

Aus der Klinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie
Der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
Direktor: Prof. Dr. med. Dr. med. dent. Nobert Kübler

**Evaluation der Mixed Reality-Technologie im Rahmen der
Lehre in der kraniofaszialen Chirurgie**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Zahnmedizin
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

vorgelegt von
David Benedikt Kaffka
2025

Als Inauguraldissertation gedruckt mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf
gez.:

Dekan: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter/in: Prof. Dr. Dr. Majeed Rana

Zweitgutachter/in: Prof. Dr. Sajjad Muhammad

Gender Disclaimer

Aus Gründen der Lesbarkeit wird in dieser Arbeit auf die gleichzeitige Nennung männlicher, weiblicher und diverser Personenbezeichnungen verzichtet. Es wird das generische Maskulinum verwendet, das sämtliche Geschlechtsidentitäten einschließt, sofern nicht explizit anders angegeben. Diese Formulierung erfolgt ausschließlich aus stilistischen Gründen und impliziert keine Wertung.

Zusammenfassung

Die Mixed Reality (MR)-Technologie ist ein digitales Visualisierungsverfahren, das die holografische Darstellung dreidimensionaler Objekte im realen Raum ermöglicht. Mithilfe einer MR-Brille können Nutzer anatomische Strukturen oder pathologische Befunde interaktiv erkunden und beurteilen. Die Einführung neuer Technologien erfordert jedoch eine sorgfältige Abwägung, um Ressourcen effizient einzusetzen und den klinischen Alltag nicht zu belasten.

Ziel dieser Untersuchung war es, zu evaluieren, inwieweit die MR-Technologie für die Vermittlung theoretischer Inhalte in der medizinischen und zahnmedizinischen Ausbildung geeignet ist und welches Potenzial sie für die Lehre bietet. Die Studie umfasste zwei Phasen. Da bislang keine validierten Evaluationsinstrumente vorlagen, wurden zunächst 15 strukturierte Leitfadenterviews durchgeführt. Auf Grundlage der Ergebnisse wurden zwei Fragebögen für die zweite Studienphase entwickelt.

Anschließend folgte eine Fragebogenerhebung im Pre-Post-Design. Die Teilnehmenden (n = 46) wurden randomisiert zwei Gruppen zugewiesen: Die Versuchsgruppe bearbeitete eine Lernaufgabe mit MR-Unterstützung, die Kontrollgruppe nutzte ein konventionelles Lernskript. Danach erfolgte eine Lernzielkontrolle. Vor dem Post-Fragebogen konnten auch die Teilnehmenden der Kontrollgruppe die MR-Anwendung erproben.

Die Evaluation zeigte, dass der Einsatz in der Lehre von den Teilnehmenden als interessant, hilfreich und lernförderlich wahrgenommen wurde. Die Befragten verfügten bereits über digitale Vorkenntnisse und verbanden hohe Erwartungen mit der Anwendung. Eine intuitive Handhabung und Zeitersparnis wurden als wichtig erachtet, könnten aber bei Nichterfüllung auch Hürden darstellen. Besonders positiv hervorgehoben wurden die dreidimensionale Visualisierung und das verbesserte Verständnis komplexer Inhalte. Kritische Rückmeldungen fielen moderat aus; Vorbehalte und Mehraufwand wurden erwähnt, jedoch weniger stark gewichtet.

Insgesamt deuten die Ergebnisse darauf hin, dass eine Einführung und Etablierung von Mixed Reality in der medizinischen Lehre grundsätzlich realisierbar erscheinen.

Abstract

Mixed Reality (MR) technology is a digital visualization method that enables the holographic projection of three-dimensional objects within real-world environments. By using an MR headset, users can interactively explore and evaluate anatomical structures or pathological findings. The introduction of novel technologies, however, requires careful consideration to ensure efficient use of resources and to avoid disrupting clinical workflows.

The objective of this study was to evaluate the extent to which MR technology is suitable for conveying theoretical content in medical and dental education, and to assess its potential for teaching purposes. The study was conducted in two phases. As no validated evaluation instruments were available to date, 15 structured guideline-based interviews were carried out in the first phase. Based on the results, two questionnaires were developed for the second study phase.

Subsequently, a pre–post questionnaire survey was conducted. Participants (n = 46) were randomly assigned to two groups: the intervention group completed a learning task supported by MR, while the control group used a conventional learning script. A learning objective assessment followed. Before completing the post-questionnaire, participants in the control group were also given the opportunity to test the MR application.

The evaluation revealed that participants perceived the use of MR in teaching as engaging, helpful, and conducive to learning. Respondents already possessed digital literacy and expressed high expectations of the technology. Intuitive usability and time efficiency were considered important factors, which, if unmet, could present barriers. Particularly positive aspects highlighted were the three-dimensional visualization and the improved comprehension of complex subject matter. Critical feedback was moderate; while concerns regarding additional effort and reservations were mentioned, they were less strongly emphasized.

Overall, the findings suggest that the introduction and implementation of Mixed Reality in medical education appear to be fundamentally feasible.

Abkürzungsverzeichnis

AR	Augmented Reality
HMD	Head-Mounted-Display
MKG	Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie
MR	Mixed Reality
Pre-FB	Pre-Fragebogen
Post-FB	Post-Fragebogen
Q1	Unteres Quartil (25. Perzentil)
Q2	Median
Q3	Oberes Quartil (75. Perzentil)
VR	Virtual Reality

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	<i>Mixed Reality Definition</i>	1
1.2	<i>Historischer Hintergrund zur Entwicklung der MR-Technologie.....</i>	2
1.3	<i>Virtual Reality, Augmented Reality, Mixed Reality im Vergleich</i>	7
1.4	<i>Einsatzgebiete in der Medizin</i>	9
1.5	<i>Medizinische Lehre.....</i>	11
1.6	<i>Ziele der Arbeit</i>	12
2	Material und Methoden	14
2.1	<i>Ablauf der Studie.....</i>	14
2.2	<i>Studiendesign.....</i>	14
2.3	<i>Interviewanteil</i>	15
2.3.1	<i>Planung und Vorbereitung</i>	15
2.3.2	<i>Sampling und Recruiting</i>	16
2.3.3	<i>Interviewdurchführung</i>	17
2.3.4	<i>Transkription</i>	18
2.3.5	<i>Auswertung der qualitativen Inhaltsanalyse</i>	18
2.4	<i>Fragebogenanteil</i>	19
2.4.1	<i>Konzeption der Fragebögen</i>	19
2.4.2	<i>Entwicklung und Aufbau der Fragenbögen.....</i>	20
2.4.3	<i>Technologie & Hardware</i>	22
2.4.4	<i>Didaktische Gestaltung der Mixed Reality-Anwendung und der Lernskripts.....</i>	24
2.4.5	<i>Lernzielkontrolle</i>	28
2.4.6	<i>Stichprobe und Rekrutierung</i>	28
2.4.7	<i>Durchführung und Ablauf der Fragebogenstudie</i>	29
2.4.8	<i>Auswertung der Fragebögen bzw. Lernzielkontrolle</i>	30
2.5	<i>Ethikvotum</i>	31
3	Ergebnisse	32
3.1	<i>Qualitative Analyse der Interviewergebnisse.....</i>	32
3.2	<i>Studienpopulation</i>	37
3.3	<i>Fragebogenauswertung</i>	38
3.3.1	<i>Ergebnisse der Pre- und Post-Fragebögen im Gruppenvergleich</i>	38
3.3.2	<i>Qualitative Auswertung der offenen Fragen der Post-Fragebögen.....</i>	41
3.3.3	<i>Quantitative Auswertung der Meinungsveränderungen</i>	43
3.4	<i>Statistische Auswertung der Lernzielkontrolle.....</i>	48
4	Diskussion	50

4.1	<i>Fachlicher Hintergrund und Bedeutung der Thematik</i>	50
4.2	<i>Methodendiskussion</i>	51
4.2.1	<i>Auswahl der Studienteilnehmenden</i>	51
4.2.2	<i>Qualitative Datenerhebung und Interviewauswertung</i>	52
4.2.3	<i>Fragebogenerstellung und quantitative Auswertung</i>	54
4.3	<i>Ergebniskritik</i>	55
4.3.1	<i>Qualitative Interviewergebnisse</i>	55
4.3.2	<i>Quantitative Fragebogenergebnisse</i>	57
4.3.3	<i>Ergebnisse der Lernzielkontrolle</i>	59
4.4	<i>Konklusion und Ausblick</i>	60
5	Literatur- und Quellenverzeichnis	62
6	Anhang	69
6.1	<i>Abbildungsverzeichnis</i>	69
6.2	<i>Tabellenverzeichnis</i>	70
6.3	<i>Zusatzmaterialien</i>	71
6.3.1	<i>Fragebogen (Pre-FB)</i>	71
6.3.2	<i>Leitfragenkatalog</i>	74

1 Einleitung

1.1 Mixed Reality Definition

Mixed Reality (MR) ist eine neue Technologie, die in den vergangenen Jahren zunehmend das Interesse der medizinischen Forschung geweckt hat (Hu et al., 2019). Sie basiert auf einem holografischen Bildgebungsverfahren, das es ermöglicht, digitalerzeugte Objekte im realen Raum zu generieren. Die virtuellen Objekte können mit der realen Umgebung sowie mit Anwendern in Echtzeit agieren (Abb. 1).

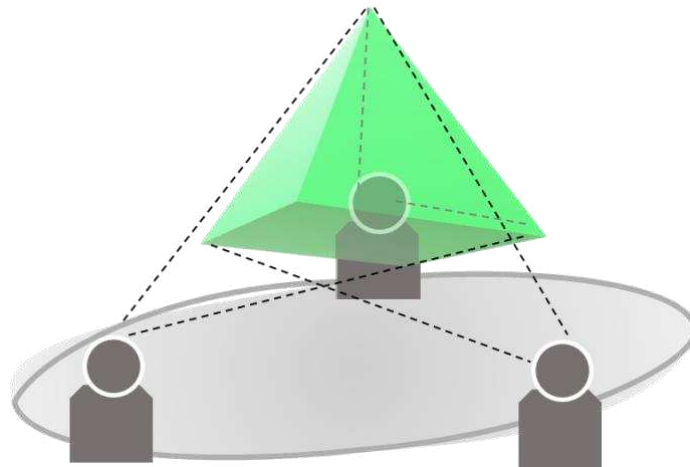


Abb. 1: Schematische Darstellung einer Mixed Reality-Anwendung von Nutzern in derselben physischen Umgebung (grau) mit verschiedenen räumlichen Perspektiven desselben virtuellen 3D-Objekts (grün)

Milgram et al. (1995) setzten sich erstmals mit einer Definition des Begriffs Mixed Reality auseinander (Milgram et al., 1995). Zu diesem Zweck entwickelten sie das sogenannte Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum, ein konzeptionelles Modell zur Einordnung und Veranschaulichung von Begriffen wie Augmented Reality (AR) und Virtual Reality (VR), die im Zusammenhang mit der Mixed Reality-Technologie häufig verwendet werden (Abb. 2) (Milgram et al., 1995).

Dabei stellen die physische Umgebung des Menschen und eine vollständig virtuell generierte Welt zwei Extreme dar, die sich an den jeweiligen Enden eines Kontinuums befinden. An diesen Endpunkten sind Vermischungen der jeweiligen Umgebungen ausgeschlossen. Die Annäherung innerhalb des Kontinuums von der realen an die virtuelle Realität bzw. umgekehrt, beschreibt nach dieser Definition die sogenannte vermischte Realität. Folglich beschreibt der Begriff Mixed Reality als Oberbegriff den gesamten Übergangsbereich zwischen den beiden Extremen im Realitäts-Virtualitäts-

Kontinuum, also für sämtliche Mischformen zwischen physischer und computergenerierter (virtueller) Welt (Milgram et al., 1995).

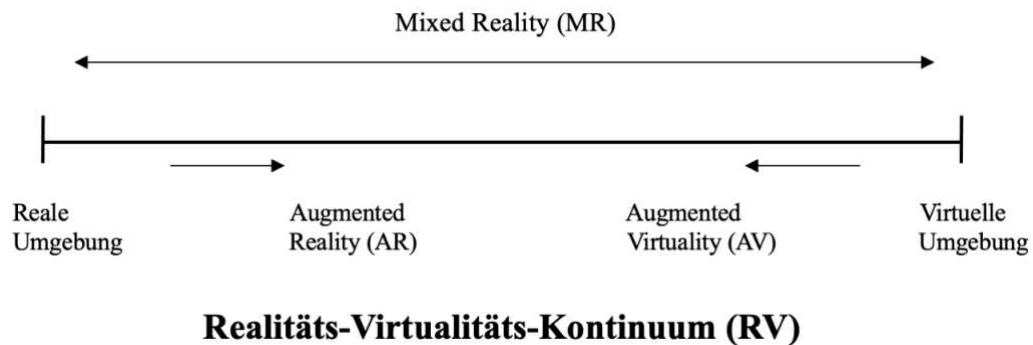


Abb. 2: Schematische Darstellung des Realitäts-Virtualitäts-Kontinuums angelehnt an Milgram et al. (1995) (Milgram et al., 1995)

Die in diesem Konzept ergänzend verwendeten Begriffe „Augmented Reality“ (AR) und „Augmented Virtuality“ (AV) können unter dem Begriff Mixed Reality zusammengefasst werden. Im Wesentlichen unterscheiden sich die beiden Begriffe im Grad der eingesetzten Virtualität. AR beschreibt eine weitestgehend reale Umgebung, die um virtuelle Elemente ergänzt wird. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei AV, ähnlich wie bei VR, um eine computergenerierte virtuelle Welt, in die reale Elemente eingefügt werden (Milgram et al., 1995).

In der Medizin ermöglicht die digitale, holografische Bildgebung der Mixed Reality-Technologie, aus radiologischen Schnittbildern virtuelle 3D-Objekte im Raum zu generieren. Diese erlauben eine räumliche Erfahrung und Interaktion mit anatomischen und pathologischen Strukturen, die in einer zweidimensionalen Umgebung nicht möglich wären (Hu et al., 2019).

1.2 Historischer Hintergrund zur Entwicklung der MR-Technologie

Der erste Forschungsbericht zur dreidimensionalen Bildwahrnehmung wurde im Jahr 1838 vom britischen Physiker Charles Wheatstone veröffentlicht (Wade, 2012). In seiner Arbeit zur Untersuchung von Stereoskopie beschrieb Wheatstone die Möglichkeit, zweidimensionale Bilder mit einem räumlichen Tiefeneindruck darzustellen. Mithilfe eines hierfür entwickelten Betrachtungsgeräts konnte den Nutzern durch die binokulare leicht versetzte Präsentation zweidimensionaler Bilder eine Raumwahrnehmung simuliert

werden. Aufgrund der Seitendifferenz und der Verschmelzung zweier unterschiedlicher Netzhautbilder konstruiert das Gehirn ein dreidimensionales Bild (Wade, 2012).

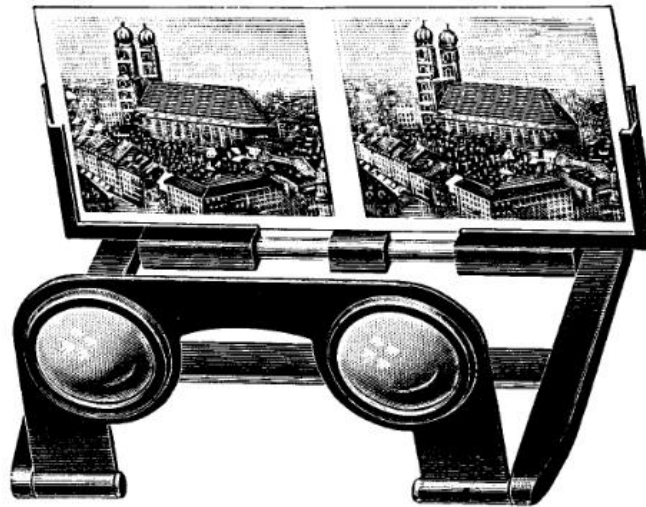


Abb. 3: Historisches Beispiel für ein Stereobetrachtungsgerät aus dem 20. Jahrhundert (Hoffmann, 2002)

Etwa 100 Jahre später kam es durch die Einführung des Geräts „View-Master“ zu einer Weiterentwicklung im Bereich der Stereoskopietechnik (Abb. 4). Das View Master-System bot durch die Betrachtung von sieben farbigen Dia-Bildpaaren und einem Hebel zum Weiterschalten eine massentaugliche Alternative zu den altmodischen und umständlichen Stereoscopen (Möser, 2010). Seine Erstvorstellung erfolgte 1939 auf der Weltausstellung in New York. Es entstand in den folgenden Jahren eine Massenanfertigung mit hoher Nachfrage im Bereich der Touristik (Möser, 2010). Der View-Master wird heute noch von der Firma Mattel (El Segundo, Kalifornien, USA) als VR-Brille in Form einer Haltevorrichtung für Smartphones vermarktet und bildete somit schon früh eine primitive Grundlage der heutigen Head-Mounted-Displays (HMD) (Brown und Green, 2016).



Abb. 4: Foto des View-Masters aus dem Jahr 1939 von der Firma Sawyer's Inc. (Portland, Oregon, USA) (Smith, 1949)

Die grundlegenden Ursprünge der heutigen VR- bzw. MR-Technologie lassen sich in den 1960er Jahren finden. Ivan Sutherland veröffentlichte 1968 sein Buch „A Head-Mounted-Three Dimensional Display“ und stellte das von ihm entwickelte Head-Mounted-Display vor, welches es dem Nutzer ermöglichte, direkt mit computererzeugten Grafiken in einer interaktiven virtuellen Realität zu interagieren (Sutherland, 1968). Die Apparatur war ein helmförmiges Gerät, das einer Art Periskop ähnelte und computergenerierte 3D-Bilder binokular darstellte (Viveiros, 2019). Aufgrund des hohen Gewichts musste sie an der Decke befestigt werden und wurde deshalb auch „Damoklesschwert“ genannt (Abb. 5). Die dargestellten Grafiken umfassten eine virtuelle Umgebung mit simplen 3D-Modellen aus Drahtgittern, die es dem Benutzer ermöglichten, die Position zu verändern und andere Perspektiven einzunehmen (Viveiros, 2019). Die erzeugten Bilder wurden den Bewegungen des Kopfs des Anwenders angepasst und über Ultraschallsensoren erfasst (Basu, 2019). Obwohl die Darstellungen eher primitiv waren, markierte dies den Beginn der Virtual Reality.

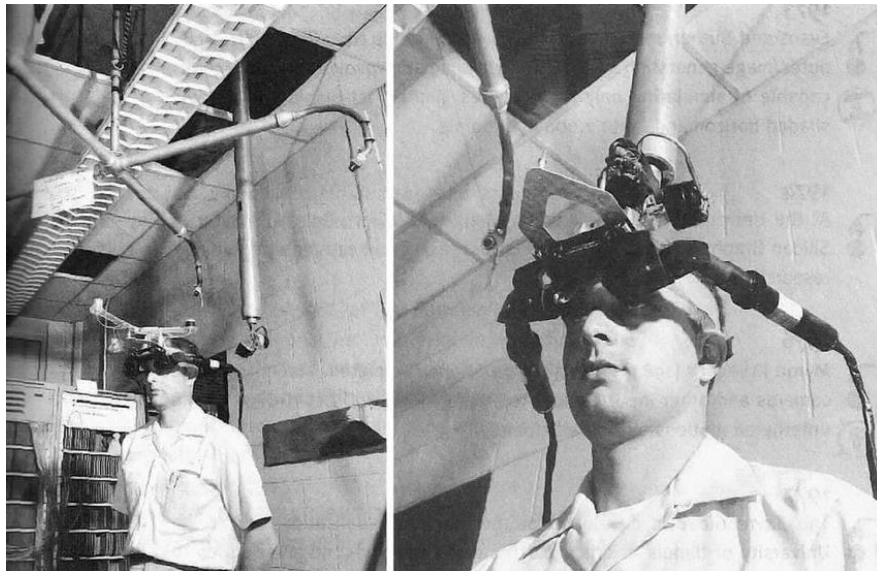


Abb. 5: Fotos des Head-Mounted-Devices von Ivan Sutherland (Sutherland, 1968)

Obwohl Sutherland mit seiner Forschung als Pionier der VR- und MR-Technologie gilt, vergingen nach seinen Veröffentlichungen Jahre bis zur ersten Anwendung der Head-Mounted-Devices Anfang der 1980er Jahre im militärischen Bereich. Thomas Furness, tätig bei den Armstrong Medical Research Laboratories der US Air Force, entwarf 1982 den „Visually Coupled Airborne Systems Simulator“ (VCASS), eine hochentwickelte Flugsimulationsanlage. Die Piloten trugen ein Head-Mounted-Display, welches ihre Sicht jenseits des herkömmlichen Cockpitfensters erweiterte, indem es zusätzliche Informationen wie Ziele und Flugwege grafisch darstellte (Basu, 2019). In den 1990er Jahren wurde die Spieleindustrie auf die VR-Technologie aufmerksam. Hersteller von Videospielen wie K.K. Sega (Tokio, Japan) oder Nintendo Co.,Ltd. (Kyōto, Japan) brachten Spielekonsolen auf den Markt, welche Kopfbewegungen mittels Sensoren erfassten bzw. auf diese reagierten (J. J. LaViola, 2008). Diese Technologien sorgten allerdings nicht für jene Aufmerksamkeit wie die der Einführung des Onlinedienstes Google Street View der Firma Google LLC. (Mountain View, Kalifornien, USA) im Jahr 2007. Basierend auf 360° Panoramaaufnahmen von Straßen und Gebäuden weltweit, wurde wenige Jahre nach der Einführung eine stereoskopische, dreidimensionale Betrachtung möglich. Diese generierte für den Nutzer eine immersive Möglichkeit der Erkundung diverser Orte (Anguelov et al., 2010).

Durch die flächendeckende Einführung des Smartphones wurde eine neue und praktikable Möglichkeit Virtual Reality maßgeblich zu nutzen geschaffen. Smartphones können mithilfe der integrierten Sensoren Bewegungen im Raum erkennen und simultan virtuelle Bilder über das Display generieren. Hierdurch gelingt eine Verknüpfung von

realer und computererzeugter Welt in Echtzeit. In Verbindung mit einer Haltevorrichtung können sie somit als einfache und kostengünstige HMD fungieren und immersive Erfahrungen schaffen, für die früher Computer mit höchster Leistungsfähigkeit benötigt wurden (Zikas et al., 2016). Im Jahr 2012 wurde erstmals ein Head-Mounted-Display für den kommerziellen Verkauf vorgestellt. Das Unternehmen Oculus VR (Irvine, Kalifornien, USA) stellte mit Oculus Rift DK1 HMD ein Virtual-Reality-Headset für Videospiele vor, welches als Meilenstein der Spieleindustrie galt (Tan et al., 2015).

In Hinblick auf die Entwicklung von Mixed Reality-HMD erfolgte durch die Markteinführung der Google Glasses der Google LLC. (Mountain View, Kalifornien, USA) 2013 aufgrund seines Konzepts, Informationen direkt vor das Auge des Benutzers zu projizieren eine wesentliche Innovation auf diesem Gebiet. Dies gelang durch die Ausstattung der Hardwarebrille mit Bewegungssensoren, einer Kamera sowie eines kleinen Bildschirms. Diese Eigenschaften wurden bereits für die Integration in medizinische Systeme beschrieben (Martinez-Millana et al., 2016).

Jedoch erst in jüngster Zeit gelang durch die Einführung der Microsoft HoloLens Microsoft Corporation (Redmond, Washington, USA) im Jahr 2016 (Abb.6) bzw. des HMD-Magic Leap One der Firma Magic Leap (Plantation, Florida, USA) im Jahr 2018 der praktische Einsatz der MR-Technologie im professionellen Umfeld. Diese haben die Fähigkeit holographische Bilder in die reale Umgebung des Nutzers räumlich zu integrieren, anstatt nur Informationen oder Abbildungen bereitzustellen. Durch die sensorgesteuerte Erfassung in der Umgebung wird die Position des Geräts im physischen Raum erfasst und kontinuierlich aktualisiert, um eine räumliche Darstellung der holografischen Informationen im Raum zu erreichen bzw. virtuell augmentierte Objekte in der realen Welt zu fixieren. Hierdurch scheinen virtuelle über realen Objekten zu schweben, was zu einer Vermischung von virtueller und realer Welt führt. Es handelt sich dementsprechend um Head-Mounted-Displays, welche immersive MR-Erfahrungen ermöglichen (Zari et al., 2023).



Abb. 6: HoloLens, Microsoft Corporation (Redmond, Washington, USA), 1. Generation Head-Mounted-Display (Microsoft, 2024)

1.3 Virtual Reality, Augmented Reality, Mixed Reality im Vergleich

Aus technologischer Sicht lässt sich der Begriff Mixed Reality in das Umfeld von Virtual Reality und Augmented Reality einordnen. Virtual Reality beschreibt eine vollständig digital erstellte, virtuelle Umgebung. Die reale Umwelt wird während der Nutzung gänzlich ausgeblendet und der Nutzer taucht mithilfe eines Head-Mounted-Displays in eine computerbasierte dreidimensionale Umgebung ein. Es besteht die Möglichkeit durch die Umgebung zu navigieren und mit dieser zu interagieren. Durch die Beteiligung des Seh- und Hörsinns wird dem Nutzer somit der immersive Gesamteindruck vermittelt, sich in einer völlig anderen Realität zu befinden - mit einer Abgrenzung zur realen Umwelt. Häufige Einsatzbereiche der Virtual Reality sind Videospiele oder auch Simulatoren in der Industrie, die mithilfe von HMD verwendet werden (Mujber et al., 2004).

Augmented Reality nutzt zwar ebenfalls digital erstellte, virtuelle Elemente, überlagert dieser allerdings mit der realen Welt und erweitert diese somit. Der Fokus liegt dementsprechend nicht auf einer artifiziellen Umgebung, sondern auf den virtuell ergänzenden Objekten (Berryman, 2012). Der Vorteil liegt darin, dass Nutzer ihre Umwelt weiterhin uneingeschränkt wahrnehmen und sich natürlich darin bewegen können, während sie gleichzeitig zusätzliche Informationen oder virtuelle Objekte bereitgestellt bekommen. Beispielsweise können Smartphones als einfacher und kostengünstiger AR-Monitor dienen. Mittels der Smartphone-Kamera kann die reale Umgebung mithilfe des Bildschirms betrachtet werden und zeitgleich werden computergenerierte, virtuelle Objekte überlagert und dargestellt. Eines der

prominentesten Beispiele ist die Smartphone-Applikation *Pokémon Go*, entwickelt von Niantic Inc. (San Francisco, Kalifornien, USA) in Kooperation mit Nintendo Co.,Ltd. (Kyōto, Japan) aus dem Jahr 2016 (Viveiros, 2019). Sowohl Virtual Reality als auch Augmented Reality bieten begrenzten Nutzen für die Medizin, da die Anwendungen entweder zu unrealistisch sind oder nur eine eingeschränkte Möglichkeit der Interaktion mit den virtuellen Inhalten besteht (Saju et al., 2022).

Mixed Reality stellt eine Kombination von VR und AR dar, welche es dem Nutzer erlaubt, gleichzeitig mit der realen Welt und virtuellen Elementen zu interagieren. Bei der Anwendung werden virtuelle 3D-Objekte holografisch im Raum eingebettet und akkurat mit der Realität verknüpft. Sensoren sorgen für eine möglichst realitätsnahe Verankerung der virtuellen Objekte in der physischen Welt (Tepper et al., 2017).

MR lässt sich folglich als eine realistischere und fortgeschrittenere Form der AR beschreiben, die ein immersiveres 3D-Erlebnis für den Nutzer generiert. Außerdem sind Interaktionen, wie beispielsweise der Wechsel der eigenen Position im Raum bzw. Veränderungen des Hologramms selbst möglich (Efe, 2022). Anwender können außerdem zu jedem Zeitpunkt miteinander kommunizieren und sich austauschen, da sie sich sowohl den realen als auch den virtuellen Raum teilen (Eck und Winkler, 2018). Da eine solche Erfahrung nicht über einen zweidimensionalen Bildschirm wie bei der AR möglich ist, wird bei der VR und MR ein Head-Mounted-Display benötigt. Die MR-HMD erlauben es dem Nutzer, im Gegensatz zu den VR-HMD, zeitgleich die Hologramme sowie die reale Umgebung zu betrachten (Rhee et al., 2017).

Folglich werden die Hologramme durch MR derartig in die reale Welt eingebettet, dass sie während der Nutzung Teil dieser werden. Durch die Möglichkeit der Interaktion, werden folglich völlig neue Anwendungsfelder geschaffen. Die Mixed Reality-Technologie gilt daher als wegweisend im Bereich der Medizin, da sie im Gegensatz zur rein ergänzenden Augmented Reality eine tiefere Verschmelzung von Realität und Virtualität ermöglicht (Hu et al., 2019).

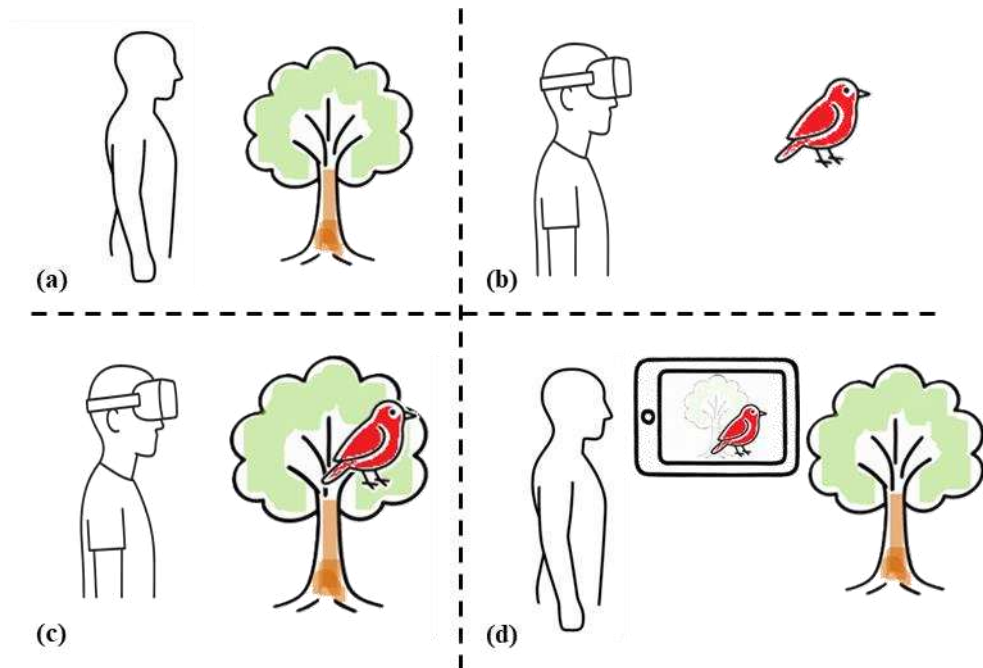


Abb. 7: Schematische Darstellung zur Abgrenzung von (a) realer Umgebung, (b) Virtual Reality (vollständige Immersion in eine digitale Welt), (c) Mixed Reality (Verschmelzung der realen mit virtuellen Elementen) sowie (d) Augmented Reality (Erweiterung der realen Umgebung durch digitale Inhalte) - Der Baum steht exemplarisch für ein reales Objekt, der Vogel für ein virtuelles Element

1.4 Einsatzgebiete in der Medizin

Die Mixed Reality-Technologie bietet ein breites Spektrum an Anwendungsmöglichkeiten in der Medizin (Hu et al., 2019). Ein wesentliches Einsatzfeld ist die medizinische Lehre und Ausbildung. Mithilfe von MR können Studierende beispielsweise die Anatomie des menschlichen Körpers im dreidimensionalen Raum interaktiv erlernen, als Alternative zu konventionellen Lehrmitteln wie Lehrbüchern oder Videos (Sappenfield et al., 2018). Dies beschränkt sich nicht nur auf Studierende, denn auch medizinisches Fachpersonal kann mithilfe der MR-Technologie in realitätsnahen Trainingssituationen geschult werden. Spezifische Eingriffe, Abläufe oder Operationen können so vorab virtuell simuliert und erlernt werden, bevor sie das erste Mal praktisch erfolgen. Ein Beispiel hierfür ist ein von Robinson et al. (2014) vorgestellter MR-Simulator zur Anlage eines zentralvenösen Katheters in die V. subclavia (Robinson et al., 2014).

Im Gegensatz zu VR-Simulationen bietet MR den Vorteil, dass erfahrene Ärzte bzw. Chirurgen den Auszubildenden nicht nur passiv während der Durchführung

supervidieren, sondern ebenfalls mit ihnen interagieren können, wodurch eine optimale Lernsituation erzielt wird (Hu et al., 2019).

Diese Form der intuitiven und greifbaren Darstellung ermöglicht es nicht nur Fachleuten, ihre Fähigkeiten zu schulen, sondern sie kann auch als Kommunikationsmedium im Rahmen des Arzt-Patienten-Gesprächs dienen. Die dreidimensionale Darstellung geplanter Eingriffe sowie die Möglichkeit der Betrachtung verschiedener Perspektiven fördern das Patientenverständnis und reduzieren so Missverständnisse während der Patientenaufklärung (Hu et al., 2019).

Des Weiteren kann MR bei der präoperativen Planung eingesetzt werden. Es ist den Behandlern möglich, einen Eingriff dreidimensional zu simulieren und potenzielle Komplikationen im Vorfeld zu erkennen (Hu et al., 2019).

Zudem erlaubt die Technologie eine interdisziplinäre, ortsungebundene Zusammenarbeit in Echtzeit, sodass ein fachlicher Austausch detailliert und zeiteffizient möglich ist (Wu et al., 2018).

Im Bereich der Telemedizin ist es Fachärzten so möglich auch über große Distanzen dreidimensionale Inhalte zu teilen und Eingriffe zu besprechen und Operationen in Echtzeit zu begleiten bzw. anzuleiten (Wang et al., 2017).

Intraoperativ ermöglicht die MR-Technologie dem Chirurgen eine dreidimensionale Betrachtung der individuellen Anatomie des Patienten. Dies erhöht die Übersicht über das Operationsfeld, was wiederum zu einer erhöhten Sicherheit und Genauigkeit während des Eingriffes führt (Hamacher et al., 2016). Erste Studien zeigen, dass durch den Einsatz von MR nicht nur die Operationsdauer reduziert werden kann, sondern auch die Strahlenbelastung durch zusätzliche bildgebende Verfahren im Vergleich zu konventionellen Verfahren signifikant gesenkt wird (Fischer et al., 2016). Entsprechende Anwendungen fanden sich bereits in der orthopädischen Chirurgie, Neurochirurgie, Thoraxchirurgie, Urologie sowie im Rahmen von Eingriffen in der Mund-, Kiefer- und Gesichtschirurgie (MKG) (Wu et al., 2018, Barsom et al., 2016, Heuts et al., 2016, Hamacher et al., 2016, Yang et al., 2021).

Ein weiteres intraoperatives Einsatzgebiet stellt die Echtzeitnavigation während der Operation dar (Wu et al., 2018). Die Durchführbarkeit und die Zeitersparnis sowie die Effektivität bei minimalinvasiven Eingriffen, wurde bereits im Bereich der Schädelbasis- und endoskopischen Sinuschirurgie dargelegt (Li et al., 2016).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die aktuellen Publikationen diverse Einsatzgebiete der Mixed Reality-Technologie in der Medizin aufzeigen. Die Literatur deutet darauf hin, dass Mixed Reality insbesondere in der medizinischen und chirurgischen Ausbildung sowie im interdisziplinären Austausch und in der Arzt-Patienten-Kommunikation ein erhebliches Potenzial besitzt (Hu et al., 2019).

1.5 Medizinische Lehre

Die stetig wachsenden Anforderungen an die medizinische und insbesondere an die chirurgische Ausbildung stellen alle Beteiligten vor große Herausforderungen für die effektive Lösungsansätze erforderlich sind. Während die Komplexität chirurgischer Eingriffe, nicht zuletzt durch minimalinvasive Verfahren, kontinuierlich zunimmt, steigen gleichzeitig der Lernstoff sowie der damit verbundene Zeitaufwand (Brunner et al., 2021). Gleichzeitig müssen ökonomische Faktoren wie Operationskosten und -dauer berücksichtigt werden. Die Ressourcen sind begrenzt und der Wunsch nach kurzen Operationszeiten ist berechtigt. Dies erschwert es, ausreichend praktische Erfahrung zu sammeln. (Stefan et al., 2018). Nicht unbegründet ist deshalb die Forderung junger Ärzte nach effizienten Ausbildungsbedingungen, beginnend im Studium, die zu den zeitlichen Rahmenbedingungen passt (Brunner et al., 2021).

Obwohl die Einführung neuer Technologien in der Medizin ebenfalls viel Aufmerksamkeit erfordert, bestätigt eine Studie von Brunner et al. (2021) zur Anwendung von Simulatoren in der chirurgischen Weiterbildung bereits deren hohe Relevanz (Steuten et al., 2008, Brunner et al., 2021). Im Gegensatz zu klassischen Tiermodellen oder Humanpräparaten machen diese eine Operation beliebig oft replizierbar und sind in der Lage Feedback zu geben (Stefan et al., 2018).

Immersive Simulatoren, wie die Mixed Reality (MR) Technologie, sind bereits für das chirurgische Training verfügbar, werden bisher jedoch kaum genutzt (Brunner et al., 2021). In einigen Fachbereichen liegen bereits vereinzelt randomisierte Studien vor, die eine hohe Evidenz für den Einsatz von Simulatoren belegen (Petersen et al., 2021). Die nachgewiesene Transfervalidität bestätigt sogar die erhöhte Patientensicherheit, dennoch erfolgt der Einsatz von Simulatoren im klinischen Alltag bisher nur zögerlich. Nicht zuletzt werden die Anschaffungskosten als Begründung für die fehlende Akzeptanz aufgeführt, wobei virtuelle Simulatoren deutlich kostengünstiger sind als beispielsweise

Desktop-Gelenk-Simulatoren. Studien zur Kosteneffizienz in Deutschland fehlen allerdings (Petersen et al., 2021).

Auch aufgrund der Covid-19-Pandemie gewann die virtuelle Lehre zusätzlich an Bedeutung, da es zu starken Einschränkungen bei Präsenzveranstaltungen aller Art kam. Es ist davon auszugehen, dass der technische Fortschritt und die Weiterentwicklung die Rolle der virtuellen Simulatoren stärken werden (Morscheid und Pouessel, 2023). Neben der aktuell noch begrenzten Verfügbarkeit stellt die digitale Infrastruktur eine Hürde dar. Es wird nicht nur eine hohe Internetbandbreite benötigt, sondern diese muss ebenfalls flächendeckend verfügbar sein, um die Nutzung der MR zu ermöglichen (Morscheid und Pouessel, 2023).

Am effektivsten können neue Inhalte erlernt werden, indem der Mensch möglichst viele Sinne einsetzt. Dies entspricht dem natürlichen Lernprozess, den Kinder seit ihrer Geburt nutzen, um jedes Detail ihrer Umgebung zu erfassen (Sancak Sert und Panieri, 2023). Simulatoren, die Seh-, Hör- und Tastsinn gleichzeitig stimulieren, können eine effektive Alternative zu herkömmlichen Lernmethoden darstellen (Caccianiga et al., 2021).

Insgesamt lässt sich der Zugang zu den virtuellen Simulatoren aktuell als beschränkt einzustufen. Trotz der vorhandenen Möglichkeiten bedarf es weiterer Studien zur Überprüfung einer möglichen Etablierung (Morscheid und Pouessel, 2023). Dies gilt sowohl für die chirurgische als auch die praxisnahe medizinische Ausbildung von Studierenden.

1.6 Ziele der Arbeit

Nicht nur die unter den Abschnitten 1.4 und 1.5 dargestellten Anwendungsmöglichkeiten, sondern auch der Einsatz in der akademischen Lehre erscheint vielversprechend. Die Implementierung einer neuen Technologie in der Klinik oder in der Lehre erfordert jedoch eine strukturierte Vorgehensweise. Zum einen darf der klinische Alltag nicht durch zusätzliche Belastungen beeinträchtigt werden, zum anderen sollte das vorhandene Potenzial der Technologie genutzt werden. Vor diesem Hintergrund stellt die systematische Evaluation des Einsatzes einen essenziellen Schritt im Einführungsprozess dar (Steuten et al., 2008).

Ziel der Arbeit ist die Analyse der Erwartungen der Studierenden an die MR-Technologie in der studentischen Ausbildung. Es soll evaluiert werden, welche Ansprüche an die

Technologie gestellt werden und ob sie diesen gerecht werden kann. Darüber hinaus soll untersucht werden, ob die Mixed Reality-Technologie zur Vermittlung von Kenntnissen geeignet ist.

2 Material und Methoden

2.1 Ablauf der Studie

Die Durchführung des Forschungsvorhabens gliederte sich in zwei Abschnitte. Zunächst wurden leitfadengestützte Experteninterviews zur qualitativen Erhebung relevanter Einschätzungen und Erfahrungen durchgeführt. Im Anschluss erfolgte eine Fragebogenstudie mit pre- und postinterventionellen Messzeitpunkten im Rahmen einer Mixed Reality-Anwendung. Eine Übersicht über den strukturierten Ablauf des Forschungsvorhabens bietet die nachfolgende Darstellung.

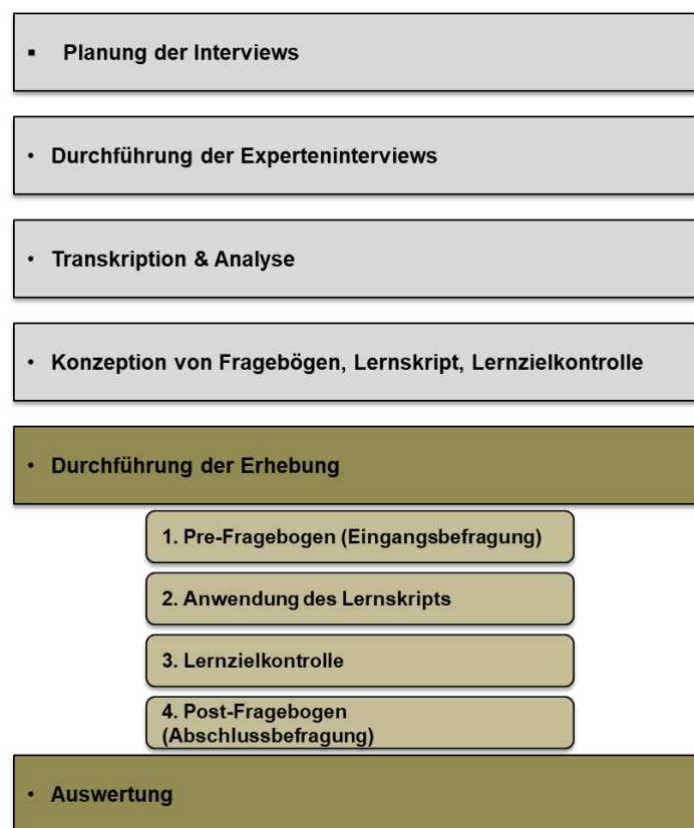


Abb. 8: Schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Studie (grau entspricht Phase 1/ oliv entspricht Phase 2)

2.2 Studiendesign

Da zum Zeitpunkt der Studiendurchführung keine validierten Messinstrumente zur Evaluation von Mixed Reality-Technologien vorlagen und der Kenntnisstand hinsichtlich ihres Einsatzes in der Lehre als begrenzt einzustufen war, wurde ein eigenes Erhebungsinstrument entwickelt. Aus diesem Grund wurde für den ersten Studienteil ein

explorativer Ansatz mit deskriptiver Auswertung gewählt. Dieser bietet den Vorteil, in einem bislang wenig untersuchten Forschungsfeld neue Hypothesen generieren zu können (Bortz & Döring, 2007). Im Rahmen des ersten Studienteils wurden leitfadengestützte Interviews durchgeführt, die als Grundlage für die Fragebogenentwicklung für die zweite Studienphase dienten.

Der zweite, randomisiert durchgeführte Teil der Untersuchung umfasste zwei standardisierte Fragebogenerhebungen, die jeweils vor und nach einer praktischen MR-Anwendungsaufgabe durchgeführt wurden. Diese Daten wurden sowohl deskriptiv als auch inferenzstatistisch ausgewertet. Zusätzlich erfolgte im Anschluss an die Anwendung eine Lernzielkontrolle.

2.3 Interviewanteil

2.3.1 Planung und Vorbereitung

Zur Planung der Studie wurde ein Interviewleitfaden für die Durchführung halbstrukturierter Interviews basierend auf dem SPSS-Prinzip nach Helfferich (2009) erstellt (Helfferich, 2009). Durch dieses Prinzip erhielten die Interviews eine notwendige inhaltliche Struktur, gleichzeitig erlaubte es eine individuelle Gestaltung des Gesprächsverlaufs sowie eine flexible Reaktion auf die Aussagen der Befragten (Helfferich, 2009). Zur Entwicklung des Interviewleitfadens wurden in mehreren Schritten relevante Fragen gesammelt, geprüft und in tabellarischer Form aufbereitet. Der Fokus lag auf Meinungen, Vorkenntnissen, Erwartungen und Vorbehalten gegenüber der MR-Technologie.

Zur Vermeidung von Suggestivfragen oder der Abfrage von Fakten wurden die Fragen auf ihre Eignung für qualitative Interviews überprüft, ungeeignete entfernt oder umformuliert. Die verbleibenden Fragen wurden themenbasiert sortiert. Durch Subsumierung konnten Leitfragen entwickelt werden, die eine Erzählaufforderung an die Befragten darstellen. Diese wurden in der ersten Spalte der Tabelle dokumentiert. Die zweite Spalte weicht bewusst vom eigentlichen SPSS-Prinzip ab. Nach Helfferich (2009) soll sie gezielte Nachfragen enthalten, die dann eingesetzt werden, wenn bestimmte Inhalte von den Teilnehmenden nicht von selbst angesprochen werden. Zur Vorbereitung der Interviews wurde eine inhaltliche Strukturierung erarbeitet, die mögliche Themenfelder umfasst, welche im Verlauf der Befragung zur Sprache kommen könnten. Zudem sollte durch diese Anpassung der subjektive Einfluss des Interviewenden auf die Beantwortung der Leitfragen minimiert werden. Die dritte Spalte beinhaltet

konkrete Nachfragen, die dazu beitragen sollten, detailliertere und präzisere Aussagen der Befragten zu erhalten. Zuletzt beinhaltet die vierte Spalte Aufrechterhaltungsfragen. Diese tragen zu einer guten Gesprächsführung bei und dienen dem Interviewer als vorformulierte Hilfen, um die Erzählung aufrechtzuerhalten und Redepausen zu überbrücken (Helfferich, 2009). Der vollständige Leitfragenkatalog ist dem Anhang zu entnehmen.

Die vier Leitfragen lauten:

- (1) Können Sie mir Situationen schildern, in denen Sie bisher mit Mixed Reality in Ihrem Alltag in Kontakt gekommen sind?
- (2) In welchem Zusammenhang ist Ihnen der Begriff „Mixed Reality“ im Alltag bereits untergekommen?
- (3) Welche Einsatzgebiete können Sie sich in Bezug auf Mixed Reality in der Medizin vorstellen?
- (4) Welche Vor- oder Nachteile sehen Sie beim Einsatz von Mixed Reality in der Medizin?

Die Anzahl der Interviews wurde unter Berücksichtigung der Umsetzbarkeit und der Ressourcen hinsichtlich der zu erwartenden Menge an gewonnenen Informationen auf 15 Teilnehmende festgelegt (Bortz und Döring, 2007). Die Dauer eines Interviews wurde mit 15–20 Minuten geplant.

Nach einer umfassenden, themenbezogenen Literaturrecherche zur Gesprächsführung wurden die theoretischen Kenntnisse in der Praxis durch Rollenspiele und Probeinterviews mithilfe von Medizinstudierenden sowie Mitarbeitenden der Klinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums Düsseldorf erprobt. Die daraus resultierenden Erkenntnisse wurden anschließend diskutiert bzw. analysiert, um dementsprechend Anpassungen an der Gesprächsführung vorzunehmen.

2.3.2 Sampling und Recruiting

Die Einschlusskriterien wurden wie folgt definiert: Die Teilnehmenden mussten entweder Medizin- bzw. Zahnmedizinstudierende im klinischen Abschnitt ihres Studiums oder Ärztinnen bzw. Ärzte des Universitätsklinikums Düsseldorf sein, die einer chirurgischen Abteilung angehören. Als Ausschlusskriterium galt das Vorliegen neurologischer Erkrankungen, beispielsweise einer Epilepsie. Zwar ist in der Literatur kein direkter

Zusammenhang zwischen der Nutzung von Mixed Reality-Technologie und epileptischen Anfällen beschrieben, jedoch sollten potenzielle Provokationen, ähnlich wie bei Videospielen, vermieden werden (Waltz et al., 1997).

Die Rekrutierung erfolgte über persönliche Kontakte der Betreuenden und des Autors sowie mittels Snowball-Sampling (Przyborski und Wohlrab-Sahr, 2013). Vor den Interviews wurden die Teilnehmenden gebeten, weitere potenzielle Personen über das Forschungsvorhaben zu informieren. Kombiniert wurde die Methode des Snowball-Samplings mit einer Strategie des Maximum-Variation-Sampling (Coyne, 1997). Folglich wurde während der Rekrutierung darauf geachtet, die Teilnehmenden möglichst vielfältig bezüglich ihres Ausbildungsstandes, Geschlechts und Alters auszuwählen. Ziel war es, ein breites Spektrum an Erwartungen, Vorbehalten, Meinungen und Vorkenntnissen zu erfassen. Auf Grundlage der definierten Ein- und Ausschlusskriterien ermöglichte das Snowball-Sampling den Zugang zu einer spezifischen Teilnehmergruppe, innerhalb derer eine möglichst hohe Variation sichergestellt wurde. Im Rahmen der Studie haben alle Teilnehmenden eine Datenschutz- und Einverständniserklärung unterzeichnet.

2.3.3 Interviewdurchführung

Die Interviews wurden im Zeitraum von Juli bis September 2022 durchgeführt. Der Doktorand führte alle Interviews entsprechend dem unter 2.3.1 beschriebenen Training selbstständig durch.

Der Ablauf der Interviews erfolgte nach folgendem Schema: Zunächst wurden die Befragten begrüßt. Die Befragten wurden darüber informiert, dass das anschließende Interview mithilfe eines digitalen Aufnahmegeräts aufgezeichnet und die Aufnahme unmittelbar nach der Transkription vernichtet wird. Es wurde den Befragten an dieser Stelle die Möglichkeit geboten Fragen zu stellen, bevor sie die Einwilligung unterschrieben. Danach wurden Kerndaten wie Datum, Ort, Geschlecht, Altersgruppe und Ausbildungsstand notiert. Während des Interviews wurden alle Leitfragen unter Berücksichtigung des unter 2.3.1 beschriebenen Leitfragenkatalogs gestellt. Zusätzlich erfolgten konkrete Nachfragen und Aufrechterhaltungsfragen gemäß der Planung (Helfferich, 2009). Es wurde darauf geachtet, dass den Befragten ausreichend Zeit für die Beantwortung der Fragen zur Verfügung stand. Nach Beendigung des Interviews wurde die Audioaufnahme für die anschließende Transkription gespeichert.

Nach der Durchführung der 15 Interviews wurde geprüft, ob die gewonnenen Informationen entsprechend dem geplanten Studiendesign für eine qualitative Inhaltsanalyse ausreichend sind bzw. eine geeignete Grundlage für den weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens bieten. Nach Auswertung der gewonnenen Informationen und verfügbaren Ressourcen wurde der erste Teil der Datenerhebung abgeschlossen. Dabei wurde sichergestellt, dass die Vielfalt an Meinungen, Vorkenntnissen, Erwartungen und Vorbehalten eine geeignete Grundlage für den weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens bildet.

2.3.4 Transkription

Vor der Transkription der Interviews wurden Transkriptionsregeln festgelegt. Diese dienten der Standardisierung des Vorgehens und bildeten eine geeignete Grundlage für die anschließende Analyse. Der Fokus der aufgestellten Regeln lag, in Anlehnung an Dresing und Pehl, stärker auf dem Inhalt der Aussagen und weniger auf para- oder nonverbalen Begleiterscheinungen während der Interviews (Dresing und Pehl, 2018). Die Transkripte wurden vom Autor jeweils im Anschluss an die Interviewaufzeichnungen erstellt. Nach Fertigstellung eines Transkripts wurde die entsprechende Tonaufnahme unwiderruflich gelöscht und das Transkript als anonymisierte Textdatei gespeichert.

2.3.5 Auswertung der qualitativen Inhaltsanalyse

Zur Auswertung der Transkripte im Rahmen der qualitativen Inhaltsanalyse wurde die Software MAXQDA (Version 24.2.0, VERBI GmbH, Berlin) verwendet. Um die erfassten Daten inhaltlich kompakt darzustellen und deren Bedeutung herauszuarbeiten, diente die zusammenfassende, induktive Kategorienbildung nach Mayring (2015) als methodische Grundlage der Analyse. Im Rahmen des gewählten explorativen, qualitativen Ansatzes ermöglichten die induktive Datenanalyse und die daraus abgeleitete Generierung von Codes eine verallgemeinernde Strukturierung des Materials, ohne Verzerrung durch die Perspektive des Forschenden (Mayring, 2015).

Orientiert am Ablaufmodell der zusammenfassenden Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) wurden folgende Schritte durchgeführt: Zunächst erfolgte die Bestimmung der Analyseeinheit (Mayring, 2015). Die Interviews wurden von Beginn an als

Auswertungseinheit betrachtet. Die kleinste zu codierende Einheit (Kodiereinheit), die zur Bildung einer Kategorie herangezogen werden konnte, bestand aus bedeutungstragenden Elementen; die größte Einheit (Kontexteinheit) entsprach einem Absatz.

Im Anschluss erfolgte die Kategorienbildung mithilfe induktiver Kodierung. Dazu wurden die Codes in einer einheitlichen Sprachebene und in grammatikalischer Kurzform formuliert. Nicht-inhaltstragende Bestandteile wurden gemäß einer Selektion ausgelassen. Diese Codes wurden zeitgleich generalisiert und auf ein gemeinsames Abstraktionsniveau angehoben. Auf diese Weise wurde das Material systematisch ausgewertet, wodurch ein geeignetes Codesystem entwickelt wurde. Für die Kodiereinheiten wurden entweder neue Codes erstellt oder sie wurden direkt subsumiert. Nicht wesentlich inhaltstragende Bestandteile wurden gestrichen, während Codes mit ähnlichem Inhalt, aber unterschiedlicher Formulierung, zusammengefasst wurden. Es erfolgte somit eine Selektion sowie eine Konstruktion bzw. Integration (Mayring, 2015). Nachdem 50% der Auswertungseinheiten kodiert wurden, fand eine Revision der Codes statt. Es wurde geprüft, ob sie dem Ziel der Analyse entsprachen und ob sowohl das Abstraktionsniveau sowie das Selektionskriterium angemessen waren. Nachdem alle Auswertungseinheiten kodiert wurden, wurde eine Rücküberprüfung der Codes am Ausgangsmaterial durchgeführt. Dadurch konnte geprüft werden, ob die Codes das Ausgangsmaterial repräsentieren (Mayring, 2015). Mithilfe der Smart-Coding Funktion der MAXQDA-Software konnten die überprüften Codes anschließend zu einem Kategoriensystem zusammengeführt werden. Dabei entstanden Über- und Unterkategorien. Diese wurden den Hauptkategorien zugeordnet, welche sich aus den vier Leitfragen ableiteten. Auf diese Weise entstand ein Kategoriensystem, das durch konkrete Textpassagen belegt ist. Abschließend erfolgte eine weitere Rücküberprüfung des Kategoriensystems am Ausgangsmaterial (Mayring, 2015). Die Auswertung der Interviews sowie das daraus erarbeitete Kategoriensystem sind im Ergebnisteil in Kapitel 3.1 dargestellt.

2.4 Fragebogenanteil

2.4.1 Konzeption der Fragebögen

Auf Basis der im ersten Studienteil gewonnenen Erkenntnisse, die in Kapitel 3.1 dargestellt sind, wurden ein Pre-Fragebogen (pre-Fb), der vor der Anwendung der MR-

Technologie auszufüllen war, sowie ein Post-Fragebogen (post-Fb), der am Ende des Forschungsvorhabens erhoben wurde, konzipiert.

Die Auswertung der Interviews erfolgte gemäß der in Kapitel 2.3.5 beschriebenen Analysemethode und wurde tabellarisch zusammengefasst. Die resultierende Tabelle umfasst sieben Hauptkategorien mit jeweils mehreren Unterkategorien. Diese lauten: Vorkenntnisse, Technik, Interaktion, Ausbildung, Visualisierung, Verständnis sowie Kritik. Die Kategorien spiegeln die zentralen Inhalte der Interviews wider und dienen als konzeptionelle Grundlage für die Entwicklung der Fragebogenitems.

Die inhaltliche Zuordnung der Items orientiert sich an den genannten Hauptkategorien, mit Ausnahme der Fragen, die der Erhebung demografischer Merkmale dienen. Die Formulierung der einzelnen Items erfolgte auf Basis der jeweiligen Unterkategorien sowie der ihnen zugeordneten, paraphrasierten Interviewpassagen und entspricht methodisch einer Umkehrung des in der qualitativen Inhaltsanalyse angewandten Kodierverfahrens. Pro Hauptkategorie wurden auf diese Weise drei bis fünf geschlossene Items abgeleitet.

Die Itemformulierung orientierte sich an den grundlegenden Empfehlungen zur Verständlichkeit, Informationsgewinn, Urteilsbildung und Antwortmöglichkeiten nach Lenzner et al. (2015) (Lenzner und Menold, 2015). Die Fragen wurden als geschlossene Items mit Antwortmöglichkeiten auf einer fünfstufigen Likert-Skala formuliert, die den Grad der Zustimmung der Teilnehmenden abbildet. Diese Skalenform wurde gewählt, da sie sich besonders zur Erfassung von Einstellungen eignet und damit den Zielen des Forschungsvorhabens entspricht (Bühner, 2021). Zwei Ausnahmen bilden die demografischen Items sowie die offenen Fragen am Ende des Post-Fragebogens.

Instruktionen und Hinweise zum Ausfüllen der Fragebögen wurden aufgrund der einfachen Struktur des Erhebungsinstruments lediglich im Rahmen des allgemeinen Ablaufs gegeben, welcher in Kapitel 2.4.7 beschrieben wird. Es handelte sich um schriftliche Papierfragebögen zur eigenständigen Bearbeitung durch die Teilnehmenden.

2.4.2 Entwicklung und Aufbau der Fragenbögen

Bei der Entwicklung der Pre- bzw. Post-Fragebögen wurde auf eine strukturelle Übereinstimmung geachtet, um eine sowohl deskriptive als auch inferenzstatistische Vergleichbarkeit der erhobenen Daten zu ermöglichen. Aus diesem Grund sind beide

Fragebögen in weiten Teilen identisch aufgebaut. Im Folgenden wird daher auf Abweichungen im Post-Fragebogen eingegangen. Eine finale Version des Fragebogens (Pre-FB) ist im Anhang abgebildet. Zu Beginn des Fragebogens war eine anonymisierte Teilnehmer-ID anzugeben, um eine eindeutige Zuordnung der Pre- und Post-Erhebungen zu ermöglichen. Anschließend wurden zwei demografische Items erhoben, die sich auf das Geschlecht der Teilnehmenden sowie den aktuellen Abschnitt ihres Studiums bezogen. Die fortlaufende Nummerierung der Items begann mit dem darauffolgenden inhaltlichen Item, sodass der Fragebogen insgesamt 28 nummerierte Items umfasst.

Im Post-Fragebogen wurden drei offene Fragen ergänzt, die mögliche Hindernisse im Umgang mit der MR-Technologie, während der Sitzung aufgetretene technische Probleme sowie wahrgenommene zusätzliche Vorteile der MR-Anwendung im Vergleich zu konventionellen Lernmethoden thematisieren. Durch die Beantwortung dieser Fragen im Freitextstil sollte den Teilnehmenden die Möglichkeit gegeben werden, sich zu Aspekten zu äußern, die entweder nicht durch die geschlossenen Items abgedeckt wurden oder im Vorfeld nicht konzipiert werden konnten. Diese drei Fragen wurden ebenfalls nicht in die Nummerierung mit aufgenommen.

Die Antwortmöglichkeiten der Items 1 bis 28 wurden im Format einer fünfstufigen Likert-Skala umgesetzt. Mit Ausnahme von Item 2 sind alle Skalen einheitlich von links nach rechts angeordnet und reichen von „Trifft voll zu“ bis „Trifft gar nicht zu“. Nachfolgend wird exemplarisch Item 1 dargestellt:

1. Ich nutze häufig digitale Medien.						
Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu

Abb. 9: Beispielhafter Aufbau eines Items (Item 1) aus dem Pre-Fragebogen

Item 2 „Wie häufig haben Sie Mixed Reality-Technik vor Beginn der Studie genutzt?“ ist hingegen nach Häufigkeiten sortiert. Die Items der Hauptkategorie „Kritik“ wurden bewusst negativ formuliert, um die Antworttendenz ‚trifft gar nicht zu‘ als inhaltlich gleichwertige Zustimmung zu positiv formulierten Aussagen interpretieren zu können. Auf diese Weise sollte eine Vergleichbarkeit der Antwortmuster gewährleistet werden.

Wie bereits beschrieben, erfolgte die Formulierung der Items auf Grundlage der sieben Hauptkategorien aus den Ergebnissen des ersten Studienteils. Eine systematische Gliederung der Items entsprechend den inhaltlichen Hauptkategorien erfolgte im

Fragebogen nicht. Tabelle 1 stellt die Zuordnung der Items des Pre-Fragebogens zu den jeweiligen Hauptkategorien dar. Die Items 12 und 17 blieben unberücksichtigt, da sie inhaltlich nicht übereinstimmten.

Kategorie	Zugeordnete Items
Vorkenntnisse	1, 2, 28
Ausbildung	3, 5, 16, 25
Visualisierung	4, 6, 8, 19
Verständnis	7, 9, 10
Interaktion	11, 14, 18, 20
Technik	15, 21, 22
Kritik	13, 23, 24, 26, 27

Tab. 1: Zuordnung der Items zu den thematischen Kategorien

2.4.3 Technologie & Hardware

In der vorliegenden Studie kam ein Mixed Reality-Head-Mounted-Display (MR-HMD) der Firma Magic Leap (Plantation, Florida, USA) zum Einsatz (Abb. 10). Das System besteht aus einem HMD mit integrierten Sensoren und Lautsprechern, einem externen Rechenelement mit integriertem Akku (sogenanntes Lightpack) sowie einem handgeführten Controller mit Touchpad und haptischem Feedback zur Steuerung der Benutzeroberfläche. Das HMD ist am Hinterkopf justierbar und ermöglicht eine individuelle Anpassung an die Kopfform. Das Lightpack kann an der Kleidung befestigt werden, während der Controller während der Anwendung in der Hand gehalten wird.

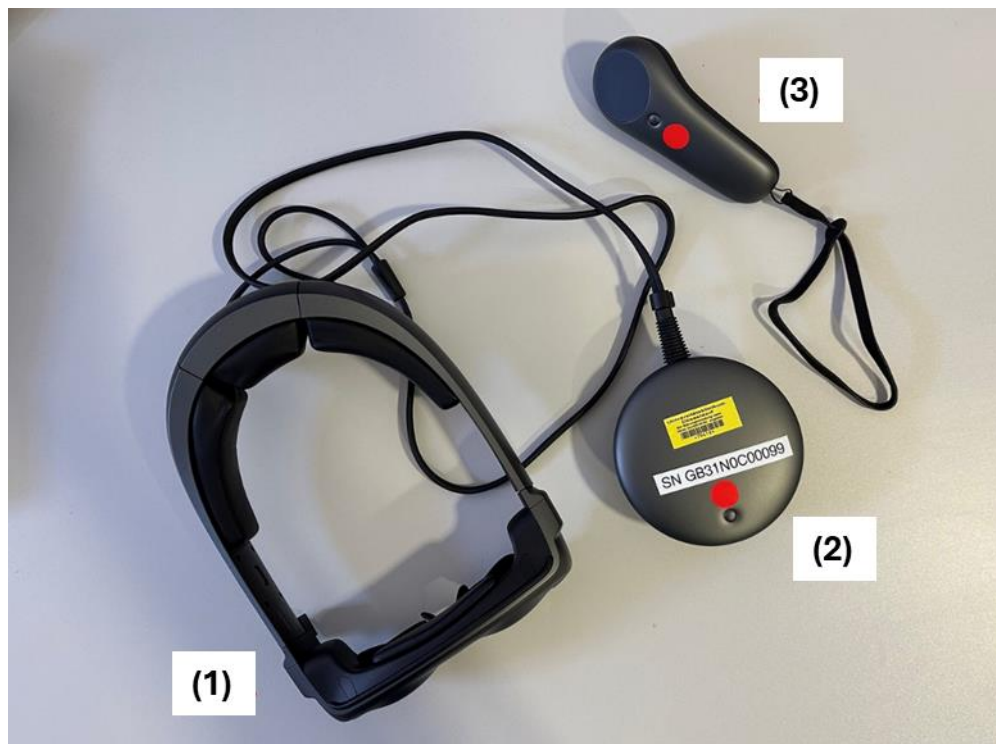


Abb. 10: Darstellung der in der Studie verwendeten Hardware: (1) Head-Mounted-Display (HMD), (2) Rechenelement mit integriertem Akku (Lightpack), (3) Handcontroller

Magic Leap (Plantation, Florida, USA) nutzt in seiner Brille ein halbtransparentes Lichtleiterdisplay mit mehreren Fokusebenen. Über dieses Display wird ein Bild generiert, vergrößert und auf das Auge ausgerichtet (Wilkat et al., 2023a). Mithilfe der Erfassung von Fixationspunkten sowie Bewegungen des Auges (Eye-Tracking) in der Brille kann ermittelt werden, ob der Nutzer nahe oder ferne Objekte betrachtet (Adhanom et al., 2023). Magic Leap One simuliert die Funktionsweise des menschlichen Sehapparats, indem es mit seinen beiden Fokalebene unterschiedliche Objekte, je nach Fokus, scharf oder unscharf darstellt. Insgesamt betrachtet der Nutzer die reale Welt durch mehrere Schichten des Displays, wobei jede Brennebene eine Schicht für die Grundfarben Rot, Blau und Gelb aufweist (Zari et al., 2023).

Über einen Infrarotprojektor wird die Umgebung registriert und eine Karte der Umgebung erstellt. Die Registrierung ist ein wichtiger Bestandteil der Mixed Reality und stellt sicher, dass virtuelle Objekte an ihrem Ort im Raum verbleiben und ihre Position bei Bewegungen des Nutzers nicht verändern (Viveiros, 2019).

Der Controller fungiert als bewegungssensitives Zeige- und Eingabegerät, das es dem Nutzer ermöglicht, mit virtuellen Objekten zu interagieren bzw. deren Position im Raum zu verändern (Wilkat et al., 2023b). Darüber hinaus erlaubt das System die Betrachtung

der Objekte aus unterschiedlichen Perspektiven, wodurch ein hoher Grad an Realitätsnähe und räumlichem Erleben erzeugt wird. (Wilkat et al., 2023a)

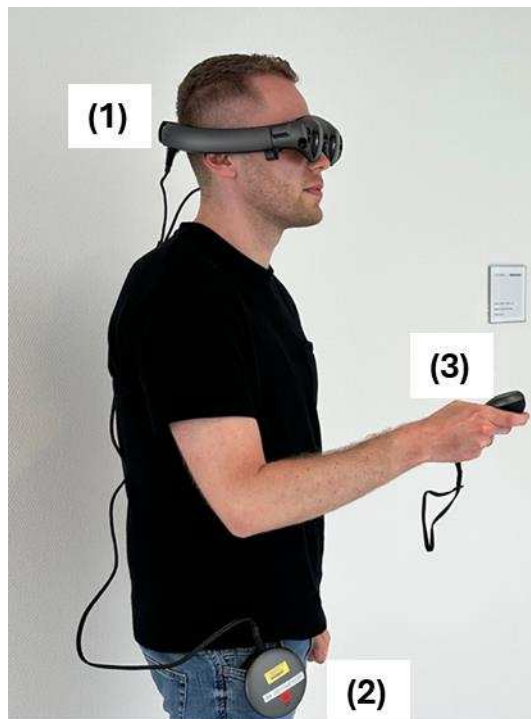


Abb. 11: Abbildung der im Forschungsvorhaben eingesetzten Hardware Magic Leap One im Anwendungskontext. Zu sehen sind: (1) Head-Mounted-Display, (2) Lightpack, (3) Handcontroller; getragen von einer Versuchsperson zur Demonstration des Systems

Der Anwender betrachtet über das Head-Mounted-Display eine holografische Darstellung, während das HMD auf dem Kopf getragen, das Lightpack an der Kleidung befestigt und der Controller in der rechten Hand gehalten wird (Abb. 11). Gleichzeitig bleibt die Interaktion mit der physischen Umgebung sowie mit anwesenden Personen möglich.

2.4.4 Didaktische Gestaltung der Mixed Reality-Anwendung und der Lernskripts

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde eine Mixed Reality-Applikation in Form eines interaktiven 3D-Puzzles mit didaktisch integrierten Annotationen entwickelt (Abb. 12). Ziel dieser Anwendung war es, eine lernorientierte Umgebung zu schaffen, die insbesondere das Verständnis räumlich-anatomischer Strukturen unterstützt. Die technische Umsetzung erfolgte unter Verwendung des Mixed Reality Viewers der Firma Brainlab (*Elements Viewer*, Version 5.3; Brainlab, München, Deutschland). Die Entwicklung der Software erfolgte durch Mitarbeiter der Firma Brainlab als Teil der

wissenschaftlichen Arbeitsgruppe und wurde im Rahmen von Feedbackprozesse angepasst und optimiert. Besonderes Augenmerk lag hierbei auf der intuitiven Bedienbarkeit, der klaren und funktionalen Visualisierung der Inhalte sowie der didaktischen Integration für den Einsatz in der medizinischen Lehre.

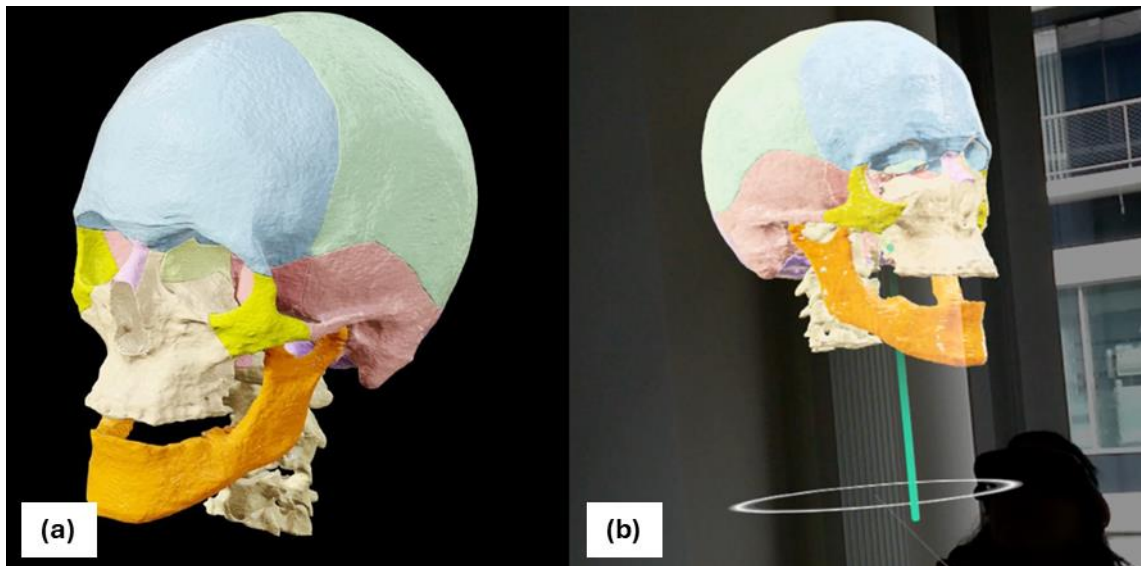


Abb. 12: (a) Bildschirmfoto aus der MR-Anwendung: Grafische Darstellung des menschlichen Schädels mit farblicher Markierung der einzelnen Knochen auf einem PC-Bildschirm (b) Sicht durch das Head-Mounted-Display eines Nutzers in einem realen Raum: Visualisierung des farblich markierten Schädels sowie eines grünen Lichtstrahls zur Objektsteuerung ausgehend vom Handcontroller

Zur didaktischen Visualisierung wurde die verschiedenen Knochen des Viszero- und Neurokraniums farblich markiert. Mithilfe des Controllers kann das Hologramm als vollständiges 3D-Objekt verschoben und skaliert werden. Die Möglichkeit zur Betrachtung aus verschiedenen Blickwinkeln sowie zum Erkunden der inneren Strukturen unterstützt eine vertiefte räumliche Vorstellung. Es besteht zudem die Möglichkeit, das virtuelle Schädelmodell in seine anatomischen Einzelkomponenten zu zerlegen (Abb. 13). Diese Funktion erlaubt eine isolierte Darstellung der zehn Schädelknochen, welche räumlich voneinander getrennt im realen Raum visualisiert werden. Durch die segmentierte Ansicht kann der Anwender sich strukturiert mit den einzelnen Knochen und ihrer topographischen Lagebeziehung auseinandersetzen. Der Nutzer kann die separierten Elemente individuell bewegen, um ein vertieftes Verständnis der anatomischen Strukturen und deren Zusammensetzung zu erlangen.



Abb. 13: Ansicht der Mixed Reality-Anwendung aus der Perspektive eines Anwenders mittels Head-Mounted-Display. Dargestellt ist das virtuelle Schädelmodell in zerlegter Form, bestehend aus farblich markierten Einzelknochen, visualisiert im realen Raum

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, der Darstellung zusätzliche virtuelle Informationsfelder mit annotierten Inhalten hinzuzufügen (Abb. 14). Die Farbgebung dieser Informationskästen ist an die jeweilige Knochenfarbe angepasst. Die Annotationen können durch die Nutzerinnen und Nutzer mittels Controller beliebig ein- und ausgeblendet werden und enthalten stichpunktartige, anatomisch relevante Informationen enthält. Die Teilnehmenden wurden vor Beginn der Anwendung angewiesen, sich die Inhalte der anatomischen Annotationen im Rahmen der visuellen Darstellung einzuprägen.

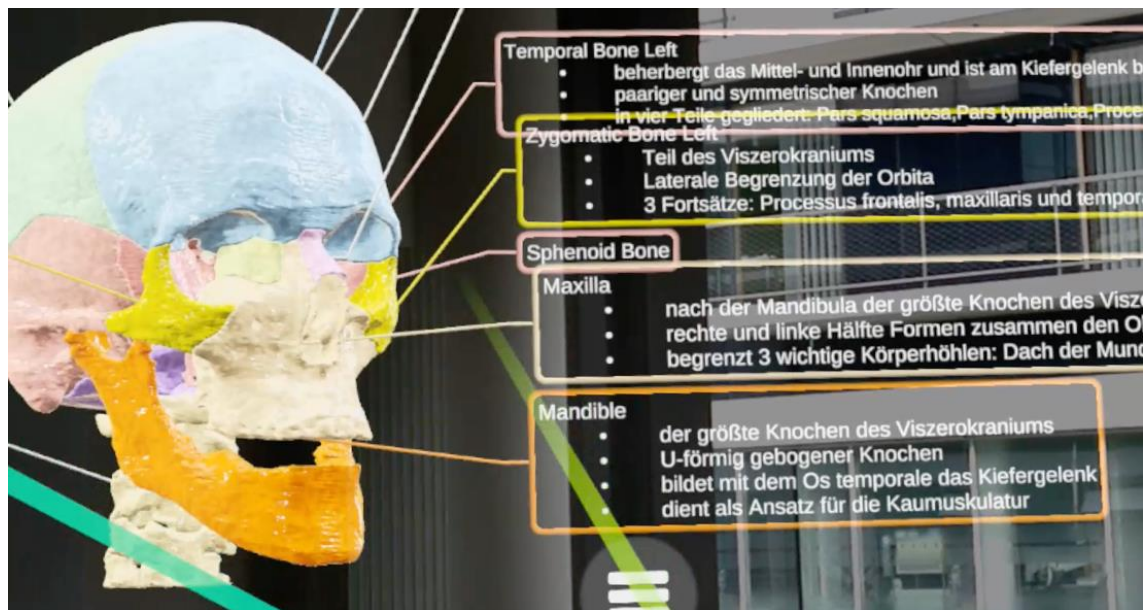


Abb. 14: Ansicht über ein Head-Mounted-Display mit Visualisierung des farblich segmentierten Schädelmodells im realen Raum. Ein grüner Lichtstrahl vom Handcontroller dient der Objektauswahl. Rechtsseitig sind farblich korrespondierende Annotationen und anatomischen Informationen dargestellt

Die Studienteilnehmenden beginnen die Interaktion mit der Anwendung in dieser zerlegten Ausgangsform (Abb. 13). Ziel der Aufgabe ist das Zusammensetzen der Schädelknochen zu einer vollständigen anatomischen Struktur. Eine korrekte Verbindung zweier Knochen wird dabei durch ein haptisches Feedback über den Controller sowie ein visuelles Einrasten signalisiert. Sowohl die dreidimensionale Bewegung einzelner Knochen als auch die Bewegung des bereits zusammengesetzten Objekts sind jederzeit möglich. Die Nutzerinnen und Nutzer können sich frei um das Modell herum sowie innerhalb der Struktur bewegen. Der Abschluss der Aufgabe erfolgt, sobald die korrekte anatomische Gesamtdarstellung erreicht wurde (Abb. 12a).

Parallel zur MR-Anwendung wurde ein Lernskript erstellt (Abb. 15), das die identischen Informationen enthält. Das Skript umfasst vier farbige, zweidimensionale Darstellungen des menschlichen Schädels auf DIN-A4-Format in ventraler und lateraler Ansicht sowie in teilzerlegter und vollständig zerlegter Form. Jede Ansicht liegt in zwei Versionen vor, ohne und mit Annotationen, sodass das Skript insgesamt acht Seiten umfasst. Die Annotationen sind analog zur MR-Anwendung mit farblich markierten Pfeilen den jeweiligen Knochen zugeordnet.

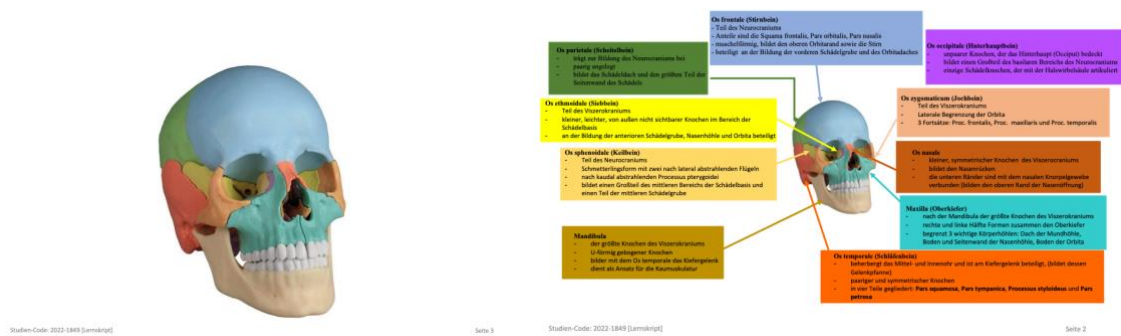


Abb. 15: Darstellung eines Teils des Lernskripts. Darstellung des menschlichen Schädels angelehnt an das Schädel-Modell des Herstellers Erler-Zimmer GmbH (Lauf, Deutschland) (Erler-Zimmer, 2025). Die Schädelknochen sind farblich markiert und im rechten Teil mit Annotationen mit anatomischen Informationen dargestellt.

2.4.5 Lernzielkontrolle

Nach Abschluss der MR-Anwendung bzw. der Bearbeitung des Lernskripts wurde eine Lernzielkontrolle durchgeführt. Ziel war die Überprüfung des erworbenen Wissens in Bezug auf die Annotationen in der MR-Anwendung bzw. im Lernskript. Die Lernzielkontrolle umfasst zehn Multiple-Choice-Items zu den zehn im virtuellen Modell bzw. im Lernskript dargestellten Schädelknochen. Jede Frage enthält fünf Aussagen (a–e) sowie vier oder fünf Antwortoptionen. Pro Frage ist genau eine Antwort korrekt, sodass jede Frage eindeutig als richtig oder falsch beantwortet werden kann. Die Aussagen wurden ausschließlich auf Grundlage, der durch die Annotationen bzw. das Lernskript bereitgestellten Informationen formuliert. Weiterführendes Wissen wurde nicht abgeprüft. Die Entwicklung der Lernzielkontrolle erfolgte in Anlehnung an die Regeln zur Erstellung von Multiple-Choice-Fragen nach Schüttpelz-Brauns und Schubert (Schüttpelz-Brauns und Schubert, 2008).

2.4.6 Stichprobe und Rekrutierung

Die erforderliche Fallzahl für ein statistisch signifikantes Gesamtmodell wurde mithilfe der Software G*Power berechnet, um die benötigte Teilnehmerzahl vor Beginn der Datenerhebung zu bestimmen (Faul et al., 2009). Die Rekrutierung der Teilnehmenden für den zweiten Studienabschnitt erfolgte auf dieselbe Weise wie im ersten Studienabschnitt.

2.4.7 Durchführung und Ablauf der Fragenbogenstudie

Im zweiten Studienteil erfolgte zunächst eine Randomisierung der Teilnehmenden durch Zuordnung zu zwei Gruppen: einer Interventionsgruppe, welche die MR-Anwendung absolvierte (MR-Gruppe), und einer Kontrollgruppe, die das Lernskript nutzte. Die Kontrollgruppe erhielt nach Abschluss der Lernzielkontrolle die MR-Anwendung zu testen.

Vor der Durchführung wurde ein Ablaufprotokoll für den strukturierten Ablauf des zweiten Studienteils erstellt. Das aus zehn Schritten bestehende Protokoll beginnt mit einer persönlichen Begrüßung der Teilnehmenden, der Aushändigung der Teilnehmerinformation (inklusive Datenschutzerklärung und Einwilligungserklärung) sowie der Erläuterung des Studienablaufs. Anschließend wurden offene Fragen geklärt. Es folgte eine kurze Erläuterung zur MR-Technologie. Um eine eindeutige Zuordnung der Pre- und Postfragebögen zu gewährleisten, wurde im nächsten Schritt eine individuelle Identifikationsnummer vergeben, die ausschließlich dem jeweiligen Probanden bekannt war. Anschließend wurde der Pre-Fragebogen bearbeitet.

Nach vollständiger Bearbeitung des Pre-Fragebogens erfolgte, abhängig von der Gruppenzugehörigkeit, entweder die Durchführung der MR-Anwendung oder die Bearbeitung des Lernskripts. Im Anschluss absolvieren alle Teilnehmenden die Lernzielkontrolle, für deren Bearbeitung eine Zeit von zehn Minuten vorgesehen war. Direkt im Anschluss füllte die MR-Gruppe den Post-Fragebogen aus. Die Kontrollgruppe erhielt zunächst die Möglichkeit, die MR-Anwendung kennenzulernen, bevor auch hier der Post-Fragebogen bearbeitet wurde. Abschließend erfolgten eine Danksagung sowie die Verabschiedung der Teilnehmenden. Der gesamte Zeitaufwand pro Person betrug etwa 60 Minuten. Die zeitlichen Vorgaben für die einzelnen Schritte wurden vorab tabellarisch in einem Ablaufprotokoll geplant. Sowohl die Lernzielkontrolle als auch die Fragebögen wurden in Papierform ausgehändigt.

Die MR-Anwendung, das Lernskript, die Fragebögen, die Lernzielkontrolle sowie das methodische Vorgehen wurden vorab einem Pretest unterzogen, um die Anwendbarkeit bei den Teilnehmenden zu überprüfen (Weiß, 2010). Nach der Durchführung von drei Pretests wurden die zeitlichen Abläufe im Ablaufprotokoll final festgelegt. Im Anschluss erfolgte eine inhaltliche Validierung der MR-Anwendung, des Lernskripts, der Fragebögen sowie der Lernzielkontrolle.

Nach Abschluss der Pretests im April 2023 wurde der zweite Studienteil im Zeitraum von Mai bis Dezember 2023 in geeigneten Räumlichkeiten des Uniklinikums Düsseldorf durchgeführt. Die Einweisung in die MR-Anwendung erfolgte durch Mitarbeiter der Arbeitsgruppe. Die Durchführung erfolgte in mehreren Durchläufen mit Kleingruppen. Die Teilnehmenden der MR-Gruppe und der Kontrollgruppe wurden dabei räumlich und zeitlich getrennt voneinander betreut. Mit Erreichen der Zielgröße von jeweils 23 Teilnehmenden pro Gruppe wurde die Datenerhebung im Rahmen des zweiten Studienteils abgeschlossen.

2.4.8 Auswertung der Fragebögen bzw. Lernzielkontrolle

Die im zweiten Studienabschnitt erhobenen Daten aus den Fragebögen sowie der Lernzielkontrolle wurden manuell digitalisiert und in eine Datenbank übertragen. Zur Qualitätssicherung erfolgte eine interne Validierung durch doppelte Dateneingabe mit anschließendem Abgleich. Die Auswertung umfasste sowohl deskriptive als auch inferenzstatistische Verfahren. Für die Datenerfassung und Analyse wurde die Software IBM SPSS Statistics, Version 29.0.1.0 (Armonk, New York, USA), verwendet. Die Auswertung der Fragebögen orientierte sich an den im ersten Studienteil definierten Kategorien, auf denen die Items basierten. Die Items wurden zur Analyse entsprechend zusammengefasst (Tab. 1). Die Items 12 und 17 wurden von der Kategorienbildung ausgeschlossen, da deren Inhalte in den Pre- und Post-Fragebögen nicht identisch waren.

Die drei offenen Fragen am Ende des Post-Fragebogens wurden in Anlehnung an die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2015) ausgewertet (Mayring, 2015). Hierbei erfolgte eine induktive, verallgemeinernde Kategorienbildung analog zur Auswertung der Interviews im ersten Studienteil.

Zur Prüfung der Normalverteilung wurde ein Kolmogorow-Smirnow-Test durchgeführt. Es wurden Hypothesen formuliert, um Meinungsunterschiede bzw. -veränderungen zwischen den Gruppen prüfen. Die Nullhypothese (H_0) lautete: Es besteht kein Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Die Alternativhypothese (H_1): Es besteht ein Unterschied zwischen den beiden Gruppen. Für den Gruppenvergleich wurde der Mann-Whitney-U-Test herangezogen. Zur Analyse intraindividuelle Veränderungen zwischen Pre- und Post-Fragebögen kam der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Test zum Einsatz. Die Auswertung der Lernzielkontrolle erfolgte ebenfalls mit dem Mann-Whitney-U-Test. Das Signifikanzniveau wurde auf $\alpha = 0,05$ festgelegt. Den Antworten der Likert-Skala wurden

numerische Werte von 1 bis 5 zugewiesen, um eine statistische Auswertung zu ermöglichen. Zur Berechnung individueller Meinungsveränderungen zwischen Pre- und Post-Befragung wurden die Gesamtwerte der Likert-Skalen subtrahiert. Die Lernzielkontrolle wurde in Analogie zur Fragebogenauswertung sowohl deskriptiv als auch inferenzstatistisch analysiert.

2.5 Ethikvotum

Nach der Beurteilung durch die Ethikkommission der medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, bestehen keine ethischen oder rechtlichen Bedenken in Bezug auf die Durchführung der Studie. Das positive Votum wurde am 23.05.2022 unter der Studien-Nummer 2022-1849 bekanntgegeben.

Diese Arbeit wurde vom Ministerium für Wirtschaft, Innovation, Digitalisierung und Energie des Landes Nordrhein-Westfalen (MWIDE NRW) sowie vom Kompetenzzentrum 5G.NRW unter der Fördernummer 005-01903-0047 gefördert.

3 Ergebnisse

3.1 Qualitative Analyse der Interviewergebnisse

Insgesamt wurden 15 Interviews durchgeführt und nach dem in Kapitel 2 beschriebenen Vorgehen ausgewertet. Die sieben männlichen und acht weiblichen Teilnehmenden setzten sich aus zehn Studierenden der Human- bzw. Zahnmedizin, drei Assistenzärzten, einem Fach- sowie einem Oberarzt der Abteilung für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums Düsseldorf zusammen. Die Ergebnisse der qualitativen Analyse wurden in Tabelle 2 dargestellt. Anders als bei der Codierungsrichtung lässt sich diese Darstellung von den Haupt- zu den Unterkategorien lesen. Es konnten sieben Hauptkategorien gebildet werden: „Vorkenntnisse“, „Ausbildung“, „Visualisierung“, „Verständnis“, „Interaktion“, „Technik“ und „Kritik“.

In der Hauptkategorie „Vorkenntnisse“ wurden Aussagen zum vorhandenen Wissen, zu bestehenden Kompetenzen sowie zum thematischen Verständnis erfasst. Ein Teil der Befragten gab an eine grundsätzliche Vorstellung von MR zu haben und konnte diese zur VR abgrenzen. Die Kenntnisse im Bereich der AR fielen hingegen etwas geringer aus, auch wenn einzelne Personen bereits Berührungspunkte oder erste Erfahrungen beschrieben.

Die Hauptkategorie „Technik“ gliederte sich in die Unterkategorien „Technologische Erwartungen“ und „Allgemein“. Die Befragten erwarteten vor allem eine einfache Bedienbarkeit, eine gute Funktionsfähigkeit sowie eine unkomplizierte Verfügbarkeit von Informationen. Allgemein wurde die MR-Technologie als interessant, innovativ, fortschrittlich und qualitätsfördernd beschrieben. Ethisch und moralisch galt sie nach Einschätzung der Teilnehmenden als unbedenklich. Die Frage, ob eine Einführung am Universitätsklinikum Düsseldorf möglich sei, wurde überwiegend positiv beantwortet.

In der dritten Hauptkategorie „Interaktion“ wurde neben der Interaktion mit Hologrammen auch die Möglichkeit des Austauschs mit anderen Nutzenden betont. Die Bedeutung der interdisziplinären Zusammenarbeit wurde hervorgehoben. Insbesondere die Interaktion zwischen Studierenden und Lehrenden wurde als hilfreich für den Wissensaustausch und die Gruppenarbeit angesehen.

Die Hauptkategorie „Ausbildung“ umfasste die Vorteile des Einsatzes von MR-Technologie in der Ausbildung sowie deren Anwendungsmöglichkeiten in der Lehre. Als positiv wurde die Möglichkeit unbegrenzter Wiederholungen in der digitalen Lehre

genannt. Mehrfach wurde erwähnt, dass der Einsatz der Technologie das Verständnis des Lernstoffs verbessert. Neben einer Optimierung der Ausbildung wurde auch eine höhere Effizienz im Lernprozess betont. Die Lehre wurde insgesamt als zentrales Einsatzgebiet der MR-Technologie identifiziert.

Die Hauptkategorie „Visualisierung“ bezog sich unter anderem auf Alltagserfahrungen der Befragten mit MR-Technologie, die häufig auf Medienberichten basierten. Darüber hinaus wurden medizinische Anwendungen im beruflichen Kontext sowie der Einsatz einer Anatomie-App zu Lernzwecken angesprochen. Im Bereich VR und AR berichteten die Befragten vor allem von Erfahrungen mit Computerspielen oder Smartphone-Apps. Digitale Visualisierungen wurden wiederholt als neue Möglichkeit beschrieben, um durch realistische Darstellungen zusätzliche Blickwinkel zu gewinnen.

Im Rahmen der Hauptkategorie „Verständnis“ ließen sich zunächst allgemeine Anwendungsbereiche benennen. Teilweise wurde der Einsatz von MR-Computern für das Speichern und Abrufen von Patientendaten genannt, ebenso wie Nutzungsmöglichkeiten in Forschung und Gesundheitswesen allgemein. Besonders hervorgehoben wurde außerdem die Rolle der MR-Technologie in der chirurgischen Ausbildung, die als ein zentrales Anwendungsfeld betrachtet wurde. Neben einem präoperativen Einsatz wurde auch der intraoperative Einsatz als realistisch angesehen. Laut den Befragten ergeben sich durch den Einsatz in der Chirurgie potenzielle Vorteile für die Patientenbehandlung. Genannt wurden unter anderem eine verbesserte Operationsqualität, präzisere Planungen, Zeitersparnisse sowie Verbesserungen bei Sicherheit und Dokumentation.

Die abschließende Hauptkategorie befasste sich mit der „Kritik“ an der MR-Technologie. Kritisch betrachtet wurden unter anderem die Anforderungen an die Einführung, die Einweisung des Fachpersonals sowie die Bereitstellung ausreichender finanzieller Mittel. Außerdem wurden verschiedene nutzerbezogene Vorbehalte geäußert. Genannt wurden mögliche körperliche Reaktionen wie Schwindel oder Übelkeit. Auch fehlende technische Kenntnisse, Verständnisprobleme und Vorurteile, insbesondere bei älteren Generationen, kamen zur Sprache. Zu den Einführungsbarrieren zählten laut Befragten zudem bürokratische Hürden und hohe Anforderungen an die digitale Infrastruktur. Auch hohe Kosten wurden mehrfach kritisch angesprochen. Die MR-Technologie wurde außerdem als zeitaufwendig und störanfällig beschrieben, mit Verweis auf mögliche technische Fehler im Einsatz. Das Thema Datenschutz wurde zwar mehrfach genannt, jedoch häufig relativiert, da es nicht als spezifisches Problem von MR wahrgenommen wurde.

Folgende Ergebnisse konnten aus den Interviews zusammengetragen werden: Die Befragten verfügten über erste Erfahrungen mit MR-, AR- und VR-Technologien und zeigten insgesamt eine hohe Erwartungshaltung gegenüber dem Einsatz von MR. Die Möglichkeiten zur Interaktion und realitätsnahen Visualisierung wurden besonders als Vorteile für die Lehre und die chirurgische Ausbildung hervorgehoben. Insgesamt wurde die Technologie als fortschrittlich und sinnvoll in verschiedenen Anwendungsfeldern bewertet. Gleichzeitig wurden Hindernisse angesprochen, etwa hohe Kosten, der Aufwand für die Einführung, technische Voraussetzungen und mögliche Vorurteile, vor allem bei älteren Nutzenden.

Hauptkategorie	Überkategorie	Unterkategorie
Vorkenntnisse	Unterschiedliche Technologien	• Keine Vorkenntnisse vorhanden • Konkrete Vorstellung von MR • Verständnis der Unterschiede VR /AR • Konkrete Vorstellung von VR • Konkrete Vorstellung von AR
Technik	Technologische Erwartungen	• Fehlerfreie Funktion • Einfache Bedienbarkeit • Verfügbarkeit von Informationen
	Allgemeine Anmerkungen	• Klinische Umsetzung • Technologischer Fortschritt • Hoher Innovationswert • Neue Anwendungsmöglichkeiten • Potenzial zur Qualitätssteigerung • Nutzenüberwiegt Hürden • Ethische/Moralische Unbedenklichkeit • Zukunftsorientierung
Interaktion	Zusammenarbeit	• Studierende, Lehrende, Fachärzte • Zusammenarbeit generell -Interdisziplinäre Zusammenarbeit
	Diagnostik und Therapie Vorbereitung auf Behandlungen Verschafft Vorteile Patientenaufklärung	
Verständnis	Vorteile für Ausbildung	• Wiederholbarkeit • Verständniserleichterung • Digitale Lehre • Effizientes Lernen • Lernunterstützung • Verbesserung der Ausbildung • Vermittlung von Wissen
	Lehre	• Anatomielehre • Behandlungssimulation • Patientensimulation
Visualisierung	Realistische Darstellung	
	Erweiterung des Blickwinkels	
	Erfahrungen im Alltag	
	Medizinische Anwendung	• Medienbeiträge • OP-Simulation • Berufliche Situation
	Computerspiele	• VR-Simulator (-Spiel) • AR-Spiel
	Studium	• AR beim Lernen • Anatomie-App • Anatomie-Projekt • 3D-Rekonstruktionen
	Navigation	• Auto • Smartphone-App • Rekonstruktion historischer Gebäude • Rekonstruktive Chirurgie
	allg. Visualisierungsmöglichkeit	

Ausbildung	Einsatzmöglichkeiten	• Datenspeicher • Forschung • Gesamte Medizin • Krankenhausalltag
	Chirurgische Ausbildung Patientenbehandlung	• Pathologie • 3D-Drucker • Endodontische Behandlung • OP-Durchführung • Intraoperative Nutzung
	Vorteile bei der Patientenbehandlung	• Exakteres Arbeiten (weniger Fehler) • Verbesserung OP-Qualität • Präzisere Planung • Sichere Behandlung • Zeitersparnis • Zeitersparnis, Therapie planen
Kritik	Anforderung	• Finanzielle Unterstützung • Einweisung
	Benutzerabhängige Vorbehalte	• Fehlende zeitliche Vorstellung • Eingewöhnungszeit • Empfindliche Reaktionen • Einsatz fachspezifisch abzuwägen • Mangelnde Fähigkeiten und • Mangelnde technische Kenntnisse • Verständnisprobleme • Schwierigkeiten und Vorbehalte
	Einführungsbarrieren	• Kein Interesse • Hoher Aufwand • Bürokratische Hindernisse • Mangelnde digitale Infrastruktur • Fachpersonal nötig • Hohe Kosten • Nicht am UKD umsetzbar • Techniksensitiv und zeitintensiv
	Systemkritik	• Zeitintensive Einführung • Autarke Entscheidungen der Technik • Mangelnde Datensicherheit • Limitationen der Simulation • Nicht ausgereift, • Technische Fehler

Tab. 2: Hierarchisches Kategoriensystem der Interviewergebnisse, gegliedert in Haupt-, Über-, Unter- und zweite Unterkategorien (kursiv eingerückt)

3.2 Studienpopulation

Die Anzahl der Studienteilnehmenden umfasste 46 Personen, die randomisiert in zwei gleich große Gruppen aufgeteilt wurden: eine Versuchsgruppe (MR-Gruppe) mit MR-Anwendung sowie die Kontrollgruppe. In beiden Gruppen waren mehr Frauen als Männer vertreten. Die MR-Gruppe bestand aus 18 Frauen (78,2 %) und 5 Männern (21,8 %), die Kontrollgruppe aus 15 Frauen (65,2 %) und 8 Männern (34,8 %). Damit war die Geschlechterverteilung innerhalb der Gruppen vergleichbar. Insgesamt lag der Anteil der weiblichen Teilnehmenden bei 71,7 % (n = 33), der männlichen bei 28,3 % (n = 13).

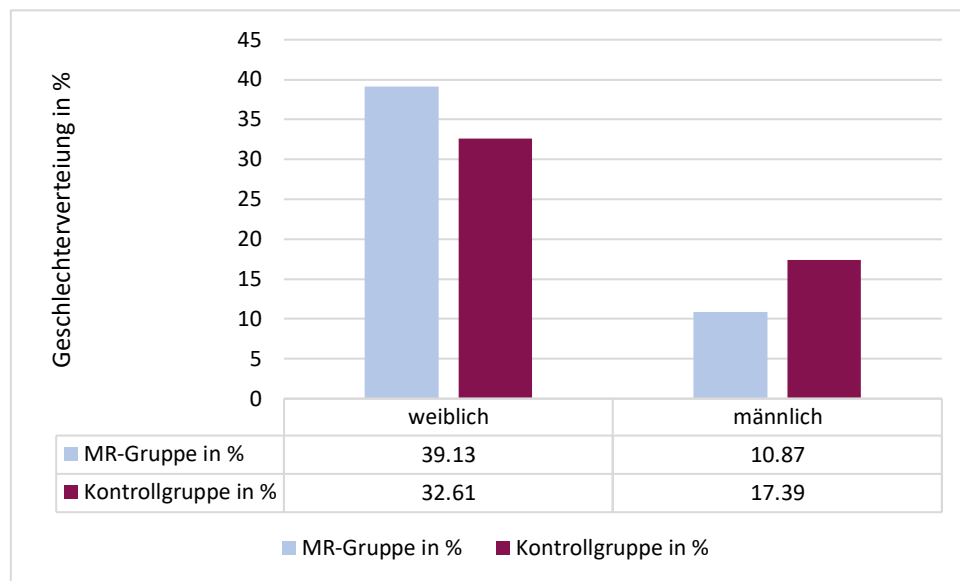


Abb. 16: Prozentuale Geschlechterverteilung bezogen auf die Gesamtstudienteilnehmer in der MR-Gruppe bzw. Kontrollgruppe

Die Teilnehmenden wurden basierend auf ihrem Studienabschnitt in vier Subgruppen unterteilt: Subgruppe 1 umfasste Studierende des 6. und 7. Semesters, Subgruppe 2 Studierende des 8. Semesters, Subgruppe 3 Studierende des 9. Semesters sowie Subgruppe 4 mit Studierenden ab dem 10. Semesters. Mehr als die Hälfte der Teilnehmenden (54,35%) gehörte der Subgruppe 4 an, etwa ein Viertel (23,91%) fiel auf Subgruppe 1, die restlichen Probanden verteilten sich auf Subgruppe 2 (10,43 %) und Subgruppe 3 (11,30 %). Die genaue Verteilung wird in Tabelle 3 dargestellt.

Subgruppe	Anteil der Teilnehmenden	Verteilung in %	
		MR-Anwendung	Kontrollgruppe
Subgruppe 1 (6./7. Semester)	23,91%	6,52 %	17,39 %
Subgruppe 2 (8. Semester)	10,43 %	6,52 %	3,91 %
Subgruppe 3 (9. Semester)	11,30 %	5,70 %	5,61 %
Subgruppe 4 (10. Semester +)	54,35%	32,61%	21,74 %

Tab. 3: Verteilung der Teilnehmenden innerhalb der Subgruppen in MR- und Kontrollgruppe (in %). Die Angaben dienen der deskriptiven Charakterisierung der Stichprobe

3.3 Fragebogenauswertung

Für die quantitative Auswertung der Fragebögen wurden drei Aspekte untersucht: Zum einen wurde geprüft, ob sich die Einschätzungen der MR- und der Kontrollgruppe sowohl im Pre- als auch im Post-Fragebogen signifikant voneinander unterschieden. Zum anderen wurde analysiert, ob sich innerhalb der jeweiligen Gruppen die Anzahl positiver und negativer Meinungsveränderungen zwischen den beiden Befragungszeitpunkten verändert hat. Darüber hinaus wurde untersucht, in welchem Ausmaß sich die Meinungen der Teilnehmenden im Verlauf zwischen Pre- und Post-Befragung verschoben haben.

3.3.1 Ergebnisse der Pre- und Post-Fragebögen im Gruppenvergleich

Zur Überprüfung möglicher Unterschiede zwischen den Gruppen wurden die Pre- und Post-Fragebögen analysiert. Ziel war es, die Likert-Skalenwerte zwischen der MR-Gruppe und der Kontrollgruppe zu den beiden Befragungszeitpunkten zu vergleichen.

Bei der Auswertung in den 5 Hauptkategorien „Vorkenntnisse“, „Ausbildung“, „Visualisierung“, „Verständnis“ und „Interaktion“ zeigten sich zwischen der Versuchs- und der Kontrollgruppe in keiner dieser fünf Kategorien statistisch signifikante Unterschiede, weder im Pre- noch im Post-Fragebogen. In allen Fällen lagen die p-Werte der durchgeführten Mann-Whitney-U-Tests oberhalb des Signifikanzniveaus von 0,05, was darauf hindeutet, dass sich die Ergebnisse der beiden Gruppen nicht signifikant voneinander unterschieden.

In den Hauptkategorien „Technik“ und „Kritik“ wichen die Ergebnisse der beiden Gruppen jedoch voneinander ab. Die Analyse der Post-Fragebögen in der Hauptkategorie „Technik“ sowie der Pre-Fragebogen in der Hauptkategorie „Technik“ zeigte einen signifikanten Gruppenunterschied. Dies deutet auf unterschiedliche Einschätzungen beider Gruppen in diesen beiden Bereichen hin (Tab. 4).

Ebenfalls ergaben sich keine signifikanten Unterschiede in den isoliert betrachteten Items 12 und 17 zwischen den Gruppen im Pre-Fragebogen bzw. Post-Fragebogen (Tab. 5).

Hauptkategorie	Gruppe	Q1	Q2	Q3	Teststatistik (U / Z / p)
Vorkenntnisse (Pre-Fb)	MR-Gruppe	1,67	1,67	2,33	U = 296,5; Z = 0,729; p = 0,466
	Kontrollgruppe	1,33	2,00	2,33	
Vorkenntnisse (Post-Fb)	MR-Gruppe	1,33	1,67	2,00	U = 206,5; Z = -1,304; p = 0,192
	Kontrollgruppe	1,00	1,33	1,67	
Ausbildung (Pre-Fb)	MR-Gruppe	1,50	1,75	2,00	U=336,500; Z=1,609; p=0,108
	Kontrollgruppe	1,50	2,00	2,25	
Ausbildung (Post-Fb)	MR-Gruppe	1,25	1,50	1,75	U=248,000; Z=-0,371; p=0,711
	Kontrollgruppe	1,25	1,50	1,75	
Visualisierung (Pre-Fb)	MR-Gruppe	1,25	2,00	2,00	U = 325,000; Z = 1,352; p = 0,177
	Kontrollgruppe	1,75	2,00	2,50	
Visualisierung (Post-Fb)	MR-Gruppe	1,00	1,50	2,00	U = 256,500; Z = -0,193; p = 0,847
	Kontrollgruppe	1,25	1,50	1,50	
Verständnis (Pre-Fb)	MR-Gruppe	1,33	1,67	2,00	U=331,500; Z=1,492; p=0,136
	Kontrollgruppe	1,67	2,00	2,33	
Verständnis (Post-Fb)	MR-Gruppe	1,00	1,67	2,00	U=191,500; Z=-1,657; p=0,098
	Kontrollgruppe	1,00	1,33	1,33	
Interaktion (Pre-Fb)	MR-Gruppe	1,25	1,50	1,75	U=347,000; Z=1,844; p=0,065
	Kontrollgruppe	1,50	1,75	2,00	
Interaktion (Post-Fb)	MR-Gruppe	1,25	1,50	2,00	U=249,000; Z=-0,347; p=0,728

	Kontrollgruppe	1,25	1,50	2,00	
Technik (Pre-Fb)	MR-Gruppe	2,00	2,67	3,00	U=269,500; Z=0,111; p=0,911
	Kontrollgruppe	2,00	2,67	3,33	
Technik (Post-Fb)	MR-Gruppe	2,00	2,33	3,00	U=358,000; Z=2,067; p=0,039*
	Kontrollgruppe	1,67	2,00	2,00	
Kritik (Pre-Fb)	MR-Gruppe	2,20	2,80	3,20	U=358,000; Z=2,067; p=0,039*
	Kontrollgruppe	2,80	3,00	3,40	
Kritik (Post-Fb)	MR-Gruppe	2,80	3,00	3,40	U=347,000; Z=1,827; p=0,068
	Kontrollgruppe	3,00	3,20	3,60	

Tab. 4: Quartilswerte (Q1, Median = Q2, Q3) der Likert-Skalen sowie Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests (U-, Z- und p-Werte) für alle Hauptkategorien im Pre- und Post-Fragebogen, getrennt nach MR- und Kontrollgruppe. Signifikante p-Werte ($p < 0,05$) sind mit * gekennzeichnet

Isolierte Items	Gruppe	Q1	Q2	Q3	Teststatistik (U / Z / p)
Item 12 (Pre-Fb)	MR-Gruppe	1,00	1,00	2,00	U=332,000; Z=1,619; p=0,105
	Kontrollgruppe	1,00	2,00	2,00	
Item 12 (Post-Fb)	MR-Gruppe	1,00	1,00	2,00	U=246,500; Z=-0,65; p=0,642
	Kontrollgruppe	1,00	1,00	2,00	
Item 17 (Pre-Fb)	MR-Gruppe	2,00	3,00	3,00	U=273,000; Z=0,211; p=0,83
	Kontrollgruppe	2,00	3,00	3,00	
Item 17 (Post-Fb)	MR-Gruppe	2,00	2,00	3,00	U=325,000; Z=1,390; p=0,165
	Kontrollgruppe	2,00	3,00	3,00	

Tab. 5: Quartilswerte (Q1, Median = Q2, Q3) der Likert-Skalen sowie Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests (U-, Z- und p-Werte) für die Items 12 und 17 im Pre- und Post-Fragebogen, getrennt nach MR- und Kontrollgruppe. Signifikante p-Werte ($p < 0,05$) sind mit * gekennzeichnet

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die MR- und die Kontrollgruppe in ihrer Bewertung der meisten Kategorien vergleichbare Einschätzungen hatten; lediglich im Bereich „Technik“ zeigen sich signifikante Unterschiede, was auf unterschiedliche Erwartungen oder Erfahrungen im Umgang mit der Technologie hinweisen könnte.

3.3.2 Qualitative Auswertung der offenen Fragen der Post-Fragebögen

Die Auswertung der offenen Fragen aus dem Post-Fragebogen, basierend auf der qualitativen Inhaltsanalyse nach Mayring (2015), zeigte entsprechend den vorgegebenen Themenbereichen „Hindernisse für die Einführung der MR-Technologie“, „Technische Probleme“ sowie „Vorteile im Vergleich zum konventionellen Lernen“ verschiedene Aspekte (Mayring, 2015). Diese sind in Tabelle 6 dargestellt.

Zusammenfassend zeigte sich, dass die Probanden bei der Einführung der MR-Technologie eine Reihe struktureller, technischer und individueller Faktoren als erschwerend ansahen. Genannt wurden u. a. eine unzureichende digitale Infrastruktur, hohe technische Anforderungen, Softwarefehler, eingeschränktes technisches Verständnis, hohe Kosten sowie ein begrenztes Einsatzspektrum. Im praktischen Einsatz sahen die Teilnehmenden Probleme bei der Darstellung (z. B. Auflösung, Head-Tracking-Latenz), eine komplexe Handhabung der Geräte, körperliche Beschwerden (z. B. visuelle Belastung) sowie die Orientierung innerhalb der MR-Umgebung als problematisch an. Auch Aspekte wie lange Ladezeiten, Softwareabstürze, unübersichtliche Benutzeroberflächen und Interaktionsprobleme wurden mehrfach genannt. Die Bedienung gestaltete sich insbesondere für Personen, die eine Brille tragen, und technisch weniger versierten Personen als schwierig. Auch die erforderliche Einführungszeit sowie eine teils geringe Akzeptanz seitens der Nutzenden wurden als kritisch angesehen.

Themenbereiche	Aspekte
Hindernisse für die Einführung der MR-Technologie	• Digitale Infrastruktur • Technische Anforderungen • Komplexe Handhabung der Geräte • Softwarefehler • Technisches Verständnis • Unkomfortables Tragegefühl des HMD • Einschränkungen bei Nutzung mit Brillen • Umgewöhnung • Kosten • Beschränktes Einsatzgebiet • Einführungszeit • Darstellungsprobleme • Akzeptanz
Technische Probleme	• Zusammensetzung Puzzle • Augenschmerzen • Orientierung • Mangelnde Übersichtlichkeit • Geringer Tragekomfort • Auflösung • Ladezeit • Eingewöhnungszeit • Kompatibilitätsprobleme mit Sehhilfen • Bedienung • Softwareabsturz • Interaktion • Internet
Vorteile im Vergleich zum konventionellen Lernen	• Veranschaulichung • Verständnis • Authentische Darstellung • Interaktion • Motivation

Tab. 6: Auswertung zu „Hindernissen“, „technischen Problemen“ und „Vorteilen der MR-Anwendung im Vergleich zum konventionellen Lernen“ basierend auf den offenen Fragen des Post-Fragebogens in kodierter Form in Anlehnung an die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (Mayring, 2015)

3.3.3 Quantitative Auswertung der Meinungsveränderungen

Die Auswertung der Pre- bzw. Post-Fragebögen erfolgte im Rahmen der inferenzstatistischen Analyse unter zwei Fragestellungen: Erstens wurde geprüft, ob sich die Anzahl positiver und negativer Meinungsveränderungen zwischen dem Pre- und dem Post-Fragebogen innerhalb der MR- bzw. der Kontrollgruppe unterscheidet. Zweitens wurde untersucht, wie stark sich die Meinungen der Teilnehmenden zwischen den Fragebögen verändert, d.h. in welchem Ausmaß eine Meinungsverschiebung stattgefunden hat.

3.3.3.1 Analyse der Meinungsveränderungen in MR- und Kontrollgruppe

In den Hauptkategorien „Vorkenntnisse“, „Ausbildung“, „Visualisierung“, „Verständnis“, „Interaktion“ und „Technik“ zeigten sich sowohl in der MR- als auch in der Kontrollgruppe Meinungsveränderungen zwischen Pre- und Post-Befragung. In der MR-Gruppe wurden dabei sowohl positive als auch negative Entwicklungen beobachtet, jedoch wies die statistische Auswertung in keiner dieser Kategorien signifikante Unterschiede zwischen den beiden Messzeitpunkten auf. Demgegenüber zeigten sich in der Kontrollgruppe in allen sechs Kategorien signifikante Veränderungen: „Vorkenntnisse“ ($Z = 3,231$; $p < 0,001$), „Ausbildung“ ($Z = 3,575$; $p < 0,001$), „Visualisierung“ ($Z = 3,551$; $p < 0,001$), „Verständnis“ ($Z = 3,462$; $p < 0,001$), „Interaktion“ ($Z = 2,280$; $p = 0,023$) und „Technik“ ($Z = 2,893$; $p = 0,004$). Diese Veränderungen deuten darauf hin, dass insbesondere die Kontrollgruppe eine insgesamt positivere Bewertung in den jeweiligen Kategorien bzgl. der MR-Technologie aufweist.

Die Hauptkategorie „Kritik“ zeigt sich hiervon abweichend im Vergleich zu den anderen Hauptkategorien. Die MR-Gruppe zeigte eine signifikante Meinungsveränderung zwischen den Pre- und Post-Fragebogen ($Z = 2,189$; $p = 0,029$), während in der Kontrollgruppe keine statistisch signifikante Veränderung nachgewiesen werden konnte ($Z = 1,716$; $p = 0,086$) (Tab. 7).

Hauptkategorie	Gruppe	Anzahl Meinungsänderungen Pre- zu Post-Fragebogen			Teststatistik (Z / p)
		positiv	negativ	keine	
Vorkenntnisse	MR-Gruppe	11	7	5	Z = 1,542; p = 0,128
	Kontrollgruppe	14	1	8	Z = 3,231; p = 0,001*
Ausbildung	MR-Gruppe	14	7	2	Z = 1,516; p = 0,129
	Kontrollgruppe	18	3	2	Z = 3,575; p < 0,001*
Visualisierung	MR-Gruppe	12	6	5	Z = 1,646; p = 0,100
	Kontrollgruppe	19	2	2	Z = 3,551; p = <0,001*
Verständnis	MR-Gruppe	9	7	7	Z = 0,314; p = 0,754
	Kontrollgruppe	15	1	7	Z = 3,462; p = <0,001*
Interaktion	MR-Gruppe	10	7	6	Z = 0,364; p = 0,716
	Kontrollgruppe	13	4	6	Z = 2,28; p = 0,023*
Technik	MR-Gruppe	12	7	4	Z = 1,518; p = 0,129
	Kontrollgruppe	15	4	4	Z = 2,893; p = 0,004*
Kritik	MR-Gruppe	16	5	2	Z = 2,189; p = 0,029*
	Kontrollgruppe	15	5	3	Z = 1,716; p = 0,086

Tab. 7: Anzahl der positiven, negativen und unveränderten Meinungsveränderungen zwischen Pre- und Post-Befragung in den Hauptkategorien, getrennt nach MR- und Kontrollgruppe. Die Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests sind jeweils mit Z- und p-Werten angegeben. Signifikante p-Werte ($p < 0,05$) sind mit * gekennzeichnet.

Bei der rein visuellen Betrachtung der Ergebnisse, ohne Anwendung statistischer Testverfahren, zeigt sich, dass in sämtlichen Kategorien die Anzahl positiver Veränderungen die der negativen übersteigt. Insgesamt lässt sich damit eine tendenziell positive Entwicklung erkennen (Abb. 17).

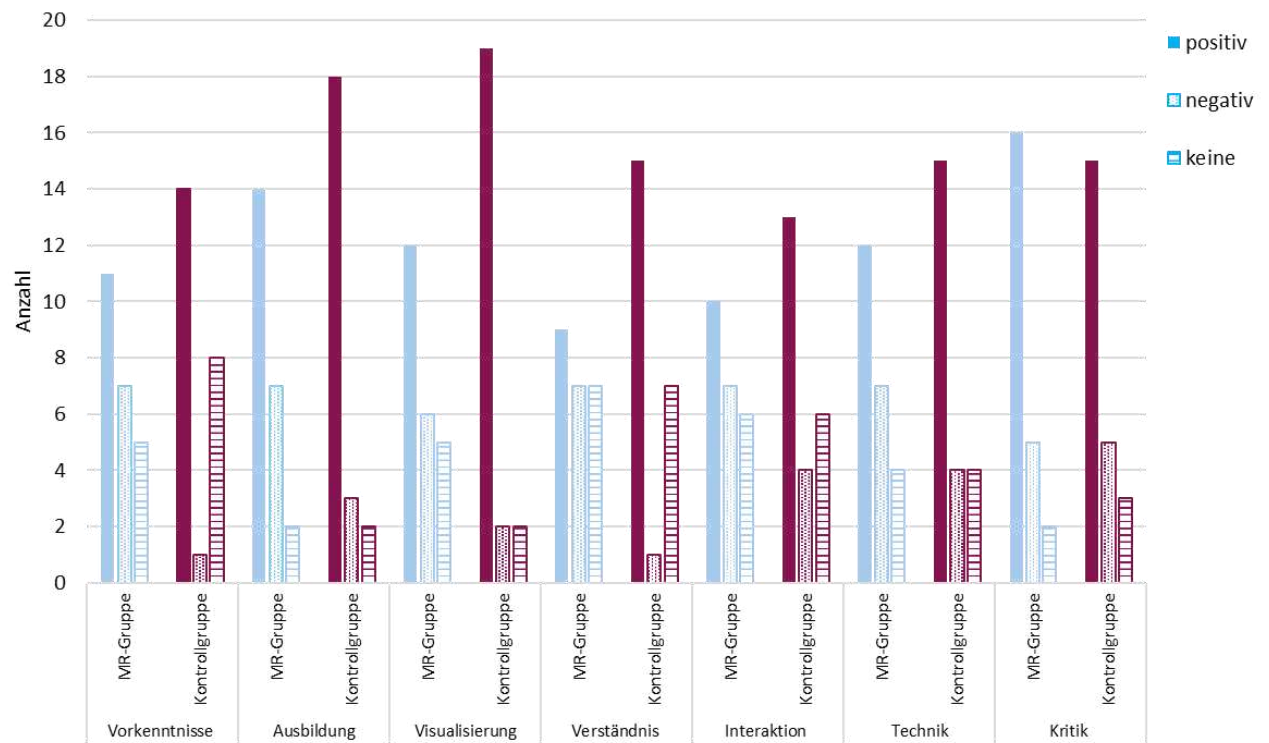


Abb. 17: Visualisierung der Anzahl positiver (ausgefüllt), negativer (gepunktet) und ausbleibender (gestrichelt) Meinungsveränderungen zwischen Pre- und Post-Fragebogen der MR-Gruppe (blau) und der Kontrollgruppe (lila)

Zusammenfassend bedeutet, dass in der MR-Gruppe, mit Ausnahme der Kategorie „Kritik“, keine signifikanten Meinungsveränderungen zwischen Pre- und Post-Befragung nachgewiesen werden konnten. Die Kontrollgruppe zeigte demgegenüber in mehreren Bereichen eine statistisch signifikante Veränderung. Die Ergebnisse legen nahe, dass die eingesetzte MR-Anwendung in der vorliegenden Studie nur in begrenztem Umfang zu einer statistisch nachweisbaren Veränderung der Wahrnehmung beigetragen hat.

3.3.3.2 Analyse des Ausmaßes der Meinungsverschiebung zwischen Pre- und Post-Befragung

Zur Untersuchung des Ausmaßes der Meinungsveränderungen wurde für jede Hauptkategorie die Differenz der Gesamtwerte der Likert-Skalen zwischen Pre- und Post-Befragung berechnet. Diese Differenzwerte dienten als Grundlage für den Vergleich zwischen der MR- und der Kontrollgruppe. Ziel dieser Analyse war es, festzustellen, in welchem Maße sich die Einschätzungen der Teilnehmenden an den beiden Erhebungszeitpunkten verändert haben und ob sich das Ausmaß dieser Veränderung zwischen den Gruppen signifikant unterschied.

Der Vergleich der Meinungsverschiebungen ergab in sechs der sieben Hauptkategorien ein einheitliches Muster: In den Bereichen „Vorkenntnisse“ ($U = 346,500$; $Z = 1,856$; $p = 0,064$), „Ausbildung“ ($U = 349,000$; $Z = 1,881$; $p = 0,060$), „Visualisierung“ ($U = 341,500$; $Z = 1,709$; $p = 0,087$), „Interaktion“ ($U = 322,500$; $Z = 1,304$; $p = 0,192$), „Technik“ ($U = 342,000$; $Z = 1,718$; $p = 0,086$) sowie „Kritik“ ($U = 290,500$; $Z = 0,577$; $p = 0,564$) konnten keine signifikanten Unterschiede im Ausmaß der Meinungsveränderung zwischen den Gruppen festgestellt werden.

Lediglich in der Hauptkategorie „Verständnis“ zeigte sich ein signifikanter Unterschied zwischen der MR- und der Kontrollgruppe ($U = 392,500$; $Z = 2,871$; $p = 0,004$). In dieser Kategorie fiel die Meinungsverschiebung zugunsten der Kontrollgruppe deutlich stärker aus.

Trotz der fehlenden statistischen Signifikanz in den übrigen Kategorien lässt sich anhand der Boxplots (Abb. 18 a–g) eine tendenziell positive Meinungsveränderung in beiden Gruppen über alle Kategorien hinweg erkennen. In der Kontrollgruppe zeigt sich hierbei eine durchgehend stärkere Ausprägung der Veränderung als in der MR-Gruppe.

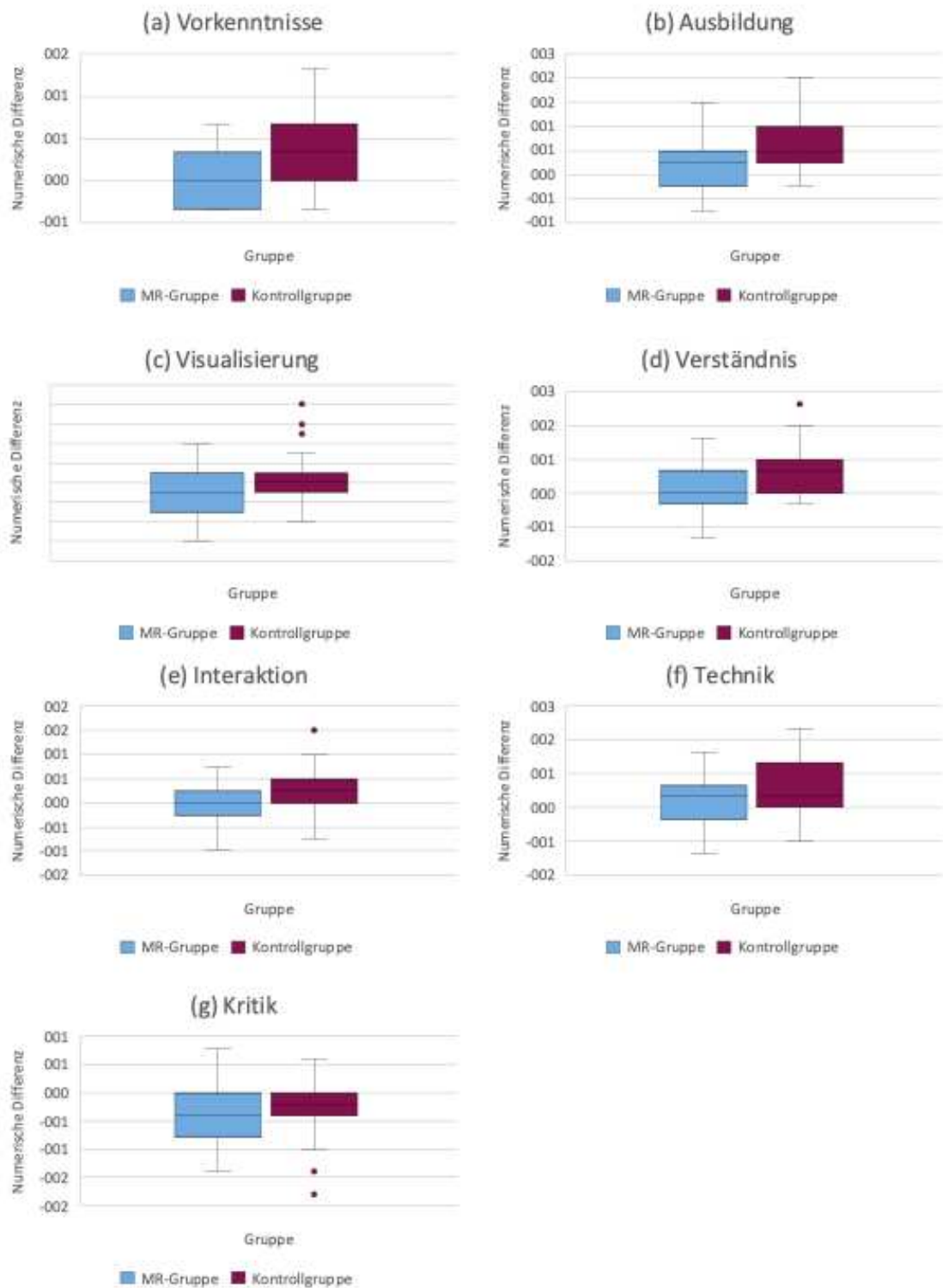


Abb. 18 a-g: Boxplots zur Darstellung der Meinungsveränderung (numerische Differenz zwischen Pre- und Post-Befragung) in den Hauptkategorien im Vergleich zwischen MR-Gruppe (blau) und Kontrollgruppe (lila). Die Auswertung erfolgte mittels Mann-Whitney-U-Test. Statistisch signifikante p-Werte ($p < 0,05$) sind mit * gekennzeichnet. **(a) Vorkenntnisse** MR-Gruppe: Q1 = -0,30 / Median = 0,00 / Q3 = 0,33; Kontrollgruppe: Q1 = 0,00 / Median = 0,33 / Q3 = 0,67; $p = 0,064$; **(b) Ausbildung** MR-Gruppe: Q1 = -0,25 / Median = 0,25 / Q3 = 0,50;

Kontrollgruppe: Q1 = 0,25 / Median = 0,50 / Q3 = 1,00; $p = 0,060$; **(c) Visualisierung** MR-Gruppe: Q1 = -0,25 / Median = 0,25 / Q3 = 0,75; Kontrollgruppe: Q1 = 0,25 / Median = 0,50 / Q3 = 0,75; $p = 0,087$; **(d) Verständnis** MR-Gruppe: Q1 = -0,33 / Median = 0,00 / Q3 = 0,67; Kontrollgruppe: Q1 = 0,00 / Median = 0,67 / Q3 = 1,00; **$p = 0,004^*$** ; **(e) Interaktion** MR-Gruppe: Q1 = -0,25 / Median = 0,00 / Q3 = 0,25; Kontrollgruppe: Q1 = 0,00 / Median = 0,25 / Q3 = 0,50; $p = 0,192$; **(f) Technik** MR-Gruppe: Q1 = -0,33 / Median = 0,33 / Q3 = 0,67; Kontrollgruppe: Q1 = 0,00 / Median = 0,33 / Q3 = 1,33; $p = 0,086$; **(g) Kritik** MR-Gruppe: Q1 = -0,80 / Median = -0,40 / Q3 = 0,00; Kontrollgruppe: Q1 = -0,40 / Median = -0,20 / Q3 = 0,00; $p = 0,564$

3.4 Statistische Auswertung der Lernzielkontrolle

Im Rahmen der Auswertung der Lernzielkontrolle erzielte die Kontrollgruppe im Mittel 8,7 von 10 korrekt beantworteten Fragen, während die MR-Gruppe durchschnittlich 7,6 korrekte Antworten erreichte. Der Vergleich der Ergebnisse mittels Mann-Whitney-U-Test ergab einen signifikanten Unterschied zugunsten der Kontrollgruppe ($U = 147,000$; $Z = -2,646$; $p = 0,008$). Dieses Ergebnis weist darauf hin, dass die Teilnehmenden der Kontrollgruppe bei Verwendung des konventionellen Lernskripts eine signifikant höhere Lernleistung erbrachten als die Teilnehmenden der MR-Gruppe. Zudem schnitt die Kontrollgruppe nicht nur leistungstärker sondern homogener ab als die MR-Gruppe.

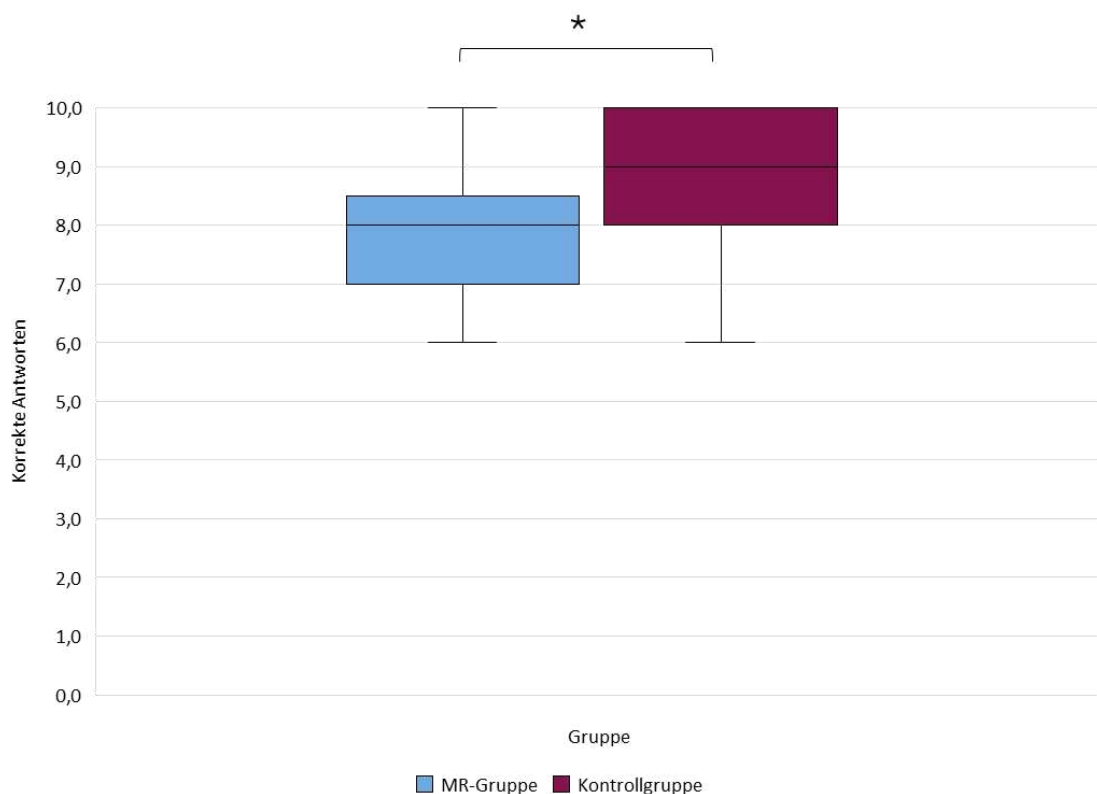


Abb. 19: Boxplot-Darstellung der Ergebnisse der Lernzielkontrolle in der MR- bzw. Kontrollgruppe; MR-Gruppe: Q1 = 7,0 / Median = 8,0 / Q3 = 8,5; Kontrollgruppe: Q1 = 8,0 / Median = 9,0 / Q3 = 10,0; **$p = 0,008^*$**

Bei der Betrachtung der einzelnen Fragen der Lernzielkontrolle zeigte sich vor allem bei der Beantwortung von Frage 7 ein deutlicher Unterschied zwischen den Gruppen. Während in der Kontrollgruppe 18 von 23 Teilnehmenden (78,3%) diese Frage richtig beantworteten, waren es in der MR-Gruppe nur 6 von 23 (26,1%). Auch bei den Fragen 6 und 9 zeigten sich größere Abweichungen: Frage 6 wurde von 22 Teilnehmenden (95,7 %) der Kontrollgruppe richtig beantwortet, in der MR-Gruppe hingegen nur von 16 Personen (69,6 %). Frage 9 wurde in der Kontrollgruppe von 78,3 % (n = 18) richtig beantwortet, in der MR-Gruppe dagegen nur von 43,5 % (n = 10).

Bei den übrigen Fragen fielen die Unterschiede weniger stark aus. Hier lagen die Ergebnisse beider Gruppen deutlich näher beieinander mit einer maximalen Abweichung von bis zu 10 Prozentpunkten bei den korrekt beantworteten Items (Abb. 20).



Abb. 20: Anzahl der korrekt beantworteten Fragen in der Lernzielkontrolle für MR- und Kontrollgruppe in Prozent. Sortierung von Frage 1 bis 10. Sortierung nach MR-Gruppe (hellblau) und Kontrollgruppe (dunkellila)

4 Diskussion

4.1 Fachlicher Hintergrund und Bedeutung der Thematik

Die Anwendung von Mixed Reality in der Medizin bietet zahlreiche Möglichkeiten, etwa durch die dreidimensionale Visualisierung von Daten zur OP-Planung, für die Lehre oder zur intra- und interdisziplinären Kommunikation von Ärzten (Hu et al., 2019, Wu et al., 2018). So können anatomische Strukturen räumlich dargestellt werden, um chirurgische Eingriffe detaillierter zu planen oder sich mithilfe der MR-Technologie interdisziplinär austauschen (Bracale et al., 2024). Komplexe Sachverhalte lassen sich hierdurch präziser kommunizieren und Entscheidungsprozesse werden vereinfacht (Fidan et al., 2023, Della Corte et al., 2024, Di Mitri et al., 2024). Bereits in der medizinischen Ausbildung ermöglicht MR durch die räumliche Darstellung von Lerninhalten ein tiefergehendes Verständnis und eine größere Sicherheit bei der Anwendung des Erlernten, was wiederum zu einem effektiveren Lernprozess führt (Liu et al., 2024). Zammit et al. (2022) zeigten in ihrer Studie beispielsweise, dass räumliche Beziehungen verdeutlicht und das Verständnis zentraler Konzepte unterstützt werden können (Zammit et al. (2022)). Im Rahmen der Digitalisierung bietet die MR-Technologie zahlreiche Vorteile, die nicht ignoriert werden können. Insbesondere komplexe Sachverhalte können durch die Visualisierungen greifbarer gemacht werden. Gleichzeitig fördert die Möglichkeit der Interaktion mit digitalen Informationen deren intensivere Verarbeitung wie eine Studie von Jeising et al. (2024) zeigt (Jeising et al. (2024)). In dieser Studie wurden die MR-Technologie und gedruckte Modelle kombiniert, um neurochirurgische Eingriffe zu trainieren. Die Kombination führte zu einer realitätsnahen und interaktiven Lernerfahrung.

Die Einführung der MR-Technologie in den medizinischen Bereich bringt zahlreiche Vorteile mit sich, erfordert jedoch eine sorgfältige Implementierung, um mögliche Herausforderungen zu bewältigen und eine erfolgreiche Integration in den klinischen Alltag zu gewährleisten (Iqbal et al., 2024, Magalhães et al., 2024). Eine zentrale Anforderung besteht in der Schulung des Fachpersonals, da der Umgang mit MR eine gezielte Einführung und praktische Erfahrung voraussetzt. Maltby et al. (2023) zeigten in ihrer Studie, dass gezielte Schulungsmaßnahmen das Verständnis für digitale Abläufe verbessert und die Kommunikation im Team fördert (Maltby et al. (2023)). Ohne eine strukturierte Einarbeitung kann es zu ineffizienten Arbeitsabläufen oder Fehlinterpretationen von MR-generierten Daten kommen. Die Integration von MR in den

klinischen Betrieb muss bestehende Prozesse ergänzen und darf keine zusätzlichen Belastungen für das medizinische Personal sein (Rebol et al.).

Ein weiterer entscheidender Aspekt bei der Einführung von MR ist die Wirtschaftlichkeit. Die Anschaffungskosten für die MR-Hardware und die Entwicklung spezifischer Softwarelösungen sind hoch, weshalb sichergestellt werden muss, dass die Implementierung dieser Technologie einen messbaren Mehrwert bietet, wie z.B. verbesserte Diagnosemöglichkeiten, effizientere Behandlungsprozesse oder eine höhere Ausbildungsqualität von Fachkräften (Kouijzer et al., 2023). Zusätzlich spielen auch organisatorische und personelle Faktoren eine Rolle. Eine offene Haltung gegenüber neuen Technologien sowie die Bereitschaft, sich mit potenziellen Herausforderungen auseinanderzusetzen, sind Grundvoraussetzungen. Eine Studie von Lie et al. (2023) zur Implementierung von VR-Simulationen in der Ausbildung im Gesundheitssektor hebt hervor, dass für einen erfolgreichen Einsatz mögliche Barrieren und Förderfaktoren identifiziert sowie Strategien zu deren Überwindung gefunden werden müssen (Lie et al. (2023)).

Aufgrund der aufgeführten Gründe ist eine umfassende Evaluation des Einsatzes der MR-Technologie im Vorfeld unerlässlich. Dabei sollten sowohl konkrete Anwendungsbereiche, technische Rahmenbedingungen und Schulungsbedarf als auch mögliche Auswirkungen auf bestehende klinische Abläufe berücksichtigt werden. Letztlich kann eine frühzeitige, detaillierte und praxisnahe Evaluierung dazu beitragen, potenzielle Herausforderungen frühzeitig zu erkennen und Lösungen für diese zu entwickeln. Dadurch wird sichergestellt, dass die Einführung neuer Technologien nicht nur innovativ, sondern auch erfolgreich und effizient verläuft.

4.2 Methodendiskussion

4.2.1 Auswahl der Studienteilnehmenden

Bei der Auswahl der Teilnehmenden für den ersten Studienteil wurde darauf geachtet, sowohl Studierende als auch Ärzte in unterschiedlichen Stadien ihrer Ausbildung einzubeziehen, um ein möglichst breites Spektrum an Meinungen und Erfahrungen abzubilden. Dies trägt zu einer hohen inhaltlichen Validität und zu einem tiefen Informationsgehalt bei (Flick, 2007). Neben Studierenden wurden in den Interviews auch Ärzte der Abteilung für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie des Universitätsklinikums Düsseldorf befragt, darunter Assistenz-, Fach- und Oberärzte.

Diese Zusammensetzung ermöglichte eine ausgewogene und möglichst repräsentative Verteilung hinsichtlich Alter und Berufserfahrung. DiCicco-Bloom und Crabtree (2006) zeigten in ihrer Studie zum Thema qualitativer Interviews, dass eine heterogene Auswahl der Teilnehmenden nach Kriterien wie Alter, Geschlecht und Spezialisierungsgrad zu einer deutlichen Erweiterung und Qualitätssteigerung der erhobenen Daten führen kann (DiCicco-Bloom und Crabtree, 2006).

Bei der Auswahl der Studierenden wurde zusätzlich eine Einteilung in vier Studienabschnitte vorgenommen. Eingeschlossen wurden ausschließlich Studierende ab dem sechsten Semester, also aus dem klinischen Abschnitt des Studiums. Damit sollte sichergestellt werden, dass grundlegende anatomische Kenntnisse, insbesondere des Schädels, vorhanden waren, da diese bereits im vorklinischen Studienabschnitt des (Zahn-) Medizinstudiums vermittelt werden.

Die Stichprobe des zweiten Studienteils bestand überwiegend aus weiblichen Teilnehmenden mit einem Anteil von über 70 %. Eingeschlossen wurden ausschließlich Studierende der Human- und Zahnmedizin. Laut Angaben des Statistischen Bundesamts waren im Jahr 2023 mehr als 64 % der Medizinstudierenden weiblich, im Fach Zahnmedizin lag der Anteil sogar bei knapp 67 % (Statistisches-Bundesamt, 2023). Die Zusammensetzung der Studienkohorte spiegelt somit die tatsächliche Geschlechterverteilung in diesen Studiengängen wider.

Ein Großteil der Teilnehmenden befand sich zudem im letzten Abschnitt des Studiums. Dies lässt sich möglicherweise durch das verwendete Snowball-Sampling erklären. Die zunächst rekrutierten Personen empfahlen häufig Kommilitonen mit ähnlichem Studienstand, was zu einer gewissen Homogenität der Stichprobe führt (Naderifar et al., 2017). Dieser Aspekt wurde aufgrund der Anonymisierung der Daten erst im Rahmen der Auswertung erkannt. Da jedoch die anatomische Lehre, insbesondere die Schädelanatomie, bereits im vorklinischen Abschnitt erfolgte und somit allen Teilnehmenden bekannt war, ist nicht von einer relevanten Verzerrung der Ergebnisse auszugehen.

4.2.2 Qualitative Datenerhebung und Interviewauswertung

Die Kombination qualitativer und quantitativer Methoden sowie die Eigenentwicklung des Fragebogens bilden einen zentralen methodischen Bestandteil dieser Dissertation und machen eine tiefergehende Betrachtung erforderlich. Da sich die Methodik dieses

Forschungsvorhabens von anderen Studien zum Einsatz von Mixed Reality unterscheidet, eignet sich die Form der qualitativen Datenerhebung besonders gut, um Erfahrungen, Meinungen und mögliche Vorbehalte der Teilnehmenden zu erfassen (Helfferich, 2009). Auf diese Weise können differenzierte, individuelle und detaillierte Darstellungen gewonnen werden. Zudem sind die Ergebnisse nicht repräsentativ, sondern sollen vor allem dazu beitragen, die Perspektiven und Erfahrungen der Teilnehmenden besser zu verstehen.

Zum Zeitpunkt der Studiendurchführung lagen nur sehr wenige standardisierte bzw. nicht passende Erhebungsmethoden bezüglich des Einsatzes von Mixed Reality in der Medizin vor, sodass Experteninterviews die Grundlage für alle weiteren Untersuchungen bilden sollten (Hu et al., 2019). Insbesondere leitfadengestützte Interviews haben sich in der Medizin bereits etabliert (Britten, 1995). Sie ermöglichen es, subjektive Erfahrungen und Ansichten sowohl von Patienten bzw. Angehörigen als auch von medizinischem Personal systematisch zu erfassen, ohne dabei die Offenheit des Gesprächs einzuschränken. Britten (1995) zeigte bereits die Relevanz dieser Methode für den medizinischen Bereich und betonte ihren Wert für das Verständnis patientenorientierter Perspektiven und komplexer Versorgungssituationen (Britten, 1995). Qualitative Methoden zielen darauf ab, komplexe Zusammenhänge zu beschreiben und zu verstehen und schlussendlich Hypothesen zu erarbeiten, die als Grundlage für weiterführende quantitative Studien dienen können (Tenny et al., 2025, Sofaer, 1999). Die spezifischen methodischen Herausforderungen sowohl qualitativer als auch quantitativer Ansätze machen eine Verknüpfung beider Modelle besonders in der vorliegenden Studie sinnvoll, um ihre jeweiligen Stärken zu vereinen und Schwächen gegenseitig auszugleichen (Kelle, 2007). Die Anzahl der Interviews der Studie stellt einen Kompromiss zwischen Umfang und Machbarkeit dar. Auch wenn der qualitative Teil der Studie keine allgemeingültigen Aussagen ermöglicht, liefert er wertvolle Anhaltspunkte für die Entwicklung der Fragebögen im zweiten Studienabschnitt.

Die Transkription und anschließende Kodierung der Interviews mithilfe der Software MAXQDA (Version 24.2.0, VERBI GmbH, Berlin) ermöglichte eine strukturierte und transparente Auswertung, die eine genaue Rückverfolgung der Analyseergebnisse zu den ursprünglichen Aussagen gewährleistet. Dieses Vorgehen bot somit eine geeignete Basis für die Item-Entwicklung der Fragebögen. Der Einsatz dieser Software in der medizinischen und sozialwissenschaftlichen Forschung für die Inhaltsanalyse von

Interviews wurde bereits zahlreich in der Literatur beschrieben (Kraft et al., 2024, Dietlinger et al., 2025, Koka et al., 2021, Kuckartz, 2024, Rädiker, 2025).

4.2.3 Fragebogenerstellung und quantitative Auswertung

Auf Grundlage der qualitativ gewonnenen Erkenntnisse konnten im Anschluss standardisierte Fragebögen entwickelt werden, die im zweiten Studienabschnitt zur quantitativen Erhebung eingesetzt wurden. Der Einsatz von Fragebögen ermöglichte es, in standardisierter Form eine Vielzahl von Daten von unterschiedlichen Teilnehmenden effizient zu erfassen. Gleichzeitig reduziert diese Methode mögliche Verzerrungen und erlaubt eine strukturierte statistische Auswertung (McPeake et al., 2014, Smith et al., 2019). Da Fragebögen eine etablierte Methode der Datenerhebung sind, fördert ihre Anonymität ehrliche und unverfälschte Antworten (De Borst et al., 2010). Allerdings können geschlossene Fragen die Tiefe der Aussagen begrenzen und unklare Formulierungen zu Missverständnissen oder nicht verwertbaren Antworten führen. So zeigte eine Studie von Chen et al. (2020), dass die Befragten bei offener Fragestellung bei der Erfassung von Augenproblemen bei Kindern vielfältigeren Symptome ergaben, während geschlossene Fragen zu einer höheren Anzahl der Symptome führten (Chen et al., 2020). Dies deutet darauf hin, dass offene Fragen tiefere Einblicke in die subjektiven Erfahrungen der Befragten ermöglichen. Jedoch erhöhen sie ebenfalls den Zeitaufwand bei der Durchführung und Auswertung. Zudem können zu komplexe oder umfangreiche Fragebögen die Teilnahmebereitschaft negativ beeinflussen (De Borst et al., 2010). Um die Nachteile der Fragebogenmethodik zu minimieren, wurde bei der Erstellung auf klare und zielgerichtete Formulierungen geachtet. Ein Pretest wurde durchgeführt, um die Verständlichkeit zu prüfen und die Validität sowie Zuverlässigkeit der Erhebung zu erhöhen und Unklarheiten vorab zu beseitigen. Dieses Vorgehen entspricht dem Leitfaden der „Association for Medical Education in Europe“ (AMEE) für die Entwicklung und Validierung von Fragebögen im Kontext medizinischer Bildungsforschung (Artino et al., 2014). Durch die Anwendung von Pre- und Post-Fragebögen war eine Analyse der Meinungsveränderung der Teilnehmenden möglich. Dabei sind jedoch potenzielle Erinnerungseffekte zu berücksichtigen, da Teilnehmende möglicherweise dazu neigen, ihre Antworten im Post-Fragebogen an die des Pre-Fragebogens anzupassen (Schwarz, 2020). Umgekehrt kann aber auch das Wissen über eine erneute Befragung zu einer bewussten oder unbewussten Beeinflussung der

Ergebnisse führen (Feldman und Lynch, 1988). Ebenso können Veränderungen der Befragungssituation dazu verleiten, die Ergebnisse beschönigend darzustellen oder sozial erwünschte Antworten zu geben z.B. bei Fragen zur eigenen Person (Mick, 1996). Weitere methodische Einschränkungen ergeben sich durch die verwendete Likert-Skala. So können eine subjektive Interpretation der Antwortmöglichkeiten und das Fehlen von Extrempositionen zu einer Verzerrung führen (Sikström et al., 2023, Cabooter et al., 2016). Dennoch bietet die eingesetzte 5-Punkt-Likert-Skala diverse Vorteile wie beispielsweise die einfache Anwendung mit klaren Antwortmöglichkeiten. Zudem erlaubt sie eine gute Differenzierung mit fünf Stufen und neutraler Antwortoption und eignet sich daher gut zur Quantifizierung subjektiver Einschätzungen (Garratt et al., 2011). Aufgrund ihrer Flexibilität und der Möglichkeit sowohl deskriptive als auch inferenzstatistische Auswertungen durchzuführen, wurde bewusst auf Alternativen wie die 4- oder 7-Punkt-Skalen verzichtet. Die neutrale Mittelloption erschien dabei besonders wichtig, um ehrliche und differenzierte Rückmeldungen zu fördern. Eine 4-Punkt-Skala hätte Teilnehmende zu einer positiven oder negativen Einschätzung gezwungen. Eine 6-Punkt-Skala bietet zwar mehr Abstufungen, hätte aber ebenfalls zu einer überbetonten Differenzierung geführt (Bortz und Döring, 2007, Roberts et al., 1999).

4.3 Ergebniskritik

In der vorliegenden Studie wurde untersucht, wie (Zahn-) Medizinstudierende den Einsatz von Mixed Reality im Rahmen der Lehre wahrnehmen und bewerten. Dafür kamen sowohl qualitative Interviews mit klinisch tätigen Personen als auch standardisierte Fragebögen zum Einsatz, die von insgesamt 46 Teilnehmenden ausgefüllt wurden. Diese wurden randomisiert einer MR-Gruppe mit Anwendungserfahrung oder einer Kontrollgruppe mit konventionellem Lernskript zugeteilt. Zusätzlich wurde eine Lernzielkontrolle durchgeführt, um mögliche Unterschiede im Lernerfolg zu erfassen. Die Auswertung der Daten ermöglichte eine differenzierte Betrachtung der Einstellungen, Einschätzungen und Lernergebnisse beider Versuchsgruppen.

4.3.1 Qualitative Interviewergebnisse

Die Interviews geben einen Einblick in die Einschätzungen der Teilnehmenden zum Einsatz von Mixed Reality in der medizinischen Lehre. Grundsätzlich zeigten sich die meisten sehr offen gegenüber der Technologie und bewerteten sie als innovativ, interessant und zukunftsorientiert. Gleichzeitig wurde aber auch deutlich, dass die

Einstellung stark davon abhängt, wie viel Vorwissen oder persönliche Erfahrung mit digitalen Anwendungen bereits vorhanden war. In der Kategorie „Vorkenntnisse“ wurde deutlich, dass viele Teilnehmende eine grundsätzliche Vorstellung von MR hatten und diese von VR abgrenzen konnten. Die Kenntnisse zu AR waren dagegen meist weniger ausgeprägt. Dennoch zeigten sich die meisten offen für die Technologie, was in der Literatur als typischer Vertrauensvorschluss gegenüber neuen digitalen Anwendungen beschrieben wird (Nikishina und Pripuzova, 2022, Paska und Budnik, 2023). Ein zentraler Punkt war der didaktische Mehrwert. In den Kategorien „Ausbildung“, „Verständnis“ und „Visualisierung“ nannten viele Teilnehmende Vorteile wie realitätsnahe Darstellungen, bessere Verständlichkeit von Inhalten, Möglichkeiten zur Wiederholung und praxisnahe Szenarien. Besonders in der Anatomie und der chirurgischen Ausbildung wurde MR als hilfreiches Zusatztool gesehen. Vergleichbare Ergebnisse zeigen aktuelle Studien, die ähnliche Potenziale hervorheben (Dennler et al., 2021, Incekara et al., 2018, George et al., 2023). George et al. (2023) untersuchten eine AR-gestützten Unterrichtseinheit zur Atemwegssicherung in der Notfallmedizin (George et al., 2023). Auch dort wurde die Technologie von allen Teilnehmenden als wertvoll und motivierend eingeschätzt insbesondere im Hinblick auf Visualisierung, Lernzugang und Anwendungsnähe. Die Analyse der Versuchsgruppen hob vor allem den didaktischen Nutzen visueller Darstellung und die Zugänglichkeit der Inhalte hervor, zwei Aspekte, die auch in den hier geführten Interviews eine zentrale Rolle spielten. Gleichzeitig zeigte sich, dass das Erleben der Immersion von den Teilnehmenden unterschiedlich wahrgenommen wurde, ein Ergebnis, das sich mit den in unserer Studie geäußerten technischen Vorbehalten deckt. Auch der Aspekt der „Interaktion“ wurde positiv bewertet sowohl mit der Technik selbst als auch mit anderen Nutzenden im Rahmen von Gruppenarbeit oder Lehrveranstaltungen. Die Zusammenarbeit zwischen Studierenden, Lehrenden und klinischem Personal wurde dabei als besonders wertvoll genannt. So beschreiben Johnston et al. (2024) die Machbarkeit eines Live-Zwei-Wege-Streams via MR und zeigten, dass sowohl Studierende als auch Lehrende die Technologie als bereichernd bewerteten, gleichzeitig, aber technische Infrastruktur und die Integration in bestehende Lehrformate als zentrale Herausforderungen nannten (Johnston et al., 2024). Diese Punkte wurden auch in den Interviews dieser Studie immer wieder als kritische Rahmenbedingungen genannt. Im Bereich „Technik“ war das Bild gemischt. Die Erwartungen an Funktionalität, Bedienung und Stabilität waren hoch, die Befragten forderten einfache Anwendungen, intuitive Handhabung und schnellen Zugriff auf Informationen. Gleichzeitig wurde MR aber insgesamt als umsetzbar und ethisch

unbedenklich eingeschätzt. Deutlicher wurde die Kritik in der Kategorie „Kritik“. Hier wurden unter anderem hohe Anschaffungskosten, fehlende personelle und technische Ressourcen, Schulungsbedarf sowie potenzielle Vorurteile gegenüber neuer Technik angesprochen. Auch körperliche Reaktionen wie Schwindel oder visuelle Überforderung wurden thematisiert. Solche Herausforderungen werden auch in anderen Studien beschrieben, die auf typische Einführungsbarrieren bei neuen Technologien hinweisen (Vervoorn et al., 2023, Paska und Budnik, 2023).

Insgesamt zeigen die Interviews ein technologieoffenes, aber trotzdem kritisches realistisches Bild. MR wird als sinnvolle Ergänzung klassischer Lehrmethoden betrachtet, wenn es gelingt, die Rahmenbedingungen wie Ausstattung, Schulung und Akzeptanz aktiv anzupassen. Die Ergebnisse machen deutlich, dass grundsätzlich Potenzial für den sinnvollen Einsatz von MR in der medizinischen Lehre vorhanden ist insofern bestimmte Voraussetzungen erfüllt werden.

4.3.2 Quantitative Fragebogenergebnisse

Ziel der quantitativen Auswertung der Fragebögen war es, die Einschätzungen der MR- und der Kontrollgruppe vor und nach der Intervention zu vergleichen, Veränderungen innerhalb der Gruppen zu erfassen und das Ausmaß dieser Meinungsverschiebungen zu bewerten.

Beim Vergleich der Gruppen zeigten sich insgesamt weitgehend ähnliche Einschätzungen. Signifikante Unterschiede traten nur in einzelnen Bereichen auf und waren nicht über alle Kategorien hinweg nachweisbar. In der Kontrollgruppe konnten in nahezu allen untersuchten Kategorien signifikant positive Meinungsveränderungen festgestellt werden. In der MR-Gruppe hingegen war lediglich in der Kategorie „Kritik“ eine signifikante Veränderung erkennbar. Diese selektive Veränderung lässt vermuten, dass die praktische Anwendung der Technologie vor allem zur kritischen Reflexion angeregt hat, z.B. durch direkte Erfahrungen mit der Bedienbarkeit, der visuellen Umsetzung oder der technischen Stabilität. Gleichzeitig zeigt sich, dass bereits das rein theoretische Auseinandersetzen mit MR, wie es in der Kontrollgruppe durch die unverbindliche Anwendungseinheit stattfand, zu einer insgesamt positiveren Bewertung führen kann.

In beiden Gruppen ließ sich eine tendenziell positive Entwicklung der Meinungen beobachten. Ein signifikanter Gruppenunterschied zeigte sich allerdings nur in der

Kategorie „Verständnis“, wobei der Effekt zugunsten der Kontrollgruppe ausfiel. Das ist insofern bemerkenswert, als gerade in dieser Kategorie ein Vorteil für die immersive Technologie erwartet worden wäre. Studien wie die von Guha et al. (2023) betonen zwar das Potenzial von MR zur Förderung von Verständnis und Motivation, heben jedoch ebenfalls hervor, dass der Lernerfolg stark von Vorerfahrung, technischer Infrastruktur und didaktischer Einbindung abhängt (Guha et al., 2023). Die bereits in der Ausgangsbefragung erkennbare positive Grundhaltung der MR-Gruppe könnte zu einer eingeschränkten Veränderbarkeit geführt haben (Deckeneffekt). In Kombination mit möglichen Überforderungseffekten bei der erstmaligen Nutzung, wie sie Kockord und Bodensiek (2021) beschreiben, könnte dies erklären, warum sich die Intervention in dieser Gruppe weniger stark auf die Meinungsentwicklung auswirkte (Kockord und Bodensiek, 2021). Die Kontrollgruppe wiederum bewertete MR auf Basis einer praxisnahen Erkundung der MR-Umgebung ohne Leistungsdruck, ohne mit potenziellen Herausforderungen der praktischen Anwendung konfrontiert zu werden. Dieses Ergebnis stützt die Annahme eines Vertrauensvorschlusses, wie er bereits unter 4.2.1 angesprochen wurde (Nikishina und Pripuzova, 2022, Paska und Budnik, 2023). Auch in der bestehenden Forschung wird MR überwiegend positiv bewertet, insbesondere im Zusammenhang mit Simulationen und chirurgischer Planung (Robinson et al., 2014, Sappenfield et al., 2018). Studien wie die von Hamacher et al. (2016) und Yang et al. (2021) sehen das größte Potenzial in der Verbesserung chirurgischer Präzision, der Reduktion räumlicher Komplexität, kürzeren OP-Zeiten und letztlich in einer besseren Patientenversorgung (Hamacher et al., 2016, Yang et al., 2021).

Darüber hinaus spielen methodische Aspekte eine Rolle bei der Interpretation der Ergebnisse. Die Verwendung von Likert-Skalen bringt bekannte Einschränkungen mit sich, etwa die Tendenz zur Mitte oder zur mechanischen Beantwortung ohne bewusste Reflexion (Douven, 2018). Zusätzlich könnte der enge zeitliche Abstand zwischen Intervention und Post-Befragung dazu geführt haben, dass die Erfahrungen noch nicht ausreichend reflektiert oder verarbeitet waren. Insgesamt bewerten beide Gruppen die Technologie positiv und die Einstellungen verbesserten sich im Verlauf der Untersuchung tendenziell. Die stärkeren signifikanten Veränderungen in der Kontrollgruppe legen jedoch nahe, dass eine orientierende MR-Übung kurzfristig zu einem größeren Einstellungswandel führen kann als die direkte Anwendung. Möglicherweise weil diese frei von ablenkenden oder überfordernden Faktoren wie komplexer Bedienung oder technischer Instabilität waren. Die MR-Gruppe hingegen zeigte durch die Veränderung

in der Kategorie „Kritik“, dass reale Nutzungserfahrungen auch zu einer kritischeren, aber möglicherweise fundierteren Einschätzung führen können. Das ist keineswegs als negativ zu bewerten, sondern als Ausdruck eines differenzierteren Urteils.

Mögliche Ursachen für diese Unterschiede liegen unter anderem in der kognitiven Belastung bei der erstmaligen Nutzung, potenziellen Ablenkungseffekten und einer gewissen Überschätzung der Technologie in der Kontrollgruppe mangels praktischer Erfahrung (Dontre, 2021). Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich die Einstellungen gegenüber MR in beiden Gruppen positiv verändert haben, allerdings in unterschiedlichem Ausmaß. Damit bestätigen die Ergebnisse auch die Beobachtungen von Vervoorn et al. (2023), wonach viele Studien zwar von positiven Effekten berichten, dabei aber häufig auf Vergleichsgruppen oder differenzierte Ausgangsdaten verzichten, was die Aussagekraft relativiert (Vervoorn et al., 2023). Die interne Validität der vorliegenden Studie ist durch eine standardisierte Durchführung und die Kontrolle externer Störeinflüsse gesichert. Die externe Validität wird jedoch durch die bereits vor Studienbeginn stark positive Grundhaltung der Teilnehmenden eingeschränkt, was die Übertragbarkeit der Ergebnisse limitiert (Slack und Draugalis, 2001).

4.3.3 Ergebnisse der Lernzielkontrolle

Die Ergebnisse der Lernzielkontrolle zeigen einen signifikanten Unterschied zugunsten der Kontrollgruppe. Diese erzielte im Durchschnitt mehr korrekt beantwortete Fragen und wies zudem eine geringere Streuung der Ergebnisse auf als die MR-Gruppe. Der Befund legt nahe, dass das konventionelle Lernskript zu einem höheren kurzfristigen Lernerfolg geführt hat als die Anwendung der MR-Technologie. Die höhere Homogenität der Kontrollgruppe deutet zusätzlich darauf hin, dass der Wissenserwerb unter dieser Lernbedingung nicht nur erfolgreicher, sondern auch konsistenter verlief.

Die Literatur liefert mehrere mögliche Erklärungsansätze für diese Ergebnisse. Eine Studie von Dontre et al. (2021) zeigte, dass der Einsatz digitaler Technologien, insbesondere bei Erstnutzung, kognitive Ressourcen binden und dadurch die Informationsverarbeitung beeinträchtigen kann (Dontre, 2021). Dies gilt insbesondere dann, wenn die Interaktion mit der Technologie zusätzliche Anforderungen an Aufmerksamkeit, räumliches Denken oder motorische Steuerung stellt, wie es bei Mixed Reality-Anwendungen der Fall ist. Die Arbeit von Kockord und Bodensiek (2021) bestätigt ebenfalls, dass MR-Formate mit einer deutlich höheren kognitiven Belastung

einhergehen können als konventionelle Lernumgebungen (Kockord und Bodensiek, 2021). Während die Kontrollgruppe sich vollständig auf die Inhalte konzentrieren konnte, war die MR-Gruppe zusätzlich mit der Bedienung, Navigation und räumlichen Orientierung innerhalb der Anwendung beschäftigt. Diese Faktoren könnten den Lernerfolg beeinträchtigt haben, ohne dass dies unmittelbar in der subjektiven Bewertung der Technologie zum Ausdruck kam.

Auch aus didaktischer Sicht ist der Vorteil des klassischen Formats gut nachvollziehbar, da die klare Struktur des Skripts, die Möglichkeit, das eigene Lerntempo anzupassen und das geringere Ablenkungspotenzial stabile Bedingungen für effizientes Lernen bieten im Gegensatz zu einer einmaligen Intervention, ohne dass vorher Erfahrungen mit Mixed Reality vorliegen. Außerdem sind Studierende mit konventionellen Lernmethoden vertraut.

4.4 Konklusion und Ausblick

Der Einsatz der MR-Technologie in der Lehre wird nicht nur als interessant, sondern auch als hilfreich für die Vermittlung von Kenntnissen und die Verbesserung des Lernprozesses bewertet. Die Teilnehmenden bringen bereits gewisse Vorkenntnisse mit und verbinden mit der Technologie hohe Erwartungen, insbesondere hinsichtlich eines komfortablen, intuitiven Umgangs bei gleichzeitig geringerem Zeitaufwand. Gleichzeitig wurden genau diese Erwartungen als potenzielle Hürden identifiziert, falls sie nicht erfüllt werden können. Besonders positiv hervorgehoben wurde die dreidimensionale Visualisierung, die zu einem besseren Verständnis komplexer Inhalte beiträgt. Der förderliche Effekt immersiver Technologien auf das inhaltliche Verständnis, vor allem durch Interaktivität und unmittelbare Rückmeldung, konnte bereits in einer Studie von Moro et al. (2017) gezeigt werden und wurde durch die Untersuchung von Bork et al. (2021) im direkten Vergleich mit herkömmlichen Lernmethoden bestätigt (Moro et al., 2017, Bork et al., 2021).

Interessanterweise spiegelten die Ergebnisse der Lernzielkontrolle diese positive Einschätzung nicht wider, da die Kontrollgruppe signifikant bessere Ergebnisse erzielte. Dennoch zeigte sich nach der Anwendung eine insgesamt noch positivere Einstellung gegenüber der Technologie, wobei die Grundhaltung bereits zuvor überwiegend positiv war. Kritikpunkte wie anfängliche Vorbehalte oder der zusätzliche Zeitaufwand wurden zwar genannt, aber insgesamt als weniger schwerwiegend im Vergleich zu den

wahrgenommenen Vorteilen eingeschätzt. Als größere Herausforderungen gelten vor allem die Verarbeitung großer Datenmengen sowie die damit verbundene Notwendigkeit einer stabilen technischen Infrastruktur (Radenkovic, 2005).

Auch Studien aus anderen medizinischen Fachbereichen, etwa aus der Urologie oder der Orthopädie, heben das Potenzial von MR-Technologien hervor und diskutieren deren Übertragbarkeit (Hamacher et al., 2016, Morscheid und Pouessel, 2023). Eine systematische Übersichtsarbeit von Barteit et al. (2021) stützt die hier gewonnenen Erkenntnisse und unterstreicht die Relevanz von MR in der medizinischen Lehre (Barteit et al., 2021). Obwohl die Ergebnisse nahelegen, dass eine Einführung, Etablierung und langfristige Integration von MR in die Lehre prinzipiell möglich sind, bilden sie vor allem eine Grundlage für weitere Untersuchungen. Zukünftige Studien sollten den längerfristigen Einsatz evaluieren, um belastbare Aussagen zu ermöglichen. Insgesamt bietet der Einsatz von Mixed Reality vielversprechende Perspektiven für die medizinische Lehre, auch in der kraniofazialen Chirurgie. Jedoch wird ersichtlich, dass technologische Innovation allein keine Garantie für einen besseren Lernerfolg ist. Der tatsächliche Nutzen hängt maßgeblich von der eingesetzten Didaktik, der Nutzererfahrung sowie einer sorgfältigen Vorbereitung ab. Für einen erfolgreichen Einsatz in der medizinischen Ausbildung erscheint es daher notwendig, MR nicht als Ersatz, sondern als ergänzendes Element in einem strukturierten Lernkonzept mit ausreichender Anleitung und Eingewöhnungszeit zu verankern.

5 Literatur- und Quellenverzeichnis

- ADHANOM, I. B., MACNEILAGE, P. & FOLMER, E. 2023. Eye Tracking in Virtual Reality: a Broad Review of Applications and Challenges. *Virtual Real*, 27, 1481–1505.
- ANGUELOV, D., DULONG, C., FILIP, D., FRUEH, C., LAFON, S., LYON, R., OGALE, A., VINCENT, L. & WEAVER, J. 2010. Google Street View: Capturing the World at Street Level. *Computer*, 43, 32–38.
- ARTINO, A. R., JR., LA ROCHELLE, J. S., DEZEE, K. J. & GEHLBACH, H. 2014. Developing questionnaires for educational research: AMEE Guide No. 87. *Med Teach*, 36, 463–74.
- BARSOM, E. Z., GRAAFLAND, M. & SCHIJVEN, M. P. 2016. Systematic review on the effectiveness of augmented reality applications in medical training. *Surg Endosc*, 30, 4174–83.
- BARTEIT, S., LANFERMANN, L., BÄRNIGHAUSEN, T., NEUHANN, F. & BEIERSMANN, C. 2021. Augmented, Mixed, and Virtual Reality-Based Head-Mounted Devices for Medical Education: Systematic Review. *JMIR Serious Games*, 9, e29080.
- BASU, A. 2019. *A brief chronology of Virtual Reality*.
- BERRYMAN, D. R. 2012. Augmented Reality: A Review. *Medical Reference Services Quarterly*, 31, 212–218.
- BORK, F., LEHNER, A., ECK, U., NAVAB, N., WASCHKE, J. & KUGELMANN, D. 2021. The Effectiveness of Collaborative Augmented Reality in Gross Anatomy Teaching: A Quantitative and Qualitative Pilot Study. *Anatomical Sciences Education*, 14, 590–604.
- BORTZ, J. & DÖRING, N. 2007. *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler: Limitierte Sonderausgabe*, Springer Berlin Heidelberg.
- BRACALE, U., IACONE, B., TEDESCO, A., GARGIULO, A., DI NUZZO, M. M., SANNINO, D., TRAMONTANO, S. & CORCIONE, F. 2024. The use of mixed reality in the preoperative planning of colorectal surgery: Preliminary experience with a narrative review. *Cir Esp (Engl Ed)*, 102 Suppl 1, S36–s44.
- BRITTEN, N. 1995. Qualitative Research: Qualitative interviews in medical research. *BMJ*, 311, 251.
- BROWN, A. & GREEN, T. 2016. Virtual Reality: Low-Cost Tools and Resources for the Classroom. *TechTrends*, 60, 517–519.
- BRUNNER, S., KRÖPLIN, J., MEYER, H. J., SCHMITZ-RIXEN, T. & FRITZ, T. 2021. [Use of surgical simulators in further education-A nationwide analysis in Germany]. *Chirurg*, 92, 1040–1049.
- BÜHNER, M. 2021. Einführung in die Test- und Fragebogenkonstruktion. Pearson Deutschland.
- CABOOTER, E., WEIJTERS, B., GEUENS, M. & VERMEIR, I. 2016. Scale format effects on response option interpretation and use. *Journal of Business Research*, 69, 2574–2584.
- CACCIANIGA, G., MARIANI, A., PARATESI, C. G. D., MENCIASSI, A. & MOMI, E. D. 2021. Multi-Sensory Guidance and Feedback for Simulation-Based Training in Robot Assisted Surgery: A Preliminary Comparison of Visual, Haptic, and Visuo-Haptic. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 6, 3801–3808.
- CHEN, A. H., BAKAR, N. A. & LAM, C. S. 2020. Comparison of open-ended and close-ended questions to determine signs and symptoms of eye problems among children. *J Optom*, 13, 81–87.

- COYNE, I. T. 1997. Sampling in qualitative research. Purposeful and theoretical sampling; merging or clear boundaries? *J Adv Nurs*, 26, 623–30.
- DE BORST, G. J., FROIO, A., BIASI, G. & MOLL, F. L. 2010. The Need for Questionnaires in Vascular Surgery: The Paradigm of Carotid Revascularisation. *European Journal of Vascular and Endovascular Surgery*, 40, 309–311.
- DELLA CORTE, M., QUARÀ, A., DE CILLIS, S., VOLPI, G., AMPARORE, D., PIRAMIDE, F., PIANA, A., SICA, M., DI DIO, M., ALBA, S., PORPIGLIA, F., CHECCUCCI, E. & FIORI, C. 2024. 3D virtual models and augmented reality for radical prostatectomy: a narrative review. *Chin Clin Oncol*, 13, 56.
- DENNLER, C., BAUER, D. E., SCHEIBLER, A. G., SPIRIG, J., GöTSCHI, T., FÜRNSTAHL, P. & FARSHAD, M. 2021. Augmented reality in the operating room: a clinical feasibility study. *BMC Musculoskelet Disord*, 22, 451.
- DI MITRI, M., DI CARMINE, A., D'ANTONIO, S., CAPOBIANCO, B. M., BISANTI, C., COLLAUTTI, E., CRAVANO, S. M., RUSPI, F., LIBRI, M., GARGANO, T. & LIMA, M. 2024. Advancing Pediatric Surgery: The Use of HoloLens 2 for 3D Anatomical Reconstructions in Preoperative Planning. *Children (Basel)*, 12.
- DICICCO-BLOOM, B. & CRABTREE, B. F. 2006. The qualitative research interview. *Medical Education*, 40, 314–321.
- DIETLINGER, F. K., KASPARIK, B., UNTERHITZENBERGER, J., SAUPE, L. B. & ROSNER, R. 2025. Challenges and facilitators in treating unaccompanied young refugees with posttraumatic stress disorder in a dissemination trial: a qualitative study with psychotherapists. *Child and Adolescent Psychiatry and Mental Health*, 19, 25.
- DONTRE, A. 2021. The influence of technology on academic distraction: A review. *Human Behavior and Emerging Technologies*, 3, 379–390.
- DOUVEN, I. 2018. A Bayesian perspective on Likert scales and central tendency. *Psychon Bull Rev*, 25, 1203–1211.
- DRESING, T. & PEHL, T. 2018. *Praxisbuch Interview, Transkription & Analyse. Anleitungen und Regelsysteme für qualitativ Forschende*, Marburg.
- ECK, U. & WINKLER, A. 2018. Display-Technologien für Augmented Reality in der Medizin. *Der Unfallchirurg*, 121, 278–285.
- EFE, A. 2022. Taking Virtual Reality and Augmented Reality to The Next Level: Artificial Intelligence with Mixed Reality. *Uluslararası Yönetim Bilişim Sistemleri ve Bilgisayar Bilimleri Dergisi*, 6, 131–148.
- ERLER-ZIMMER. 2025. *Osteopathie-Schädelmodell* [Online]. Available: <https://erler-zimmer.de/Osteopathie-Schaedelmodell-22-teilig-didaktische-Ausfuehrung-EZ-Augmented-Anatomy/4708> [Accessed 25.09.2025 2025].
- FAUL, F., ERDFELDER, E., BUCHNER, A. & LANG, A.-G. 2009. Statistical power analyses using G*Power 3.1: Tests for correlation and regression analyses. *Behavior Research Methods*, 41, 1149–1160.
- FELDMAN, J. M. & LYNCH, J. G. 1988. Self-generated validity and other effects of measurement on belief, attitude, intention, and behavior. *Journal of Applied Psychology*, 73, 421–435.
- FIDAN, D., MERO, G., MAZILESCU, L. I., HEUER, T. & KAISER, G. M. 2023. Mixed reality combined with ALPPS for colorectal liver metastases, a case report. *Int J Surg Case Rep*, 109, 108624.
- FISCHER, M., FUERST, B., LEE, S. C., FOTOUHI, J., HABERT, S., WEIDERT, S., EULER, E., OSGOOD, G. & NAVAB, N. 2016. Preclinical usability study of multiple augmented reality concepts for K-wire placement. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 11, 1007–14.
- FLICK, U. 2007. *Qualitative Sozialforschung: eine Einführung*, Rowohlt-Taschenbuch-Verlag.

- GARRATT, A. M., HELGELAND, J. & GULBRANDSEN, P. 2011. Five-point scales outperform 10-point scales in a randomized comparison of item scaling for the Patient Experiences Questionnaire. *J Clin Epidemiol*, 64, 200–7.
- GEORGE, O., FOSTER, J., XIA, Z. & JACOBS, C. 2023. Augmented Reality in Medical Education: A Mixed Methods Feasibility Study. *Cureus*, 15, e36927.
- GUHA, P., LAWSON, J., MINTY, I., KINROSS, J. & MARTIN, G. 2023. Can mixed reality technologies teach surgical skills better than traditional methods? A prospective randomised feasibility study. *BMC Med Educ*, 23, 144.
- HAMACHER, A., KIM, S. J., CHO, S. T., PARDESHI, S., LEE, S. H., EUN, S. J. & WHANGBO, T. K. 2016. Application of Virtual, Augmented, and Mixed Reality to Urology. *Int Neurourol J*, 20, 172–181.
- HELFFERICH, C. 2009. *Die Qualität qualitativer Daten: Manual für die Durchführung qualitativer Interviews*, VS Verlag für Sozialwissenschaften.
- HEUTS, S., SARDARI NIA, P. & MAESSEN, J. G. 2016. Preoperative planning of thoracic surgery with use of three-dimensional reconstruction, rapid prototyping, simulation and virtual navigation. *J Vis Surg*, 2, 77.
- HOFFMANN, A. 2002. *Das Stereoskop: Geschichte der Stereoskopie*, München, Deutsches Museum.
- HU, H.-Z., FENG, X.-B., SHAO, Z.-W., XIE, M., XU, S., WU, X.-H. & YE, Z.-W. 2019. Application and Prospect of Mixed Reality Technology in Medical Field. *Current Medical Science*, 39, 1–6.
- INCEKARA, F., SMITS, M., DIRVEN, C. & VINCENT, A. 2018. Clinical Feasibility of a Wearable Mixed-Reality Device in Neurosurgery. *World Neurosurg*, 118, e422–e427.
- IQBAL, A. I., AAMIR, A., HAMMAD, A., HAFSA, H., BASIT, A., ODUOYE, M. O., ANIS, M. W., AHMED, S., YOUNUS, M. I. & JABEEN, S. 2024. Immersive Technologies in Healthcare: An In-Depth Exploration of Virtual Reality and Augmented Reality in Enhancing Patient Care, Medical Education, and Training Paradigms. *J Prim Care Community Health*, 15, 21501319241293311.
- J. J. LAVIOLA, J. 2008. Bringing VR and Spatial 3D Interaction to the Masses through Video Games. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 28, 10–15.
- JEISING, S., LIU, S., BLASZCZYK, T., RAPP, M., BEEZ, T., CORNELIUS, J. F., SCHWERTER, M. & SABEL, M. 2024. Combined use of 3D printing and mixed reality technology for neurosurgical training: getting ready for brain surgery. *Neurosurg Focus*, 56, E12.
- JOHNSTON, M., O'MAHONY, M., O'BRIEN, N., CONNOLLY, M., IOHOM, G., KAMAL, M., SHEHATA, A. & SHORTEN, G. 2024. The feasibility and usability of mixed reality teaching in a hospital setting based on self-reported perceptions of medical students. *BMC Med Educ*, 24, 701.
- KELLE, U. 2007. Integration qualitativer und quantitativer Methoden.
- KOCKORD, R. & BODENSIEK, O. 2021. Cognitive Load During First Contact With Mixed Reality Learning Environments. *Proceedings of Mensch und Computer 2021*. Ingolstadt, Germany: Association for Computing Machinery.
- KOKA, K. M., YADLAPALLI, S., PILLARISSETTI, P., YASANGI, M. K., YARAGANI, A. & KUMMAMURU, S. 2021. The barriers for tobacco cessation counseling in teaching health care institutions: A qualitative data analysis using MAXQDA software. *J Family Med Prim Care*, 10, 3262–3267.
- KOUIJZER, M., KIP, H., BOUMAN, Y. H. A. & KELDERS, S. M. 2023. Implementation of virtual reality in healthcare: a scoping review on the implementation process of virtual reality in various healthcare settings. *Implement Sci Commun*, 4, 67.

- KRAFT, B., KUSCHER, T., ZAWATZKI, S., HOFSTETTER, S. & JAHN, P. 2024. Evaluation of the Continuing Education Training “Beratende für Digitale Gesundheitsversorgung” (“Consultant for Digital Healthcare”): Protocol for an Effectiveness Study. *JMIR Res Protoc*, 13, e57860.
- KUCKARTZ, U. 2024. *Fokussierte Interviewanalyse mit MAXQDA*, Wiesbaden, Springer.
- LENZNER, T. & MENOLD, N. 2015. *Frageformulierung*.
- LI, L., YANG, J., CHU, Y., WU, W., XUE, J., LIANG, P. & CHEN, L. 2016. A Novel Augmented Reality Navigation System for Endoscopic Sinus and Skull Base Surgery: A Feasibility Study. *PLoS One*, 11, e0146996.
- LIE, S. S., HELLE, N., SLETTELAND, N. V., VIKMAN, M. D. & BONSAKSEN, T. 2023. Implementation of Virtual Reality in Health Professions Education: Scoping Review. *JMIR Med Educ*, 9, e41589.
- LIU, S., YANG, J., JIN, H., LIANG, A., ZHANG, Q., XING, J., LIU, Y. & LI, S. 2024. Exploration of the application of augmented reality technology for teaching spinal tumor's anatomy and surgical techniques. *Front Med (Lausanne)*, 11, 1403423.
- MAGALHÃES, R., OLIVEIRA, A., TERROSO, D., VILAÇA, A., VELOSO, R., MARQUES, A., PEREIRA, J. & COELHO, L. 2024. Mixed Reality in the Operating Room: A Systematic Review. *J Med Syst*, 48, 76.
- MALTBY, S., GARCIA-ESPERON, C., JACKSON, K., BUTCHER, K., EVANS, J. W., O'BRIEN, W., DIXON, C., RUSSELL, S., WILSON, N., KLUGE, M. G., RYAN, A., PAUL, C. L., SPRATT, N. J., LEVI, C. R. & WALKER, F. R. 2023. TACTICS VR Stroke Telehealth Virtual Reality Training for Health Care Professionals Involved in Stroke Management at Telestroke Spoke Hospitals: Module Design and Implementation Study. *JMIR Serious Games*, 11, e43416.
- MARTINEZ-MILLANA, A., BAYO-MONTON, J. L., LIZONDO, A., FERNANDEZ-LLATAS, C. & TRAVER, V. 2016. Evaluation of Google Glass Technical Limitations on Their Integration in Medical Systems. *Sensors (Basel)*, 16.
- MAYRING, P. 2015. *Qualitative Inhaltsanalyse*, 69 469 Weinheim, Beltz Verlagsgruppe.
- MCPEAKE, J., BATESON, M. & O'NEILL, A. 2014. Electronic surveys: how to maximise success. *Nurse Res*, 21, 24–6.
- MICK, D. G. 1996. Are Studies of Dark Side Variables Confounded by Socially Desirable Responding? The Case of Materialism. *Journal of Consumer Research*, 23, 106–119.
- MICROSOFT. 2024. *HoloLens (1st gen) hardware* [Online]. Microsoft. Available: <https://learn.microsoft.com/en-us/hololens/hololens1-hardware> [Accessed 22.10.2024 2024].
- MILGRAM, P., TAKEMURA, H., UTSUMI, A. & KISHINO, F. 1995. *Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum*, SPIE.
- MORO, C., ŠTROMBERGA, Z., RAIKOS, A. & STIRLING, A. 2017. The effectiveness of virtual and augmented reality in health sciences and medical anatomy. *Anat Sci Educ*, 10, 549–559.
- MORSCHIED, Y. P. & POUESSEL, F. 2023. Simulatoren und andere Hilfsmittel in der orthopädisch-unfallchirurgischen Weiterbildung. *Die Orthopädie*, 52, 539–546.
- MöSER, K. A. B., A. 2010. *Techniknostalgie und Retrotechnologie*, Karlsruhe, KIT Scientific Publishing.
- MUJBER, T. S., SZECSI, T. & HASHMI, M. S. J. 2004. Virtual reality applications in manufacturing process simulation. *Journal of Materials Processing Technology*, 155-156, 1834–1838.

- NADERIFAR, M., GOLI, H. & GHALJAIE, F. 2017. Snowball Sampling: A Purposeful Method of Sampling in Qualitative Research. *Strides in Development of Medical Education*, 14, –.
- NIKISHINA, E. & PRIPUZOVA, N. 2022. Institutional Trust as a Factor in Attitudes Toward New Technologies. *Journal of Institutional Studies*, 14, 022–035.
- PASKA, M. & BUDNIK, K. 2023. Trust as a participant in the adaptation of technological changes. *Scientific Papers of Silesian University of Technology. Organization and Management Series*, 2023, 383–391.
- PETERSEN, W., HEES, T. & OHDE, J. 2021. [Current status of virtual simulators for surgical training in orthopedics and trauma surgery]. 34, 94–102.
- PRZYBORSKI, A. & WOHLRAB-SAHR, M. 2013. *Qualitative Sozialforschung: Ein Arbeitsbuch*.
- RADENKOVIC, M. 2005. Novel infrastructures for supporting mixed-reality experiences. *IEEE MultiMedia*, 12, 12–19.
- RÄDIKER, S. 2025. Qualitative Inhaltsanalyse: Eine flexible Methode zur Erforschung interprofessioneller Bildung und Zusammenarbeit. In: WALKENHORST, U. & FISCHER, M. (eds.) *Interprofessionelle Bildung für die Gesundheitsversorgung*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- REBOL, M., PIETROSZEK, K., RANNIGER, C., HOOD, C., RUTENBERG, A., SIKKA, N. & GUETL, C. *Collaborative System Design of Mixed Reality Communication for Medical Training*.
- RHEE, T., PETIKAM, L., ALLEN, B. & CHALMERS, A. 2017. MR360: Mixed Reality Rendering for 360° Panoramic Videos. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 23, 1379–1388.
- ROBERTS, J., LAUGHLIN, J. & WEDELL, D. 1999. Validity Issues in the Likert and Thurstone Approaches to Attitude Measurement. *Educational and Psychological Measurement - EDUC PSYCHOL MEAS*, 59, 211–233.
- ROBINSON, A. R., 3RD, GRAVENSTEIN, N., COOPER, L. A., LIZDAS, D., LURIA, I. & LAMPOTANG, S. 2014. A mixed-reality part-task trainer for subclavian venous access. *Simul Healthc*, 9, 56–64.
- SAJU, S., BABU, A., KUMAR, A. S., JOHN, T. & VARGHESE, T. 2022. Augmented Reality VS Virtual Reality. *International Journal of Engineering Technology and Management Sciences*
- SANCAK SERT, Z. & PANIERI, G. 2023. Functions of senses in learning. *Septentrio Educational*, 11–13.
- SAPPENFIELD, J. W., SMITH, W. B., COOPER, L. A., LIZDAS, D., GONSALVES, D. B., GRAVENSTEIN, N., LAMPOTANG, S. & ROBINSON, A. R., 3RD 2018. Visualization Improves Supraclavicular Access to the Subclavian Vein in a Mixed Reality Simulator. *Anesth Analg*, 127, 83–89.
- SCHÜTTPELZ-BRAUNS, K. & SCHUBERT, S. 2008. Qualitätssicherung von Multiple-Choice-Prüfungen.
- SCHWARZ, H., REVILLA, M. AND WEBER, W. 2020. Memory Effects in Repeated Survey Questions: Reviving the Empirical Investigation of the Independent Measurements Assumption.
- SIKSTRÖM, S., PÅLSSON HÖÖK, A. & KJELL, O. 2023. Precise language responses versus easy rating scales-Comparing respondents' views with clinicians' belief of the respondent's views. *PLoS One*, 18, e0267995.
- SLACK, M. K. & DRAUGALIS, J. R., JR. 2001. Establishing the internal and external validity of experimental studies. *American Journal of Health-System Pharmacy*, 58, 2173–2181.

- SMITH, A. H. 1949. *Mushrooms In Their Natural Habitat* [Online]. Available: <http://scarc.library.oregonstate.edu/omeka/items/show/1791>. [Accessed 22.09.2025 2025].
- SMITH, M. G., WITTE, M., ROCHA, S. & BASNER, M. 2019. Effectiveness of incentives and follow-up on increasing survey response rates and participation in field studies. *BMC Med Res Methodol*, 19, 230.
- SOFAER, S. 1999. Qualitative methods: what are they and why use them? *Health Serv Res*, 34, 1101–18.
- STATISTISCHES-BUNDESAMT. 2023. *Anzahl der Studierenden im Fach Humanmedizin in Deutschland nach Geschlecht in den Wintersemestern von 2010/2011 bis 2022/2023* [Online]. Statista GmbH. Available: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/200758/umfrage/entwicklung-der-anzahl-der-medizinstudenten/> [Accessed 09.04.2023].
- STEFAN, P., PFANDLER, M., WUCHERER, P., HABERT, S., FÜRMETZ, J., WEIDERT, S., EULER, E., ECK, U., LAZAROVICI, M., WEIGL, M. & NAVAB, N. 2018. [Team training and assessment in mixed reality-based simulated operating room : Current state of research in the field of simulation in spine surgery exemplified by the ATMEOS project]. *Unfallchirurg*, 121, 271–277.
- STEUTEN, L., VALLEJO-TORRES, L., YOUNG, T. & BUXTON, M. 2008. Transferability of economic evaluations of medical technologies: a new technology for orthopedic surgery. *Expert Rev Med Devices*, 5, 329–36.
- SUTHERLAND, I. E. 1968. A head-mounted three dimensional display. *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I*. San Francisco, California: Association for Computing Machinery.
- TAN, C. T., LEONG, T. W., SHEN, S., DUBRAVS, C. & SI, C. 2015. Exploring Gameplay Experiences on the Oculus Rift. *Proceedings of the 2015 Annual Symposium on Computer-Human Interaction in Play*. <conf-loc>, <city>London</city>, <country>United Kingdom</country>, </conf-loc>: Association for Computing Machinery.
- TENNY, S., BRANNAN, J. M. & BRANNAN, G. D. 2025. Qualitative Study. *StatPearls*. Treasure Island (FL): StatPearls Publishing
- Copyright © 2025, StatPearls Publishing LLC.
- TEPPER, O. M., RUDY, H. L., LEFKOWITZ, A., WEIMER, K. A., MARKS, S. M., STERN, C. S. & GARFEIN, E. S. 2017. Mixed Reality with HoloLens: Where Virtual Reality Meets Augmented Reality in the Operating Room. *Plast Reconstr Surg*, 140, 1066–1070.
- VERVOORN, M. T., WULFSE, M., VAN DOORMAAL, T. P. C., RUURDA, J. P., VAN DER KAAIJ, N. P. & DE HEER, L. M. 2023. Mixed Reality in Modern Surgical and Interventional Practice: Narrative Review of the Literature. *JMIR Serious Games*, 11, e41297.
- VIVEIROS, L. C. 2019. *Augmented Reality and its Aspects: A Case Study for Heating Systems*. Instituto Politecnico de Braganca (Portugal).
- WADE, N. J. 2012. Wheatstone and the origins of moving stereoscopic images. *Perception*, 41, 901–24.
- WALTZ, S., HAHN, A. & STEPHANI, U. 1997. Epileptische Anfälle bei Bildschirmspielen. *Monatsschrift Kinderheilkunde*, 145, 845–849.
- WANG, S., PARSONS, M., STONE-MCLEAN, J., ROGERS, P., BOYD, S., HOOVER, K., MERUVIA-PASTOR, O., GONG, M. & SMITH, A. 2017. Augmented Reality as a Telemedicine Platform for Remote Procedural Training. *Sensors (Basel)*, 17.
- WEIß, C. 2010. *Basiswissen Medizinische Statistik*, Springer Berlin Heidelberg.

- WILKAT, M., KARNATZ, N., SCHRADER, F., SCHORN, L., LOMMEN, J., PARVIZ, A., MöLLMANN, H. L. & RANA, M. 2023a. Usage of Object Matching Algorithms Combined with Mixed Reality for Enhanced Decision Making in Orbital Reconstruction-A Technical Note. *J Pers Med*, 13.
- WILKAT, M., LIU, S., SCHWERTER, M., SCHRADER, F., SAIGO, L., KARNATZ, N., KÜBLER, N. R. & RANA, M. 2023b. A New Approach to Virtual Occlusion in Orthognathic Surgery Planning Using Mixed Reality-A Technical Note and Review of the Literature. *J Pers Med*, 13.
- WU, X., LIU, R., YU, J., XU, S., YANG, C., SHAO, Z., YANG, S. & YE, Z. 2018. Mixed Reality Technology-Assisted Orthopedics Surgery Navigation. *Surg Innov*, 25, 304–305.
- YANG, R., LI, C., TU, P., AHMED, A., JI, T. & CHEN, X. 2021. Development and Application of Digital Maxillofacial Surgery System Based on Mixed Reality Technology. *Front Surg*, 8, 719985.
- ZAMMIT, C., CALLEJA-AGIUS, J. & AZZOPARDI, E. 2022. Augmented reality for teaching anatomy. *Clin Anat*, 35, 824–827.
- ZARI, G., CONDINO, S., CUTOLO, F. & FERRARI, V. 2023. Magic Leap 1 versus Microsoft HoloLens 2 for the Visualization of 3D Content Obtained from Radiological Images. *Sensors (Basel)*, 23.
- ZIKAS, P., BACHLITZANAKIS, V., PAPAETHYMIOU, M. & PAPAGIANNAKIS, G. A Mobile, AR Inside-Out Positional Tracking Algorithm, (MARIOPOT), Suitable for Modern, Affordable Cardboard-Style VR HMDs. *In: IOANNIDES, M., FINK, E., MOROPOULOU, A., HAGEDORN-SAUPE, M., FRESA, A., LIESTØL, G., RAJCIC, V. & GRUSSENMEYER, P., eds. Digital Heritage. Progress in Cultural Heritage: Documentation, Preservation, and Protection, 2016// 2016 Cham. Springer International Publishing, 257–268.*

6 Anhang

6.1 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung einer Mixed Reality-Anwendung von Nutzern in derselben physischen Umgebung (grau) mit verschiedenen räumlichen Perspektiven desselben virtuellen 3D-Objekts (grün)	1
Abb. 2: Schematische Darstellung des Realitäts-Virtualitäts-Kontinuum angelehnt an Milgram et al. (1995) (Milgram et al., 1995)	2
Abb. 3: Historisches Beispiel für ein Stereobetrachtungsgerät aus dem 20. Jahrhundert (Hoffmann, 2002)	3
Abb. 4: Foto des View-Masters aus dem Jahr 1939 von der Firma Sawyer's Inc. (Portland, Oregon, USA) (Smith, 1949)	4
Abb. 5: Fotos des Head-Mounted-Devices von Ivan Sutherland (Sutherland, 1968)	5
Abb. 6: HoloLens, Microsoft Corporation (Redmond, Washington, USA), 1. Generation Head-Mounted-Display (Microsoft, 2024)	7
Abb. 7: Schematische Darstellung zur Abgrenzung von (a) realer Umgebung, (b) Virtual Reality (vollständige Immersion in eine digitale Welt), (c) Mixed Reality (Verschmelzung der realen mit virtuellen Elementen) sowie (d) Augmented Reality (Erweiterung der realen Umgebung durch digitale Inhalte) - Der Baum steht exemplarisch für ein reales Objekt, der Vogel für ein virtuelles Element	9
Abb. 8: Schematische Darstellung des zeitlichen Ablaufs der Studie (grau entspricht Phase 1/ oliv entspricht Phase 2)	14
Abb. 9: Beispielhafter Aufbau eines Items (Item 1) aus dem Pre-Fragebogen	21
Abb. 10: Darstellung der in der Studie verwendeten Hardware: (1) Head-Mounted-Display (HMD), (2) Rechenelement mit integriertem Akku (Lightpack), (3) Handcontroller	23
Abb. 11: Abbildung der im Forschungsvorhaben eingesetzten Hardware Magic Leap One im Anwendungskontext. Zu sehen sind: (1) Head-Mounted-Display, (2) Lightpack, (3) Handcontroller; getragen von einer Versuchsperson zur Demonstration des Systems	24
Abb. 12: (a) Bildschirmfoto aus der MR-Anwendung: Grafische Darstellung des menschlichen Schädels mit farblicher Markierung der einzelnen Knochen auf einem PC-Bildschirm (b) Sicht durch das Head-Mounted-Display eines Nutzers in einem realen Raum: Visualisierung des farblich markierten Schädels sowie eines grünen Lichtstrahls zur Objektsteuerung ausgehend vom Handcontroller	25
Abb. 13: Ansicht der Mixed Reality-Anwendung aus der Perspektive eines Anwenders mittels Head-Mounted-Display. Dargestellt ist das virtuelle Schädelmodell in zerlegter Form, bestehend aus farblich markierten Einzelknochen, visualisiert im realen Raum	26
Abb. 14: Ansicht über ein Head-Mounted-Display mit Visualisierung des farblich segmentierten Schädelmodells im realen Raum. Ein grüner Lichtstrahl vom Handcontroller dient der Objektauswahl. Rechtsseitig sind farblich korrespondierende Annotationen und anatomischen Informationen dargestellt	27
Abb. 15: Darstellung eines Teils des Lernskripts. Darstellung des menschlichen Schädels angelehnt an das Schädel-Modell des Herstellers Erler-Zimmer GmbH (Lauf, Deutschland) (Erler-Zimmer, 2025). Die Schädelknochen sind farblich markiert und im rechten Teil mit Annotationen mit anatomischen Informationen dargestellt.	28
Abb. 16: Prozentuale Geschlechterverteilung bezogen auf die Gesamtstudienteilnehmer in der MR-Gruppe bzw. Kontrollgruppe	37
Abb. 17: Visualisierung der Anzahl positiver (ausgefüllt), negativer (gepunktet) und ausbleibender (gestrichelt) Meinungsveränderungen zwischen Pre- und Post-Fragebogen der MR-Gruppe (blau) und der Kontrollgruppe (lila)	45
Abb. 18 a-g: Boxplots zur Darstellung der Meinungsveränderung (numerische Differenz zwischen Pre- und Post-Befragung) in den Hauptkategorien im Vergleich zwischen MR-Gruppe (blau) und Kontrollgruppe (lila). Die Auswertung erfolgte mittels Mann-Whitney-U-Test. Statistisch signifikante p-Werte ($p < 0,05$) sind mit * gekennzeichnet. (a) Vorkenntnisse MR-Gruppe: $Q1 = -0,30$ / Median = $0,00$ / $Q3 = 0,33$; Kontrollgruppe: $Q1 = 0,00$ / Median = $0,33$ / $Q3 = 0,67$; $p = 0,064$; (b) Ausbildung MR-Gruppe: $Q1 = -0,25$ / Median = $0,25$ / $Q3 = 0,50$; Kontrollgruppe: $Q1 = 0,25$ / Median = $0,50$ / $Q3 = 1,00$; $p = 0,060$; (c) Visualisierung MR-Gruppe: $Q1 = -0,25$ / Median = $0,25$ / $Q3 = 0,75$; Kontrollgruppe: $Q1 = 0,25$ / Median = $0,50$ / $Q3 = 0,75$; $p = 0,087$; (d) Verständnis MR-Gruppe: $Q1 = -0,33$ / Median = $0,00$ / $Q3 = 0,67$; Kontrollgruppe: $Q1 = 0,00$ / Median = $0,67$ / $Q3 = 1,00$; p = 0,004* ; (e) Interaktion MR-Gruppe: $Q1 = -0,25$ / Median = $0,00$ / $Q3 = 0,25$; Kontrollgruppe: $Q1 = 0,00$ /	

Median = 0,25 / Q3 = 0,50; p = 0,192; (f) Technik MR-Gruppe: Q1 = -0,33 / Median = 0,33 / Q3 = 0,67; Kontrollgruppe: Q1 = 0,00 / Median = 0,33 / Q3 = 1,33; p = 0,086; (g) Kritik MR-Gruppe: Q1 = -0,80 / Median = -0,40 / Q3 = 0,00; Kontrollgruppe: Q1 = -0,40 / Median = -0,20 / Q3 = 0,00; p = 0,564	47
Abb. 19: Boxplot-Darstellung der Ergebnisse der Lernzielkontrolle in der MR- bzw. Kontrollgruppe; MR-Gruppe: Q1 = 7,0 / Median = 8,0 / Q3 = 8,5; Kontrollgruppe: Q1 = 8,0 / Median = 9,0 / Q3 = 10,0; p = 0,008*	48
Abb. 20: Anzahl der korrekt beantworteten Fragen in der Lernzielkontrolle für MR- und Kontrollgruppe in Prozent. Sortierung von Frage 1 bis 10. Sortierung nach MR-Gruppe (hellblau) und Kontrollgruppe (dunkellila).....	49

6.2 Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Zuordnung der Items zu den thematischen Kategorien	22
Tab. 2: Hierarchisches Kategoriensystem der Interviewergebnisse, gegliedert in Haupt-, Über-, Unter- und zweite Unterkategorien (kursiv eingerückt).....	36
Tab. 3: Verteilung der Teilnehmenden innerhalb der Subgruppen in MR- und Kontrollgruppe (in %). Die Angaben dienen der deskriptiven Charakterisierung der Stichprobe.....	38
Tab. 4: Quartilswerte (Q1, Median = Q2, Q3) der Likert-Skalen sowie Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests (U-, Z- und p-Werte) für alle Hauptkategorien im Pre- und Post-Fragebogen, getrennt nach MR- und Kontrollgruppe. Signifikante p-Werte (p<0,05) sind mit * gekennzeichnet	40
Tab. 5: Quartilswerte (Q1, Median = Q2, Q3) der Likert-Skalen sowie Ergebnisse der Mann-Whitney-U-Tests (U-, Z- und p-Werte) für die Items 12 und 17 im Pre- und Post-Fragebogen, getrennt nach MR- und Kontrollgruppe. Signifikante p-Werte (p<0,05) sind mit * gekennzeichnet	40
Tab. 6: Auswertung zu „Hindernissen“, „technischen Problemen“ und „Vorteilen der MR-Anwendung im Vergleich zum konventionellen Lernen“ basierend auf den offenen Fragen des Post-Fragebogens in kodierter Form in Anlehnung an die qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (Mayring, 2015).....	42
Tab. 7: Anzahl der positiven, negativen und unveränderten Meinungsveränderungen zwischen Pre- und Post-Befragung in den Hauptkategorien, getrennt nach MR- und Kontrollgruppe. Die Ergebnisse der Wilcoxon-Vorzeichen-Rang-Tests sind jeweils mit Z- und p-Werten angegeben. Signifikante p-Werte (p<0,05) sind mit * gekennzeichnet.	44

6.3 Zusatzmaterialien

6.3.1 Fragebogen (Pre-FB)

 Universitätsklinikum Düsseldorf	 hhu Heinrich Heine Universität Düsseldorf																		
Klinik für Mund-, Kiefer- und Plastische Gesichtschirurgie Zentrum für Operative Medizin II																			
Teilnehmer-ID: _____																			
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 30%;">Geschlecht</td> <td style="width: 35%; text-align: center;"> ☐ weiblich </td> <td style="width: 35%; text-align: center;"> ☐ männlich </td> </tr> </table>		Geschlecht	☐ weiblich	☐ männlich															
Geschlecht	☐ weiblich	☐ männlich																	
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2">In welchem Semester befinden Sie sich aktuell?</td> </tr> <tr> <td style="width: 60%;">Semester 6-7</td> <td style="width: 40%; text-align: center;"> ☐ </td> </tr> <tr> <td>Semester 7-8</td> <td style="text-align: center;"> ☐ </td> </tr> <tr> <td>Semester 8-9</td> <td style="text-align: center;"> ☐ </td> </tr> <tr> <td>Semester 10<</td> <td style="text-align: center;"> ☐ </td> </tr> </table>		In welchem Semester befinden Sie sich aktuell?		Semester 6-7	☐	Semester 7-8	☐	Semester 8-9	☐	Semester 10<	☐								
In welchem Semester befinden Sie sich aktuell?																			
Semester 6-7	☐																		
Semester 7-8	☐																		
Semester 8-9	☐																		
Semester 10<	☐																		
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="7">1. Ich nutze häufig digitale Medien.</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%;">Trifft voll zu</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 15%;">Trifft gar nicht zu</td> </tr> </table>		1. Ich nutze häufig digitale Medien.							Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu			
1. Ich nutze häufig digitale Medien.																			
Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="6">2. Wie häufig haben Sie Mixed-Reality -Technik vor Beginn der Studie genutzt?</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%;">nie</td> <td style="width: 10%;">< 2</td> <td style="width: 10%;">2-5</td> <td style="width: 10%;">6-10</td> <td style="width: 10%;">> 10</td> <td></td> </tr> <tr> <td style="text-align: center;"> ☐ </td> <td style="text-align: center;"> ☐ </td> <td style="text-align: center;"> ☐ </td> <td style="text-align: center;"> ☐ </td> <td style="text-align: center;"> ☐ </td> <td></td> </tr> </table>		2. Wie häufig haben Sie Mixed-Reality -Technik vor Beginn der Studie genutzt?						nie	< 2	2-5	6-10	> 10		☐	☐	☐	☐	☐	
2. Wie häufig haben Sie Mixed-Reality -Technik vor Beginn der Studie genutzt?																			
nie	< 2	2-5	6-10	> 10															
☐	☐	☐	☐	☐															
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="7">3. Die Mixed-Reality-Technik ist für die chirurgische Ausbildung interessant.</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%;">Trifft voll zu</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 15%;">Trifft gar nicht zu</td> </tr> </table>		3. Die Mixed-Reality-Technik ist für die chirurgische Ausbildung interessant.							Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu			
3. Die Mixed-Reality-Technik ist für die chirurgische Ausbildung interessant.																			
Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="7">4. Die Mixed-Reality-Technik erleichtert die Visualisierung von anatomischen Strukturen im Vergleich zur Darstellung auf dem 2D-Bildschirm.</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%;">Trifft voll zu</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 15%;">Trifft gar nicht zu</td> </tr> </table>		4. Die Mixed-Reality-Technik erleichtert die Visualisierung von anatomischen Strukturen im Vergleich zur Darstellung auf dem 2D-Bildschirm.							Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu			
4. Die Mixed-Reality-Technik erleichtert die Visualisierung von anatomischen Strukturen im Vergleich zur Darstellung auf dem 2D-Bildschirm.																			
Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="7">5. Der Einsatz der MR-Technologie ist unbedenklich möglich.</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%;">Trifft voll zu</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 15%;">Trifft gar nicht zu</td> </tr> </table>		5. Der Einsatz der MR-Technologie ist unbedenklich möglich.							Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu			
5. Der Einsatz der MR-Technologie ist unbedenklich möglich.																			
Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="7">6. Die Darstellungen mittels Mixed-Reality-Technik sind realistisch.</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%;">Trifft voll zu</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 15%;">Trifft gar nicht zu</td> </tr> </table>		6. Die Darstellungen mittels Mixed-Reality-Technik sind realistisch.							Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu			
6. Die Darstellungen mittels Mixed-Reality-Technik sind realistisch.																			
Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="7">7. Die Anregung mehrerer Sinne führt zu einem zum besseren Verständnis von Lerninhalten.</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%;">Trifft voll zu</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 15%;">Trifft gar nicht zu</td> </tr> </table>		7. Die Anregung mehrerer Sinne führt zu einem zum besseren Verständnis von Lerninhalten.							Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu			
7. Die Anregung mehrerer Sinne führt zu einem zum besseren Verständnis von Lerninhalten.																			
Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="7">8. Die Mixed-Reality-Technik erleichtert die Darstellung abstrakter Inhalte und Konzepte in der chirurgischen Ausbildung.</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%;">Trifft voll zu</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 15%;">Trifft gar nicht zu</td> </tr> </table>		8. Die Mixed-Reality-Technik erleichtert die Darstellung abstrakter Inhalte und Konzepte in der chirurgischen Ausbildung.							Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu			
8. Die Mixed-Reality-Technik erleichtert die Darstellung abstrakter Inhalte und Konzepte in der chirurgischen Ausbildung.																			
Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="7">9. Die Mixed-Reality-Technik ist zur Vermittlung von Kenntnissen geeignet.</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%;">Trifft voll zu</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 15%;">Trifft gar nicht zu</td> </tr> </table>		9. Die Mixed-Reality-Technik ist zur Vermittlung von Kenntnissen geeignet.							Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu			
9. Die Mixed-Reality-Technik ist zur Vermittlung von Kenntnissen geeignet.																			
Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu												
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="7">10. Im Gegensatz zu klassischen Lernmethoden vermittelt die Mixed-Reality-Technik die Fakten effizienter.</td> </tr> <tr> <td style="width: 15%;">Trifft voll zu</td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 10%; text-align: center;"> ☐ </td> <td style="width: 15%;">Trifft gar nicht zu</td> </tr> </table>		10. Im Gegensatz zu klassischen Lernmethoden vermittelt die Mixed-Reality-Technik die Fakten effizienter.							Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu			
10. Im Gegensatz zu klassischen Lernmethoden vermittelt die Mixed-Reality-Technik die Fakten effizienter.																			
Trifft voll zu	☐	☐	☐	☐	☐	☐	Trifft gar nicht zu												

11. Die Interaktion mit echten Menschen, in der realen Welt, ist hilfreich.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
12. Eine dreidimensionale Darstellung führt zu effizienterem Lernen im Vergleich zu zweidimensionalen Abbildungen.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
13. Die Mixed-Reality-Technik ist nicht ausgereift.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
14. Menschen lernen besser durch Interaktion.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
15. Das Tragen der Mixed-Reality-Brillen stelle ich mir komfortabel vor.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
16. Die Mixed-Reality-Technik ist hilfreich bei der Vermittlung chirurgischer Fähigkeiten.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
17. Den Umgang mit der Hardware der Mixed-Reality-Technik stelle ich mir leicht vor.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
18. Die Mixed-Reality-Technik verbessert die Zusammenarbeit.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
19. Ich denke die Visualisierungen werden mir das Gefühl geben, dass ich Teil der virtuellen Umgebung bin.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
20. Bei der Nutzung der Mixed-Reality-Systemen können sich die Teilnehmer aktiv beteiligen, anstatt passiv auf 2D-Displays zu schauen.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
21. Der technische Aufwand der Mixed-Reality-Technik ist angemessen.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
22. Der Zeitaufwand bei der Nutzung der Mixed-Reality-Technik ist angemessen.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
23. Ich habe Bedenken bezüglich des Datenschutzes.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu
24. Die Einführung der Mixed-Reality-Technik in die Medizin wird schwierig sein.	Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐	Trifft gar nicht zu

25. Die Einführung der Mixed-Reality-Technik in die Medizin ist eine Verbesserung.	
Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐
	Trifft gar nicht zu
26. Die Funktionen in den Mixed-Reality-Anwendungen sind vermutlich sehr komplex.	
Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐
	Trifft gar nicht zu
27. Die Mixed-Reality-Technik stellt hohe Ansprüche an die digitale Infrastruktur.	
Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐
	Trifft gar nicht zu
28. Die Unterschiede zwischen Virtual-Reality und Mixed-Reality sind mir bekannt.	
Trifft voll zu	☐ ☐ ☐ ☐ ☐
	Trifft gar nicht zu

6.3.2 Leitfragenkatalog

Leitfragen	Inhaltstrukturierung	Konkrete Fragen	Aufrechterhaltungsfragen
Können Sie mir Situationen schildern, in denen Sie bisher mit Mixed Reality in Ihrem Alltag in Kontakt gekommen sind.	1. Print-Medien 2. Rundfunkmedien 3. Online-Medien 4. Studium 5. Persönliches Umfeld	Was genau haben Sie da gemacht? Mit wem? Wie lange? Was war Ihr Motiv dabei? Wie wichtig war Ihnen der Aspekt mehr über diese Technologie zu erfahren? Waren andere Aspekte für Sie auch wichtig? Wurde Ihr Interesse geweckt? Welche Vorstellung hatten Sie von der Technologie zu diesem Zeitpunkt?	Wie hat sich das genau abgespielt? Schildern Sie mir die Situation im Detail? Welche Meinung hatten Sie zu diesem Zeitpunkt?
In welchen Zusammenhang ist Ihnen der Begriff „Mixed Reality“ im Alltag bereits untergekommen?	1. Virtual Reality 2. Augmented Reality 3. 3D-Scans 4. Multi-User-Anwendung	Haben Sie eine genaue Vorstellung davon? Können Sie die unterschiedlichen Technologien beschreiben? Erläutern Sie eine der Situationen?	Wie hat sich das genau abgespielt? Welche Aspekte meinen Sie da genau? Können Sie mir das noch ein bisschen genauer erklären?
Welche Einsatzgebiete können Sie sich in Bezug auf Mixed Reality in der Medizin vorstellen?	1. Lehre 2. Ausbildung 3. Interdisziplinäre Kommunikation 4. Dokumentation	Wie soll der zeitliche Rahmen sein? Welche Erwartungen haben Sie an die Technologie? Was wünschen Sie sich konkret als Unterstützungsmaßnahmen? Wieso? Wie soll das genau ablaufen/wie stellen Sie sich das vor? Wer soll mitwirken? Was glauben Sie ist an dieser Form der Unterstützung so besonders hilfreich? Glauben Sie, dass es möglich ist das hier umzusetzen?	Können Sie mir dafür ein Beispiel nennen? Können Sie mir das noch ein bisschen genauer erklären? Können Sie das noch spezifizieren? Können Sie mir das noch genauer begründen? Fallen Ihnen noch weitere Aspekte ein?
Welche Vor- oder Nachteile sehen Sie beim Einsatz von Mixed Reality in der Medizin?	1. Praxisbezug 2. Digitale Infrastruktur 3. Akzeptanz neuer Technologien 4. Kosten	Welche moralischen/ethischen Bedenken haben Sie? Was kritisieren Sie an der neuen Technologie? Was überwiegt in Bezug auf die neuen Technologien?	Haben Sie konkrete Vorstellungen? Können Sie mir das etwas genauer beschreiben? Können Sie hier noch etwas genauer ins Detail gehen? Wie meinen Sie das?

Danksagung

Zunächst möchte ich mich für die unermüdliche Anleitung, Ermutigung und fachliche Expertise während des gesamten Forschungsprozesses bei Prof. Dr. Dr. Rana, Prof. Dr. Muhammad und Dr. Dr. Karnatz bedanken.

Ein besonderer Dank gilt auch Dr. Shufang Liu sowie Dr. Michael Schwertferger für ihre hervorragende Unterstützung bei der fachlichen Entwicklung, Planung und Umsetzung des Forschungsvorhabens.

Ein besonderer Dank gebührt außerdem meiner liebevollen Ehefrau. Ihre grenzenlose Unterstützung, Geduld und Zuspruch haben mir den Rücken gestärkt und mich stets dazu ermutigt, meinen Traum zu verfolgen.

Ich möchte auch meiner Familie für die Unterstützung während meines gesamten Studiums danken. Ihre Bereitschaft, mir zur Seite zu stehen, hat mir geholfen immer mein Bestes zu geben.

Abschließend möchte ich allen danken, die dazu beigetragen haben, dass diese Arbeit entstehen konnte.

Mein aufrichtiger Dank gilt auch den Institutionen, welche diese Forschungsarbeit unterstützt haben. Ihre Förderung hat es ermöglicht, meine Forschung zu verwirklichen und einen Beitrag zum Wissensfortschritt zu leisten.