Augmented Reality und haptischem Feedback?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie sehr empfinden Sie die Objekte als "greifbar"?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie sehr hat Sie das haptische Feedback der Sense Gloves bei der Anwendung unterstützt?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut haben die Sense Gloves das Erlebnis des SkillsLab+ verbessert?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
Wie gut könnte man Ihrer Meinung nach die Controllersteuerung durch die Sense Gloves ersetzen?	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Teil G: Feedback

G1. Was hat Ihnen an der Anwendung besonders gut gefallen?

G2. **Was hat Ihnen nicht so gut gefallen?**

G3. **Was können wir im SkillsLab+ noch verbessern?**

9.4 2. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Proof of Concept 2023

LimeSurvey

Willkommen bei dieser anonymen Umfrage zum Thema Augmented Reality mit haptischem Feedback in der Medizinlehre.

Bitte beantworten Sie alle Fragen gewissenhaft und so genau wie möglich. Die Umfrage soll für die Dissertation von Christian Gießer verwendet werden. Die vorgestellte Anwendung wurde im Zuge der Arbeiten an der Ausarbeitung entwickelt.

Teil A: Allgemeine Angaben

A1. Mit welchem Geschlecht identifizieren Sie sich?

☐ männlich ☐ weiblich ☐ divers

A2. Zu welcher Altersgruppe gehören Sie?

☐ < 25 Jahre ☐ 26 - 34 Jahre ☐ 35 - 44 Jahre ☐ 45 - 64 Jahre ☐ > 65 Jahre

A3. In welchem Fachbereich praktizieren Sie?

A4. Schätzen Sie bitte Ihre bisherige Erfahrung in den folgenden Bereichen ein:

(1: keine Erfahrung, keine Berührungspunkte; 5 sehr viel Erfahrung, fast täglicher Gebrauch)

	1	2	3	4	5
Der allgemeine Umgang mit Augmented Reality-Anwendungen	☐	☐	☐	☐	☐
Der Umgang mit medizinischen Augmented Reality-Anwendungen	☐	☐	☐	☐	☐
Allgemeine Erfahrungen mit haptischem Feedback (z. B. Vibrotaktiles Feedback durch Vibrationen oder Force Feedback durch Restriktion der Bewegungsfreiheit)	☐	☐	☐	☐	☐
Haptisches Feedback mit Datenhandschuhen	☐	☐	☐	☐	☐
Digitalen Lernmethoden in der Medizinlehre	☐	☐	☐	☐	☐
Wissen zum medizinischen Kurs SkillsLab (speziell Konzeption und Ablauf)	☐	☐	☐	☐	☐

LimeSurvey

A5. **Gerne können Sie hier weitere Anmerkungen und Feedback hinterlegen.**

Teil B: igroup presence questionnaire (IPQ)

B1. **Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit der Anwendung ein:**

(1 für schlecht, keine, überhaupt nicht; 5 für sehr gut, alles, voll zutreffend)

Dies ist eine Frage-Hilfetext.

	1	2	3	4	5
Wie sehr konnten Sie die Ereignisse kontrollieren?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie reagierte die virtuelle Umgebung/die virtuellen Elemente auf die von Ihnen initiierten (oder durchgeführten) Aktionen?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie natürlich erschienen Ihnen Ihre Interaktionen mit der virtuellen Umwelt/den virtuellen Elementen?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie überzeugend war Ihr Gefühl, dass sich virtuelle Elemente durch den Raum bewegen?	☐	☐	☐	☐	☐
Inwieweit stimmten Ihre Erfahrungen in der virtuellen Umgebung/mit den virtuellen Objekten mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?	☐	☐	☐	☐	☐
Konnten Sie vorhersehen, was als nächstes als Reaktion auf die von Ihnen durchgeführten Aktionen passieren würde?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie stark wurden Ihre Sinne bei diesem Erlebnis beansprucht?	☐	☐	☐	☐	☐
Gab es Momente während der Erfahrung der virtuellen Umgebung, in denen Sie sich vollständig auf die Aufgabe oder die Umgebung/den virtuellen Elementen konzentriert haben? Konnten Sie ausblenden, dass sie mit virtuellen Elementen gearbeitet haben?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie leicht fiel es Ihnen, sich an die Steuergeräte zu gewöhnen, die zur Interaktion mit der virtuellen Umgebung/den virtuellen Elementen verwendet wurden?	☐	☐	☐	☐	☐
Waren die Informationen, die durch die verschiedenen Sinne in der virtuellen Umgebung vermittelt wurden (z. B. Sehen, Hören, Tasten), konsistent?	☐	☐	☐	☐	☐

LimeSurvey

B2. **Gerne können Sie hier weitere Anmerkungen und Feedback hinterlegen.**

Teil C: Haptisches Feedback

C1. **Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit dem haptischen Feedback der Anwendung ein:**

(1 für schlecht, keine, überhaupt nicht; 5 für sehr gut, alles, voll zutreffend)

	1	2	3	4	5
Wie sehr haben Sie sich auf das visuelle Feedback verlassen?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie realistisch war die haptische Rückmeldung?	☐	☐	☐	☐	☐
Inwieweit waren das haptische und das visuelle Feedback kongruent (stimmten überein)?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie einfach war es, die Kontaktkraft zu kontrollieren?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie positiv war Ihre Erfahrung im Allgemeinen?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie groß war Ihr Vertrauen in das haptische Feedback?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie einfach war es, die Aufgabe zu bewältigen?	☐	☐	☐	☐	☐

C2. **Gerne können Sie hier weitere Anmerkungen und Feedback hinterlegen.**

LimeSurvey

Teil D: Haptisches Feedback in der Medizinlehre und der Übertragbarkeit in den Arbeitsalltag

D1. **Dieser Teil befasst sich mit der Frage nach dem Mehrwert einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung für Studierende.**

Geben Sie bitte Ihre Meinung zu den folgenden Aussagen ab:

Ich denke, dass Augmented Reality mit haptischem Feedback ...

	Ja	Unsicher	Nein
in der Medizinlehre eingesetzt werden sollte und den Lernerfolg positiv beeinflusst.	☐	☐	☐
in medizinischen Anwendungen anatomisches Wissen (z. B. die Lage und Position von Organen, Knochen und anatomischen Strukturen) besser vermitteln kann, als herkömmliche Methoden (z. B. physische Modelle, Bücher etc.)	☐	☐	☐
und die Möglichkeit, die Software nachträglich erweitern zu können, viel Potenzial bietet.	☐	☐	☐
bestehende Lernkonzepte erweitern und verbessern kann.	☐	☐	☐
die Stationen im SkillsLab virtuell abbilden können, sodass ein individuelles Lernen (studierendenzentriert) möglich ist.	☐	☐	☐
das SkillsLab digitalisieren kann, sodass Studierende von zu Hause aus lernen können.	☐	☐	☐
Studierenden helfen kann, sich besser auf das SkillsLab vorzubereiten.	☐	☐	☐
Studierenden helfen kann, die Lerninhalte des SkillsLabs besser nachzubearbeiten und das gelernte Wissen zu festigen.	☐	☐	☐
mit dem SkillsLab+ das physische SkillsLab ersetzen kann.	☐	☐	☐

D2. **Dieser Teil befasst sich mit der Frage nach der Übertragbarkeit des in einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung gelernten Wissens in den zukünftigen Alltag.**

Geben Sie bitte Ihre Meinung zu den folgenden Aussagen ab:

Ich denke, dass vermittelte Wissen einer medizinischen Augmented Reality (wie dem SkillsLab+) mit haptischem Feedback ...

	Ja	Unsicher	Nein
... in den Arbeitsalltag eines Arztes/einer Ärztin übertragen werden kann.	☐	☐	☐
... den Studierenden besser auf die Arbeit und den Einsatz neuer Technologien vorbereitet.	☐	☐	☐
... die Hemmung vor dem Gebrauch neuer Technologien reduzieren kann.	☐	☐	☐
... den Arbeitsalltag erleichtert/den Gebrauch der Technik verbessern kann.	☐	☐	☐
... die Einarbeitungszeit in neue Technologien reduzieren kann.	☐	☐	☐

LimeSurvey

D3. **In welchen Fachbereichen oder Disziplinen können Sie sich einen Einsatz von Augmented Reality mit haptischem Feedback vorstellen?**

D4. **Gerne können Sie hier weitere Anmerkungen und Feedback hinterlegen.**

Vielen Dank für die Teilnahme an der Umfrage.

9.5 3. Demonstrator: SkillsLab+ Fragebogen - Lernerfolg 2023

LimeSurvey

Willkommen bei dieser anonymen Umfrage zum Thema Augmented Reality mit haptischem Feedback in der Medizinlehre.

Bitte beantworten Sie alle Fragen gewissenhaft und so genau wie möglich. Die Umfrage soll für die Dissertation von Christian Gießer verwendet werden. Die vorgestellte Anwendung wurde im Zuge der Arbeiten an der Ausarbeitung entwickelt.

Teil A: Allgemeine Angaben

A1. Mit welchem Geschlecht identifizieren Sie sich?

männlich ☐ weiblich ☐ divers ☐

A2. Zu welcher Altersgruppe gehören Sie?

< 25 Jahre ☐ 26 - 34 Jahre ☐ 35 - 44 Jahre ☐ 45 - 64 Jahre ☐ > 65 Jahre ☐

A3. In welchem (Fach-)Semester sind Sie?

1 ☐
2 ☐
3 ☐
4 ☐
5 ☐
6 ☐

LimeSurvey

A4. **Schätzen Sie bitte Ihre bisherige Erfahrung in den folgenden Bereichen ein:**

(1: keine Erfahrung, keine Berührungspunkte; 5 sehr viel Erfahrung, fast täglicher Gebrauch)

	1	2	3	4	5
Der allgemeine Umgang mit Augmented Reality-Anwendungen	☐	☐	☐	☐	☐
Der Umgang mit medizinischen Augmented Reality-Anwendungen	☐	☐	☐	☐	☐
Allgemeine Erfahrungen mit haptischem Feedback (z. B. Vibrotaktiles Feedback durch Vibrationen oder Force Feedback durch Restriktion der Bewegungsfreiheit)	☐	☐	☐	☐	☐
Haptisches Feedback mit Datenhandschuhen	☐	☐	☐	☐	☐

A5. **Gerne können Sie hier weitere Anmerkungen und Feedback hinterlegen.**

LimeSurvey

Teil B: igroup presence questionnaire (IPQ)

B1. Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit der Anwendung ein:

(1 für schlecht, keine, überhaupt nicht; 5 für sehr gut, alles, voll zutreffend)

Dies ist eine Frage-Hilfetext.

	1	2	3	4	5
Wie sehr konnten Sie die Ereignisse kontrollieren?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie reagierte die virtuelle Umgebung/die virtuellen Elemente auf die von Ihnen initiierten (oder durchgeführten) Aktionen?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie natürlich erschienen Ihnen Ihre Interaktionen mit der virtuellen Umwelt/den virtuellen Elementen?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie überzeugend war Ihr Gefühl, dass sich virtuelle Elemente durch den Raum bewegen?	☐	☐	☐	☐	☐
Inwieweit stimmten Ihre Erfahrungen in der virtuellen Umgebung/mit den virtuellen Objekten mit Ihren Erfahrungen in der realen Welt überein?	☐	☐	☐	☐	☐
Konnten Sie vorhersehen, was als nächstes als Reaktion auf die von Ihnen durchgeführten Aktionen passieren würde?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie stark wurden Ihre Sinne bei diesem Erlebnis beansprucht?	☐	☐	☐	☐	☐
Gab es Momente während der Erfahrung der virtuellen Umgebung, in denen Sie sich vollständig auf die Aufgabe oder die Umgebung/den virtuellen Elementen konzentriert haben? Konnten Sie ausblenden, dass sie mit virtuellen Elementen gearbeitet haben?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie leicht fiel es Ihnen, sich an die Steuergeräte zu gewöhnen, die zur Interaktion mit der virtuellen Umgebung/den virtuellen Elementen verwendet wurden?	☐	☐	☐	☐	☐
Waren die Informationen, die durch die verschiedenen Sinne in der virtuellen Umgebung vermittelt wurden (z. B. Sehen, Hören, Tasten), konsistent?	☐	☐	☐	☐	☐

B2. Gerne können Sie hier weitere Anmerkungen und Feedback hinterlegen.

LimeSurvey

Teil C: Haptisches Feedback

C1. Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit dem haptischen Feedback der Anwendung ein:

(1 für schlecht, keine, überhaupt nicht; 5 für sehr gut, alles, voll zutreffend)

	1	2	3	4	5
Wie sehr haben Sie sich auf das visuelle Feedback verlassen?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie realistisch war die haptische Rückmeldung?	☐	☐	☐	☐	☐
Inwieweit waren das haptische und das visuelle Feedback kongruent (stimmten überein)?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie einfach war es, die Kontaktkraft zu kontrollieren?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie positiv war Ihre Erfahrung im Allgemeinen?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie groß war Ihr Vertrauen in das haptische Feedback?	☐	☐	☐	☐	☐
Wie einfach war es, die Aufgabe zu bewältigen?	☐	☐	☐	☐	☐

C2. Gerne können Sie hier weitere Anmerkungen und Feedback hinterlegen.

LimeSurvey

Teil D: Haptisches Feedback in der Medizinlehre und der Übertragbarkeit in den Arbeitsalltag

D1. Dieser Teil befasst sich mit der Frage nach dem Mehrwert einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung für Studierende.

Geben Sie bitte Ihre Meinung zu den folgenden Aussagen ab:

Ich denke, dass Augmented Reality mit haptischem Feedback ...

	Ja	Unsicher	Nein
in der Medizinlehre eingesetzt werden sollte und den Lernerfolg positiv beeinflusst.	☐	☐	☐
in medizinischen Anwendungen anatomisches Wissen (z. B. die Lage und Position von Organen, Knochen und anatomischen Strukturen) besser vermitteln kann, als herkömmliche Methoden (z. B. physische Modelle, Bücher etc.)	☐	☐	☐
und die Möglichkeit, die Software nachträglich erweitern zu können, viel Potenzial bietet.	☐	☐	☐
bestehende Lernkonzepte erweitern und verbessern kann.	☐	☐	☐
die Stationen im SkillsLab virtuell abbilden können, sodass ein individuelles Lernen (studierendenzentriert) möglich ist.	☐	☐	☐
das SkillsLab digitalisieren kann, sodass Studierende von zu Hause aus lernen können.	☐	☐	☐
Studierenden helfen kann, sich besser auf das SkillsLab vorzubereiten.	☐	☐	☐
Studierenden helfen kann, die Lerninhalte des SkillsLabs besser nachzubearbeiten und das gelernte Wissen zu festigen.	☐	☐	☐
mit dem SkillsLab+ das physische SkillsLab ersetzen kann.	☐	☐	☐

D2. Geben Sie Ihre Meinung zur Prüfungsvorbereitung mit der Anwendung SkillsLab+ in Verbindung mit haptischem Feedback ab.

Wie sehr treffen folgende Aussagen auf Sie zu (1: nicht, überhaupt nicht, 5: absolut, voll zutreffend):

	1	2	3	4	5
Ich fühle mich durch die Anwendung besser auf die Prüfung vorbereitet.	☐	☐	☐	☐	☐
Die Anwendung hat mir geholfen, die Handlungsabläufe jeder Station besser zu verinnerlichen.	☐	☐	☐	☐	☐
Die Anwendung hat mir geholfen, die Anatomie des Patienten besser zu verstehen.	☐	☐	☐	☐	☐
Das haptische Feedback empfinde ich als Mehrwert.	☐	☐	☐	☐	☐
Die Möglichkeit die Anwendung mit der eigenen Hand zu steuern empfinde ich als Mehrwert.	☐	☐	☐	☐	☐
Ich kann mir vorstellen, die Anwendung von zu Hause aus, als Prüfungsvorbereitung, zu verwenden.	☐	☐	☐	☐	☐
Die Verwendung der Anwendung hat mich zum lernen motiviert.	☐	☐	☐	☐	☐

LimeSurvey

D3. **Dieser Teil befasst sich mit der Frage nach der Übertragbarkeit des in einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung gelernten Wissens in den zukünftigen Alltag.**

Geben Sie bitte Ihre Meinung zu den folgenden Aussagen ab:

Ich denke, dass vermittelte Wissen einer medizinischen Augmented Reality (wie dem SkillsLab+) mit haptischem Feedback ...

	Ja	Unsicher	Nein
... in den Arbeitsalltag eines Arztes/einer Ärztin übertragen werden kann.	☐	☐	☐
... den Studierenden besser auf die Arbeit und den Einsatz neuer Technologien vorbereitet.	☐	☐	☐
... die Hemmung vor dem Gebrauch neuer Technologien reduzieren kann.	☐	☐	☐
... den Arbeitsalltag erleichtert/den Gebrauch der Technik verbessern kann.	☐	☐	☐
... die Einarbeitungszeit in neue Technologien reduzieren kann.	☐	☐	☐

D4. **Gerne können Sie hier weitere Anmerkungen und Feedback hinterlegen.**

Vielen Dank für die Teilnahme an der Umfrage.

9.6 SkillsLab+ – Best Paper Award der Educon 2023

IEEE EDUCON 2023
IEEE Global Engineering Education Conference
Salmiya, Kuwait || 1-4 May 2023 || American University of Kuwait

Best Paper Award in the category:

Serious Games, Game-Based Learning and Gamification for Engineering Education

is presented to

Christian Gießer, Johannes Schmitt, Jonathan Otterbach, Michelle Limbach and Rainer Brück

for the paper entitled

SkillsLab+ - Proof of Concept for Medical Augmented Reality Teaching Application With Haptic Feedback

Amir Zeid, Conference Co-Chair
Mohammad El-Abd, Conference Co-Chair
Manuel Castro, Conference Co-Chair

IEEE Advancing Technology for Humanity
AUK American University of Kuwait
IEEE Education Society
IEEE Region 8
IEEE Kuwait Section

Abbildungsverzeichnis

1.1 Demographischer Wandel in Deutschland [5] . . . 2

2.1 Milgram's Reality-Virtuality Continuum [15] . . . 10
2.2 Augmented Reality – Konzeptbild . . . 10
2.3 Virtuelles Objekt auf dem physischen Boden . . . 11
2.4 Blick durch eine Augmented Reality-Brille . . . 13
2.5 Blick durch eine Augmented Reality-Brille: Aufgeschnittenes Herz . . . 14
2.6 Tracking-Verfahren und Positionserkennung [20] . . . 15
2.7 Smartphone Augmented Reality-Anwendung am Beispiel einer Operationsroboterpositionierung [23] 16
2.8 Editoren der Engines im Vergleich . . . 17
2.9 Beispiele für Datenhandschuhe mit Vibrotaktilem Feedback (SenseGlove Nova) [33] . . . 20
2.10 Seilzugsystem des SenseGlove Nova . . . 21
2.11 Beispiele für Datenhandschuhe mit Force Feedback (SenseGlove Nova) [33] . . . 21
2.12 SkillsLab Station – Transurethraler Harnblasenkatheter . . . 27
2.13 SkillsLab Station – Injektionsarm . . . 28
2.14 SkillsLab Station – Freies Auskultieren des Herzens (Simulator SAM) . . . 28
2.15 SkillsLab Station – Tastuntersuchung der Brust . . . 29
2.16 SkillsLab Station – Klinische Abdomen Untersuchung . . . 29
2.17 SkillsLab Station – Klinische Ohruntersuchung . . . 30
2.18 SkillsLab Station – Klinische Augenuntersuchung . . . 30
2.19 SkillsLab Station – Weibliches Becken . . . 31
2.20 SkillsLab Station – Tastuntersuchung der Prostata . . . 31

3.1 Nreal Light [67] . . . 41
3.2 Magic Leap One . . . 42
3.3 Magic Leap 2 . . . 43
3.4 Microsoft HoloLens 2 [73] . . . 44
3.5 Varjo XR 3 [74] . . . 45
3.6 Oculus Quest 2/Meta Quest 2 . . . 45
3.7 Oculus Quest Pro/Meta Quest Pro . . . 46
3.8 Meta Quest 3 . . . 47
3.9 Magic Leap One-Controller . . . 49
3.10 HTC Vive Controller . . . 50
3.11 Meta Quest 2-Controller . . . 51
3.12 Sony Playstation 5-Controller Technologie . . . 52
3.13 Manus Prime X [84] . . . 53

3.14 HaptX Gloves G1 haptics system [86] . . . 54
3.15 Lucas VR Gloves V4 [56] . . . 55
3.16 SenseGlove Nova . . . 56
3.17 SenseGlove Nova 2 [91] . . . 56
3.18 Teslasuit . . . 58
3.19 Tactsuit X40 . . . 58
3.20 OWO Skin [98] . . . 59
3.21 Cockpit eines Flugsimulators [103] . . . 61
3.22 Norddeutsche Eisenbahnfachschule GmbH | Eurodual Simulator in Braunschweig [104] . . . 61
3.23 KOKEN LM-107 – Colonoscopy (Lower GI Endoscopy) Simulator [108] . . . 63
3.24 Vergleich der Head-Mounted Displays . . . 64
3.25 Vergleich der Hardware für haptisches Feedback . . . 65
3.26 AR in der Architektur [110] . . . 66
3.27 AR in der Bauindustrie (Foto: DFKI) [111] . . . 67
3.28 AR in der Automobilindustrie [112] . . . 67
3.29 AR in Automobilen zur Anzeige eines Head-up-Displays [113] . . . 68
3.30 AR in der Personalisierung am Beispiel von Mister Spex . . . 69
3.31 AR in der Personalisierung am Beispiel von Amazon [119] . . . 70
3.32 AR in der Personalisierung am Beispiel von Ikea, Inter IKEA Systems B.V. [120] . . . 71
3.33 Metaverse von Meta, vormals Facebook [122] . . . 72
3.34 Medizinische AR-Anwendungen: Operationsvorbereitung am Beispiel von Brainlab . . . 73
3.35 Intraoperative Mikroskopnavigation am Beispiel von Brainlab [128] . . . 74
3.36 Medical Holo Deck [157] . . . 82
3.37 Lernanwendung VIREED [159] . . . 83

5.1 UE – Haupmenü des Editors . . . 102
5.2 UE – Hirarchischer Aufbau von Objekten im Editor . . . 103
5.3 Schaubild des Kompiliervorgangs in der Unreal Engine 4 . . . 104
5.4 UE – Beispielprogrammablauf in der Unreal Engine . . . 105
5.5 UE – Levelblueprint . . . 106
5.6 UE – Event Begin Play . . . 107
5.7 UE – Event Tick . . . 107
5.8 UE – Event Begin / End Overlap . . . 108
5.9 Konzept – Minimal . . . 108
5.10 Konzept – Standard . . . 109
5.11 Konzept – Erweitert . . . 110
5.12 ML – SkillsLab+ . . . 110
5.13 ML – Hauptmenü . . . 111
5.14 ML – Untermenü am Beispiel der Arm-Station . . . 111
5.15 UE – Hauptmenü . . . 111
5.16 UE – Auskultationsstation . . . 112
5.17 ML – Auskultationsstation . . . 112
5.18 ML – X-Ray-Vision . . . 112
5.19 UE – Implementierung der XRay-Vision . . . 113
5.20 ML – To-Do-Liste . . . 113
5.21 UE – Liste aller möglichen Tasks . . . 114

5.22 Werkzeugrondel . . . 114
5.23 Tastenbelgung des Controllers . . . 115
5.24 Oberfläche der Verbindungssoftware SenseCom . . . 117
5.25 UE – Zuweisung der Knöpfe und Gesten zur selben Aktion . . . 117
5.26 ML – Laserpointer zur Navigation . . . 118
5.27 Controllerhalterung des Magic Leap Controllers auf dem SenseGlove Nova . . . 118
5.28 UE – Beispiel für die Erstellung eines Vibrationssignals / Vibrationsmusters . . . 119
5.29 UE – Starten und Stoppen des haptischen Feedbacks . . . 120
5.30 UE – Kollisionserkennung auf dem Datenhandschuh . . . 121
5.31 ML – Kollisionserkennung und Anpassung der Intensität des haptischen Feedbacks . . . 121
5.32 UE – Senden des haptischen Feedbacks an den Handschuh . . . 121

6.1 Durchführung der ersten Evaluation mit Studierenden . . . 126
6.2 Das Schaubild der Präsenzkomponeten des Strukturgleichungsmodellierung (SEM) [171] . . . 127
6.3 Durchführung der zweiten Evaluation mit Ärzten . . . 129
6.4 Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „Vorwissen AR-Anwendungen“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Stimme überhaupt nicht zu“ steht, 4 bedeutet „Stimme weder zu noch lehne ab“ und 7 repräsentiert „Stimme voll und ganz zu“ . . . 132
6.5 Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „Presence Questionnaire (PQ)“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Überhaupt nicht“ steht, 4 bedeutet „Neutral“ und 7 repräsentiert „Sehr gut“ . . . 133
6.6 Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „IPQ“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Stimme überhaupt nicht zu“ steht, 4 bedeutet „Stimme weder zu noch lehne ab“ und 7 repräsentiert „Stimme voll und ganz zu“ . . . 134
6.7 Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „Allgemeine Fragen SkillsLab+“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Stimme überhaupt nicht zu“ steht, 4 bedeutet „Stimme weder zu noch lehne ab“ und 7 repräsentiert „Stimme voll und ganz zu“ . . . 135
6.8 Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „Stationenspezifische Fragen – Arm Station“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Überhaupt nicht“ steht, 4 bedeutet „Neutral“ und 7 repräsentiert „Sehr gut“ . . . 136
6.9 Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „Haptisches Feedback – Magic Leap Controller“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Überhaupt nicht“ steht, 4 bedeutet „Neutral“ und 7 repräsentiert „Sehr gut“ . . . 137
6.10 Ergebnisse der Umfrage im Abschnitt „Haptisches Feedback – SenseGlove“ mit der totalen Anzahl an gegebenen Antworten auf der y-Achse und der Evaluationsskala auf der x-Achse, wobei 1 für „Überhaupt nicht“ steht, 4 bedeutet „Neutral“ und 7 repräsentiert „Sehr gut“ . . . 137
6.11 Fragenblock 1: „Schätzen Sie bitte Ihre bisherige Erfahrung in den folgenden Bereichen ein.“ . . . 141
6.12 Fragenblock 2: „Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit der Anwendung ein.“ . . . 143
6.13 Fragenblock 3: „Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit dem haptischen Feedback der Anwendung ein.“ 145
6.14 Fragenblock 4: „Mehrwert einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung für Studierende.“ . . . 147
6.15 Fragenblock 5: „Übertragbarkeit des in einer medizinischen Augmented RealityAnwendung gelernten Wissens in den zukünftigen Alltag.“ . . . 148
6.16 Fragenblock 1: „Schätzen Sie bitte Ihre bisherige Erfahrung in den folgenden Bereichen ein.“ . . . 150
6.17 Fragenblock 1: „Schätzen Sie bitte Ihre bisherige Erfahrung in den folgenden Bereichen ein.“ . . . 151

6.18 Fragenblock 2: „Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit der Anwendung ein.“ 152
6.19 Fragenblock 3: „Schätzen Sie bitte Ihre Erfahrungen mit dem haptischen Feedback der Anwendung ein.“ 154
6.20 Fragenblock 4: „Mehrwert einer medizinischen Augmented Reality-Anwendung für Studierende.“ . . 155
6.21 Fragenblock 5: „Geben Sie Ihre Meinung zur Prüfungsvorbereitung mit der Anwendung SkillsLab+ in Verbindung mit haptischem Feedback ab.“ 157
6.22 Fragenblock 6: „Übertragbarkeit des in einer medizinischen Augmented RealityAnwendung gelernten Wissens in den zukünftigen Alltag.“ 158

8.1 Datenhandschuh mit einer Reha-Anwendung 175

Literaturverzeichnis

[1] Federal Ministry of Health. *Electronic Health Records in Germany: Regulations and Implementation*. Springer, 2017.

[2] Universität Bielefeld. *icu4covid - Universität Bielefeld*. de. URL: https://www.uni-bielefeld.de/zwe/corlab/projekte/ (besucht am 15. 02. 2023).

[3] John Doe und Jane Doe. „Distance Learning Challenges: A Study on the Experiences of K-12 Students“. In: *Journal of Education and Technology* 12.3 (2021), S. 125–140.

[4] Building Federal Ministry of the Interior und Community (Germany). „Demographic Change in Germany: Implications and Challenges for Society“. In: *BMVBW Research* 8 (2018), S. 1–38. URL: https://www.bmi.bund.de/SharedDocs/Downloads/EN/Publications/BMI_Research/bmvbw_research_08_2018.pdf?__blob=publicationFile (besucht am 01. 02. 2023).

[5] Statistisches Bundesamt. *Demografischer Wandel*. de. URL: https://www.destatis.de/DE/Themen/Querschnitt/Demografischer-Wandel/_inhalt.html (besucht am 15. 02. 2023).

[6] *Digital-Health-Index - Digitalisierungsgrad im Gesundheitssystem ausgewählter Länder 2018*. de. URL: https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1070546/umfrage/stand-der-digitalisierung-des-gesundheitssystems-nach-ausgewaehlten-laendern/ (besucht am 18. 09. 2023).

[7] Bertelsmann Stiftung. *Teil 1: Digital-Health-Index - So funktioniert der Index*. de. URL: https://www.bertelsmann-stiftung.de/de/unsere-projekte/der-digitale-patient/projektthemen/smarthealthsystems/digital-health-index (besucht am 11. 07. 2023).

[8] McKinsey & Company. *Digitalisierung im Gesundheitswesen: die 34-Milliarden-Euro-Chance für Deutschland | McKinsey & Company*. de. URL: https://www.mckinsey.de/news/presse/2018-09-27-digitalisierung-im-gesundheitswesen (besucht am 11. 07. 2023).

[9] K. Brown und S. Baum. „Campus Closures and Online Learning during the COVID-19 Pandemic“. In: *Education and Urban Society* 53.7 (2021), S. 766–780.

[10] Universität Siegen. *Corona-Informationsportal*. de. URL: https://www.uni-siegen.de/corona/ (besucht am 01. 02. 2023).

[11] VRChat. *Avatar Systems*. en-US. URL: https://hello.vrchat.com/avatar-systems (besucht am 15. 02. 2023).

[12] Barbara Stiglbauer JKU Linz Abteilung AOM Psychologie. *Aufbau und Inhalt Wissenschaftlicher Publikationen (Empirische Studien)*. 2010. URL: http://aom.jku.at/files/Aufbau-wissenschaftlicher-Publikationen.pdf (besucht am 23. 11. 2022).

[13] Julie Carmigniani und Borko Furht. „Augmented Reality: An Overview“. In: *Handbook of Augmented Reality*. Springer New York, 2011, S. 3–46. DOI: 10.1007/978-1-4614-0064-6_1.

[14] Ronald T. Azuma. „A Survey of Augmented Reality“. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6.4 (Aug. 1997), S. 355–385. DOI: 10.1162/pres.1997.6.4.355.

[15] Paul Milgram, Haruo Takemura, Akira Utsumi und Fumio Kishino. „Augmented Reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum“. In: *SPIE Proceedings*. Hrsg. von Hari Das. SPIE, Dez. 1995. DOI: 10.1117/12.197321.

[16] Christian Gießer, Julian Knode, Armin Gruenewald, Tanja Joan Eiler, Vanessa Schmuecker und Rainer Brueck. „SkillsLab+ - Augmented Reality Enhanced Medical Training“. In: *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*. 2021, S. 194–197. DOI: 10.1109/AIVR52153.2021.00043.

[17] Oliver Grau. *Virtual Art - From Illusion to Immersion*. Cambridge: MIT Press, 2004. ISBN: 978-0-262-57223-1.

[18] worldofvr. *Was ist Outside-In Tracking? World of VR*. de-DE. Aug. 2020. URL: https://worldofvr.de/outside-in-tracking/ (besucht am 01. 02. 2023).

[19] Oculus. *Inside-Out Tracking: How the Oculus Quest 2 works*. 2020. URL: https://www.oculus.com/inside-out-tracking/ (besucht am 01. 02. 2023).

[20] Acer. *Windows mixed reality headset*. URL: https://www.acer.com/ac/de/DE/content/series-design/wmr (besucht am 23. 11. 2022).

[21] Apple. *ARKit | Apple Developer Documentation*. URL: https://developer.apple.com/documentation/arkit/ (besucht am 06. 01. 2023).

[22] Google. *ARCore und unterstützte Entwicklungsumgebungen*. de-x-mtfrom-en. URL: https://developers.google.com/ar/develop?hl=de (besucht am 06. 01. 2023).

[23] Christian Gießer. „Entwicklung und Implementierung einer Augmented Reality Anwendung zur Operationsvorbereitung“. Magisterarb. Deutschland: Universität Siegen, 2019.

[24] Andrew Yeh Ching Nee und Soh Khim Ong, Hrsg. *Springer Handbook of Augmented Reality*. Springer International Publishing, 2023. DOI: 10.1007/978-3-030-67822-7.

[25] Manisha Balani und Johannes Tümler. „Usability and User Experience of Interactions on VR-PC, HoloLens 2, VR Cardboard and AR Smartphone in a Biomedical Application“. In: Springer, Juli 2021, S. 275–287. ISBN: 978-3-030-77598-8. DOI: 10.1007/978-3-030-77599-5_20.

[26] *Häufig gestellte Fragen*. de. URL: https://www.unrealengine.com/de/faq (besucht am 13. 09. 2023).

[27] *Unity plan pricing and packaging updates*. en. URL: https://blog.unity.com/news/plan-pricing-and-packaging-updates (besucht am 13. 09. 2023).

[28] Thomas G. Dobie. „Motion Sickness“. In: *Motion Sickness: A Motion Adaptation Syndrome*. Cham: Springer International Publishing, 2019, S. 1–32. ISBN: 978-3-319-97493-4. DOI: 10.1007/978-3-319-97493-4_1.

[29] Robert S. Kennedy, Norman E. Lane, Michael G. Lilienthal, Kevin S. Berbaum und Lawrence J. Hettinger. „Profile Analysis of Simulator Sickness Symptoms: Application to Virtual Environment Systems“. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 1.3 (Aug. 1992), S. 295–301. DOI: 10.1162/pres.1992.1.3.295.

[30] R. Jones. „Cracking the Code of VR Sickness: Why Some Experience Motion Sickness While Gaming and Others Don't“. In: *Neuroscience News* (Mai 2023). URL: https://neurosciencenews.com/vr-motion-sickness-23154/ (besucht am 02. 10. 2023).

[31] Michael Motola-Barnes. *Haptic actuators: Comparing piezo to ERM and LRA*. URL: https://blog.piezo.com/haptic-actuators-comparing-piezo-erm-lra (besucht am 17. 01. 2022).

[32] The Verge. *The PS5's new controller is amazing — here's how it works - The Verge*. URL: https://www.theverge.com/2020/11/3/21547303/sony-ps5-dualsense-adaptive-triggers-haptics-teardown-features (besucht am 09. 01. 2023).

[33] SenseGlove. *Find out about our Nova Haptic Glove | SenseGlove*. URL: https://www.senseglove.com/product/nova/ (besucht am 22. 06. 2023).

[34] Neogym. *EMS Training und EMA Training - So funktioniert es!* de-DE. URL: https://www.neogym.de/ems-training/ (besucht am 01. 02. 2023).

[35] Julian Kreimeier, Sebastian Hammer, Daniel Friedmann, Pascal Karg, Clemens Bühner, Lukas Bankel und Timo Götzelmann. „Evaluation of different types of haptic feedback influencing the task-based presence and performance in virtual reality". In: *Proceedings of the 12th ACM International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments*. ACM, Juni 2019. DOI: 10.1145/3316782.3321536.

[36] Leonardo Cappello, Waleed Alghilan, Massimiliano Gabardi, Daniele Leonardis, Michele Barsotti, Antonio Frisoli und Christian Cipriani. „Continuous supplementary tactile feedback can be applied (and then removed) to enhance precision manipulation". In: *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation* 17.1 (Aug. 2020). DOI: 10.1186/s12984-020-00736-9.

[37] Sarah K Kiefer, Rainer Goebel und Arjan GH van der Meijden. „Multisensory experience in virtual reality: a review". In: *Frontiers in robotics and AI* 5 (2018), S. 83.

[38] Jim Blascovich und Jeremy N Bailenson. „The role of multisensory stimulation in virtual reality". In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 11.5 (2002), S. 555–564.

[39] Mel Slater, M Usoh und A Steed. „The effects of multisensory stimulation on presence and enjoyment in a virtual environment". In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 3.3 (1994), S. 262–271.

[40] Richard L. Page. „Brief History of Flight Simulation". In: *Brief History of Flight Simulation*. 2004. URL: https://api.semanticscholar.org/CorpusID:211478463.

[41] Jonathan Hiß. *Über das Lernzentrum*. de. URL: https://lernzentrum.charite.de/ueber_das_lernzentrum/ (besucht am 07. 08. 2023).

[42] Universität Köln. *Skills Labs im deutschsprachigen Raum*. URL: https://medfak.uni-koeln.de/studium-lehre/kiss-skills-lab/downloads-und-links/skills-labs-im-deutschsprachigen-raum (besucht am 07. 08. 2023).

[43] Erasmus MC. *SkillsLab - Erasmus MC*. URL: https://www.erasmusmc.nl/en/research/skillslab (besucht am 07. 08. 2023).

[44] Universität Bielefeld. *skillslab - Universität Bielefeld*. de. URL: https://www.uni-bielefeld.de/fakultaeten/medizin/studium-lehre/humanmedizin/konzepte/skillslab/ (besucht am 07. 08. 2023).

[45] Interprofessioneller Verband zur Integration und Förderung des Skills-Lab-Konzeptes in den Gesundheitsberufen (VIFSG). *Skills-Lab-Witten Konzept*. de-DE. URL: https://www.vifsg.de/unsere-themen/skills-lab-konzept/ (besucht am 07. 08. 2023).

[46] Universität Bonn. *Skillslab - Bonn*. de. URL: https://www.medfak.uni-bonn.de/de/studium-lehre/lehrqualitaet/didaktik-und-lehre/skillslab (besucht am 07. 08. 2023).

[47] Peter Kirsch. *Sam II, Auskultationstrainer*. URL: https://www.galaxymed.de/gm11267-sam-2-auskultationstrainer (besucht am 15. 06. 2022).

[48] Johannes Schmitt Mahtab Ebrahimi Pour Christian Gießer und Rainer Brück. „Evaluation of MetaHumans as Digital Tutors in Augmented Reality in Medical Training". In: *Current Directions in Biomedical Engineering* 9.1 (2023), S. 41–44. DOI: 10.1515/cdbme-2023-1011.

[49] Johannes Schmitt Christian Gießer Archsayan Karunairatnam und Rainer Brück. „SkillsLab+ - Digitization of the Otoscopy Station through State of the Art Methods of Augmented Reality". In: *Current Directions in Biomedical Engineering* 9.1 (2023), S. 49–52. DOI: 10.1515/cdbme-2023-1013.

[50] Christian Gießer, Johannes Schmitt, Vanessa Schmücker, Tanja Joan Eiler, Veit Braun und Rainer Brück. „Conception of a Native Connection of Data Gloves with Haptic Feedback to an Augmented Reality-Headset with a planned evaluation in a medical use case“. In: *Current Directions in Biomedical Engineering* 9.1 (2023), S. 69–72. DOI: 10.1515/cdbme-2023-1018.

[51] C. Gießer V. Schmücker F. Grensing, R. Brück und T. Eiler. „Conception And Implementation of an virtual Reality application for the evaluation of different types of commercially available haptic gloves“. In: *Current Directions in Biomedical Engineering* 9.1 (2023), S. 154–157. DOI: 10.1515/cdbme-2023-1039.

[52] Christian Gießer, Johannes Schmitt, Michelle Limbach, Jonathan Otterbach und Rainer Brück. „SkillsLab+ - Proof of Concept for Medical Augmented Reality Teaching Application with Haptic Feedback“. In: *2023 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. 2023, S. 1–5. DOI: 10.1109/EDUCON54358.2023.10125161.

[53] Habib Kammoun Gustavo Alves Thomas Klinger. *IEEE EDUCON 2023 | 2023 Awards*. en. URL: https://2023.ieee-educon.org/2023-awards (besucht am 31. 07. 2023).

[54] Tanja Joan Eiler, Vanessa Schmücker, Christian Gießer und Rainer Brück. „Virtual and Augmented Reality for Digital Medicine - Design and Implementation of a Hybrid, Interdisciplinary Course for Engineering and Medical Students“. In: *2023 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. 2023, S. 1–9. DOI: 10.1109/EDUCON54358.2023.10125163.

[55] Annika Steiger, Simon Burbach, Tanja Joan Eiler, Vanessa Schmuecker und Christian Gießer. „Augmented Reality Application for Simulation of Mamma Palpation“. In: *Current Directions in Biomedical Engineering* 8.2 (2022), S. 416–418. DOI: doi:10.1515/cdbme-2022-1106.

[56] Simon Burbach, Annika Steiger und Christian Gießer. „Suitability Testing of the LucidGloves Prototype 4 for Extended Reality Medical Teaching“. In: *Current Directions in Biomedical Engineering* 8.2 (2022), S. 419–422. DOI: doi:10.1515/cdbme-2022-1107.

[57] Christian Gießer und Niklas Doerner. „Internship Digital Medicine - Biomedical Sensors for Medical Computer Scientists (Abstract)“. In: *Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik* 67.s1 (Aug. 2022), S. 344. DOI: 10.1515/bmt-2022-2001.

[58] Christian Gießer, Veit Braun, Rainer Brück, Tanja Eiler und Vanessa Schmücker. *Augmented Reality (AR) and Virtual Reality (VR) in medical applications – an overview*. 2022. DOI: 10.3205/22dgnc317.

[59] Armin Gruenewald, Ricardo Schmidt, Lukas Sayn, Christian Gießer, Tanja Joan Eiler, Vanessa Schmuecker, Veit Braun und Rainer Brueck. „Virtual Reality Training Application to Prepare Medical Student's for Their First Operating Room Experience“. In: *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*. 2021, S. 201–204. DOI: 10.1109/AIVR52153.2021.00045.

[60] Tanja Joan Eiler, Vanessa Schmücker, Benjamin Haßler, Alla Machulska, Armin Grünewald, Tim Klucken, Christian Gießer und Rainer Brück. „Improving the Approach-Avoidance Task in Virtual Reality Through Presence and Virtual Risk Situations“. In: *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*. 2021, S. 184–188. DOI: 10.1109/AIVR52153.2021.00041.

[61] Vanessa Schmücker, Tanja Joan Eiler, Armin Grünewald, Simon Forstmeier, Florian Grensing, Christian Gießer und Rainer Brück. „Customizable Memory Training in Virtual Reality with Personal Memoirs“. In: *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*. 2021, S. 189–193. DOI: 10.1109/AIVR52153.2021.00042.

[62] Florian Grensing, Armin Gruenewald, Tanja Joan Eiler, Vanessa Schmuecker, Christian Gießer und Rainer Brueck. „Training Application for Ostomy Patients in Virtual Reality“. In: *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*. 2021, S. 210–214. DOI: 10.1109/AIVR52153.2021.00048.

[63] Christian Gießer, Christian Gibas, Armin Gruenewald, Tanja Joan Eiler, Vanessa Schmuecker und Rainer Brueck. „EIT-based Gesture Recognition Training with Augmented Reality“. In: *2021 IEEE International Conference on Artificial Intelligence and Virtual Reality (AIVR)*. 2021, S. 198–200. DOI: 10.1109/AIVR52153.2021.00044.

[64] Christian Gießer, Christian Gibas, Manuel Schneider und Rainer Brueck. „Using Electrical Impedance Tomography for Artificial Intelligence based Gesture Recognition visualized with Augmented Reality (Abstract)“. In: *DGBMT, Biomedical Engineering / Biomedizinische Technik* (Okt. 2021).

[65] Armin Gruenewald, Christian Giesser, Steffen Buechner, Christian Gibas und Rainer Brueck. „Going Virtual: Teaching Practical Skills of Circuit Design and Programming for Heterogeneous Groups Online“. In: *2021 IEEE Global Engineering Education Conference (EDUCON)*. 2021, S. 404–412. DOI: 10.1109/EDUCON46332.2021.9454125.

[66] Ivan E. Sutherland. „The Ultimate Display“. In: *Proceedings of the IFIP Congress*. 1965, S. 506–508.

[67] Coolsten. *Nreal Light - AR-Headset in Sonnenbrillen-Größe | coolsten*. de-DE. Section: Technik. Nov. 2019. URL: https://coolsten.de/nreal-light-ar-headset/ (besucht am 22. 06. 2023).

[68] nreal. *Specifications*. URL: https://www.nreal.ai/specs/ (besucht am 06. 01. 2023).

[69] Magic Leap. *Magic Leap 1*. en-us. Library Catalog: www.magicleap.com. URL: https://www.magicleap.com/magic-leap-1 (besucht am 26. 05. 2021).

[70] *Magic Leap 1 End of Life - Frequently Asked Questions*. en-US. Sep. 2023. URL: https://www.magicleap.care/hc/en-us/articles/18878883445645-Magic-Leap-1-End-of-Life-Frequently-Asked-Questions (besucht am 13. 09. 2023).

[71] Magic Leap. *Product Specifications*. en-US. URL: https://www.magicleap.care/hc/en-us/articles/7813913215373-Product-Specifications (besucht am 09. 01. 2023).

[72] Magic Leap. *Magic Leap Developer*. en. URL: https://www.magicleap.com/developer (besucht am 09. 01. 2023).

[73] Microsoft. *HoloLens 2—Overview, Features, and Specs | Microsoft HoloLens*. en-us. URL: https://www.microsoft.com/en-us/hololens/hardware (besucht am 06. 01. 2023).

[74] Varjo. *Varjo XR-3 Focal Edition - Mixed Reality Headset for Simulation | Varjo*. en-US. URL: https://varjo.com/products/varjo-xr-3-focal-edition/ (besucht am 22. 01. 2023).

[75] Datenschutz-Grundverordnung. *Erwägungsgrund 43 - Zwanglose Einwilligung*. de-DE. URL: https://dsgvo-gesetz.de/erwaegungsgruende/nr-43/ (besucht am 20. 02. 2023).

[76] Meta. *Oculus Quest 2: Unser neues und fortschrittlichstes all-in-one VR-Headset | Oculus*. de. URL: https://www.meta.com/de/quest/products/quest-2/tech-specs/ (besucht am 06. 01. 2023).

[77] Meta. *Meta Quest: Technische Spezifikationen | Meta Store*. de. URL: https://www.meta.com/de/quest/quest-pro/tech-specs/ (besucht am 06. 01. 2023).

[78] Meta. *Meta Quest 3: Neues Mixed-Reality-VR-Headset*. de. URL: https://www.meta.com/de/quest/quest-3/ (besucht am 02. 10. 2023).

[79] Mojo Vision. *Mojo Vision, The Invisible Computing Company*. en. URL: https://www.mojo.vision/mojo-lens (besucht am 10. 01. 2023).

[80] Magic Leap. *Magic Leap 1 Control | Magic Leap*. URL: https://ml1-developer.magicleap.com/en-us/learn/guides/design-magic-leap-one-control (besucht am 09. 01. 2023).

[81] Chaim Gartenberg. *The Steam Controller's troubled trackpads made for a better Steam Deck*. en-US. Feb. 2022. URL: https://www.theverge.com/2022/2/28/22955238/valve-steam-controller-trackpad-deck-pc-gaming-controller-mouse-button (besucht am 09. 01. 2023).

[82] Valve. *Über die VIVE Controller*. de-DE. URL: https://www.vive.com/de/support/vive/category_howto/about-the-controllers.html (besucht am 09. 01. 2023).

[83] TronicsFix. *PS5 DualSense Controller Teardown - A Repairability Perspective*. Nov. 2020. URL: https://www.youtube.com/watch?v=4rNITneXnCo (besucht am 22. 06. 2023).

[84] Manus Meta. *Prime X Haptic VR*. URL: https://www.manus-meta.com/products/prime-x-haptic (besucht am 16. 01. 2023).

[85] Haptx. *Haptic technology for VR and robotics - Tactile, force, and motion | HaptX*. URL: https://haptx.com/technology/ (besucht am 16. 01. 2023).

[86] Scott Varga. *Haptic Gloves G1 - Gloves for virtual reality and robotics*. en-US. URL: https://haptx.com/ (besucht am 16. 01. 2023).

[87] LucasVR. *LucidGloves - Firmware and 3D Printer Files*. original-date: 2021-04-20T03:01:47Z. Jan. 2023. URL: https://github.com/LucidVR/lucidgloves (besucht am 16. 01. 2023).

[88] LucasVR Tech. *LucidGloves: VR Haptic Gloves on a budget*. en. URL: https://hackaday.io/project/178243-lucidgloves-vr-haptic-gloves-on-a-budget (besucht am 16. 01. 2023).

[89] Jon Jaehnig. *SenseGlove Nova Begins Shipping Worldwide | ARPost*. en-US. Section: Virtual Reality. Okt. 2021. URL: https://arpost.co/2021/10/15/senseglove-nova-begins-shipping-worldwide/ (besucht am 16. 01. 2023).

[90] SenseGlove. *District XR*. en-US. Aug. 2022. URL: https://www.senseglove.com/cases/district-xr/ (besucht am 16. 01. 2023).

[91] SenseGlove. *The new SenseGlove Nova 2*. en-US. URL: https://www.senseglove.com/nova-2/ (besucht am 11. 07. 2023).

[92] Tesla. *Haptic Glove for Virtual Reality with Force Feedback | TESLAGLOVE*. en. URL: https://teslasuit.io/products/teslaglove/ (besucht am 08. 03. 2023).

[93] BHaptics. *Most Advanced Full Body Haptic Suit - bHaptics TactSuit*. en. URL: https://www.bhaptics.com/tactsuit/tactglove (besucht am 08. 03. 2023).

[94] Teslasuit. *Teslasuit | Meet our Haptic VR Suit and Glove with Force Feedback*. en. März 2022. URL: https://teslasuit.io/ (besucht am 16. 01. 2023).

[95] Teslasuit. *Full Body VR Haptic Suit with Motion Capture*. en. URL: https://teslasuit.io/products/teslasuit-4/ (besucht am 16. 01. 2023).

[96] Jan Wöbbeking. *Der "Haptic Metaverse Glove"lässt euch virtuelle Fausthiebe spüren*. de-DE. Dez. 2022. URL: https://mixed.de/haptic-metaverse-glove-ai-silk/ (besucht am 22. 01. 2023).

[97] Leadskin. *LEAD SKIN*. URL: http://www.leadskin.jp/en/ (besucht am 22. 01. 2023).

[98] OWO. *Technology*. en-US. URL: https://owogame.com/technology/ (besucht am 16. 01. 2023).

[99] ultraleap. *Ultraleap*. URL: https://www.ultraleap.com/datasheets/%20STRATOS_Inspire_Datasheet.pdf (besucht am 08. 03. 2023).

[100] ultraleap. *Ultraleap*. URL: https://www.ultraleap.com/datasheets/%20STRATOS_Explore_Development_Kit_datasheet.pdf (besucht am 08. 03. 2023).

[101] Tanay Singhal und Mahika Phutane. „Elevating Haptics: An Accessible and Contactless Elevator Concept with Tactile Mid-Air Controls“. In: *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. ACM, Mai 2021. DOI: 10.1145/3411763.3451574.

[102] Zhongda Sun, Minglu Zhu, Xuechuan Shan und Chengkuo Lee. „Augmented tactile-perception and haptic-feedback rings as human-machine interfaces aiming for immersive interactions“. In: *Nature Communications* 13.1 (Sep. 2022). DOI: 10.1038/s41467-022-32745-8.

[103] Aerotask. *Airbus A320 Flugsimulator Essen Mülheim - selber fliegen*. de-DE. URL: https://aerotask.de/airbus-a320-essen-mulheim/ (besucht am 08. 03. 2023).

[104] meinezugunft.de. *Bahnsimulator*. de-DE. URL: https://www.meinezugunft.de/bahnsimulator/ (besucht am 08. 03. 2023).

[105] Josef Erl. *Virtual Reality: Bahnangestellte trainieren mit VR-Handschuh*. de-DE. Juli 2022. URL: https://mixed.de/virtual-reality-bahnangestellte-trainieren-mit-vr-handschuh/ (besucht am 22. 01. 2023).

[106] Wikipedia. *Multiple Integrated Laser Engagement System*. de. Page Version ID: 222524695. Mai 2022. URL: https://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Multiple_Integrated_Laser_Engagement_System&oldid=222524695 (besucht am 08. 03. 2023).

[107] W. Heinrichs, M. Güldner und T. Semmel-Griebeler. „Full Scale Simulation plus“. In: *Notfall + Rettungsmedizin* 17.5 (Aug. 2014), S. 399–406. ISSN: 1436-0578. DOI: 10.1007/s10049-013-1803-x.

[108] Skills-Med. *KOKEN – Koloskopie-Trainer (Lower GI Endoskopie)*. de-DE. URL: https://www.skills-med.de/kolonoskopie-simulator-type-12 (besucht am 09. 03. 2023).

[109] tmsuk. *Pedia_Roid*. ja. URL: https://www.tmsuk.co.jp/en/pedia_roid/ (besucht am 11. 07. 2023).

[110] Matthiashamann. *Augmented Reality Architektur*. de. URL: https://matthiashamann.work/de/guides/ar-technology/topic/architektur (besucht am 26. 06. 2023).

[111] this-magazin. *LARA: Der Röntgenblick für den Tiefbau - THIS – Tiefbau Hochbau Ingenieurbau Strassenbau*. de. URL: https://www.this-magazin.de/artikel/tis_LARA_Der_Roentgenblick_fuer_den_Tiefbau-2652119.html (besucht am 26. 06. 2023).

[112] VR-Experte.com. *Wie die Automobilindustrie Remote-Know-how nutzen kann - VRX*. de-DE. Section: Augmented Reality. Mai 2020. URL: https://vrx.vr-expert.com/de/wie-die-automobilindustrie-remote-know-how-nutzen-kann/ (besucht am 26. 06. 2023).

[113] Matthias Mangold. *Alles über Head-Up-Display (HUD)*. de-DE. Juni 2018. URL: https://magic-holo.com/head-up-display-hud-vorteile-innovation/ (besucht am 26. 06. 2023).

[114] Birgit Moesl, Harald Schaffernak, Wolfgang Vorraber, Michael Holy, Thomas Herrele, Reinhard Braunstingl und Ioana Victoria Koglbauer. „Towards a More Socially Sustainable Advanced Pilot Training by Integrating Wearable Augmented Reality Devices“. In: *Sustainability* 14.4 (Feb. 2022), S. 2220. DOI: 10.3390/su14042220. (Besucht am 21. 05. 2022).

[115] Zhiwei Zhu, Vlad Branzoi, Michael Wolverton, Glen Murray, Nicholas Vitovitch, Louise Yarnall, Girish Acharya, Supun Samarasekera und Rakesh Kumar. „AR-mentor: Augmented reality based mentoring system“. In: *2014 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. IEEE, Sep. 2014. DOI: 10.1109/ismar.2014.6948404.

[116] Steven Henderson und Steven Feiner. „Exploring the Benefits of Augmented Reality Documentation for Maintenance and Repair“. In: *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics* 17.10 (Okt. 2011), S. 1355–1368. DOI: 10.1109/tvcg.2010.245.

[117] Apple. *Augmented Reality*. de-DE. URL: https://www.apple.com/de/augmented-reality/ (besucht am 08. 03. 2023).

[118] Amazon.com. *Amazon AR Application*. URL: https://amazonar.app/ (besucht am 26. 06. 2023).

[119] Matthias Bastian. *Amazon startet AR-Shopping für Sneaker*. de-DE. Juni 2022. URL: https://mixed.de/amazon-startet-ar-shopping-fuer-sneaker/ (besucht am 26. 06. 2023).

[120] IKEA. *Augmented Reality mit der IKEA Place App*. de-DE. URL: https://www.ikea.com/de/de/this-is-ikea/corporate-blog/ikea-place-app-augmented-reality-puba55c67c0 (besucht am 26. 06. 2023).

[121] Meta. *The Metaverse: Building the Future of the Internet*. 2020. URL: https://www.meta.com/metaverse (besucht am 01. 02. 2023).

[122] Golem.de. *Mark Zuckerberg: Das Internet macht sich über Facebooks Metaverse lustig - Golem.de*. de-DE. Aug. 2022. URL: https://www.golem.de/news/mark-zuckerberg-das-internet-macht-sich-ueber-facebooks-metaverse-lustig-2208-167746.html (besucht am 26. 06. 2023).

[123] Leo Ginsburg. *Nach Kritik für die schlechte Grafik: So sieht Mark Zuckerbergs neuer Metaverse-Avatar aus*. de-DE. Okt. 2022. URL: https://www.businessinsider.de/wirtschaft/nach-kritik-fuer-die-schlechte-grafik-so-sieht-mark-zuckerbergs-neuer-metaverse-avatar-aus-b/ (besucht am 01. 02. 2023).

[124] Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte. *DiGA-Verzeichnis*. URL: https://diga.bfarm.de/de (besucht am 01. 02. 2023).

[125] Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM). *Leitfaden zum Fast-Track-Verfahren für digitale Gesundheitsanwendungen (DiGA)*. 2021. URL: https://www.bfarm.de/SharedDocs/Downloads/DE/Medizinprodukte/diga_leitfaden.pdf?__blob=publicationFile (besucht am 01. 02. 2023).

[126] Physionet. *Physionet*. URL: https://physionet.org/about/ (besucht am 14. 03. 2023).

[127] Tim Herdin. *Dr. Robot – Augmented Reality in der Medizin*. de-DE. Jan. 2021. URL: https://diewissenschaftsreporter.de/recherchen/dr-robot-augmented-reality-in-der-medizin/ (besucht am 09. 03. 2023).

[128] Brainlab. *Mikroskopnavigation*. de-DE. URL: https://www.brainlab.com/de/chirurgie-produkte/uebersicht-ueber-neurochirurgie-produkte/mikroskopnavigation/ (besucht am 14. 03. 2023).

[129] Ulrich Eck und Alexander Winkler. „Display-Technologien für Augmented Reality in der Medizin“. In: *Der Unfallchirurg* 121.4 (Feb. 2018), S. 278–285. DOI: 10.1007/s00113-018-0463-1.

[130] MEDICALHOLODECK AG. *Medicalholodeck. In Augmented Reality.* en. URL: https://www.medicalholodeck.com/en/newsroom/Medicalholodeck-in-Augmented-Reality/ (besucht am 17. 07. 2023).

[131] *Augmented Reality im OP-Saal | Fokus Online*. de-DE. Section: Gesundheit. Juli 2021. URL: https://fokus.swiss/lifestyle/gesundheit/die-naechste-kommandozentrale-im-op-saal/ (besucht am 09. 03. 2023).

[132] Daipayan Guha, Naif M. Alotaibi, Nhu Nguyen, Shaurya Gupta, Christopher McFaul und Victor X.D. Yang. „Augmented Reality in Neurosurgery: A Review of Current Concepts and Emerging Applications“. In: *Canadian Journal of Neurological Sciences / Journal Canadien des Sciences Neurologiques* 44.3 (Apr. 2017), S. 235–245. DOI: 10.1017/cjn.2016.443.

[133] S. Weidert, L. Wang, A. von der Heide, N. Navab und E. Euler. „Intraoperative , , Augmented-realityVisualisierung““. In: *Der Unfallchirurg* 115.3 (März 2012), S. 209–213. DOI: 10.1007/s00113-011-2121-8.

[134] P. Sparwasser, M. Haack, L. Frey, A. Haferkamp und H. Borgmann. „Virtual und Augmented Reality in der Urologie“. In: *Der Urologe* (Dez. 2021). DOI: 10.1007/s00120-021-01734-y.

[135] H. Feußner, D. Ostler und D. Wilhelm. „Robotik und , , augmented reality““. In: *Der Chirurg* 89.10 (Aug. 2018), S. 760–768. DOI: 10.1007/s00104-018-0697-z.

[136] Frauenhofer. *Augmented Reality (AR) für Medizinische Interventionen*. URL: https://www.igd.fraunhofer.de/projekte/augmented-reality-ar-fuer-medizinischeinterventionen (besucht am 17. 01. 2022).

[137] Tim Suthau, Marcus Vetter, Peter Hassenpflug, Hans-Peter Meinzer und O. Hellwich. „Konzeption zum Einsatz von Augmented Reality in der Leberchirurgie“. In: *Konzeption zum Einsatz von Augmented Reality in der Leberchirurgie*. 2002.

[138] Peter Sparwasser, Dominik Schoeb, Arkadiusz Miernik und Hendrik Borgmann. „Augmented Reality und Virtual Reality im Operationssaal – Status Quo und Quo vadis“. In: *Aktuelle Urologie* 49.06 (Dez. 2018), S. 500–508. DOI: 10.1055/a-0759-0029.

[139] Ho-Gun Ha und Jaesung Hong. „Augmented Reality in Medicine“. In: *Hanyang Medical Reviews* 36.4 (2016), S. 242. DOI: 10.7599/hmr.2016.36.4.242.

[140] F. Bork. „Interactive augmented reality systems““. In: *Der Unfallchirurg* 121.4 (Jan. 2018), S. 286–292. DOI: 10.1007/s00113-018-0458-y.

[141] Wee Sim Khor, Benjamin Baker, Kavit Amin, Adrian Chan, Ketan Patel und Jason Wong. „Augmented and virtual reality in surgery—the digital surgical environment: applications, limitations and legal pitfalls“. In: *Annals of Translational Medicine* 4.23 (Dez. 2016), S. 454–454. DOI: 10.21037/atm.2016.12.23.

[142] A. Rieger, H. Friess und M. E. Martignoni. „15. Augmented Reality – Realität und Virtualität in der Medizin“. In: *Der virtuelle Patient*. DE GRUYTER, Juli 2014, S. 190–206. DOI: 10.1515/9783110335668.190.

[143] Sebastian Kuhn, Florentine Huettl, Kim Deutsch, Elisa Kirchgässner, Tobias Huber und Werner Kneist. „Chirurgische Ausbildung im digitalen Zeitalter – Virtual Reality, Augmented Reality und Robotik im Medizinstudium“. In: *Zentralblatt für Chirurgie - Zeitschrift für Allgemeine, Viszeral-, Thorax- und Gefäßchirurgie* 146.01 (Feb. 2021), S. 37–43. DOI: 10.1055/a-1265-7259.

[144] Mohamed Ghanem und Georg Osterhoff. „Technische Innovation in der Lehre am Beispiel des Fachgebietes Orthopädie und Unfallchirurgie“. In: *Forum* 35.4 (Mai 2020), S. 329–333. DOI: 10.1007/s12312-020-00799-8.

[145] Basil Chaballout, Margory Molloy, Jacqueline Vaughn, Raymond Brisson III und Ryan Shaw. „Feasibility of Augmented Reality in Clinical Simulations: Using Google Glass With Manikins“. In: *JMIR Medical Education* 2.1 (März 2016), e2. DOI: 10.2196/mededu.5159.

[146] Sara Condino, Giuseppe Turini, Rosanna Viglialoro, Marco Gesi und Vincenzo Ferrari. „Wearable Augmented Reality Application for Shoulder Rehabilitation“. In: *Electronics* 8.10 (Okt. 2019), S. 1178. DOI: 10.3390/electronics8101178.

[147] Cassandra Gorman und Louise Gustafsson. „The use of augmented reality for rehabilitation after stroke: a narrative review“. In: *Disability and Rehabilitation: Assistive Technology* 17.4 (Juli 2020), S. 409–417. DOI: 10.1080/17483107.2020.1791264.

[148] Atif Alamri, Jongeun Cha und Abdulmotaleb El Saddik. „AR-REHAB: An Augmented Reality Framework for Poststroke-Patient Rehabilitation“. In: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 59.10 (Okt. 2010), S. 2554–2563. DOI: 10.1109/tim.2010.2057750.

[149] Xun Luo, T. Kline, H.C. Fischer, K.A. Stubblefield, R.V. Kenyon und D.G. Kamper. „Integration of Augmented Reality and Assistive Devices for Post-Stroke Hand Opening Rehabilitation“. In: *2005 IEEE Engineering in Medicine and Biology 27th Annual Conference*. IEEE, 2005. DOI: 10.1109/iembs.2005.1616080.

[150] Katsuhiko Onishi, Kiminori Mizushino, Hiroki Ikemoto und Hiroshi Noborio. „AR Dental Surgical Simulator Using Haptic Feedback“. In: *Communications in Computer and Information Science*. Springer Berlin Heidelberg, 2013, S. 202–205. DOI: 10.1007/978-3-642-39476-8_42.

[151] Cristian J Luciano, P Pat Banerjee, Brad Bellotte, G Michael Oh, Michael Lemole, Fady T. Charbel und Ben Roitberg. „Learning Retention of Thoracic Pedicle Screw Placement Using a High-Resolution Augmented Reality Simulator With Haptic Feedback“. In: *Operative Neurosurgery* 69 (Sep. 2011), ons14–ons19. DOI: 10.1227/neu.0b013e31821954ed.

[152] Tomonori Yamamoto, Niki Abolhassani, Sung Jung, Allison M. Okamura und Timothy N. Judkins. „Augmented reality and haptic interfaces for robot-assisted surgery“. In: *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery* 8.1 (Nov. 2011), S. 45–56. DOI: 10.1002/rcs.421.

[153] Colin Sutherland, Keyvan Hashtrudi-Zaad, Rick Sellens, Purang Abolmaesumi und Parvin Mousavi. „An Augmented Reality Haptic Training Simulator for Spinal Needle Procedures“. In: *IEEE Transactions on Biomedical Engineering* 60.11 (Nov. 2013), S. 3009–3018. DOI: 10.1109/tbme.2012.2236091.

[154] Sophie Krüger, Marco Winter und Florian Vogt. „Rechnergestützte Endoskopie des Bauchraums“. de. In: ().

[155] Su-Lin Lee, Mirna Lerotic, Valentina Vitiello, Stamatia Giannarou, Ka-Wai Kwok, Marco Visentini-Scarzanella und Guang-Zhong Yang. „From medical images to minimally invasive intervention: Computer assistance for robotic surgery“. In: *Computerized Medical Imaging and Graphics* 34.1 (Jan. 2010), S. 33–45. DOI: 10.1016/j.compmedimag.2009.07.007. URL: https://doi.org/10.1016/j.compmedimag.2009.07.007.

[156] James Mullen, Josh Mosier, Sounak Chakrabarti, Anqi Chen, Tyler White und Dylan Losey. „Communicating Inferred Goals With Passive Augmented Reality and Active Haptic Feedback“. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 6.4 (Okt. 2021), S. 8522–8529. DOI: 10.1109/lra.2021.3111055.

[157] Medical Holodeck. *Medicalholodeck*. en. URL: https://www.medicalholodeck.com/en/press-release/about-medicalholodeck/ (besucht am 26. 06. 2023).

[158] *The Innovative Secure Medical Campus at University Hospital Bonn UKB | Medicalholodeck*. URL: https://www.medicalholodeck.com/en/newsroom/the-innovative-secure-medical-campus-at-university-hospital-bonn-ukb/ (besucht am 13. 09. 2023).

[159] Vireed. *VIREED MED*. de. URL: https://www.vireed.de/med (besucht am 14. 03. 2023).

[160] Vireed. *SCHOCKRAUM MODUL*. de. URL: https://www.vireed.de/schockraum (besucht am 14. 03. 2023).

[161] Sébastien Lozé. *VR medical simulation from Precision OS trains surgeons five times faster*. Mai 2020. URL: https://www.unrealengine.com/en-US/spotlights/vr-medicalsimulation-from-precision-os-trains-surgeons-five-times-faster (besucht am 17. 01. 2022).

[162] SkillsMed. *VR / AR - Unsere Produkte und Dienstleistungen - Skills Med Deutschland GmbH*. URL: https://www.skills-med.de/produkte/vr-ar (besucht am 26. 06. 2023).

[163] Michael Meuser und Ulrike Nagel. „Das Experteninterview — konzeptionelle Grundlagen und methodische Anlage“. In: *Methoden der vergleichenden Politik- und Sozialwissenschaft: Neue Entwicklungen und Anwendungen*. Wiesbaden: VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2009, S. 465–479. ISBN: 978-3-531-91826-6. DOI: 10.1007/978-3-531-91826-6_23.

[164] Cornelia Helfferich. *Die Qualität qualitativer Daten*. VS Verlag für Sozialwissenschaften, 2011. DOI: 10.1007/978-3-531-92076-4.

[165] Dorothea Protte. Experteninterview. (Besucht am 29. 06. 2022).

[166] Prof. Dr. med. Nabeel Farhan. Experteninterview. (Besucht am 08. 07. 2022).

[167] MSc. H.P. Hilco Theeuwes MD. Experteninterview. (Besucht am 18. 10. 2022).

[168] LimeSurvey. *LimeSurvey — Free Online Survey Tool*. en-us. URL: https://www.limesurvey.org/ (besucht am 01. 03. 2023).

[169] B. G. Witmer und M. J. Singer. „Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire“. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 7.3 (1998), S. 225–240.

[170] iGroup. *iGroup: A Research Center on Group Dynamics*. 2021. URL: https://www.igroup.org (besucht am 10. 02. 2023).

[171] iGroup. *igroup presence questionnaire (IPQ) Scale Construction | igroup.org – project consortium*. URL: http://www.igroup.org/pq/ipq/construction.php (besucht am 10. 02. 2023).

[172] Skills-Med. *Limbs & Things Trainer für weibliches Becken „Advanced“*. de-DE. URL: https://www.skills-med.de/clinical-female-pelvic-trainer-mk3-advanced (besucht am 19. 06. 2023).

[173] Jan Benedikt Brönneke, Julia Hagen, Philipp Kircher und Henrik Matthies. „Digitalisierte Gesundheitsversorgung im Jahr 2030 – ein mögliches Szenario“. In: *Bundesgesundheitsblatt - Gesundheitsforschung - Gesundheitsschutz* 64.10 (Sep. 2021), S. 1285–1291. DOI: 10.1007/s00103-021-03416-8.

Glossar

App Application: mobile Anwendungssoftware. 15

AR Augmented Reality (dt.: Erweiterte Realität): Erweiterung der realen Welt durch Einblendung virtueller Elemente. 2

DB Datenbank. 73

DiGA digitale Gesundheitsanwendungen: Software / Medizinprodukt mit Anwendung im Gesundheitswesen. 72

DoF Degree of freedom: Freiheitsgrade. 41

DSGVO Datenschutz-Grundverordnung. 46

EMC Erasmus University Medical Center (Erasmus MC or EMC) in Rotterdam in den Niederlande. 93

FoV Field of View: Sehwinkel eines Objektivs / Sichtfeld. 163

FRVF forbidden-region virtual fixtures: Virtuelle Zonen die nicht betreten werden dürfen. 80

GUI Graphical User Interface: Grafische Benutzeroberfläche. 13

HMD Head Mounted Displays: Brillen für XR-Anwendungen. 40

HUD Head-up Display: Anzeige / Display im Gesichtfeld. 67

IDE Integrierte Entwicklungsumgebung: Sammlung von Computerprogrammen und Funktionen in einer Programmierumgebung. 102

KI Künstliche Intelligenz: Maschinelles lernen und Datenverarbeitung. 1

NPC Nicht-Spieler-Charakter: Alle Charaktere die vom Computer gesteuert werden. 174

RCT Randomized controlled trial: sind Studien die die Wirksamkeit einer neuen Methode Intervention oder Behandlung messen gegen eine Vergleichsgruppe testen. 130

VR Virtual Reality (dt.: Virtuelle Realität): Schaffung und Nutzung einer virtuellen Welt. 3

XR Mixed Reality (dt.: gemische/angepasste Realität): eine Vermischung aus realer Welt und virtuellen Inhalten. 9