



OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG



FAKULTÄT FÜR
INFORMATIK

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fakultät für Informatik

Institut für Simulation und Graphik

Abschlussarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science (M.Sc.)

Augmented Reality-Konzepte zur Verbesserung der Distanzeinschätzung für die Navigation von chirurgischen Instrumenten

Verfasser:

Gerd Schmidt

Erstgutachter:

Jun.-Prof. Dr. Christian Hansen

Zweitgutachter:

Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim

Betreuer:

M.Sc. Florian Heinrich

Magdeburg, 11.03.2019

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Masterarbeit selbstständig und ausschließlich unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form weder einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt oder noch anderweitig veröffentlicht.

Gerd Schmidt

Ort, Datum

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung

Kurzfassung	3
1 Einleitung	7
1.1 Motivation	7
1.2 Ziele	8
1.3 Herangehensweise	9
2 Stand der Technik	11
2.1 Augmented Reality	11
2.1.1 Arten Augmented Reality	11
2.1.2 Tracking	14
2.2 Microsoft HoloLens	18
2.2.1 Technische Eigenschaften	19
2.2.2 Medizinische Anwendungen	20
2.3 Verwandte Arbeiten	21
2.3.1 Intraoperative Distanzvisualisierungen	21
2.3.2 Vorarbeiten	26
2.4 Zusammenfassung	30
3 Konzeption	31
3.1 Anforderungsanalyse	31
3.1.1 Rahmenbedingung	31
3.1.2 Funktionale und Nichtfunktionale Anforderungen	32
3.2 Grundlegender Anwendungsaufbau	35
3.3 Visualisierungskonzepte	35
3.3.1 Direkte Navigationswarnungen	35
3.3.2 Indirekte Navigationswarnungen	43
3.4 Diskussion	44
3.5 Zusammenfassung	46
4 Realisierung	47
4.1 Technischer Aufbau	47
4.1.1 Programmablauf	48
4.1.2 Registrierung	50
4.2 Visualisierung der Navigationskonzepte	53
4.3 Zusammenfassung	57
5 Evaluation	61
5.1 Vorevaluation	61

5.2	Qualitative Evaluation	62
5.2.1	Ergebnisse	63
5.2.2	Diskussion	66
5.3	Quantitative Evaluation	67
5.3.1	Ablauf	68
5.3.2	Ergebnisse	72
5.3.3	Diskussion	76
5.4	Auswertung der Anforderungsanalyse	80
6	Schlussfolgerungen	83
6.1	Zusammenfassung	83
6.2	Fazit und Ausblick	84
	Literaturverzeichnis	87
	Appendices	91

Kurzfassung

In der bildgestützten Chirurgie stehen Ärzte vor der anspruchsvollen Aufgabe, die Distanz und räumliche Verhältnisse zwischen medizinischen Instrumenten und umliegenden Risikostrukturen korrekt einzuschätzen.

Unter Verwendung von Augmented Reality können Navigationshinweise mit geeigneten Visualisierungen direkt im Sichtfeld des operierenden Arztes eingeblendet und die Hand-Auge-Koordination unterstützt werden. Dazu wurden innerhalb dieser Arbeit verschiedene Instrument-basierte Visualisierungen erarbeitet, um Distanzen und räumliche Verhältnisse besser einschätzen zu können. Diese wurden anschließend im Rahmen einer prototypischen Augmented Reality Anwendung umgesetzt.

In einer Evaluation konnten zwei Konzepte identifiziert werden, mit denen eine Maximierung des Abstands zu Risikostrukturen und eine Verminderung von Kollisionen möglich sind. Weiterhin konnte gezeigt werden, dass die entwickelten Konzepte grundlegende Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit erfüllen. Eine kürzere Bearbeitungszeit konnte im Rahmen dieser Arbeit nur bedingt erreicht werden. Der entwickelte Augmented Reality Prototyp zeigt erste Verbesserungsansätze auf, die den Grundstein legen für weitere Untersuchungen mit ausgereifterer Hardware.

Abstract

The assessment of distances and spatial relationships between medical instruments and surrounding risk structures is a challenging task for a surgeon in image-guided surgery. Using augmented reality, navigation instructions with suitable visualizations can be displayed directly in the surgeon's field of view to support a better hand-eye coordination. For this purpose, various instrument-based visualizations were developed within this thesis in order to be able to better assess distances and spatial relations. These were then implemented as part of a prototype augmented reality application.

In an evaluation two concepts could be identified which allow a maximization of the distance to risk structures and a reduction of collisions. Furthermore, it could be shown that the developed concepts fulfil basic requirements for usability, though a shorter processing time could only be achieved to a limited extent within the scope of this work. The developed augmented reality prototype shows first improvement approaches, which set a base for further investigations with more sophisticated hardware.

1 Einleitung

1.1 Motivation

Bei der Durchführung von bildgestützter Chirurgie können im Vergleich zu offenen Eingriffen weniger Verletzungen am gesunden Gewebe erzeugt werden. Dies führt zu weniger Komplikationen, einem geringeren Infektionsrisiko, geringer Sterblichkeit und einer verkürzten Genesungszeit [11]. Zur Durchführung bildgestützter Eingriffe werden Monitore im Operationsaal aufgestellt, die verfügbare Bildinformationen anzeigen. Diese können präoperative Informationen, welche im Vorfeld durch entsprechende Bildgebungsverfahren erzeugt wurden enthalten. Die Qualität eines chirurgischen Ergebnisses erhöht sich unter Verwendung bildgestützter Verfahren, wobei eine Trennung zwischen auf einem Monitor dargestellten Informationen und dem eigentlichen Arbeitsbereich zu einer erhöhten geistigen Belastung führt und zeitliches Stressempfinden verstärkt [36]. Weiterhin zeigt sich, dass bei der Verwendung von bildgeführter Chirurgie, Probleme durch fehlende Tiefenwahrnehmung oder Einschränkungen hinsichtlich der Hand-Auge-Koordination entstehen können [63][9]. Der Zusammenhang zwischen in Bilder dargestellten Informationen ist nicht immer eindeutig. Dies kann zu einer fehlerhaften Einschätzung der Position und Orientierung von chirurgischen Instrumenten führen und die Sicherheit von Patienten gefährden [62][9]. Informationen über den Abstand zwischen medizinischen Instrumenten und umliegenden Strukturen sind für einen Arzt wichtig, können dennoch nicht immer korrekt eingeschätzt werden [14].

In Vorarbeiten von Heinrich et al. wurden verschiedene Konzepte zur Verbesserung der räumlichen Wahrnehmung von Instrumenten und umliegenden Strukturen innerhalb von 3D-Darstellungen entwickelt und untersucht [25]. Die Konzepte konzentrierten sich auf die Hinzugabe von visuellen Hinweisen durch farbkodierte Linien zwischen Instrument und umliegende Strukturen. In einer Nutzerstudie konnte eine Verbesserung der Entfernungsbeurteilung und der räumlichen Wahrnehmung von chirurgischen Instrumenten in Risikostrukturen gezeigt werden. Die Arbeit beschränkt sich in erster Linie auf eine monitorgestützte Darstellung. Mögliche Probleme hinsichtlich Hand-Auge-Koordination sind dadurch noch nicht gelöst.

Gegenwärtige Entwicklungen im Bereich Augmented Reality versprechen neue Möglichkeiten Informationen gezielt dort darzustellen wo sie benötigt werden. Aktuelle Hardware wie die *Microsoft HoloLens* [18], die *Meta 2* [37] oder die *Magic Leap One* [35] versprechen ein breites Einsatzspektrum. So können 2D und 3D Informationen, anstatt auf einem Monitor, direkt im Sichtfeld des Nutzers eingeblendet werden. In einem ersten Schritt könnten virtuelle Monitore an geeignetere Positionen platziert werden, die mit realen Monitoren nicht zu erreichen sind [19]. Weiterhin könnten auch komplexere Informationen wie rekonstruierte 3D-Datensätze in intraoperativen Szenarien an geeigneten Positionen dargestellt

werden [50]. Unter Verwendung von Augmented Reality kann der Abstand und die räumlichen Beziehungen zwischen Objekten nicht immer direkt eingeschätzt werden [29]. Zur Verbesserung der räumlichen Wahrnehmung kann für Augmented Reality die Arbeit von Heinrich et al. übertragen und Informationen an medizinischen Instrumenten eingeblendet werden, um bei der Navigation, oder bei Überwachung eines Sicherheitsabstands, zu unterstützen. Erste ähnliche Ansätze zur Unterstützung der Instrumentenführung mit Hilfe von Augmented Reality wurden in aktuellen Forschungsarbeiten getätigt [14] [2] [10].

Im Rahmen dieser Arbeit wird untersucht, ob sich eine Augmented Reality Unterstützung für eine Verbesserung in der Risikodistanzbeurteilung in der Navigation von chirurgischen Instrumenten eignet.

1.2 Ziele

Im Rahmen dieser Arbeit soll untersucht werden, ob sich eine Augmented Reality Unterstützung für eine Verbesserung in der Risikodistanzbeurteilung in der Navigation von chirurgischen Instrumenten eignet.

Dazu soll ein Prototyp entwickelt werden, der es ermöglicht Bewegungen von medizinischen Instrumenten zu verfolgen und diese durch Augmented Reality-Visualisierungen zu ergänzen. Im Fokus dieser Arbeit sollen Visualisierungskonzepte entwickelt und in die prototypische Anwendung integriert werden, mit denen ein Nutzer Risikodistanzen besser einschätzen kann. Zur Darstellung soll die Microsoft HoloLens verwendet werden.

Weiterhin sollen die entwickelten Konzepte in einer Nutzerstudie untereinander und mit bereits bestehenden Konzepten verglichen und evaluiert werden.

1.3 Herangehensweise

Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über einzelne Kapitel und dazugehörige Themengebiete gegeben.

Kapitel 2: *Stand der Technik*

Dieses Kapitel zeigt die benötigten Grundlagen zum Verständnis dieser Arbeit auf. Dazu gehören die Klärung von Grundlagenbegriffen. Weiterhin werden aktuelle und verwandte Forschungsergebnisse aufgezeigt.

Kapitel 3: *Konzeption*

Das Kapitel Konzeption beginnt mit einer Anforderungsanalyse. In der zweiten Hälfte werden mögliche Konzepte ausgearbeitet und diskutiert.

Kapitel 4: *Realisierung*

In diesem Kapitel wird der Entwicklungsprozess von den zuvor vorgestellten Konzepten und des Prototypen dargestellt. Zudem werden Limitationen aufgezeigt.

Kapitel 5: *Evaluation*

Im Rahmen dieses Kapitels sollen die entwickelten Konzepte evaluiert werden. Dazu sollen zunächst Parameter in einer Vorstudie zur Finalisierung der Konzepte festgelegt werden. Anschließend wird eine qualitative und eine quantitative Studie durchgeführt und im Anschluss die Ergebnisse diskutiert.

Kapitel 6: *Schlussfolgerungen*

Im abschließenden Kapitel werden alle in dieser Arbeit dargestellten Aspekte zusammengefasst und ein Ausblick in mögliche Folgearbeiten dargestellt.

2 Stand der Technik

Bevor Anforderungen und Konzepte aufgestellt und ausgearbeitet werden können, müssen zuerst benötigte Grundlagen ausgearbeitet werden. Anschließend werden verwandte Arbeiten hinsichtlich des Einsatzes von Augmented Reality im medizinischen Kontext und bereits untersuchte Augmented Reality Visualisierungsansätze dargestellt. Abschließend werden eigene Vorarbeiten diskutiert.

2.1 Augmented Reality

Augmented Reality wird in der Literatur von Milgram [41] mit Hilfe des Mixed-Reality-Kontinuums (siehe Abbildung 2.1) definiert. Aufgeteilt wird dies in vier Kernkonzepte. An den Außenseiten befinden sich zum einem die Realität, welche komplett ohne digitale/virtuelle Inhalte dargestellt wird und die Virtuelle Realität (nachfolgend VR), welche allumfassend aus virtuellen Inhalten besteht. Dazwischen entsteht ein fließender Übergang zwischen den beiden letzten Kernkonzepten des Mixed-Reality-Kontinuums. Zum einem Augmented Reality (nachfolgend AR) und Augmented Virtuality (nachfolgend AV). AR besteht aus Elementen unserer Realität, welche durch virtuelle Inhalte ergänzt werden. AV besitzt einen verhältnismäßig größeren Anteil von virtuellen Inhalten als AR [41].

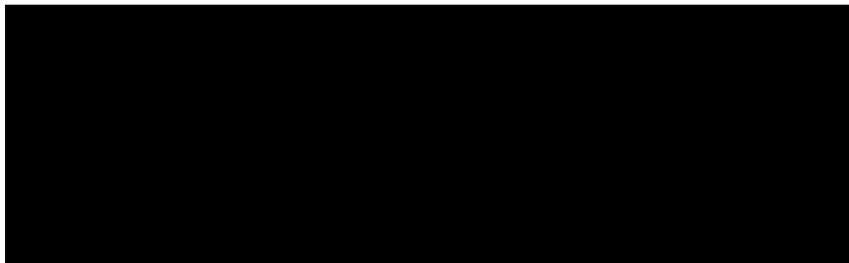


Abbildung 2.1: Mixed-Reality-Kontinuum nach Milgram et al..
Entnommen aus [41].

2.1.1 Arten Augmented Reality

Um AR zu ermöglichen, können verschiedene Ausgabemedien genutzt werden. In der Regel werden diese in drei Kategorien eingeteilt. Am verbreitetsten sind *Hand-Held-Displays* (zum Beispiel Smartphones und Tablets), *Monitor-Based-Displays* und *Head-Mounted-Displays* (kopfgetragene Geräte, nachfolgend als HMD abgekürzt) [3].

Für eine korrekte Darstellung muss für virtuelle Inhalte dieselbe Perspektive (Position, Orientierung, Skalierung) gewählt werden, wie für die dargestellten realen Inhalte.

Stimmt zusätzlich die Perspektive des im Display gezeigte Bild mit dem der Perspektive des Betrachters überein, wird dies als *Magic-Lens-Effekt* bezeichnet [22]. Mit Hilfe von *Magic-Lens-Filtern* können reale Inhalte, durch beispielsweise verborgene oder zusätzliche Informationen ergänzt werden [6]. Der Begriff Pose wird nachfolgend als Kombination der Begriffe Position und Orientierung verwendet. Neben der Bildausgabekategorie wird zusätzlich in der Art wie ein AR-Bild entsteht, zwischen verschiedenen Technologien unterschieden. Am verbreitetsten sind *Video-See-Through*, *Optical-See-Through* und *Projection-Based* Bildgenerierungsverfahren [22]. Nachfolgend wird jeweils zu jedem Verfahren eine kurze Erklärung inklusive Vor- und Nachteile aufgezeigt. Es existieren weitere Verfahren und Displaytypen, wie beispielsweise Retinal Displays, bei dem Bilder direkt auf die Retina des Auges projiziert werden [7]. Im Zuge dieser Arbeit wird ein Fokus auf die zuvor genannten Verfahren gesetzt.

Video-See-Through

Video-See-Through Geräte zeichnen die reale Welt mit Hilfe einer oder mehreren Kameras auf, fügen nachträglich virtuelle Inhalte dem Bild hinzu und zeigen das Gesamtergebnis dem Betrachter auf einem Display. Abbildung 2.2 (a) stellt eine Video-See-Through Anwendung mit einem Hand-Held-Display dar. Nachfolgend werden Vor- und Nachteile dieser Technik ausgearbeitet [22] [61] [7].

Vorteile:

- Virtuelle Objekte können beliebig positioniert werden.
- Helle und dunkle Virtuelle Objekte können dargestellt werden.
- Virtuelle Schatten für Tiefenhinweise können dargestellt werden.
- Virtuelle und reale Inhalte können synchronisiert werden.
- Reales Bild kann umfassend manipuliert werden.

Nachteile:

- Auflösung von Kamera und Display beeinflusst Darstellung der virtuellen Objekte und des realen Bildes.
- Field of View (virtueller/realer Anteil) ist abhängig vom Display.
- Realer und virtueller Anteil des Bildes ist von Latenz beeinflusst.

Optical-See-Through

Optical-See-Through-Geräte verwenden halb durchlässige Displays auf denen nur virtuelle Inhalte dargestellt werden. So entsteht durch die Überlagerung der realen Welt ein aus realem und virtuellem Anteil kombiniertes Bild. Abbildung 2.2 (b) stellt eine Optical-See-Through Anwendung mit einem HMD dar. Diese Vorgehensweise besitzt Vor- und Nachteile und wird nachfolgend aufgelistet: [22] [61] [7].

Vorteile:

- Virtuelle Objekte können beliebig positioniert werden
- Realer Anteil ist immer sichtbar und unabhängig von Latenz
- Realer Anteil ist immer sichtbar und unabhängig von der Displayauflösung
- Realer Anteil ist trotz Stromausfall/Schaden sichtbar

Nachteile:

- Dunkle Elemente werden transparent dargestellt
- Virtuelle Schatten für Tiefenhinweise können nicht dargestellt werden
- Field of View des virtuellen Inhalts ist begrenzt
- Virtuelle Inhalte erscheinen Teiltransparent
- Realer Anteil wird überlagert. Eine umfassende Manipulation ist nicht möglich.
- Abdunklung der Realität

Projection-Based Augmented Reality

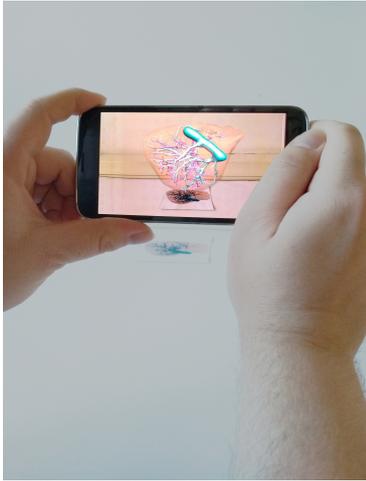
Bei dem Einsatz von Projection-Based AR werden virtuelle Inhalte auf eine Oberfläche mit Hilfe eines Projektor-Systems eingeblendet. Abbildung 2.2 (c) stellt einen Projection-Based AR Ansatz dar. Vor- und Nachteile werden nachfolgend aufgelistet [22] [61] [7].

Vorteile:

- Realer Anteil ist immer sichtbar und unabhängig von Latenz.
- Realer Anteil ist immer sichtbar und unabhängig von der Displayauflösung.
- Field of View des Nutzers ist nicht eingeschränkt
- Projektion auf einfachen Oberflächen und komplexen Strukturen möglich.

Nachteile:

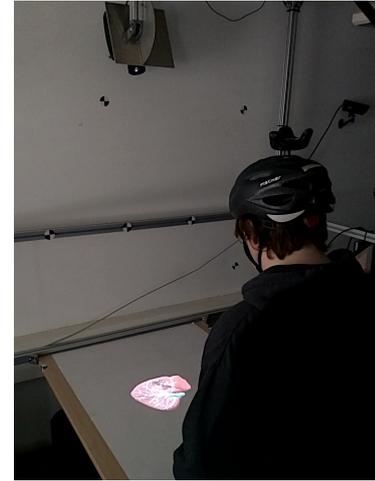
- Objekte können vollständig nur in der Projektionsfläche dargestellt werden.
- Dunkle Elemente werden transparent dargestellt.
- Virtuelle Schatten für Tiefenhinweise können nicht dargestellt werden.
- Verschattung durch andere Objekte (Mehrere Projektoren werden benötigt)
- Realer Anteil wird überlagert. Eine umfassende Manipulation ist nicht möglich.



(a) Video-See-Through AR als Hand-Held-Display



(b) Optical-See-Through AR als Head-Mounted-Displays



(c) Projection-Based AR

Abbildung 2.2: Die Abbildung zeigen verschieden Ausprägungen und Displayarten um AR umzusetzen.

2.1.2 Tracking

Neben der Kombination von realem Bild, virtuellem Bild und die korrekte Registrierung beider Inhalte, beschreibt Azuma die Echtzeitinteraktion als Kernaspekt von AR [3]. Durch Veränderung der Betrachterpose (beispielweise durch Bewegung mit einem HMD) muss ständig eine Aktualisierung der virtuellen Darstellung entsprechend der neuen Perspektive ermittelt werden. Weiterhin müssen Objekte oder Referenzpunkte im Raum erkannt werden, um virtuelle Inhalte an entsprechenden Punkten zu platzieren. Das Erkennen und Verfolgen von Objekten oder Referenzpunkten wird als Tracking bezeichnet [22]. Ein Trackingsystem wird genutzt, um die eigene Pose oder die Pose von Objekten zu bestimmen. Es existieren verschiedene Trackingverfahren für jeweils unterschiedliche Einsatzbereiche.

Optische Trackingverfahren

Nachfolgend wird zuerst ein Überblick über optische Trackingverfahren gegeben. Dazu zählen Infrarotlicht-, Merkmalsbasierte- und Markerbasierte- Tracking Verfahren. Diese lassen sich zusätzlich in Outside-In Verfahren und Inside-Out Verfahren unterteilen. Beim Outside-In Verfahren werden Kameras genutzt, die von außen auf eine Szene schauen und daraus Informationen zur Pose von Objekten ermitteln. Umgekehrt werden beim Inside-Out-Verfahren Kameras an ein Objekt befestigt und die Pose anhand der Umgebung ermittelt.

Infrarotlicht Tracking

Infrarotlicht (nachfolgend IR) Tracking ist ein optisches Trackingverfahren. Generell wird zwischen aktiven und passiven IR-Tracking unterschieden. Bei passivem Tracking wird das IR-Licht von einem Trackingsystem ausgestrahlt und anschließend von einem Retroreflexiven Marker zum Trackingsystem mit Hilfe von Reflexion zurückgestrahlt. Unter der Verwendung von aktivem Tracking strahlt der verwendete Marker IR-Licht aus. Es

findet keine Retroreflexion statt. Zur Bestimmung der Position werden zwei IR-Kameras und mindestens ein Marker benötigt. Für die Ermittlung von Rotation werden zusätzliche Marker verwendet. Diese werden im starren Verhältnis zueinander als Markershield (oder auch Target genannt) zusammengefasst. Unabhängig vom IR-Tracking Verfahren werden die verwendeten Marker als IR-Marker bezeichnet [22] [56].

Vorteile:

- Unabhängigkeit von Elektromagnetischer Felder (passiv).
- Unabhängigkeit von Menschlich wahrnehmbaren Licht.

Nachteile:

- Sicht zwischen Kamera und Markershield muss gewährleistet sein.
- IR-Marker muss am Objekt angebracht werden.
- Aktive IR-Marker benötigen zusätzliche Energiequelle.

Merkmalsbasiertes Tracking

Merkmalsbasiertes Tracking ist ein markerloses Tracking und kann in verschiedenen Variationen umgesetzt werden. Eine mögliche Variation ist das geometriebasierte Tracking. Beim geometriebasierten Tracking werden in einem Videobild Ecken und Kanten von Objekten oder eines Raumes extrahiert. Anhand mehrerer aufeinander folgender Videobilder können für jedes aufeinander folgende Bild die Abstände zwischen den extrahierten Ecken und Kanten ermittelt werden und daraus die relative Veränderung der Pose bestimmt werden. Geometriebasiertes Tracking bildet den ersten Schritt für Merkmalsbasiertes Tracking. Anstatt nur nach Kanten und Ecken an Objekten oder in Räumen zu suchen, können weitere Merkmale wie markante Punkte oder Kurvenverläufe oder Farbgebungen mit einbezogen. Verhältnisse zwischen Merkmalen müssen zu Beginn bekannt oder ermittelt werden. Die Ermittlung der Pose wird analog zum Geometriebasierten Tracking über die Messung von Transformationen zwischen Merkmalen bestimmt [22] [56].

Vorteile:

- Keine zusätzlichen Merkmale oder Hilfsmittel müssen an Objekten angebracht werden.
- Unabhängigkeit von Elektromagnetischer Felder.

Nachteile:

- Nicht immer ist das Ergebnis eindeutig (Ähnliche Strukturen sind Störeffekte).
- Verschiebungen, Rotationen oder Deformationen in der Umgebung können das Trackingergebnis beeinflussen.
- Lichteinflüsse können Merkmalsausprägungen verändern.

Markerbasiertes Tracking

Beim Markerbasiertem Tracking werden bekannte vordefinierte Muster in einem Videobild gesucht. Dazu werden eindeutige Muster ohne Rotationssymmetrien erstellt. Diese können auf Papier ausgedruckt werden und verwenden daher die Bezeichnung Flach oder Bildmarker. Anschließend werden die Bildmarker an zu verfolgenden Objekten befestigt. Wird ein Muster durch Bildverarbeitungsprozesse im Videostream erkannt, kann die relative Pose zwischen Kamera und Bildmarker berechnet werden. Die Abbildung 2.2 (a) zeigt einen Bildmarker, der von einem Hand-Held-Gerät erkannt wird und ein virtuelles Lebermodell in Relation zur Pose des Bildmarkers visualisiert [22] [56].

Vorteile:

- Bildmarker sind kostengünstig in der Herstellung. Ausdruck auf Papier möglich.
- Bildmarker können verschiedene Muster haben (Individualisierung).

Nachteile:

- Muster dürfen keine Rotationssymmetrien oder andere Redundanzen enthalten.
- Guter Kontrast und gut unterscheidbare Strukturen müssen bei der Erstellung berücksichtigt werden.
- Kamera muss qualitativ hochwertige und kontrastreiche Bilder erzeugen können.
- Farbige Marker sind schwieriger zu erkennen als Schwarz-Weiß Marker. (Abhängigkeit von Licht und Kamera-Qualität)

Weitere Trackingverfahren

Neben optischen Tracking kann die Bestimmung einer Pose noch auf andere Weise ermittelt werden. Dies umfasst Inertiales Tracking, Elektromagnetisches Tracking, Laufzeitbasiertes Tracking und Mechanisches Tracking.

Inertiales Tracking

Um Inertiales Tracking zu realisieren werden in der Regel zwei verschiedene Arten von Inertialsensoren kombiniert. Beschleunigungssensoren (Accelerometer) messen die Beschleunigung, die auf ein Objekt in eine Richtung ausgeübt wird. Bei der Verwendung von drei orthogonal zueinander ausgerichteten Sensoren kann so die Translation zum Startzeitpunkt der Messung bestimmt werden. Neigungsmesser (Gyrosensoren/Rotationsaccelerometer) ermitteln die Winkelbeschleunigung um eine Achse. Analog zu den Beschleunigungssensoren werden zur Bestimmung der Rotationsänderung drei orthogonal zueinander ausgerichteten Sensoren verwendet. Die Rotation wird aus den aufeinanderfolgenden Rotationsänderung bestimmt [22] [56].

Vorteile:

- Ein Bezugspunkt zur Umgebung ist nicht nötig.
- Keine Kamera notwendig.
- Klein und kostengünstig.

Nachteile:

- Da nur die Positions- und Rotationsänderung zu einem Zeitpunkt bestimmt wird, können durch kleine Messfehler Drifteffekte entstehen (Fehler summieren sich auf). Die Ermittlung der Pose wird ungenauer.
- Drifteffekte müssen durch eine wiederkehrende Rekalibrierung im Ruhezustand ausgebessert werden.

Elektromagnetisches Tracking

Bei der Verwendung von Elektromagnetisches Tracking werden künstliche Magnetfelder mit Hilfe von Spulen erzeugt. Anhand der Ausrichtung der künstlichen Magnetfelder, kann die Pose durch Empfangsspulen ermittelt werden. Es werden dazu orthogonal zueinander stehende Senderspulen und drei orthogonal zueinander Empfangsspulen benötigt [22] [56].

Vorteile:

- Empfänger sind sehr klein.
- Kein Sichtkontakt oder direkte Verbindung notwendig. Verdeckung durch den Nutzer oder anderen Objekten ist kein Problem.

Nachteile:

- Störung durch andere magnetische Materialien.

Laufzeitbasiertes Tracking

Die Position eines Empfängers wird über die Laufzeit zwischen einem Empfangsgerät und einem oder mehreren Sendern abgeschätzt. Es existieren verschiedene Laufzeitbasiertes Tracking Verfahren. Global Positioning Systeme (GPS) ermitteln die Position mit Hilfe von Laufzeiten zu Satelliten. Differential GPS verwendet zusätzlich lokale Referenzempfänger um die Genauigkeit zu erhöhen. Assisted GPS kann für die Ermittlung der Position von Tablets und Smartphone eingesetzt werden. Die Positionsbestimmung wird mit Hilfe der aktuellen Mobilfunkzelle und Laufzeiten zu Funkmasten ermittelt. Es existieren noch weitere Verfahren, wie die WLAN-Ortung, wo Laufzeiten zu WLAN-Routern (mit bekannter Position) errechnet und dadurch die eigene Position abgeschätzt werden kann [22] [56].

Vorteile:

- Laufzeitbasierte Systeme eignen sich für die Abschätzung der Position im großen mobilen Außenbereich.

Nachteile:

- Genauigkeit der Position liegt im Meterbereich. In einem medizinischen Kontext ist eine Positionsbestimmung nicht einsetzbar.
- Signale können durch hohe Gebäude verfälscht oder abgeschirmt werden.

Mechanisches Tracking

Unter Verwendung von Mechanisches Tracking wird die Pose von Objekten mit Hilfe einer mechanischen Verbindung ermittelt. Die mechanische Verbindung besteht dabei aus mehreren Drehachsen/Rotationseinheiten deren Ausrichtungswinkel ermittelt werden kann. Durch die Auswertung aufeinander folgender Winkel der Drehachsen und die Länge einzelner Achsen kann die Pose eines Objektes bestimmt werden [22] [22] [56].

Vorteile:

- Die Latenz zur Ermittlung der Pose ist gering, da unter Anderem keine Bildverarbeitungsprozesse nötig sind.

Nachteile:

- Direkte Verbindung kann den Interaktionsraum einschränken.
- Mechanische Verbindungen müssen leichtgängig sein, um nicht vom Nutzer als störend betrachtet zu werden.

2.2 Microsoft HoloLens

Die Microsoft HoloLens (nachfolgend HoloLens genannt) [18] ist ein stereoskopisches HMD zur Darstellung von AR Inhalten. Für die Darstellung wird ein Optical-See-Through Ansatz verwendet. Ende Februar 2019 wurde die *Microsoft HoloLens 2*, ein direkter Nachfolger der Microsoft HoloLens vorgestellt. Im Rahmen dieser Arbeit wurde die erste Version der HoloLens verwendet. Nachfolgende Beschreibungen innerhalb dieser Arbeit beziehen sich daher immer auf die erste Version der HoloLens. Die Abbildung 2.3 zeigt das Gerät von der Seite. Zur Verwendung wird kein zusätzlicher Rechner benötigt. Durch den verbauten Akku ist keine externe Stromzufuhr über ein Kabel während der Verwendung notwendig.



Abbildung 2.3: Microsoft HoloLens ist ein HMD AR-Gerät und verfolgt einen Optical-See-Through Ansatz.

2.2.1 Technische Eigenschaften

Zur Bestimmung der Pose im Raum verwendete die HoloLens optisches Tracking und einen Inside-Out-Ansatz. Dadurch ist das Gerät unabhängig in der Bewegungsfreiheit.

Um dies zu erreichen sind eine Reihe von unterschiedlichen Sensoren in dem Gerät verbaut. Neben einem Inertialsensor und vier Umgebungserkennungskameras sind weiterhin noch eine Tiefenkamera, eine Videokamera (unabhängig zur Raumlokalisierung), ein Lichtsensor und 4 Mikrofone verbaut [64]. In Kombination der Sensoren verfolgt die HoloLens ein SLAM (Simultaneous localization and mapping) Ansatz [16] [45]. Beim SLAM Verfahren ist anfänglich die Pose des Geräts nicht bekannt. Aufeinander aufbauend wird die Pose durch Bewegung des Geräts anhand bereits detektierten und neu detektieren Merkmalen (Merkmalsbasiertes Tracking) geschätzt [22]. Dadurch wird eine Karte (mapping) der Umgebung erstellt und die Pose innerhalb dieser Karte bestimmt. Die maximal mögliche Displayauflösung beträgt 720p (1268x720) und ist die Standardauflösung. Die minimal mögliche Darstellungsgröße beträgt 360p (634x360). Der Hersteller empfiehlt eine Auflösung von mindestens 540p (951x540) [57]. Es können zwei verschiedene Kategorien von Anwendungen entwickelt werden. Dazu gehören 2D-Apps, wie zum Beispiel herkömmliche Desktop Anwendungen, bei denen virtuelle Fenster im Raum platziert werden können. Mixed-Reality-Anwendungen bilden die zweite Kategorie, mit denen virtuelle Szenen aus verschiedenen 2D und 3D Objekten erstellt werden können. 2D-Apps müssen als *Universal Windows Platform*(UWP) erstellt werden. UWP eine Schnittstelle um Anwendungen für verschiedene Gerätetypen gleichzeitig zu entwickeln. Mixed-Reality-Anwendungen können einerseits mit der UWP-Schnittstelle oder mit der Win32-Schnittstelle entwickelt werden. Mit der Win32-Schnittstelle werden auch herkömmliche Anwendungen auf Windows-Systemen entwickelt. Die für die Entwicklung von Multimediainhalten verwendete *DirectX*-Schnittstelle wird bis zur Version 11 unterstützt. Weiterhin können Mixed-Reality-Anwendungen mit der Game Engine *Unity* der Firma *Unity Technologies ApS* entwickelt werden. Die Abbildung 2.4 präsentiert eine reale Umgebung aus der Sicht eines HoloLens-Nutzers, die mit virtuellen Inhalten durch die HoloLens ergänzt wurde. Neben der HoloLens existieren vergleichbare AR-Headsets wie die *Meta 2* (Meta, USA) [37], oder die *Magic Leap One* (Magic Leap, USA) [35].

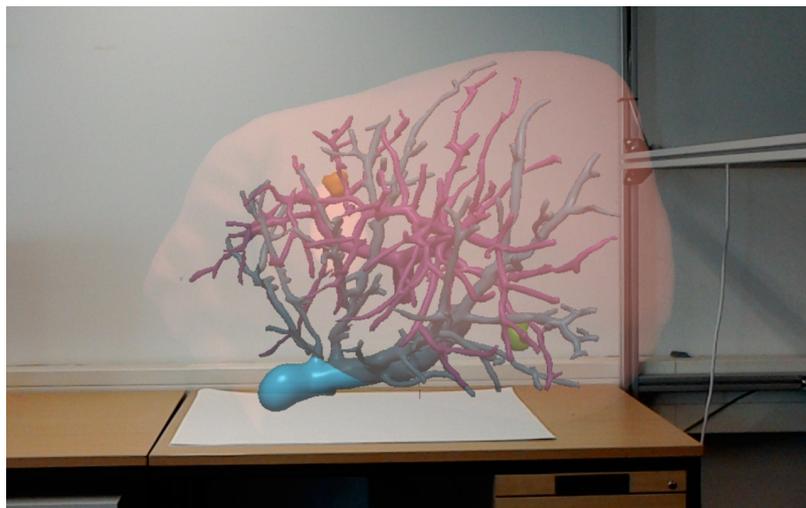


Abbildung 2.4: Exemplarische Visualisierung eines vergrößerten Lebermodells, welche unter der Verwendung der HoloLens dargestellt wurde.

2.2.2 Medizinische Anwendungen

Für den Einsatz im medizinischen Kontext wurde die HoloLens bereits in einigen Publikationen untersucht. Das Spektrum reicht von Anwendungen zu Therapieunterstützung über prä-operative und intraoperative Unterstützung. Für den Rahmen dieser Arbeit wird der Fokus auf intraoperative Ausarbeitungen gesetzt.

Zunächst muss untersucht werden, ob sich die HoloLens überhaupt für den Einsatzbereich eignet. Moosburner et al. verglichen in ihrer Arbeit die HoloLens und die Meta 2 für den Einsatz in einem Operations-Szenario [42]. Sie zeigten, dass die Meta 2 einige Vorteile wie das größere FOV und die bessere Displayauflösung besitzt, jedoch im Vergleich zur AR-Objekt Stabilität der HoloLens unterlegen ist. Sowohl Auflösung, FOV und AR-Objekt Stabilität sind wichtige Faktoren. Weiterhin merkten sie an, dass ein kabelgebundenes Set-Up, wie es die Meta 2 verwendet, ungeeignet für den interoperativen Einsatz ist. Außerdem führte die Nutzung der Meta 2 zu einer höheren Nutzerfrustration im Vergleich zur HoloLens. Tepper et al. benennen die Möglichkeiten der intraoperativen Darstellung von 3D-Informationen, wie sie durch die HoloLens dargestellt werden, als Grundlage für eine verbesserte Entscheidungsfindung [55].

Bei herkömmlicher bildgeführter Chirurgie werden Planungsdaten während eines Eingriffs auf einem Monitor im Operationsaal dargestellt. Diese Monitore können nur bedingt beliebig im Raum oder auf den Patienten platziert werden. Dies führt dazu, dass Chirurgen während eines Eingriffs den Fokus zwischen Patient und Monitor häufig wechseln müssen, anstatt sich auf einen Bereich konzentrieren zu können [26] [50] [38].

Einen Ansatz um diesen Effekt zu minimieren stellen Deib et al. vor. Sie untersuchten das Unterstützungspotential der HoloLens während einer mit einem Phantom simulierten Wirbelsäulenoperation [19]. Dazu führten sie verschiedene Eingriffe durch. So wurde in einem herkömmlichen Verfahren, bei dem Echtzeit Bildinformationen aus einer Angiographiebildgebung auf einem Monitor dargestellt werden, mit dem Einsatz der HoloLens in dem Bildinformationen auf einem durch das HMD dargestellten virtuellen Monitor im direkten Sichtfeld des Betrachters angezeigt werden, verglichen. Für diesen speziellen Einsatzbereich konnten ähnlichen Ergebnisse mit der herkömmlichen und der untersuchten Vorgehensweise mit der HoloLens erzielt werden.

Neben der Darstellung von virtuellen Monitoren bietet die HoloLens die Möglichkeit 3D-Modelle im Raum zu positionieren. Sauer et al. untersuchten den intraoperativen Einsatz der HoloLens während eines viszeralkirurgischen Eingriffs. Dazu wurde aus im Vorfeld erzeugten klassischen Bilddaten ein 3D-Objekt eines Lebergefäßbaums extrahiert, aufbereitet und anschließend während eines Eingriffs über den Patienten eingeblendet. Die Autoren sehen in dieser Darstellungsform der Daten ein hohes Potential zur Verbesserung in der Wahrnehmung der 3D-Anatomie parallel zum chirurgischen Eingriff [50].

Meulstee et al. untersuchten in einer Studie die Genauigkeit der Positionierung von Objekten in Anlehnung an herkömmliche bildgeführte Chirurgie mit einem Monitorsystem und mit AR-Unterstützung. Als AR-System wurde die HoloLens verwendet. Zur exakten Positionierung verwendeten sie eine selbst gefertigte Messplatte auf der getrackte Objekte platziert werden konnten. Im Ergebnis wurde beim verwendeten Aufbau ein mittlerer Positionierungsfehler von 2,3 mm (3,5 mm maximaler Fehler) ermittelt. Der

errechnete Fehleranteil durch die Verwendung von AR betrug im Durchschnitt 1,6 mm [38].

Außerhalb von Forschungsstudien entwickelte die Firma Novarad eine auf der HoloLens basierende Anwendung (OpenSight) für den prä-operativen Einsatz. Diese wurde als erste HoloLens-Anwendung von der *U.S. Food and Drug Administration* (FDA) für den Einsatz in der prä-operativen Operationsplanung zugelassen [43] [60].

Gibby et al. untersuchten in Zusammenarbeit mit Novarad die Anwendung OpenSight. Dazu ermittelten und planten sie im Vorfeld mögliche Nadel Einstichsverläufe an einem Lendenwirbelphantom unter der Verwendung von Computertomographie (CT)-Daten. Anschließend wurde die Einstichsverlaufsplanung mit Hilfe der HoloLens angezeigt und mit Hilfe der Visualisierung wurden reale Nadeln platziert und der Unterschied zwischen geplante Pose und tatsächlicher Pose durch erneute Generierung von CT-Daten verglichen. Nadeln konnten im Durchschnitt mit einer Genauigkeit von 4,69 mm in medial-lateral Richtung und 4,48mm in kranial-kaudal Richtung platziert werden [23].

2.3 Verwandte Arbeiten

Dieser Abschnitt gliedert sich in zwei Teilabschnitte. Im ersten Abschnitt werden Arbeiten zum Thema Distanzvisualisierung beziehungsweise Tiefenwahrnehmung aufgezeigt. Anhand dessen soll der Leser an den Kern dieser Arbeit herangeführt werden. Der zweite Abschnitt beschreibt unmittelbare Vorarbeiten zu dieser Arbeit.

2.3.1 Intraoperative Distanzvisualisierungen

Das Einschätzen der Distanz, wie zum Beispiel zwischen der Spitze eines medizinischen Instrument und umliegender Strukturen ist nicht immer leicht. Die Hinzugabe von Tiefeneindrücken spielt eine wichtige Rolle, um AR-Visualisierungen richtig zu interpretieren und Relationen zwischen Objekten zu verstehen [29].

Ein Ansatz dafür ist es, den Tiefeneindruck durch eine Ergänzung der Repräsentation von virtuellen Objekten zu verbessern. Kersten-Oertel et al. untersuchten verschiedene Darstellungsmöglichkeiten zur Abstandsvisualisierung von zerebralen Gefäßen. Dabei stellte sich die Visualisierungstechnik Pseudo-Chromadepth nach Ropinski et al. [49], bei dem die Gefäßstrukturen entsprechend ihrer Distanz zum Betrachter eingefärbt wurden, als am hilfreichsten zur Einschätzung der Tiefe heraus [28]. Darauf aufbauend entwickelte Lawonn et al. weitere illustrative Gefäßvisualisierungstechniken. Die Autoren ergänzten Gefäßstrukturen mit Schraffuren und kombinierten dazu illustrative Schatten mit Konturen und Support-Lines, welche 3D Punkte auf eine 2D Ebene projizierten [32]. Die Abbildung 2.5 stellt die Pseudo-Chromadepth Visualisierung und die von Lawonn et al. vorgestellte Visualisierungstechnik da.

Ein anderer Ansatz ist es, anstatt alle umliegenden Strukturen mit einzubeziehen, kritische Bereiche detaillierter zu betrachten. Hansen et al. präsentierten einen Ansatz zum



Abbildung 2.5: Pseudo-Chromadepth-Visualisierung (a) und Illustrative Visualisierungstechnik nach Lawonn et al. (b) am Beispiel an Lebergefäßen und Tumorgewebe. Entnommen aus [32].

Einbezug von *Risk Maps* in Anlehnung an Teilresektionen in der Leberchirurgie. So wurden farblich kodierte Sicherheitsabstände zwischen umliegenden Strukturen zur Resektionsfläche auf die Resektionsfläche mit Hilfe einer diskreten Farbskala eingeblendet. Geringe Abstände wurden dunkler dargestellt, größere Abstände wurden hingegen heller visualisiert. Um unterschiedliche Strukturen unterscheiden zu können, wurde der Hauptfarbton je nach Struktur verändert [24]. Ein verwandter Ansatz wurde zuvor von Lamata et al. gezeigt [31]. Die Abbildung 2.6 stellt den Ansatz von Hansen et al. dar.

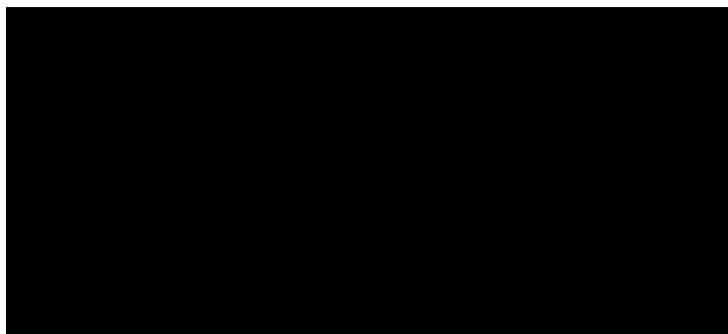


Abbildung 2.6: Risk Map Visualisierung nach Hansen et al.. Sicherheitsabstände von Blutgefäßen und Tumorgewebe in der Nähe der Resektionsfläche wurden auf die Resektionsfläche eingezeichnet. Entnommen aus [24].

Bichlmeier et al. stellten einen AR-Ansatz vor, um die Tiefenwahrnehmung und die Navigation zu verbessern, in dem ein virtueller Spiegel hinter kritische Strukturen frei platziert werden konnte, um so die Interaktion aus einer anderen Perspektive betrachten zu können. In einer Evaluation konnte unter Verwendung des virtuellen Spiegels (Virtual Mirror) eine höhere Genauigkeit während einer Navigationsaufgabe erreicht werden [5]. Die Abbildung 2.7 stellt den Ansatz an einem Wirbelsäulenphantom dar.

Die Hinzugabe visueller Hinweise in einem AR-Kontext kann zu Problemen führen. So zeigen Dixon et al. in ihrer Arbeit, dass mit AR-Unterstützung eine höhere Genauigkeit in der Kernaufgabe erzielt werden konnte, jedoch wurden gut sichtbare Fremdkörper und Unregelmäßigkeiten häufiger übersehen als ohne AR-Unterstützung [21]. Dieser Effekt

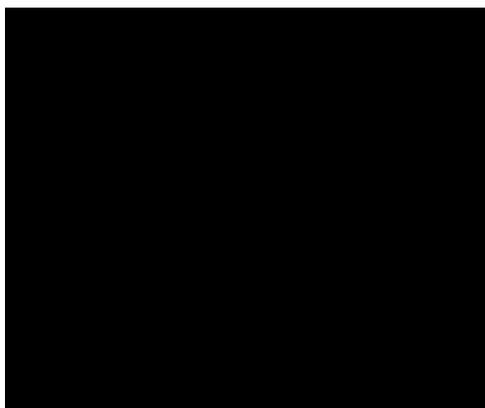


Abbildung 2.7: Virtual Mirror Visualisierung nach Bichlmeier et al. Ein virtueller Spiegel wurde unter Verwendung von AR so platziert, dass ein Teil des Wirbelsäulenphantoms von unten betrachtet werden kann. Entnommen aus [5].

wird als *inattentive blindness* (Unaufmerksamkeitsblindheit) bezeichnet und wurde bereits von Simons et al. untersucht [52]. Daher sollte der Anteil an AR-Elementen nicht zu sehr den Fokus des Betrachters einnehmen.

Anstatt Informationen großflächig auf Strukturen oder Hilfsebenen einzuzeichnen, könnten Abstände oder relative Informationen direkt zwischen Instrument und Strukturen dargestellt werden. Choi et al. beschreiben dazu einen Ansatz zur kombinierten Darstellung von Virtual Reality- und AR-Visualisierungen [14]. Ziel war es, Fehler (Kollision mit kritischen Strukturen) von Ärzten während eines chirurgischen Eingriffs zu minimieren. Als zusätzliche Unterstützung wurde der minimale Abstand zwischen der Spitze eines medizinischen Instruments und umliegenden Struktur in Echtzeit berechnet und dem Nutzer mit Hilfe einer Liniendarstellung visualisiert. Zusätzlich wurde der gemessene Abstand als Text dargestellt. Die Abbildung 2.8 stellt das Ergebnis von Choi et al. in AR-Ansicht dar. Der Ansatz zur Bestimmung und Visualisierung der Minimalen Distanz wurde bereits im Bereich der Otologische Chirurgie von Cho et al. gezeigt [13].

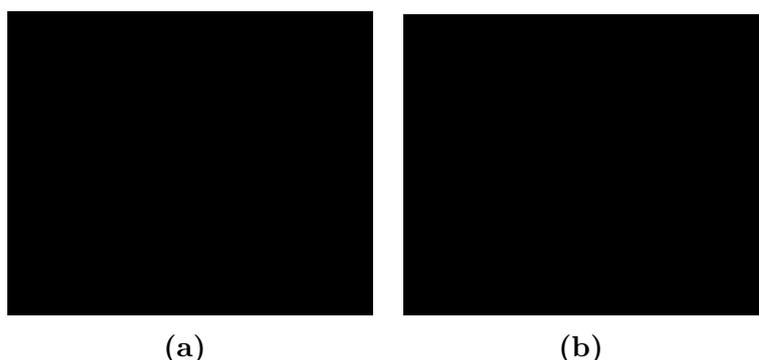


Abbildung 2.8: Closest Point Visualisierung nach Choi et al. zu unterschiedlichen Instrumentpositionen. Entnommen aus [14].

Einen dazu ähnlichen Ansatz wurde von De Paolis et al. vorgestellt [17]. So wurde für den Kontext eines minimal-invasiven Eingriffs eine AR-Anwendung entwickelt. Nach einer initialen Registrierung eines Körpers und einer Rekonstruktion der Organe anhand

eines CT-Datensatzes, konnten aus einem Datensatz erzeugte virtuelle Organstrukturen auf die Oberfläche des Körpers eingeblendet werden, sodass beim Nutzer der Anwendung der Eindruck entsteht, er könne in den Körper hineinsehen. Zur Navigationsverbesserung wurde die minimale Distanz von der Instrumentenspitze zu einem wichtigen Punkt (*Point of Interest*) mit Hilfe einer roten Linie angezeigt. Weiterhin wurde Abstand in einer Infokasten als Text, ähnlich der Arbeit von Choi et al. dargestellt. Zusätzlich wurde abhängig der Distanz ein wachsender (bei kleiner Distanz) oder schrumpfender (bei großer Distanz) Balken in der Infokasten eingeblendet. Für kleinere Distanzen wurde der Balken rot eingefärbt, bei größerer Distanz grün. Berührt das Instrument ein Objekt oder ein Organ, so wird das virtuelle Werkzeug rot markiert. Weiterhin wurde mit einer weißen Linie die Hauptrichtung des Instruments als Verlängerung der Instrumentenspitze dargestellt. So kann die Verlaufsrichtung bei gleichbleibender Ausrichtung des Instruments eingeschätzt werden. Die Abbildung 2.9 [17] zeigt die Darstellung virtueller Organe auf einer Puppe. zusätzlich ist die Infokasten und der durch eine rote Linie markierte *Point of Interest* und die mit einer weißen Linie dargestellte Verlängerung der Instrumentenspitze ist dargestellt.

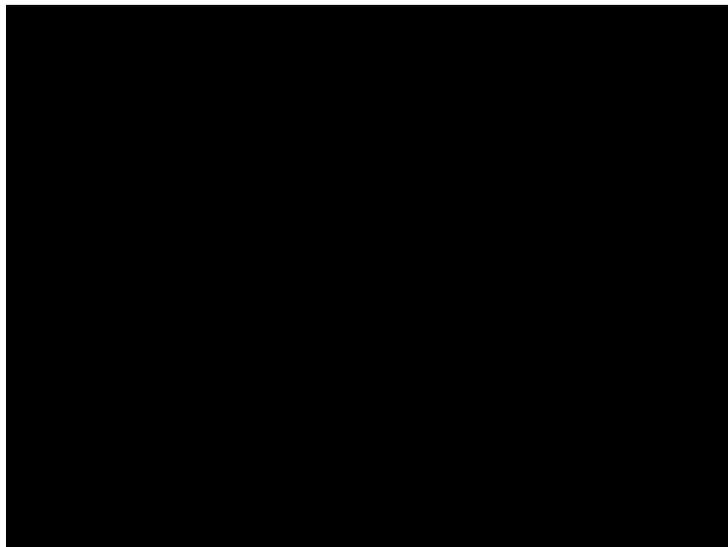


Abbildung 2.9: Darstellung eines *Point of Interest* durch eine rote Linie und Visualisierung der Hauptrichtung eines Instruments durch eine weiße Linie. In der oberen Bildecke wird eine grün unterlegte Infobox mit Anzeige der Distanz zwischen Instrumentenspitze und *Point of Interest* dargestellt. Die Entfernung kann als Text oder visuell als wachsenden/schrumpfender Balken abgelesen werden. Entnommen aus [17].

Als Hilfestellung entwickelten De Paolis et al. eine weitere Visualisierung, die dem Arzt bei der richtigen Instrumentenausrichtung entlang einer ermittelten Stichrichtung, unterstützen soll. Dazu wird eine blaue Linie zwischen Zielpunkt und Instrumentenspitze eingezeichnet. Stimmt die aktuelle Verlaufsrichtung des Instruments und die geplante Stichrichtung überein, so wird die Linie grün dargestellt. Befinden sich Hindernisse zwischen Zielpunkt und dem idealen Pfad, so ändert die Linie ihre Farbe zu rot. Die Abbildung 2.10 stellt die drei beschriebenen Zustände dar.

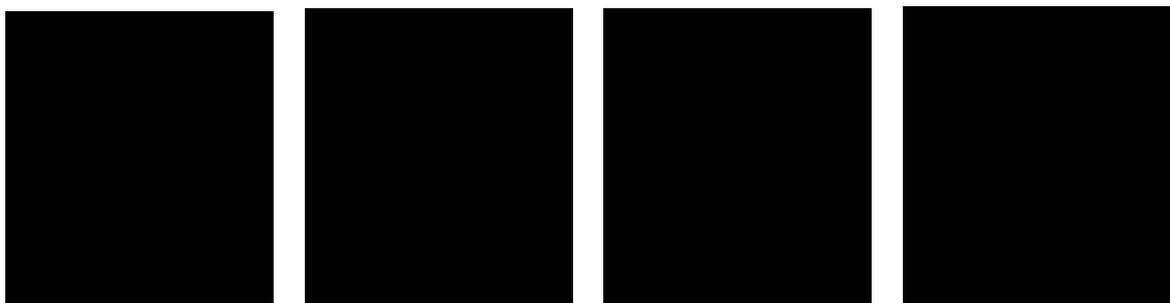
Einen weiteren Ansatz stellten Bork et al. vor. In Ihrer Arbeit kombinieren sie visuelles und akustisches Feedback. Dazu wird in einem minimal invasiven Kontext eine halb durch-



(a) Pfadrichtung zwischen Instrument und Zielpunkt (b) Instrumentausrichtung stimmt mit Pfadrichtung überein (c) Andere Strukturen befinden sich entlang des Pfades

Abbildung 2.10: Verschiedene Visualisierungsdarstellungen nach De Paolis et al. zur Unterstützung der richtigen Instrumentenwinkelbestimmung anhand der aktuellen Einstichrichtung zum gewählten Zielpunkt. Entnommen aus [17].

sichtige ausdehnende Kugel an die Spitze eines Instruments eingeblendet. Beim Ausdehnen der Kugel wird ein regelmäßiges akustisches Signal ausgegeben. Zusätzlich werden in festen Abständen weitere halbtransparente Kugeln in der Größe des aktuellen Ausdehnungsradius eingeblendet. Die Farbe variiert je nach Distanz zum Ursprung (Instrumentenspitze). So wurde eine rote Farbgebung bei geringer Distanz gewählt. Bei größerer Distanz wechselt die Farbe von rot zu blau. Wird beim Ausdehnen der Kugel eine Kollision mit umliegenden Strukturen ausgelöst, so verändert sich die regelmäßige akustische Ausgabe zu einem unregelmäßigen Signal. Umliegende Strukturen werden weiterhin erst nach Kollision angezeigt und sind vorher unsichtbar. Anhand des Radius der ausdehnenden Kugel und der Farbgebung kann die aktuelle Distanz zum Kollisionspunkt eingeschätzt werden [10]. Die Abbildung 2.11 stellt die Visualisierung in unterschiedlichen Zeitabständen dar. Black et al. untersuchten das Unterstützungspotential von auditiven und visuellen Feedback in bildgestützter Navigation. Ihr Vorgehen erlaubt eine Instrumentnavigation ohne Verdeckungen durch virtuelle Inhalte. Im Vergleich zum visuellen Feedback oder einer Kombination aus visuellem und auditivem Feedback, wurde eine längere Bearbeitungszeit und eine höhere Arbeitsbelastung durch Nutzer festgestellt [8].



(a) (b) (c) (d)

Abbildung 2.11: Visualisierung nach Bork et al. unterschiedlichen Zeitpunkten. Entnommen aus [10].

Lin et al. entwickelten eine AR-Anwendung für ein Nadelbiopsie-System. Dazu blendeten die Autoren eine virtuelle Nadel über den Verlauf einer realen Nadel während einer simulierten Biopsie, auf die Oberfläche eines Phantoms ein. So konnte ein Nutzer ab-

schätzen, wo sich das Instrument innerhalb des undurchsichtigen Phantoms befand. Zusätzlich blendeten sie den weiteren vorhergesagten Verlauf des Instruments ein [34]. Dabei berücksichtigten sie, dass sich Nadeln während eines Eingriffs leicht verbiegen oder deformiert werden können und bezogen die Vorarbeit in diesem Gebiet von Park et al. ein [44].



Abbildung 2.12: HoloLens AR-Visualisierung zur Verlaufsdetektion einer Nadel in einem undurchsichtigen Phantom nach Lin et al. Die Nadel (silber/grau) wird durch eine virtuelle weiß/rot gestreifte Textur überlagert. Grün wird der geplante Nadelverlauf visualisiert. In (a) ohne Berücksichtigung von Nadelkrümmung. In (b) mit Berücksichtigung von Nadelkrümmung und Deformation. Entnommen aus [34].

Song et al. entwickelten ein AR-Konzept um Ärzte während einer Wurzelkanalbehandlung zu unterstützen. Um die Navigation (zum Beispiel zur Reinigung) innerhalb eines Wurzelkanal zu verbessern und keine Schäden zu verursachen, entwickelten die Autoren drei Teilvisualisierungen, die dem Arzt seine aktuelle Lage anhand der Distanz, Instrumentorientierung und Tiefe zur geplanten Zugangspose darstellt. Jede der drei vorgestellten Parameter wurde durch Farbe (rot kritische/r Distanz/Winkel/Tiefe oder grün ideale/r Distanz/Winkel/Tiefe) und Skalierung von Hilfsobjekten visualisiert. Zusätzlich wurden die betrachteten Parameter durch Veränderung der Soundfrequenz und durch eine Textdarstellung ergänzt. In einer Auswertung hinsichtlich der Genauigkeit konnte gezeigt werden, dass der verwendete Aufbau nicht den Ansprüchen einer Wurzelkanalbehandlung genügt. Hierfür wird eine Genauigkeit im Submillimeterbereich benötigt [2]. Die Abbildung 2.13 stellt die verschiedenen Visualisierungsergebnisse dar. Zur Bestimmung der Pose von Instrument und zu behandelten Zahn verwendeten die Autoren die HoloLens-Webcam und das Vuforia SDK [48] zur Detektion optischer Marker.

In einer Machbarkeitsanalyse stellten Kuzhagaliyev et al. einen Ansatz vor, in dem an einer Ultraschallsonde selbst durch die Sonde generierte Bilder in Echtzeit am Sondenkopf durch die HoloLens dargestellt werden. So kann ein Arzt statt auf einen Monitor zu schauen, direkt am Sondenkopf das resultierende Bild sehen. Weiterhin vervollständigen sie diesen Ansatz, durch die Ergänzung von Planungsdaten von möglichen Stichkanälen, um im Beispiel der Autoren eine Nadelablation von tumorösen Gewebe durchzuführen. Dazu blendeten sie den Planungsfad in grün ein. Zusätzlich wird die Ablationsnadel rot markiert. Ein gelbes Dreieck und weitere Hilfslinien wurden zwischen Ablationsnadel und Planungsfad eingeblendet, um die Unterschiede zu visualisieren [30]. Die Abbildung 2.14 stellt den Systementwurf da.

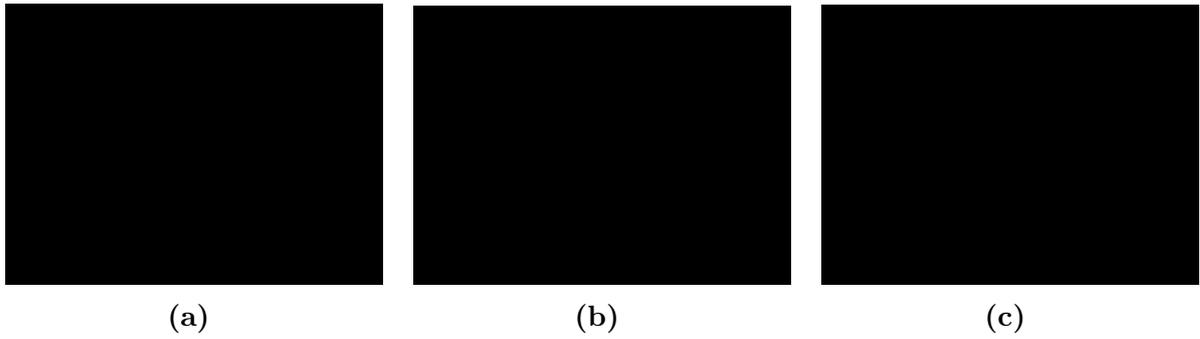


Abbildung 2.13: Verschiedene Visualisierungen zur besseren Positionierung eines Instruments hinsichtlich Distanz, Winkel und Tiefe in einem vergrößerten Wurzelkanalphantom. In (a) ist das Instrument gut platziert und die Visualisierung nimmt eine grüne Farbe an. In (b) und (c) ist Pose des Instruments schlechter als in der Planung vorgesehen. Die Visualisierungen werden größer und wechseln die Farbe zu rot. Entnommen aus [2].

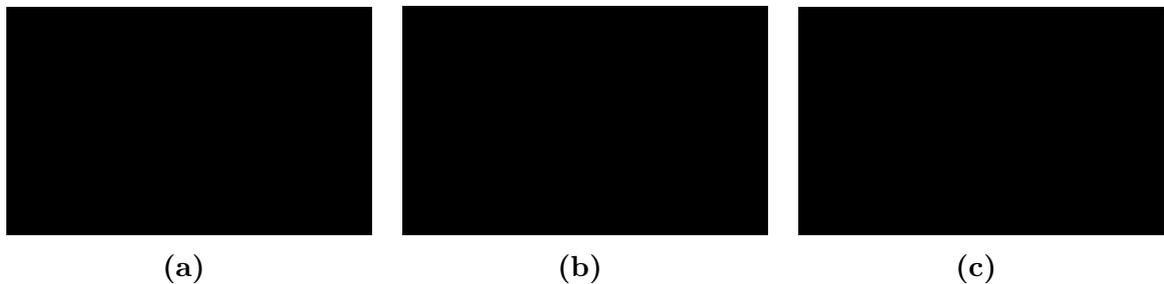


Abbildung 2.14: Kombination aus Ultraschallsonde und simulierten durch die HoloLens dargestellten Ultraschallbildern (a). Visualisierung des Unterschieds (gelbes Dreieck und weitere Stützlinien) in der Pose einer Ablationsnadel (in rot überlagert) und des in grün dargestellten Planungsfads. Resultat aus der Kombination aus (a) und (b). Entnommen aus [30].

2.3.2 Vorarbeiten

Aufbauend auf den in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen Arbeiten wurde im Vorfeld zu dieser Arbeit weitere Visualisierungskonzepte zur Verbesserung der räumlichen Wahrnehmung für die Instrumentennavigation ausgearbeitet. Dies erfolgte in Zusammenarbeit mit Heinrich et al. [25]. Insgesamt wurden drei Navigationskonzepte in einer Monitor-gestützten Anwendung ausgearbeitet und evaluiert. Die Konzepte konzentrierten sich dabei auf die Darstellung von Linien an einer Instrumentenspitze. Die Länge einer Linie bestimmt dessen Farbe (rot geringe Distanz, gelb mittlere Distanz, grün weite Distanz). Nachfolgend werden die Konzepte zusammengefasst.

Pointer Ray

Das erste Konzept (Pointer Ray) stellt eine virtuelle Verlängerung des Instruments (ähnlich zu De Paolis [17]) dar. Dafür wird ein Strahl ausgehend von der Instrumentenspitze entlang der Instrumentrichtung ausgesendet. Trifft der Strahl auf umliegende Strukturen, so wird dieser nicht weiter verfolgt (vergleiche Abbildung 2.15).

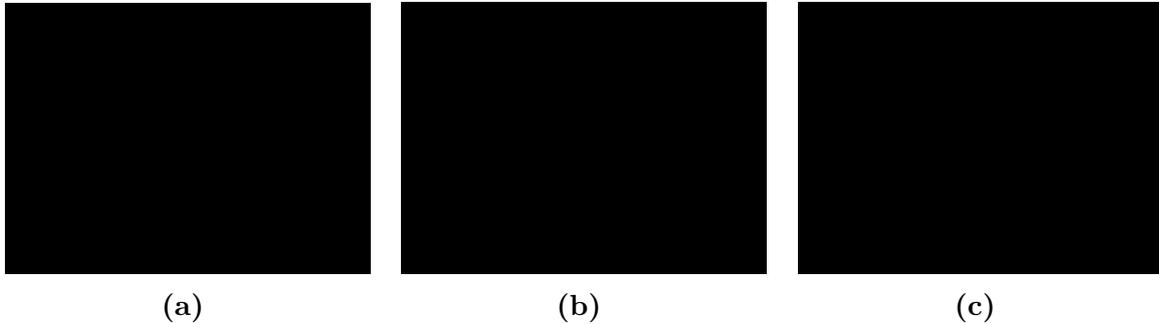


Abbildung 2.15: Pointer Ray nach Heinrich et al.: Darstellung einer virtuellen Verlängerung der Instrumentenspitze entlang der Hauptinstrumentrichtung. Bei großer Distanz (a) wird die Verlängerung grün eingefärbt. Bei mittlerer Distanz gelb (b) und bei geringer Distanz rot (c). Entnommen aus [25].

Side-looking Radar

Als zweites Konzept (Side-looking Radar) beschreiben Heinrich et al. ein Visualisierungskonzept, bei dem ein Strahl in einem anpassbaren Winkel um die Hauptachse rotiert. Analog zum Konzept Pointer wird der Strahl bei einer Kollision mit umliegenden Strukturen nicht weiterverfolgt (vergleiche Abbildung 2.16).

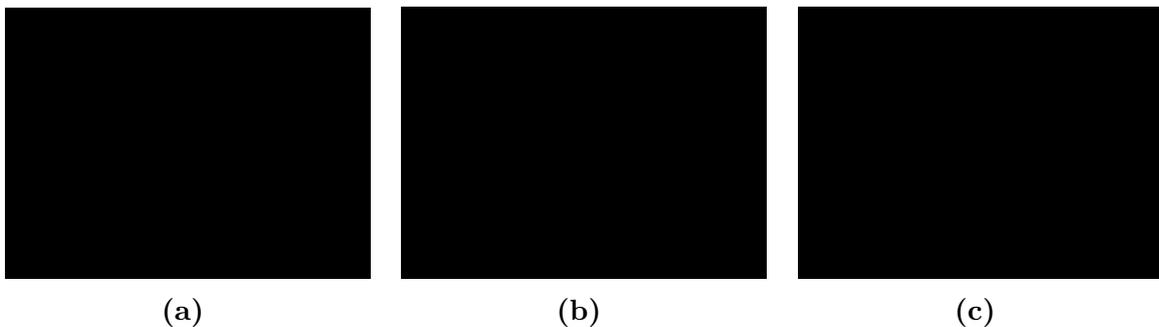


Abbildung 2.16: Side-looking Radar nach Heinrich et al.: Darstellung einer rotierenden virtuellen Verlängerung der Instrumentenspitze entlang der Hauptinstrumentrichtung. Bei großer Distanz (a) wird die Verlängerung grün eingefärbt. Bei mittlerer Distanz gelb (b) und bei geringer Distanz rot (c). Entnommen aus [25].

Virtual Lighthouses

Als drittes Konzept wurde das Konzept Virtual Lighthouses eingeführt. Zur Umsetzung wurden im Vorfeld *Points of Interest* (nachfolgend POI) auf potentiell interessante Punkte markiert. Anschließend wird zur Laufzeit zwischen Instrumentspitze und den definierten POI Linien eingeblendet. Die Linien wurden zyklischer Reihenfolge ein und ausgeblendet (vergleiche Abbildung 2.17).

Im Kapitel Konzeption werden diese Konzepte im späteren Verlauf der Arbeit nochmals aufgegriffen und durch neue Inhalte ergänzt (vergleiche Abschnitt 3.3.1).

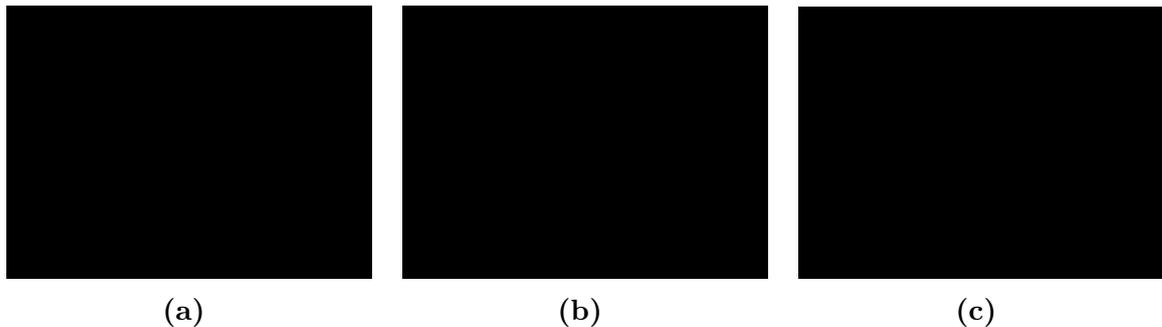


Abbildung 2.17: Virtual Lighthouses nach Heinrich et al.: Im Vorfeld definierte Punkte werden in zyklischer Reihenfolgen ein- beziehungsweise ausgeblendet. Bei großer Distanz (a) wird die Verbindung zwischen Punkt und Instrumentspitze grün eingefärbt. Bei mittlerer Distanz gelb und bei geringer Distanz rot. Entnommen aus [25].

Als Ergebnis einer Nutzerstudie wurden die entwickelten Konzepte von Versuchsteilnehmern besser bewertet als ohne zusätzliche Navigationsunterstützung. Das Konzept Side-looking Radar wurde sowohl in der Gesamtwertung als auch in der Wertung nach Nützlichkeit am besten eingestuft. Das Konzept Virtual Lighthouses wurde von Versuchsteilnehmern sehr unterschiedlich, sowohl stark ablenkend als auch nicht störend, bewertet. Unabhängig von den subjektiven Einschätzungen der Versuchsteilnehmer konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Konzepten bezüglich Zielgenauigkeit, mittlerer und minimaler Abstand zu Risikostrukturen identifiziert werden. Heinrich et al. vermuten, dass durch anspruchsvollere Aufgaben, andere Ergebnisse und Unterschiede zwischen Konzepten herausgestellt werden könnten. Weiterhin beschreiben sie, dass die Wahl einer kontinuierlichen Farbgebung, anstatt einer diskreten Farbgebung, andere Ergebnisse erzielen könnte.

2.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden zu Beginn die Grundlagen zu AR und verschiedenen Trackingverfahren herausgearbeitet. Im Bezug zur Zielsetzung und Aufgabenstellung wurden anschließend verwandte Arbeiten zum Thema HoloLens im medizinischen Kontext dargestellt. Es existieren eine Reihe von aktuellen Arbeiten in dem Bereich. Moosburner et al. [42], Tepper et al. [55] und Meulstee et al. [38] untersuchten dabei die generelle Eignung der HoloLens für einen medizinischen Kontext, mit Fokus auf den Einsatz für chirurgische Eingriffe. Deib et al. [19] und Sauer et al. [50] untersuchten die Eignung an Praxisbeispielen. Alle schreiben der HoloLens eine Reihe positiver Möglichkeiten zu, zufriedenstellende Nutzungsmöglichkeiten konnten sie aufgrund einiger Schwachstellen nicht ermitteln. Im weiteren Verlauf des Kapitels wurden verschiedene Arbeiten zur Verbesserung der Tiefenwahrnehmung und Distanzeinschätzung aufgezeigt. Aspekte wie *Inattentional Blindness* beschreiben die Risikofaktoren, die bei der Erstellung von AR-Visualisierung beachtet werden sollten. Die Arbeiten von Choi et al. [14], De Paolis et al. [17], Bork [10] und Song et al. beschreiben Ansätze, um eine Unterstützung durch AR-Navigation zu realisieren. Weitere Ansätze werden im Verlauf dieser Arbeit ausgearbeitet und ausgewertet. Unter Beteiligung an der Arbeit von Heinrich et al. [25] wurden einige Visualisierungskonzepte zur Verbesserung der räumlichen Wahrnehmung in bildgestützter Chirurgie, entwickelt und analysiert. Diese werden in den nachfolgenden Abschnitten mit einbezogen und ausgearbeitet.

3 Konzeption

In dieser Arbeit soll ein AR-basierter Ansatz zur Verbesserung der Navigation und Abstandskontrolle während chirurgischer Eingriffe untersucht werden. Dafür sollen in diesem Kapitel mit Hilfe der in Kapitel 2 aufgezeigten verwandten Arbeiten mögliche Herangehensweisen und Lösungsansätze analysiert werden. Zu Beginn werden Anforderungen an die Entwicklung eines Prototypen und Visualisierungskonzepte aufgestellt. In der zweiten Hälfte dieses Kapitels werden diese Konzepte entwickelt und diskutiert.

3.1 Anforderungsanalyse

In der Anforderungsanalyse werden einige Richtlinien für die anschließende Visualisierungs- und Prototypenkonzeption definiert und ein Richtlinienkatalog festgelegt. Dazu werden Rahmenbedingungen aufgezeigt, woraus nachfolgend Anforderungen abgeleitet werden können.

3.1.1 Rahmenbedingung

Um mögliche Verbesserungen mit Hilfe von Augmented Reality bei der Navigation mit medizinischen Instrumenten in kritischen Umgebungen zu untersuchen, soll im Zuge dieser Arbeit ein AR-Prototyp und verschiedene Navigationsvisualisierungen entwickelt werden. Für die AR-Darstellung soll die *Microsoft HoloLens* und für das Verfolgen von externen Instrumenten die *Atracsys spryTrack 180* (nachfolgend als Trackingkamera bezeichnet) verwendet werden. Weiterhin wird angenommen, dass ein Nutzer während der Interaktion mit der HoloLens und dem Trackingsystem eine feste Position im Raum einnimmt. Als Untersuchungsumgebung sollen in dieser Arbeit vereinfachte Lebermodelle aus echten CT-Daten verwendet werden, welche ebenfalls durch die HoloLens augmentiert werden. So kann eine wiederholbare Testumgebung für eine spätere detaillierte Evaluation geschaffen werden. Technisch sehr anspruchsvolle Faktoren wie Deformation von Organen, oder die durch Atmung entstehenden kleinen Bewegungen von realen Patienten sollen für die erste prototypische Entwicklung innerhalb dieser Arbeit nicht untersucht werden. Für Trainingssimulationen existieren bereits kommerzielle Produkte, welche die Deformation von Objekten realisieren [54]. Für den Rahmen dieser Arbeit sollen die zu entwickelnden Navigationskonzepte auch für realitätsnahe dynamische Umgebungen verwendet werden können.

3.1.2 Funktionale und Nichtfunktionale Anforderungen

Aus den Rahmenbedingungen können einige Kernanforderungen für die Anwendung abgeleitet werden. Zur Übersichtlichkeit werden diese nachfolgend in Funktionale Anforderungen und Nichtfunktionale Anforderungen unterteilt.

Funktionale Anforderungen

Funktionale Anforderungen beschreiben die Kernaufgabe, denen die Anwendung und die Konzepte folgen sollen. Aus den Rahmenbedingungen geht hervor, dass für die Anwendung AR in Kombination mit der HoloLens verwendet werden soll. Weiterhin sollen externe Werkzeuge/medizinische Instrumente in der Anwendung unterstützt werden. Die HoloLens unterstützt in erster Linie nur die eigene Positions- und Rotationserkennung. Um diese Informationen für Werkzeuge zu ermitteln, muss ein externes Trackingsystem unterstützt werden. Dazu leitet sich die nächste Anforderung, *Instrumenten Tracking* ab. Hierfür soll die Atracsys-Kamera verwendet werden. Zugehörig dazu ist die dritte Kernanforderung *Registrierung*. Trackinginformationen der HoloLens und des externen Trackingsystems arbeiten in unterschiedlichen Koordinatensystemen. Die Translation, Rotation und die Händigkeit der Koordinatensysteme, müssen ineinander überführt werden. Die letzte Anforderung *Navigation* spiegelt die Hauptaufgabe dieser Arbeit wieder. Diese wird in den nachfolgenden nicht funktionalen Anforderungen und in späteren Abschnitten durch Konzepte weiter ausgearbeitet. Mit der Anwendung soll es möglich sein, durch kritische Umgebungen zu navigieren und den Abstand zu umliegenden Strukturen zu visualisieren. Die Tabelle 3.1 fasst die nachfolgend beschriebenen funktionalen Anforderungen zusammen.

Tabelle 3.1: Auflistung der Funktionalen Anforderungen, welche der zu entwickelnde Prototyp im Rahmen dieser Arbeit erfüllen muss.

Funktionale Anforderung	Kurzbeschreibung
Augmented Reality	Die Anwendung soll für die Microsoft HoloLens entwickelt werden.
Instrumenten Tracking	Werkzeuge sollen mit einer externen Tracking-Kamera getrackt und Werkzeugposen sollen in der AR-Anwendung verwendet werden.
Registrierung	Trackinginformationen aus dem externen System müssen in das Koordinatensystem der HoloLens überführt werden können.
Navigation	Die Anwendung soll in einem dynamischen Umfeld Visualisierungen entsprechend berechnen und darstellen können.

Nichtfunktionale Anforderungen

Dieser Abschnitt befasst sich mit den nichtfunktionalen Anforderungen, welche die zu entwickelnde Anwendung und die in den nachfolgenden Abschnitten skizzierten Visualisierungskonzepte erfüllen müssen. In dieser Arbeit teilen sich diese in drei Hauptkategorien **Gebrauchstauglichkeit**, **Performance**, **Visualisierungsaspekte** auf. Nachfolgend werden die einzelnen Hauptkategorien ausgearbeitet. Die Tabelle 3.2 fasst die beschriebenen Nichtfunktionale Anforderungen zusammen.

Unter **Gebrauchstauglichkeit** werden Nutzer-orientierte Anforderungen wie *Zufriedenstellung*, *Effizienz* und *Effektivität* in Anlehnung an DIN EN ISO 9241-11 [20] zusammengefasst. Zufriedenstellung oder auch Nutzerzufriedenheit ist subjektiv und beschreibt ob Nutzer gegenüber einem System oder ein Konzept eine positive Haltung einnimmt. Die Anforderung ist erfüllt, wenn über mehrere Nutzer hinweg überdurchschnittlich positive Aussagen zu einem Navigationskonzept abgegeben werden. Die Anforderung Effizienz stellt sicher, dass entwickelte Konzepte eine Verbesserung hinsichtlich des Aufwandes, der zum Erfüllen einer Aufgabe getätigt werden muss, erzielen. Im Kontext dieser Arbeit ist ein System oder ein Konzept ist effizienter wenn eine Aufgabe schneller gelöst werden kann. Neben der Effizienz sollen auch in Bezug auf Effektivität bessere Ergebnisse, in diesem Fall hinsichtlich der Genauigkeit und Fehlerrate erzielt werden. So erzeugt ein Konzept oder ein System eine höhere Effektivität, wenn beispielsweise weniger oder gleichbleibend viele Berührungen eines Instruments an kritischen Strukturen erfolgen. Brooke stellte einen Test, bestehend aus einem Fragebogen, vor um die Gebrauchstauglichkeit zu untersuchen und zu bewerten [12].

Performance beschreibt Anforderungen, die durch Umsetzung der Anwendung bedingt ist. Dies teilt sich in *Darstellungsgeschwindigkeit*, *Latenz* und *Robustheit* auf. Die Darstellungsgeschwindigkeit ist ein wichtiger Bestandteil in AR Anwendungen. Durch die Rahmenbedingungen wurde die Verwendung HoloLens definiert. Das in dem Gerät verwendete Display verfügt über eine Bildwiederholrate von 240 Hz. Innerhalb dieser 240 Hz werden vier verschiedene Farbfelder berechnet, sodass für den Nutzer am Ende eine Bildwiederholrate von 60 Hz zur Verfügung steht [58]. Daher soll die Anwendung auch mindestens 60 Bilder pro Sekunde für die Darstellung errechnen können. Weiterhin empfiehlt der Hersteller diese Grenze nicht zu unterschreiten, da dies auch die Verarbeitungsgeschwindigkeit, der internen Posebestimmung der HoloLens beeinflusst [58]. Latenz ist ein weiterer wichtiger Bestandteil, welcher bei VR und AR Anwendungen betrachtet werden muss [22]. Um die Gesamtlatenz zu minimieren ist neben der Wahl eines geeigneten Trackingsystems (bereits vorgegeben durch die Aufgabenstellung), die Wahl eines entsprechenden Übertragungsprotokolls zur Transportlatenzminimierung und einer schnellen Simulation der nachfolgenden Visualisierungskonzepte wichtig (Bildwiederholrate 60 FPS). Weiterhin soll die Anwendung robust gegenüber fehlerhaften Eingaben sein. Vorstellbar wäre zum Beispiel, dass nicht in jedem Renderzyklus neue Trackingdaten zur Verfügung stehen, eingehende Trackingdaten ungenau oder durch die Übertragung beschädigt worden sind. Dies wird festgelegt durch die Anforderung Robustheit.

In der Kategorie **Visualisierungsaspekte** werden Anforderungen wie die Verwendung einer *Minimalansicht*, einer guten *Distanzeinschätzung* und einer einheitlichen *Farbkodierung* zusammengefasst. Die Anforderung der Minimalansicht beschreibt, dass die Visualisierungskonzepte ergänzend zur Umgebung gestaltet werden sollen. Die Sicht auf kritische

Punkte oder Regionen soll weitestgehend nicht verdeckt werden. Weiterhin sollen die Navigationskonzepte nicht von der Umgebung ablenken, sondern sich in diese integrieren. Die Anforderung der Distanzeinschätzung gibt die Kernaufgabe der Visualisierungen an. Sie sollen dem Nutzer helfen, die Distanz zu Risikostrukturen einzuschätzen, um damit die Navigation innerhalb kritischer Umgebungen, wie beispielsweise zwischen bedeutsamen Blutgefäßen, zu vereinfachen. Die Anforderung zur Farbkodierung ergänzt die vorherige Anforderung. Bei der Erstellung mehrerer Visualisierungen, welche bei Bedarf ergänzt oder entfernt werden können, muss eine einheitliche Farbkodierung vorgegeben werden, um Verwirrungen beim Nutzer zu vermeiden.

Tabelle 3.2: Überblick über die Nichtfunktionalen Anforderungen.

Nichtfunktionale Anforderung	Kurzbeschreibung
Gebrauchstauglichkeit	
Zufriedenstellung	Nutzer nehmen eine positive Einstellung gegenüber dem Prototyp und entwickelte Konzepte ein.
Effektivität	Die Anwendung soll es einem Nutzer ermöglichen, seine Aufgaben mit weniger Navigationsfehlern (ungewollte Kollision mit umliegenden Strukturen) zu bewerkstelligen.
Effizienz	Die Anwendung soll einem Nutzer dabei helfen, seine Aufgaben (beispielsweise die Navigation zu Zielstrukturen) zügig umzusetzen.
Performance	
Darstellungsgeschwindigkeit	Die Anwendung soll Bilder mit mindestens 60 FPS darstellen, um die Verarbeitungsgeschwindigkeit, der internen Posebestimmung der HoloLens nicht zu beeinflussen.
Trackinglatenz	Um direkt auf Nutzerinteraktionen zu reagieren zu können, soll die Anwendung eine möglichst geringe Latenz zwischen einzelnen Hardwarekomponenten aufweisen.
Robustheit	Die Anwendung soll stabil arbeiten und keine Programmabstürze erzeugen.
Visualisierungsaspekte	
Minimalansicht	Visualisierungen sollen den Nutzer nicht ablenken. Kritische Regionen dürfen nicht verdeckt werden.
Farbkodierung	Visualisierungskonzepte sollen einer verständlichen Farbkodierung folgen. Kombinierte Visualisierungen sollen eine einheitliche Farbgebung verwenden.

3.2 Grundlegender Anwendungsaufbau

Mit Hilfe der Anforderungsanalyse werden in diesem Abschnitt der grundlegende Anwendungsaufbau skizziert. Das Kernstück des Prototypen bildet die HoloLens. Auf diesem Gerät sollen die Navigationshinweise errechnet und finale AR-Bilder dargestellt werden. Für die Kommunikation zwischen HoloLens und dem Trackingsystem wird ein zusätzlicher Computer benötigt. Die Kommunikation zwischen Rechner und AR-Gerät soll mit Hilfe einer WLAN-Netzwerkverbindung realisiert werden. Als Netzwerkübertragungsprotokoll soll UDP (User Datagram Protocol) verwendet werden, da dieses Protokoll im Vergleich zu anderen Netzwerkprotokollen wie beispielsweise TCP (Transmission Control Protocol) schneller in der Übertragung von Daten ist. Dies folgt der in der Anforderungsanalyse beschriebene Minimierung der Latenz zwischen aktueller/realer Werkzeugposition und der Darstellung auf der HoloLens. Die Fehleranfälligkeit und möglicher Datenverlust durch UDP kann minimiert werden, durch Verwendung eines eigenen lokalen Netzwerks. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Registrierung, genauer die Überführung der Koordinatensysteme zwischen HoloLens und dem Trackingsystem. Im Zuge einer Untersuchung hinsichtlich der Genauigkeit des in der HoloLens verwendeten Tracking, zeigen de Oliveira et. al einen Ansatz zur Registrierung zwischen beiden Geräten. Die Pose eines analogen Bild-Markers, wurde sowohl durch die HoloLens-Webcam als auch durch das Abtasten mit einem, durch ein externes Trackingsystem erfassten, Werkzeugs bestimmt. So konnte eine Registrierung der verschiedenen Systeme realisiert werden [16]. Für diese Arbeit soll die Registrierung in ähnlicher Form mit Hilfe eines kombinierten Markers umgesetzt werden. Durch die Verwendung eines kombinierten Markers kann die Transformation zwischen beiden Koordinatensystemen im Vorfeld exakt eingemessen werden, sodass zu Programmstart von beiden Geräten nur einmal die Markerpose ermittelt werden muss.

3.3 Visualisierungskonzepte

Nachfolgend werden verschiedene Visualisierungskonzepte vorgestellt, die den Nutzer bei der Navigation, unter Beachtung der in der Anforderungsanalyse festgelegten Kriterien (*Minimalansicht*, *Distanzeinschätzung*, einheitlich *Farbkodierung*), unterstützen sollen. Mit Hilfe dieser Kriterien sollen die Visualisierungskonzepte dabei den Anwender bei seinen Aufgaben unterstützen, ohne von der eigentlichen Aufgabe abzulenken. Nachfolgend werden eine Reihe von Konzepten und ihre individuellen Visualisierungsziele skizziert. Diese unterteilen sich in zwei Hauptkategorien: *direkte Navigationswarnungen* und *indirekte Navigationswarnungen*.

3.3.1 Direkte Navigationswarnungen

Mit direkten Navigationswarnungen werden Konzepte zusammengefasst, welche Warnungen direkt im Aktionsbereich, in der Regel die Instrumentenspitze, visualisieren. Einige der zehn nachfolgenden Konzepte bauen inhaltlich aufeinander auf, die Reihenfolge ist aber nicht qualitativ wertend zu betrachten.

Pointer Ray

Bei der Verwendung von chirurgischen Instrumenten sind Objekte und Strukturen vor der Instrumentenspitze wichtig. Damit verhindert werden kann, dass Strukturen ungewollt mit der Spitze verletzt werden, ist es wichtig, dass der Benutzer die Entfernung zwischen Werkzeugspitze und Umgebung einschätzen kann. Ein Konzept für diesen Einsatzbereich wurde von Heinrich et al. bereits in einer Monitor-gestützten Anwendung untersucht [25]. Bei diesem Konzept wird das verwendete Instrument entlang der Spitze künstlich mit Hilfe eines Strahls verlängert, bis dieser auf umliegende Strukturen trifft. Um diesen Abstand besser einschätzen zu können wurde der Strahl zusätzlich in diskreten Stufen farbkodiert. Insgesamt wurden dabei drei Grenzdistanzen verwendet. Bei geringer Distanz wurde der Strahl rot eingefärbt, gelb bei einem mittleren Abstand und grün bei großer Distanz zwischen Instrumentenspitze und umliegender Struktur.

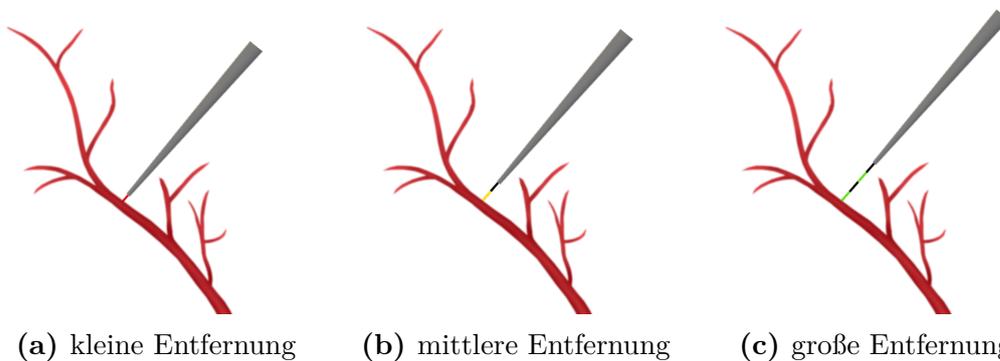


Abbildung 3.1: Pointer Ray-Visualisierung aus verschiedenen Distanzen.

Ergänzend für diese Arbeit könnten für dieses Konzept (nachfolgend Pointer genannt) schwarze Abstandsbalken entlang des Strahls eingeblendet werden. Diese kodieren direkte Abstandswerte. In Abbildung 3.1 (c) dunkeln diese Balken den Strahl ab. Die Breite des Balkens ist konstant. Anstatt Balken mit fester Breite zu verwenden, können auch vereinfacht Kerben dargestellt werden. So lässt sich der Strahl mit einem Maßstab vergleichen. Inspiriert ist diese Darstellung von Biopsie-Nadeln, wie Abbildung 3.2 dargestellt.



Abbildung 3.2: Biopsie-Nadel mit schwarzen Marken/Kerben, mit denen die Einstichtiefe bestimmt werden kann.

Side-looking Radar

Neben dem Pointer, der zur Identifizierung von Strukturen direkt vor der Instrumentspitze genutzt werden kann, ist durch kleine Bewegungen des Instruments oder Deformationen im Umfeld nicht nur punktuell ein Punkt vor der Instrumentspitze wichtig, sondern auch umliegende Strukturen. Für diesen Einsatzbereich stellen Heinrich et al. den Side-looking Radar (nachfolgend Radar) vor [25]. In Anlehnung eines Seitensichtradars, welches von Flugzeugen für die Orientierung genutzt wird, werden in einer stark vereinfachten Form durch dieses Konzept umliegende Objekte abgetastet. Dafür wird ein einzelner Strahl von der Nadelspitze ausgehend mit einem einstellbaren Winkel zur Hauptnadelachse verfolgt, bis dieser auf umliegende Strukturen trifft. Der Strahl rotiert um die Hauptnadelachse, sodass er verschiedene Pfade entlang einer Kegeloberfläche abtastet. Entsteht eine Kollision mit einer umliegenden Struktur, so wird der Strahl nur bis zum Kollisionspunkt gezeichnet. Die Abbildung 3.3 veranschaulicht dieses Verhalten.

Ähnlich wie beim Pointer könnte der Radar die gleichen Optionen zu Farbkodierung. Weiterhin wäre eine Ergänzung der bereits beim Pointer beschriebenen schwarzen Abstandsbalken möglich.

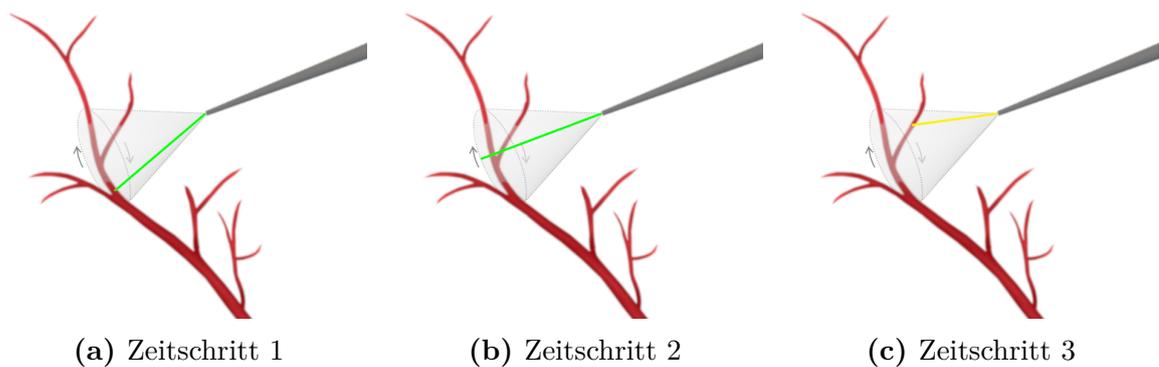


Abbildung 3.3: Radarvisualisierung in verschiedenen Zeitschritten. Der in den Teilabbildungen dargestellte Kegel verdeutlicht die Bewegungslaufbahn des Radarstrahls auf der Mantelfläche entlang der Mantellinie und ist kein Teil der Visualisierung. Zur Vereinfachung wurden hier die schwarzen Abstandsbalken nicht abgebildet.

Extended Radar

Die Konzepte Pointer und Radar können im Rahmen dieser Arbeit ergänzend kombiniert werden. Beide Visualisierungen agieren in unterschiedlichen Arbeitsbereichen, sie stören sich gegenseitig nicht. Um die räumliche Relation zwischen den Konzepten zusätzlich zu verbessern, könnte für diese Arbeit eine Fläche zwischen den beiden Strahlen eingeblendet werden und analog zu den vorherigen Konzepten farbkodiert eingefärbt werden. Abhängig von der kleinsten Distanz zu umliegenden Strukturen kann entweder der Farbwert des Pointers oder des Radars für die Fläche übernommen werden. Weiterhin sollte, um Verdeckungen entsprechend der Anforderung zum Minimalkonzept zu minimieren, eine niedrige Opazität für die Fläche gewählt werden. In der Abbildung 3.4

werden drei exemplarische Zeitschritte für die Veranschaulichung dieses Konzeptes dargestellt.

Ein Nachteil des Konzeptes könnte es sein, dass die eingeblendete Fläche zwischen Pointer und Radar in einem großen Bereich Distanzinformationen darstellt, ohne dass der Bereich selbst die Farbkodierung beeinflusst. So könnten sich beispielsweise Blutgefäße zwischen Pointer und Radar befinden, ohne dass die Fläche dies visualisiert. Daher kann dieses Konzept dahingehend erweitert werden, indem zwischen Pointer und Radar weitere Messpunkte ermittelt werden und die Fläche und die Farbkodierung dementsprechend angepasst wird.

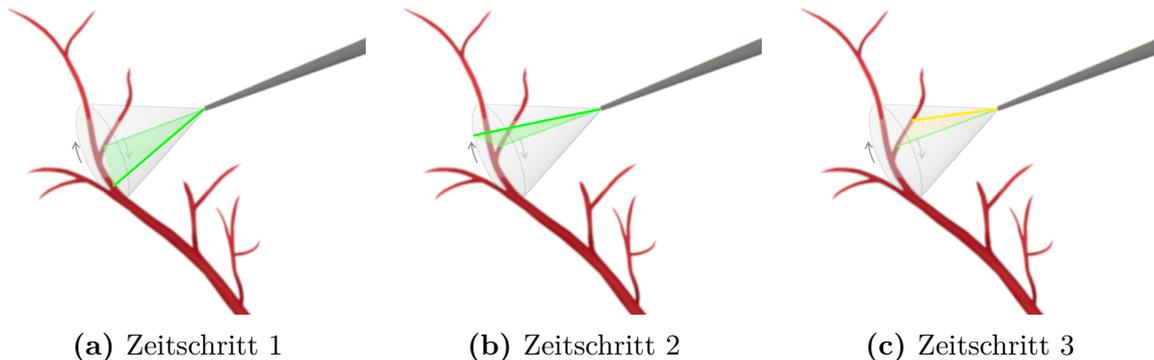


Abbildung 3.4: Extended Radar Visualisierung zu verschiedenen Zeitschritten. Der in den Teilabbildungen dargestellte Kegel verdeutlicht die Bewegungslaufbahn des Radarstrahls auf der Mantelfläche entlang der Mantellinie und ist kein Teil der finalen Visualisierung. Zur Vereinfachung wurden auch hier die schwarzen Abstandsbalken nicht mit abgebildet.

Virtual Lighthouses

Weiterhin stellen Heinrich et al. das Konzept Virtual Lighthouses vor [25]. Anders als dauerhaft Strukturen abzutasten werden mit dieser Visualisierung zuvor eine Reihe von kritischen Regionen/Punkten (Points of Interest) durch einen Arzt ausgewählt. Bei der Näherung mit einem Instrument werden diese Punkte mit Hilfe einer Linie zwischen Punkt und Werkzeugspitze markiert. Um zu vermeiden, dass zu vielen Linien gleichzeitig dargestellt werden, erweitern Heinrich et al. dieses Konzept. Linien werden nicht dauerhaft dargestellt, sondern verblassen und erscheinen, vergleichbar mit dem Lichtschein eines Leuchtturmes in einem zirkulären Zyklus. Diese Linien folgen demselben Farbkodierungsmuster der zuvor beschriebenen Konzepte. In der Abbildung 3.5 werden drei verschiedene Virtual Lighthouses zu drei verschiedenen Zeitschritten dargestellt. Im Gegensatz zu den im Zeitschritt zwei und drei dargestellten virtuellen Leuchttürmen, befindet sich der sichtbare Virtual Lighthouses im Zeitschritt eins nah an einem Blutgefäß. Die Linie wurde daher gelb eingefärbt.

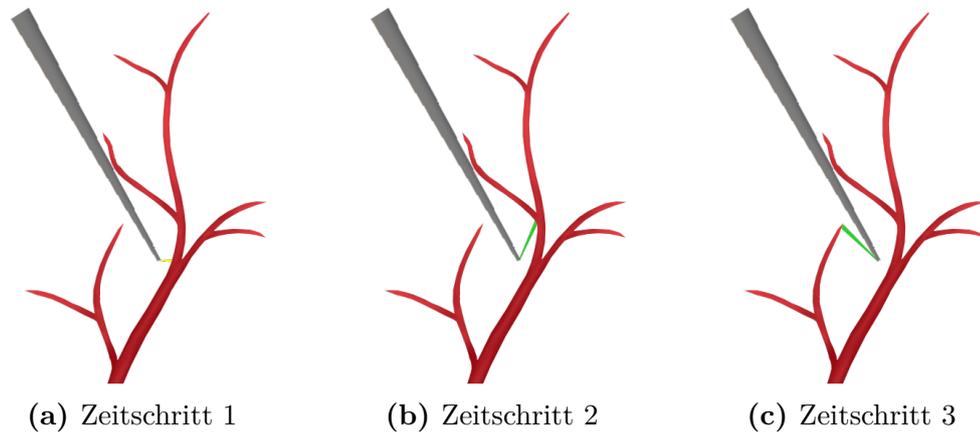


Abbildung 3.5: Drei Virtual Lighthouses in drei verschiedenen Zeitschritten. Verschiedene im Vorfeld festgelegte Punkte werden in zyklischer Reihenfolge einblendet und ausgeblendet.

Ring

Die bereits vorgestellten Visualisierungen Pointer und Radar reagieren nur auf Strukturen, die sich unmittelbar vor der Nadelspitze befinden. Durch kleine seitliche Bewegungen die während der Navigation auftreten, sind auch Abständen zu Elementen neben der Instrumentenspitze relevant. Diese benötigten Informationen können mit dem Konzept Ring erzeugt werden. Dazu wird ein Ring orthogonal zur Nadelspitze angelegt. Anschließend dehnt sich der Ring, ähnlich eines Funksignals gleichmäßig aus oder verharret mit einem festen Abstand zur Instrumentenspitze. Der Ring selbst ist in Segmente unterteilt, auf denen Entfernungen zu umliegenden Strukturen farbkodiert einblendet werden. Die Farbkodierung sollte analog den anderen Konzepten folgen. In der Abbildung 3.6 wird dies mit Hilfe eines Blutgefäßes skizziert. In dem Beispiel der Abbildung 3.6 befindet sich nur Gefäßast in der Nähe des Rings, die Visualisierung könnte auch auf weitere Gefäßäste reagieren und den Ring an entsprechenden Stellen gelb beziehungsweise rot einfärben.

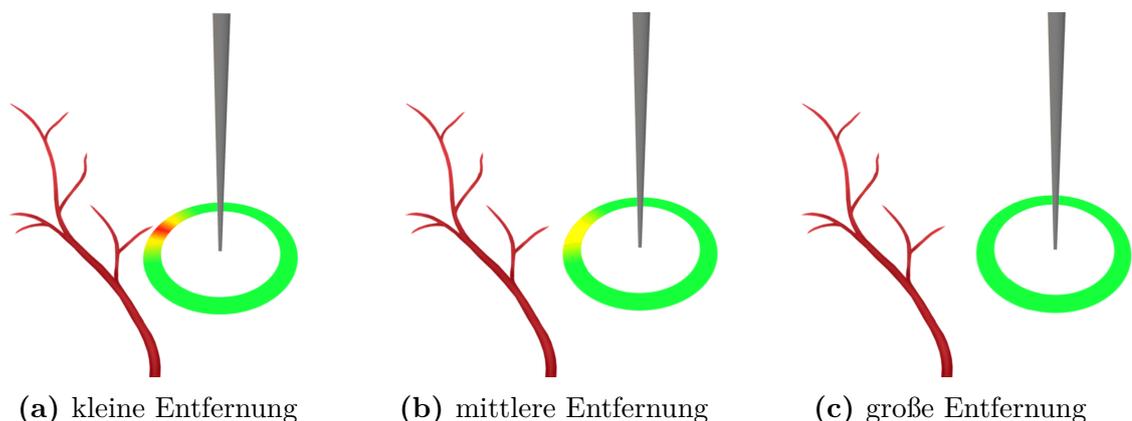


Abbildung 3.6: Ring-Visualisierung aus verschiedenen Distanzen zu einem Gefäßast.

Map

Das Konzept des Rings reduziert sich nur auf Elemente, die sich direkt in der orthogonalen Richtung der Instrumentspitze befinden. Viele Informationen, die sich nicht orthogonal der Nadeldrichtung befinden, werden dabei bisher ignoriert. Strukturen im vorderen Bereich könnten nur mit dem Pointer oder Radar bedingt abgedeckt werden. Das Konzept der Map soll hierbei unterstützen. Anstatt des Ring könnte eine halbtransparente Halbkugel verwendet werden, welche an der Nadelspitze dargestellt wird. Ähnlich der Visualisierung Ring kann die Halbkugel in einige kleine Segmente unterteilt analog zum Konzept Ring farblich kodiert werden. In Anlehnung an die Arbeit von Bork et al. [10] wäre ein Ausdehnen der Halbkugel denkbar. Die Visualisierung würde sich von der Instrumentspitze heraus ausdehnen und beginnt nach einem festgelegten Zeitpunkt sich von Neuem. Das Pausieren des Ausdehnens ist ebenfalls denkbar. Weiterhin ist die Ausrichtung dieser Halbkugel interessant. So wäre eine Variante der Ausrichtung entlang der Hauptrichtung des Instruments und eine Ausrichtung in Blickrichtung des Nutzers denkbar.

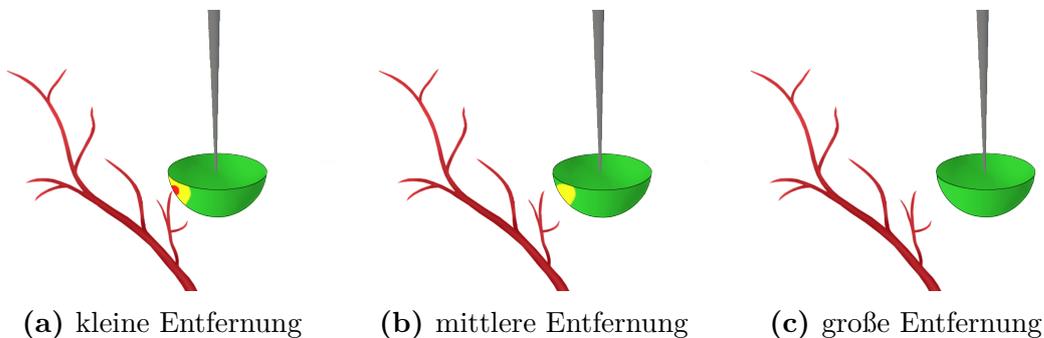


Abbildung 3.7: Map-Visualisierung aus verschiedenen Distanzen. Die Öffnung der Kugel folgt dem ersten Modus entlang der Hauptnadelrichtung.

Ein potentieller Nachteil der vorherigen Visualisierung ist, dass die Anforderung des Minimalkonzepts zum Teil nicht erfüllt sind, da die Visualisierung im Vergleich zu den bisher vorgestellten Konzepten mehr Verdeckung erzeugt. Um dem entgegen zu wirken könnte anstatt eine geschlossene Halbkugel nur einzelne Patches oder alternativ einzelne Ringelemente der Halbkugel dargestellt werden. Die Abbildung 3.8 veranschaulicht dieses Darstellung.

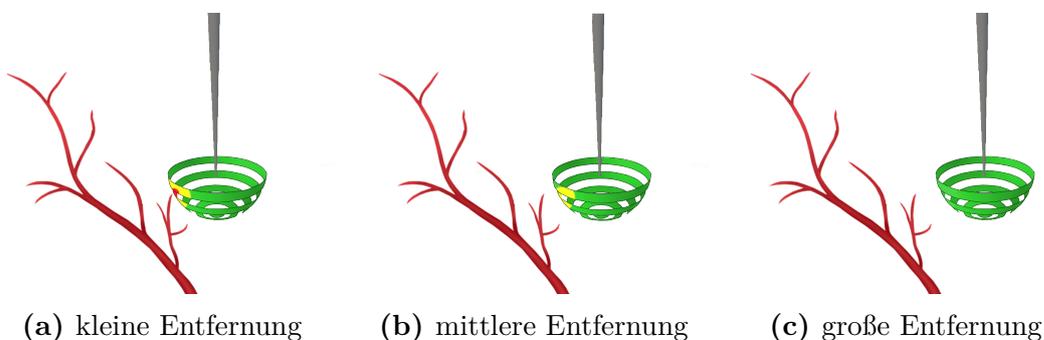


Abbildung 3.8: Erweiterte Map-Visualisierung aus verschiedenen Distanzen. Statt einer geschlossenen Halbkugel werden nur einzelne Ringelemente dargestellt.

Distance Sensor

Das Konzept der Map stellt viele Distanzinformationen parallel zur Verfügung. Das Konzept Distance Sensor präsentiert einen gegensätzlichen Ansatz. So sollen Informationen nur dargestellt werden, wenn sie benötigt werden. Diese Visualisierung kann mit einem seitlichen Abstandsensor, die in Einparkassistentensystem in Autos zum Einsatz kommen, verglichen werden. Wird sich mit der Instrumentenspitze seitlich einer Struktur genähert, so wird dies durch eine Dreiecksfläche markiert. Je dichter sich das Werkzeug an einem Objekt befindet, desto mehr Abtastpunkte einer Struktur häufen sich dicht an der Instrumentenspitze und so größer wird die Dreiecksfläche dargestellt und erzeugt mehr Aufmerksamkeit. Zusätzlich nimmt die Opazität der Fläche zu, je dichter sich die Instrumentenspitze den umliegenden Objekten nähert. Bei größerer Entfernung zur Struktur, wird nichts dargestellt. Abbildung 3.9 skizziert dies. Im Gegensatz zu den anderen Konzepten ist diese Visualisierung nicht zusätzlich farbkodiert, sondern wird dauerhaft einfarbig, zum Beispiel rötlich dargestellt. Ähnlich zum Konzept des Rings reagiert die Visualisierung auf mehrere Gefäßäste.

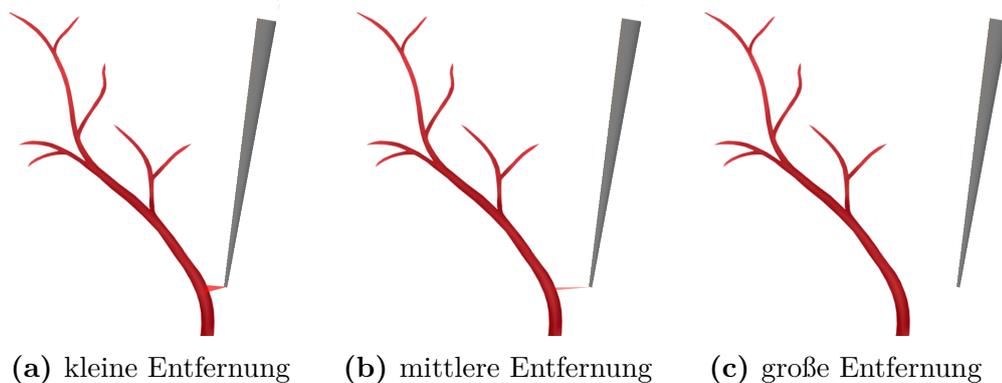


Abbildung 3.9: Distance Sensor-Visualisierung aus verschiedenen Distanzen zu einem Gefäßast.

Closest Point

Die zuvor vorgestellten Konzepte verbindet, dass diese nur die Distanzwarnungen für ihren entsprechenden Arbeitsbereich aufzeigen. Das Konzept Closest Point wurde bereits von Choi et al. in einer zu dieser Arbeit verwandten Arbeit untersucht [14]. Hier wird im gesamten Arbeitsbereich der Instrumentenspitze, die geringste Distanz zu umliegenden Strukturen bestimmt und mit einem grünen Punkt markiert. Anschließend wurde mit einer weißen Linie die Nadelspitze und der Punkt mit dem kleinsten Abstand auf den Strukturen markiert. Zusätzlich wird dieser Abstand mit einem Label numerisch dargestellt.

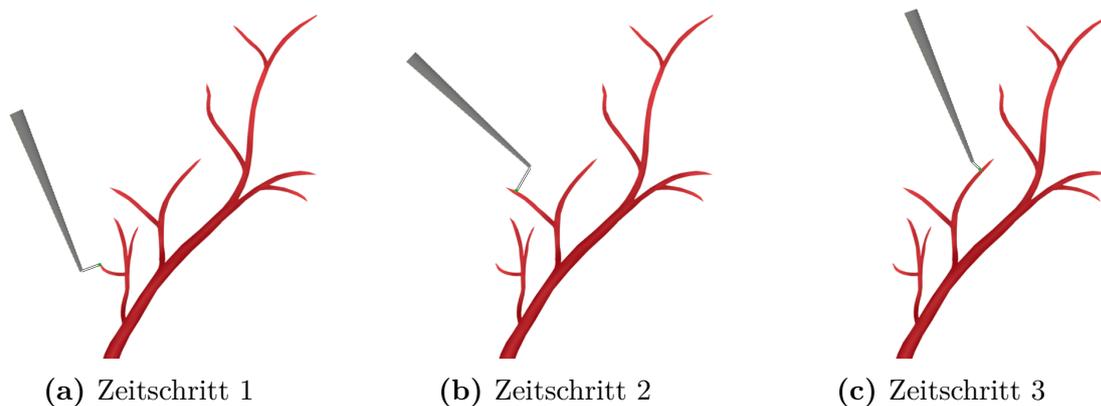


Abbildung 3.10: Closest Point Visualisierung aus verschiedenen Distanzen. Auf ein Label welches den ermittelten Abstand darstellt wurde in dieser Abbildung verzichtet.

Paint Over

Das letzte Konzept zur direkten Navigationswarnung unterscheidet sich von den vorherigen Visualisierungen dadurch, dass keine neuen Elemente (Linien, Ringe, etc) zur Umgebung hinzugefügt werden, sondern dass umliegende Strukturen anhand ihrer Distanz zur Instrumentenspitze eingefärbt werden. Die Farbkodierung folgt ebenfalls den vorherigen Konzepten. Abbildung 3.11 veranschaulicht diesen Effekt. Eine flächendeckende Visualisierung widerspräche der Anforderung nach einer Minimalvisualisierung, daher sollte der Bereich, der eingefärbt wird, nur in Abhängigkeit des Risikobereichs, der Instrumentenspitze angewendet werden. Abbildungen 3.11 (a) und (b) zeigen zwei Möglichkeiten. Zum Einem wird nur der Bereich in der Nähe der Werkzeugspitze kugelförmig mit einem zuvor festgelegten Abstand eingefärbt(a), zum anderen wird eine Schnittebene durch alle Strukturen eingeblendet (b). Diese folgt der orthogonal der Nadelspitze. Dies soll zusätzlich bei der Orientierung unterstützen, indem hierdurch Relationen zu anderen Gefäßästen markiert werden.

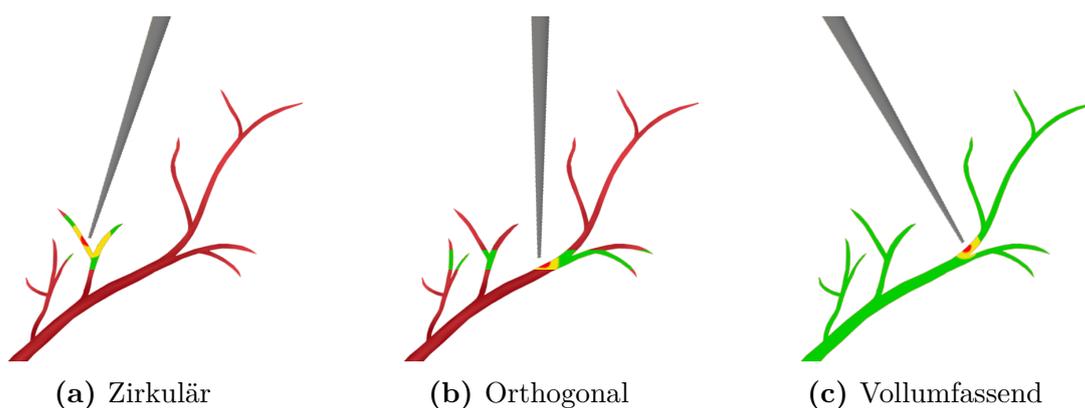


Abbildung 3.11: Verschiedene Paint Over Visualisierungen. Die Visualisierung (c) verstößt gegen die Anforderung des Minimalkonzepts und wird nicht weiter verwendet.

3.3.2 Indirekte Navigationswarnungen

Direkte Navigationswarnungen verdecken stets einen Teil der umliegenden Strukturen. Mit Fokus auf die Anforderung der Minimalansicht sollen indirekte Navigationswarnungen den Nutzer dauerhaft freie Sicht in ihrem Aktionsbereich gewährleisten. Daher sollen in diesem Abschnitt Konzepte vorgestellt, welche Visualisierungen erzeugen, die nicht im kritischen Instrumentarbeitsbereichen dargestellt werden.

Label

In den anderen vorgestellten Konzepten war stets indirekt Distanzen durch Farbe kodiert. Mit dem Label werden numerische Informationen direkt in den Fokus des Betrachters gestellt und geben genaue Werte die Entfernung an. Choi et al. ergänzen damit das bereits vorgestellte Konzept Closest Point. Ein Label muss nicht auf die Distanzbestimmung des Closest Point reduziert werden. So kann es sinnvoll sein, diese Abstandsmessung mit denen des Pointers, Radars oder des Rings zu kombinieren. Weiterhin ist die Position des Labels im Sichtbereich des Nutzers variabel. Es kann somit an der Instrumentsspitze, am Instrumentschaft oder unabhängig vom Instrument im Sichtbereich des Nutzers befestigt werden.

Warn Symbol

Dieses Konzept soll es ermöglichen, ohne direkte Navigationswarnungen den Nutzer Feedback zu seinen Interaktionen zu geben. So kann direkt im Sichtbereich des Nutzers ein kleines Head-Up-Display mit einem Warnsymbol eingeblendet. Dies wechselt die Farbe je nach umliegender Distanz der Instrumentsspitze zu umliegenden Strukturen. Die Farbkodierung folgt dabei den vorherigen Konzepten. Bei geringer Entfernung blinkt dieses Symbol ebenfalls, um eine höhere Aufmerksamkeit zu erzeugen.

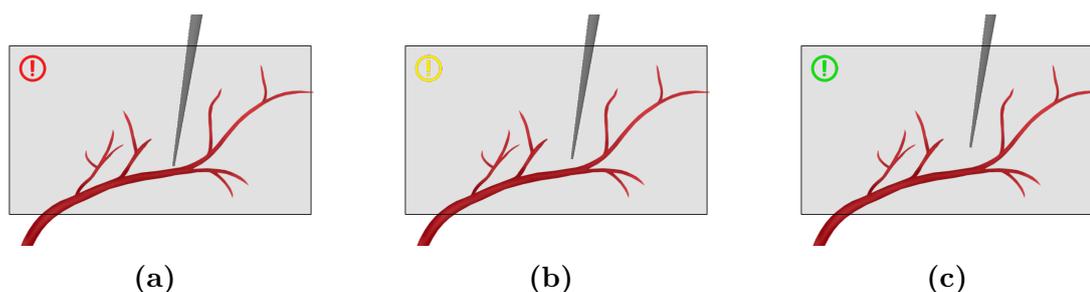


Abbildung 3.12: Warnsymbol-Visualisierung aus verschiedenen Distanzen. Der grau hinterlegte Kasten beschreibt den Ausschnitt in dem die HoloLens Visualisierungen darstellen kann. Die Visualisierung wird in der oberen Ecke des grau hinterlegte Kastens dargestellt.

Warning Frame

Diese Visualisierung verfolgt ein ähnliches Ziel wie die zuvor beschriebenen Warnsymbole. Anstatt eines Warnsymbols an einer festen Stelle im Sichtbereich des Betrachters, ist

die Idee dieses Konzeptes den ganzen Sichtbereich auszunutzen, ohne eine Verdeckung im Fokus des Nutzers zu erzeugen. Hierfür bietet sich ein Rahmen an, der sich dem HoloLens-Sichtbereich des Nutzers anpasst. Dieser Rahmen wird dauerhaft eingeblendet und kann ähnlich der Warnsymbole die Farbe wechseln. Die Farbkodierung folgt ebenfalls den vorherigen Konzepten. Dieser Rahmen hat verschiedene Darstellungsparameter. Zum einen eine dauerhafte Visualisierung wie in Abbildung 3.13 dargestellt ist. Zum anderen können auch nur bestimmte Farbbereiche dargestellt werden. So kann Beispielsweise auf den grünen Farbrahmen verzichtet werden, sodass der Rahmen nur zu kritischen Situationen eingeblendet wird. Als dritte Option soll dieser Rahmen ähnlich dem Konzept des Warnbereichs blinken können.

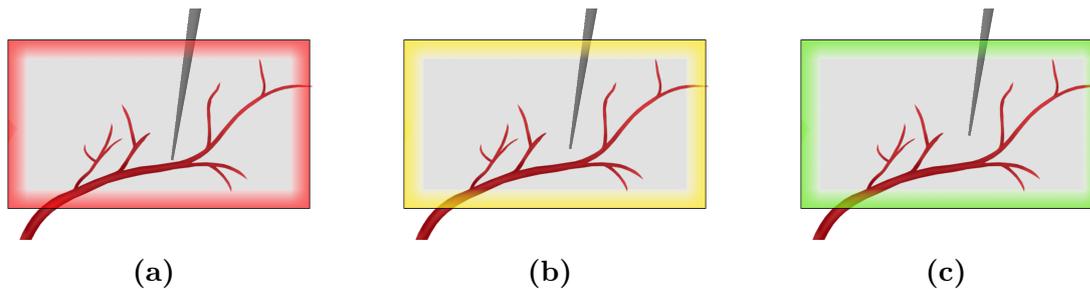


Abbildung 3.13: Sichtbereich-Warnung Visualisierung aus verschiedenen Distanzen. Der grau hinterlegte Kasten beschreibt den Ausschnitt in dem die HoloLens Visualisierungen darstellen kann.

3.4 Diskussion

Die vorgestellten Navigationskonzepte kombinieren zuvor untersuchte Konzepte, passen sie an oder ergänzen sie. Die Konzepte Pointer und Radar beschreiben in ihrer originalen Form stark reduzierte Visualisierungen [25]. So werden Distanzinformationen auf Strahlen mittels drei Farbsektoren kodiert. Detailliertere Informationen über einen exakteren Abstand erhält der Nutzer nicht. Mit der Ergänzung der beschriebenen schwarzen Abstandsmarken kann dem Nutzer zusätzliche Informationen über die Distanz anvisierter Strukturen, bei gleichbleibender Verdeckung durch die Visualisierung erhalten. Die zuvor in Abschnitt 3.1.2 beschriebene Anforderung der Minimalansicht bleibt trotz dieser Ergänzung erhalten. Weiterhin sollte in allen Konzepten untersucht werden, ob die Verwendung einer kontinuierlichen Farbskala, anstatt wie in der ursprünglichen Arbeit genutzten diskreten Farbskala verwendet werden könnte. Kontinuierliche Skalen werden oft genutzt, um eine möglichst genaue Beschreibung zu erzeugen, während diskrete Farbskalen eher dafür geeignet sind Bereiche/Regionen abzudecken [46].

Das Konzept der Virtual Lighthouses benötigt im Vergleich zu den anderen Konzepten einen zusätzlichen Vorverarbeitungsschritt [25]. So müssen im Vorfeld kritische Punkte definiert werden. Neue kritische Punkte, welche im Verlauf einer Operation entstehen, können mit dieser Konzeption nicht beachtet werden. Dies verstößt zum Teil gegen die nicht-funktionale Anforderung der Effizienz. Diese Arbeitsschritte müssten ausgelagert werden und im Rahmen einer detaillierteren Aufbereitung dieses Konzeptes voraussichtlich automatisiert platziert werden können, sodass die potentielle Effizienzminderung in diesem Schritt der Ausarbeitung weniger stark bewertet werden kann.

Das Konzept Ring bietet für sich allein stehend nur Informationen über den Abstand seitlich zur Nadel. Für kritischere Informationen vor der Nadelspitze fehlen Navigationshinweise, daher sollte dieses Konzept nur in Kombination mit anderen Konzepten, wie beispielsweise dem Pointer verwendet werden. Weiterhin können Teile dieser Visualisierung durch das Ausdehnen von umliegenden Strukturen verdeckt werden. Für diesen Zeitraum können somit keine Informationen aus der Visualisierung genutzt werden. Dieser Effekt verstärkt sich bei geringen seitlichen Abständen, durch größeren Zeitraum in dem die Visualisierung nicht zu sehen ist. Weiterhin muss die ideale Breite des Rings bestimmt werden, um der Anforderung des Minimalkonzepte gerecht zu werden.

Das Konzept des Distance Sensors sollte ähnlich dem Ring nicht alleinstehend aufgrund fehlender Informationen im vorderen Werkzeugbereich verwendet werden. Im Gegensatz zum Ring wird diese Visualisierung nur aktiv, wenn sich der Nutzer in einem kritischen Bereich aufhält. Weiterhin wird nur der kritische Bereich angezeigt. Daher ist dieses Konzept ein weiteres Minimalkonzept, dass ähnlich dem Pointer und dem Radar möglichst wenig Verdeckung durch die Visualisierung erzeugt.

Im Gegensatz dazu steht die Map-Visualisierung. Diese gibt durch ihre flächendeckende Visualisierung ein detaillierteres Abstandsbild der Umgebung an. Gleichzeitig werden dauerhaft Objekte/Strukturen verdeckt. Um diese Problematik der Verdeckung zu minimieren und den in Abschnitt 3.1.2 aufgestellten Anforderungen gerecht zu werden, sollte eine geeignete Transparenz für diese Visualisierung bestimmt werden. Diese Problematik kann durch eine Anpassung abgeschwächt werden. Anstatt Flächendeckend zu visualisieren, könnten nur Elemente der Halbkugel dargestellt werden.

Das Konzept Closest Point zeigt im gesamten Arbeitsbereich des Werkzeuges, den am dichtesten Punkt an und verbindet diesen mit Hilfe eine Linie mit der Werkzeugspitze [14]. Im Gegensatz zu den anderen Visualisierungen ist hier sichergestellt, dass immer der kritischste Bereich, also der Bereich mit dem geringsten Abstand dargestellt wird. In Verbindung mit einem Label, welches die Distanz direkt in beispielsweise Zentimeter anzeigt kann so der Risikobereich vom Nutzer direkt abgelesen werden. Der Closest Point kann jedoch in bestimmten Umgebungen mit vielen Engstellen, wie beispielsweise bei der Navigation zwischen Blutgefäßen, häufig die Position wechseln. So ist es denkbar, dass der Closest Point sich zu einem Zeitpunkt links des Werkzeuges und zum nächsten Zeitpunkt rechts des Werkzeuges befindet. Daher ist es möglich, dass die beim Nutzer Verwirrungen erzeugen könnte. Weiterhin zeigt dieses Konzept nur einen kritischen Punkt. Andere Konzepte wie zum Beispiel die Map oder der Ring lassen mehr als einen kritischen Punkte zu.

Im letzten Konzept (Paint Over) der direkten Navigationswarnungen werden Distanzinformationen durch einfärben der umliegenden Strukturen selbst kodiert. Dadurch entsteht keine Verdeckung durch zusätzliche Inhalte. Bei Betrachtung in einem realen-weltlichen Kontext, kann eine Überlagerung von Strukturen dazu führen, das Blutungen oder vergleichbare Risikofaktoren überdeckt und dadurch vom Arzt nicht wahrgenommen werden kann.

Die zueinander ähnlichen Konzepte Warnsymbol und Warning Frame arbeiten komplett losgelöst davon Visualisierungen an der Werkzeugspitze einzublenden. Daher kann es dort im kritischen Bereich auch nicht zu einer Verdeckung durch die Visualisierungen kommen. Jedoch wird dem Nutzer nicht angezeigt wo genau eine kritische Distanz unterschritten

wird. Weiterhin wäre es möglich, dass der Nutzer das Warnsymbol nicht wahrnimmt, da er auf die Werkzeugspitze fokussiert ist. Das Konzept der Sichtbereichswarnung hingegen könnte eine zu große Ablenkung erzeugen. Verstärkt werden könnte dies, da die Visualisierung auf Grund der limitierten Projektionsfläche der HoloLens noch zu sehr im Zentrum der Nutzersicht liegt.

3.5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel ist zu Beginn eine Anforderungsanalyse durchgeführt worden. Dazu wurden anhand von Rahmenbedingungen Anforderungen ausgearbeitet. So wurde ein Regelwerk aufgestellt, mit dem ein Prototyp skizziert und verschiedene Navigationskonzepte entwickelt werden können. Die Tabellen 3.1 und 3.2 fassen diese Anforderungen zusammen. In dem Kapitel 5 (Evaluation) wird im späteren Verlauf dieser Arbeit untersucht, ob alle Anforderungen erfüllt worden sind.

Im nächsten Schritt wurde der Anwendungsaufbau ausgearbeitet. Die Kernanwendung zur Darstellung von AR-Visualisierungen soll für die HoloLens entwickelt werden. Über eine WLAN-Verbindung soll unter Verwendung des Netzwerkprotokolls UDP Trackinginformationen an die HoloLens gesendet werden. Die Registrierung der Koordinatensysteme zwischen HoloLens und dem Trackingsystems soll mit einer Kombination aus einem Bildmarker und einem IR-Marker realisiert werden. Nachdem der Anwendungsaufbau diskutiert worden ist, wurden im Anschluss verschiedene Visualisierungskonzepte ausgearbeitet und bestehende Konzepte erweitert. Die Konzepte unterteilen sich in zwei Hauptkategorien. Direkte Navigationswarnungen stellen Visualisierungen an einem medizinischen Instrument dar. Indirekte Navigationswarnungen stellen Visualisierungen an einer festen Position im Sichtbereich des Nutzers dar. Die entwickelten Konzepte besitzen unterschiedliche Eigenschaften und sollen im nachfolgenden Kapitel implementiert werden.

4 Realisierung

Unter der Berücksichtigung der im vorherigen Kapitel definierten Anforderungen wird in diesem Kapitel der Prototyp realisiert und die Konzepte implementiert. Dazu wird der technische Aufbau beschrieben und die resultierenden Limitierungen aufgezeigt. Im Anschluss werden die Komponenten des Prototypen dargestellt und ein Überblick in den Programmablauf aufgezeigt. Daran anknüpfend werden wichtige Aspekte zur Implementierung der Visualisierungskonzepte beschrieben.

4.1 Technischer Aufbau

Um die in der Konzeption dargestellten Visualisierungen zu ermöglichen wird verschiedene Hardware benötigt. Für die Darstellung der von AR-Visualisierungen wird, wie in den Rahmenbedingungen gefordert, die Microsoft HoloLens (Microsoft Corporation, USA) verwendet.

Die HoloLens besitzt einige Limitierungen hinsichtlich der visuellen Qualität und Ortsstabilität in der virtuelle Inhalte dargestellt werden [58]. Standardmäßig empfiehlt der Hersteller virtuelle Objekte bei freier Bewegung im Raum erst ab einem Mindestabstand von 1,25m und einem Maximalabstand von 5m zwischen Nutzer und Objekt darzustellen. Idealerweise sollten Objekte in einem Abstand von 2m positioniert werden, da Objekte in dieser Distanz besonders scharf vom HoloLens-Display dargestellt werden können. Bei stationärer Nutzung mit wenig Bewegung durch den Nutzer und der virtuellen Objekte kann die Minimalgrenze auf einen Abstand von 50cm reduziert werden. Für den Einsatz in dieser Arbeit müssen auch Objekte in geringerer Distanz dargestellt werden können, um gezielt mit den in Kapitel 3 beschriebenen Konzepten zu arbeiten. Unter der Berücksichtigung, dass Objekte nach Empfehlung des Herstellers nicht näher als 50 cm dargestellt werden sollten, ist es dennoch mit der HoloLens möglich im Nahbereich Objekte darzustellen. Für den Rahmen dieses Prototypen wurde die Grenze auf 10cm festgelegt. Welchen Einfluss dies auf die Bildqualität und die Ortsstabilität der HoloLens hat wird im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Weiterhin empfiehlt der Entwickler, dem Gerät einen Fokuspunkt zu definieren, mit dessen Hilfe sie eine höhere Ortsstabilität für virtuelle Objekte erzeugen kann. Dafür wurde ein Mittelpunkt im Raum gewählt, in dem später, wie in den Rahmenbedingungen vorgegeben, virtuellen Lebermodelle für den Nutzer eingeblendet werden [58].

Weiterhin bietet die HoloLens nicht direkt eine Möglichkeit exakt Werkzeuge oder medizinische Instrumente zu verfolgen. Um dies zu ermöglichen wurde die *spryTrack sTk 180* der Firma Atracsys Atracsys LLC verwendet. Diese erlaubt es passive und aktive Infrarot Marker (nachfolgend IR-Marker genannt), zu verfolgen. Nach Herstellerangabe (aus dem der Hardware beigelegten Handbuch) ist die Genauigkeit der IR-Marker Detektion im Arbeitsbereich 20 cm bis 1 m am höchsten. Bei einem 95%- Konfidenzintervall liegen

fehlerhafte Messungen im quadratischen Mittel bei 0,13 mm und innerhalb 0,26 mm. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher dieser Arbeitsbereich gewählt. Die Latenz zur Ermittlung der IR-Marker Pose beträgt nach Herstellerangaben ≈ 25 ms. Je nach verwendeten Einstellungen kann der Wert schwanken. Durch diese Latenz ist es nicht möglich bei einer Framerate von 60 fps auf Seiten der HoloLens für jeden Frame neue Trackingdaten zur Verfügung zu stellen. Für diese Arbeit werden, sofern keine aktualisierte Trackinginformationen vorliegen, alte Informationen verwendet. Auf eine zusätzliche Prädiktion von Trackinginformation mit dem Kalman-Filter [27] oder Ähnlichem wird im Rahmen dieses Prototypen verzichtet. Für den Prototypen wurden zwei passiver IR-Marker verwendet. Einer zur Registrierung zwischen HoloLens und Atracsys-Kamera (siehe Abschnitt 4.1.2), der zweite zur Verfolgung eines medizinischen Instruments. Dafür wurden passive IR-Marker des Herstellers CASCINATION AG mit der Produkt-ID *MS2-05-007* und *MS3-02-001* genutzt, da diese in der Atracsys-API [1] bereits standardmäßig verwendet werden, um Fehler bei der Einmessung eigener Marker zu vermeiden.

Zur Kommunikation zwischen Trackingsystem und HoloLens wurde ein Steuerungsrechner und ein WLAN-Router (*R6120*) der Firma NETGEAR, Inc. (USA) verwendet. Für eine Studie in Kapitel 5 wird zusätzlich ein Fußschalter verwendet, mit dem Interaktionen mit Visualisierungskonzepten möglich sind.

Für die Implementierung wurden verschiedene externe Softwaretools genutzt. Als Entwicklungsumgebung für AR-Visualisierungen wurde die Game Engine *Unity 2018.1.6f1* [59] in Verbindung mit *Visual Studio 2017* [40] genutzt. Zusätzlich wurde das Unity-Package *HoloToolkit 2017.4.0.0* [39] verwendet, um die Entwicklung für die HoloLens zu vereinfachen und eigenständig aktualisiert um die Kompatibilität mit *Unity 2018.1.6f1* zu gewährleisten. Zusätzlich wurde das *Vuforia SDK 7.2.20* [48] für das Erkennen von Bildmarkern verwendet. Zur Kommunikation mit der Trackingkamera wurde die Hersteller API *spryTrack SDK RC6* [1] verwendet. Entwickelt wurden Anwendungen in den Programmiersprachen C++ und C#.

Zur Umsetzung wurden mehrere Programme entwickelt. Diese gliedern sich in drei Hauptkategorien ein. Zum einem die **Hololens-Komponente**, welche den Kern dieser Arbeit bildet. Hier werden die AR-Visualisierungen errechnet, Abstände und mögliche Kollisionen bestimmt. Die zweite Komponente, nachfolgend **Kontroll-Komponente** genannt, stellt eine Steuerungsanwendung auf einem separaten Rechner dar. Mit ihr können Visualisierungen aktiviert oder deaktiviert werden. Zusätzlich können auch Anpassungen an den Visualisierungen oder generelle Aufgaben verwaltet werden. Die letzte Komponente, nachfolgend **Tracking-Komponente** genannt, empfängt Trackingdaten leitet diese an die HoloLens-Komponente weiter.

4.1.1 Programmablauf

Abbildung 4.1 skizziert den vereinfachten Programmzyklus und Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten. Nach einer Registrierung, siehe Abschnitt 4.1.2, zwischen HoloLens und externem Trackingsystem wird für jeden Zyklus zunächst überprüft, ob für den aktuellen Zyklus neue Trackinginformation des externe Trackingsystems vorliegen. Falls nicht, wird anstatt auf neue Informationen zu warten, alte Daten verwendet. Dies ist notwendig, um eine hohe Framerate der HoloLens zu gewährleisten. Diese ist neben einer flüssigen Bilddarstellung notwendig, da sich die HoloLens eigenständig im Raum

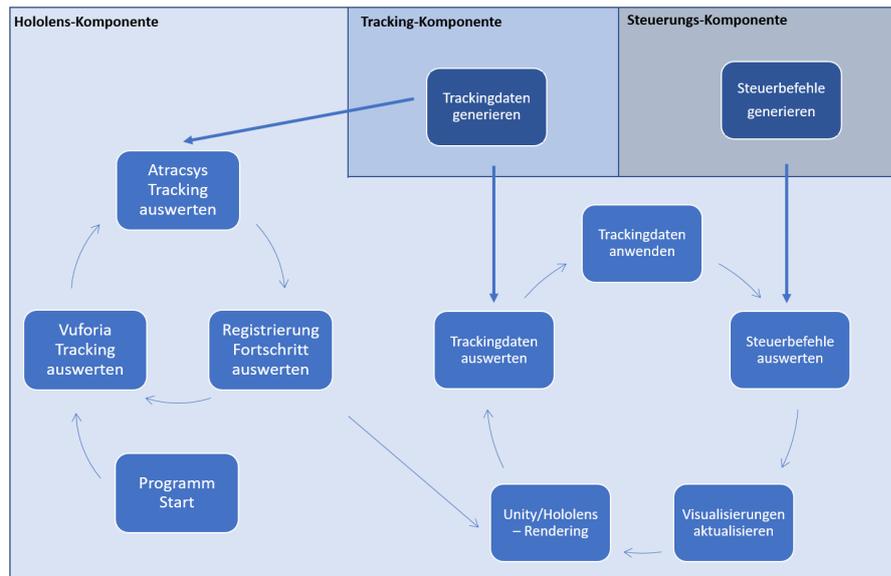


Abbildung 4.1: Grober Programmablauf der entwickelten Komponenten.

orientiert und die Aktualisierung der HoloLens-Pose und die daraus notwendige neu Berechnung der AR-Darstellung gewährleistet sein muss [58]. Mit der Atracsys-API, werden mit Hilfe einer C++ - Anwendung aktuelle Trackingdaten von der Kamera ausgelesen. Diese beinhalten neben der Position und Orientierung auch eine eindeutige ID des erkannten IR-Markers, anhand deren sie identifiziert werden können. Sind neue Trackinginformationen vorhanden, werden diese direkt über eine UDP-Netzwerkschnittstelle an die HoloLens-Komponente übertragen. Je nachdem, ob aktuelle Trackinginformation an der HoloLens-Komponente zur Verfügung stehen, werden diese Positions- und Rotationsinformationen auf das virtuelle Werkzeug angewendet. Im nächsten Schritt wird überprüft, ob neue Informationen der dritten optionalen Komponente zur Verfügung stehen.



Abbildung 4.2: UI-Interface der Kontroll-Komponente zur Manipulationen verschiedener Visualisierungskonzepte.

Diese Komponente kann verwendet werden, um Visualisierungen zu aktivieren beziehungsweise zu deaktivieren oder um einzelne Parameter der Visualisierung zu beeinflussen. Abbildung 4.2 stellt einen Ausschnitt der Steuerungsanwendung zur Manipulation von verschiedenen Visualisierungen dar. Im Kapitel 5 wird diese Komponente dazu genutzt, um den Studienverlauf zu steuern. Im Anschluss werden je nach Visualisierung benötigten Informationen, wie beispielsweise über den horizontalen Abstand zu umliegenden Strukturen, berechnet und Visualisierung dementsprechend aktualisiert und schlussendlich wird von der Game-Engine die finale AR-Darstellung berechnet und dann von der HoloLens angezeigt. Der Zyklus beginnt vom Neuen mit der Überprüfung nach neuen externen Trackinginformationen.

4.1.2 Registrierung

Das Trackingsystem und die HoloLens ermitteln Positionen und Orientierungen in verschiedenen Koordinatensystemen. Um eine Überführung dieser Systeme zu bewerkstelligen wurde ein kombinierter Marker (nachfolgend Duo-Marker genannt) (siehe Abbildung 4.3) entwickelt. Dieser besitzt passive IR-Marker, dessen Pose durch das Trackingsystem ermittelt werden kann und einen Bildmarker, dessen Pose durch die HoloLens-Webcam und dem Vuforia-SDK ermittelt wird. Die IR-Marker wurden auf einem Stützstreifen in einem 90 Grad Winkel zum Bildmarker angebracht, um verdeckungsfrei durch das Trackingsystem lokalisiert zu werden. Abbildung 4.4 verdeutlicht den gesamten Registrierungs Aufbau. Die Transformation zwischen IR- und Bildmarker wurde im Anschluss ausgemessen.

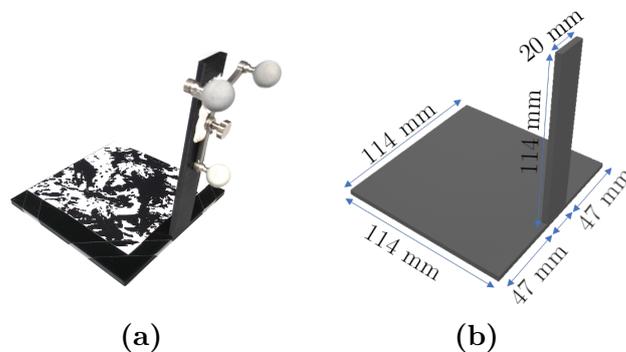


Abbildung 4.3: Duo-Marker (a) bestehend aus einem Bildmarker und passiven IR-Reflektoren. Das schwarze Trägerstück wurde mit Hilfe eines 3D-Druckers erstellt. Die Maße des Trägerstücks (b) betragen 114 mm in der Breite, Höhe und Tiefe. Der Stab zur Befestigung der passiven Reflektoren ist 20 mm breit und wurde mittig platziert. Alle Flächen wurden gleichmäßig 3 mm dick gedruckt.

Das Unity-Plugin Vuforia ermöglicht es Bildmarker im Raum zu erkennen. Dabei werden Bild-Marker im Videostream der Videokamera gesucht und anhand ihrer Größe und der Pose der HoloLens kann die Pose des Bildmarkers im HoloLens/Unity Koordinatensystem bestimmt werden. Um eine stabile und schnelle Erkennungsrate zu erhalten, werden einige Anforderungen an den Bildmarker gestellt. Der Vuforia-Entwickler nennt dafür drei Kernattribute, welche auch bei der Erstellung des Markers verwendet wurden: Detailreichtum,



Abbildung 4.4: Aufbau des Registrierungsprozess: Ein Nutzer trägt eine HoloLens und fokussiert den Bild-Marker. Parallel dazu werden die passiven Reflektoren durch die Atracsys-Kamera getrackt.

guter Kontrast und keine wiederholenden Muster [47]. Diesen Anforderungen folgend, wurde ein Bildmarker mit Hilfe eines Bildverarbeitungsprogramm erstellt. Die Abbildung 4.5 (a) stellt das Endergebnis dar. Auf der Vuforia Entwicklerwebseite wurde dieser Marker anschließend registriert und bewertet. Die Bewertung erhielt die maximale Punktzahl. In Abbildung 4.5 (b) werden die durch Vuforia erkannten Features durch gelbe Kreuze dargestellt. Nachdem beide Geräte (HoloLens/Trackingsystem) den Duo-Marker erfasst haben, kann eine finale Transformation bestimmt werden.

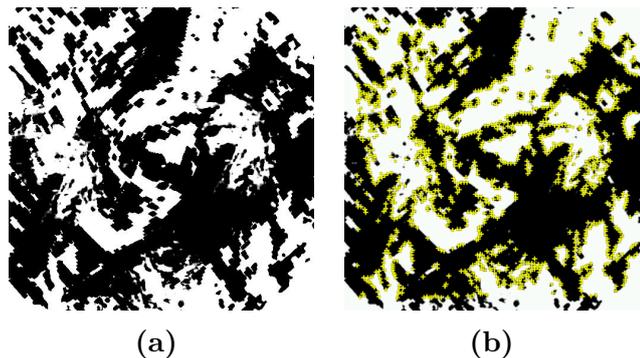


Abbildung 4.5: Verwendeter Bild-Marker. Links ohne Features, Rechts mit durch Vuforia erkannte Features.

Die Abbildung 4.6 beschreibt alle nötigen Transformationen, die für Registrierungsprozess notwendig sind. Das Trackingsystem stellt Positions- und Orientierungsinformationen in einem rechtshändigen Koordinatensystem dar, während Unity Informationen in einem linkshändigen Koordinatensystem zur Verfügung stellt. Diese Umrechnung wurde zur Vereinfachung der Erklärung nicht aufgelistet. Das Weltkoordinatensystem w wird zum Start der Anwendung automatisiert durch die HoloLens festgelegt. T_w^h beschreibt die Transformation zwischen Ursprung und der HoloLens (h). Das Vuforia Plugin ermittelt mit Hilfe HoloLens-Webcam die Pose des Bildmarkers (r) und bestimmt anschließend mit Rückschluss zu T_w^h die Transformation T_w^r . Die Transformation T_r^n vom Bildmarker (r) zum IR-Marker (n) wurde im Vorfeld eingemessen und ist bekannt. Die Trackingkamera c ermittelt die Transformation T_c^n aus Richtung der Kamera zum IR-Marker. Um die Transformation von IR-Marker (n) in Richtung der Trackingkamera (c) zu bestimmen, muss die inverse Transformation bestimmt werden. Durch anwenden der zuvor bestimmten Transformationsschritte kann anschließend die Transformation T_w^c bestimmt werden.

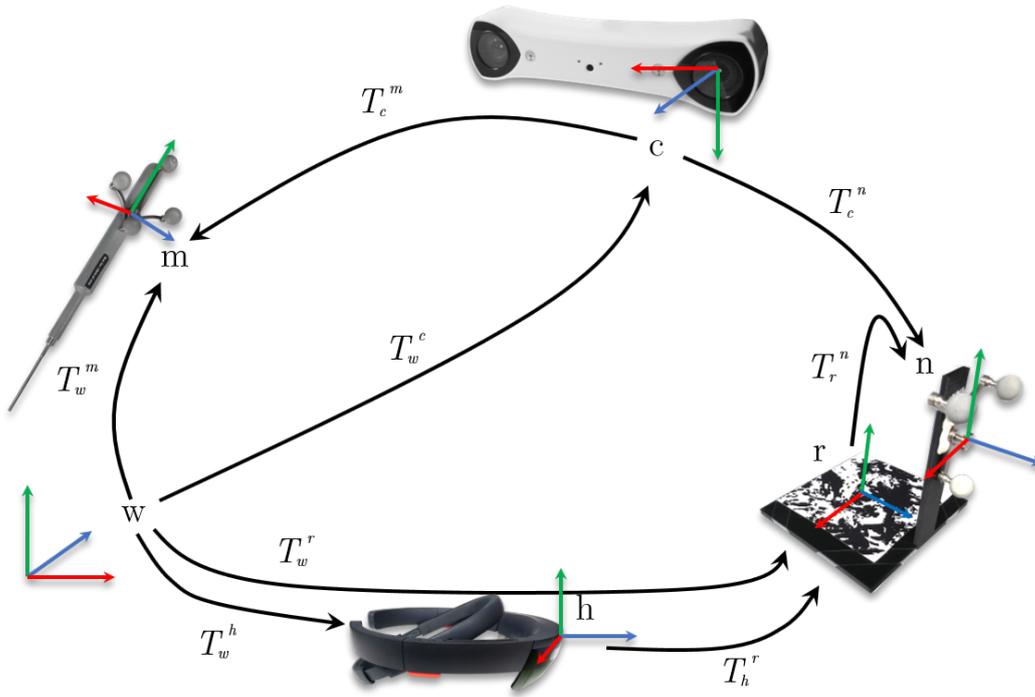


Abbildung 4.6: Das Ursprungskoordinatensystem w wird zum Start der Anwendung festgelegt. Mit c ist das Koordinatensystem der Kamera gekennzeichnet, h die HoloLens, m beschreibt den IR-Marker zur Interaktion, r den Bildmarker des Duo-Markers und n den IR-Marker des Duo-Markers. Mit T werden Transformationen bezeichnet. Gesucht wird die unbekannte Transformation T_w^m .

Diese beschreibt die Registrierungstranformation und muss nach Anwendungsstart nur einmalig bestimmt werden. Die Gleichung 4.1 fasst alle Schritte zusammen. Die gesuchte Transformation T_w^m kann anschließend für jede aktualisierte Pose von m aus T_w^c und der neuen durch die Atracsys-Kamera bestimmte Transformation T_c^m bestimmt werden (siehe Gleichung 4.2).

$$T_w^c = (T_c^n)^{-1} * T_r^n * T_w^r \quad (4.1)$$

$$T_w^m = T_c^m * T_w^c \quad (4.2)$$

Um Messfehler bei der Ermittlung der Pose (Bildmarker/IR-Marker) zu minimieren, wurden Trackinginformationen mehrerer aufeinander folgender Frames (drei Sekunden mit je 30 Frames) beider Systeme aufgezeichnet und anschließend gemittelt. Die Reduzierung auf 30 FPS statt 60 FPS ist durch das Vuforia-Plugin notwendig. Nach der Registrierung wird dieses Plugin deaktiviert, damit die Anwendung anschließend in einer Darstellungsgeschwindigkeit von 60 FPS arbeiten kann.

4.2 Visualisierung der Navigationskonzepte

In diesem Abschnitt wird die Implementierung einzelner Visualisierungskonzepte detailliert betrachtet.

Die Konzepte verbindet eine einheitliche Ampel-Farbkodierung, bestehend aus den Kernfarben rot (geringer/kritischer Abstand zu den umliegenden Strukturen < 0,5 cm), gelb (mittlerer Abstand 0,5 cm bis 1 cm) und grün (sicherer Abstand). Der Farbwechsel wurde diskret mit den drei festgelegten Farben und kontinuierlich mit Hilfe einer *Color-Map*, welche zwischen den festgelegten Farben interpoliert, realisiert. Der Austausch der Farbskala/Color-Map ist möglich, um beispielsweise die verwendete Skala durch eine für farbenblinde Personen besser unterscheidbare Skala zu ersetzen.

Die Konzepte Pointer und Radar folgen dem in der Konzeption skizzierten Aufbau. Für den Strahl wurde ein Raycast ausgehend der Instrumentenspitze gesendet, bis dieser auf eine umliegende Struktur trifft. Für den Pointer wird der Raycast entlang Instrumentrichtung (nach vorne), für den Radar abgewinkelt zur Instrumentrichtung (seitlich) verfolgt. Die Geschwindigkeit und der Winkel des Radars kann beliebig verändert werden. Die Linie wird mit dem *Unity LineRenderer* dargestellt. Die in den Konzepten beschriebenen schwarzen Abstandsbalken werden nachträglich mit Hilfe eines *Unity LineRenderer* auf die Linie kopiert. Es existieren vier verschiedene Darstellungsmöglichkeiten. Abbildung 4.7 veranschaulicht diese. Für das Konzept Extended Radar wird in jedem Frame

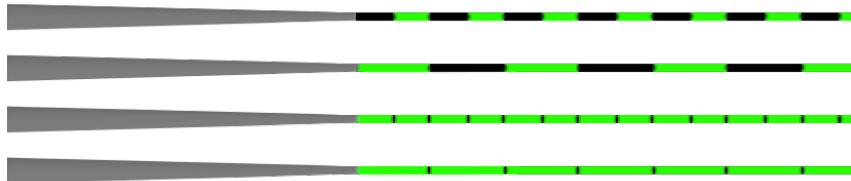


Abbildung 4.7: Variation Abstandsbalken von oben nach unten:

- 0,5cm Schwarzer Balken im Wechsel
- 1,0cm Schwarzer Balken im Wechsel
- 0,5cm Markierung
- 1,0cm Markierung

eine Dreiecksfläche aus dem Schnittpunkt Radar/Umgebung, Pointer/Umgebung und Instrumentenspitze berechnet. Weiterhin werden in jedem Frame die Distanzinformationen von Pointer und Radar ausgelesen und die Fläche entsprechend der geringsten Distanz eingefärbt. Die Opazität der Fläche ist variabel verstellbar.

Für das Konzepte Map (und die erweiterte Ringdarstellung der Map) wird ein 3D-Mesh in die Applikation geladen und an die Spitze des virtuellen Instruments verschoben. Die einzelnen Flächen des 3D-Mesh werden entsprechend ihrer Distanz zu den umliegenden Objekten eingefärbt. Dazu wird für jeden Vertex (V_i) im 3D-Mesh ein Raycast von der Instrumentenspitze in Richtung V_i verfolgt, bis dieser auf eine Struktur trifft. Die Distanz zwischen Schnittpunkt und Instrumentenspitze wird im Anschluss ermittelt und zum V_i gespeichert. Mit Hilfe eines Pixel-Shader werden anschließend die Farbwerte entsprechend der zu den Vertices gespeicherten Distanzinformationen bestimmt. Das Detailreichtum dieser Konzepte ist somit abhängig von der Anzahl der gleichmäßig verteilten Vertices im

3D-Mesh. Das Mesh der Map und das Mesh der erweiterten Map bestehen jeweils aus ≈ 1.000 Vertices. Beide Konzepte dehnen sich in einer gleichmäßigen, variabel verstellbaren, Geschwindigkeit aus. Weiterhin muss eine Maximalausdehnung festgelegt werden. Nachdem dieser Ausdehnungsgrad erreicht ist, wird die Visualisierung auf den initialen Radius zurückgesetzt.

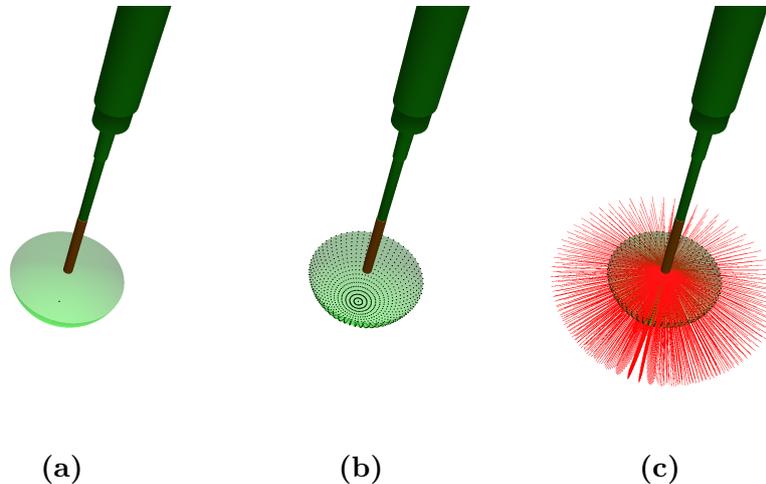


Abbildung 4.8: Map-Funktionsweise: (a) Finale Darstellung ohne Hindernisse. (b) Darstellung mit eingefärbten Vertices des 3D-Mesh. (c) Darstellung mit eingefärbten Vertices des 3D-Mesh und eingefärbten Strahlen zur Distanzberechnung.

Für das Konzept Ring wird in jedem Frame ein neues 3D-Mesh entsprechend des aktuellen Durchmessers berechnet. Der Radius und die Breite des Rings kann variabel festgelegt werden. Analog zu den vorherigen Konzepten dehnt sich der Ring in einer gleichmäßigen, variabel verstellbaren, Geschwindigkeit aus. Bei der Überschreitung der Maximalausdehnung des Rings wird dieser auf den initialen Radius zurückgesetzt. Das 3D-Mesh des Rings ist in 250 Segmente (500 Vertices) unterteilt, welche analog des Vorgehens des Konzepts Map über die Distanzbestimmung über Raycasting eingefärbt werden.

Das Konzept Distance Sensor wurde in der Implementierung im Funktionsumfang eingeschränkt. Statt alle Strukturen im Bereich der Instrumentenspitze für die Distanzerkennung und zur Markierung durch eine Visualisierung zu nutzen, werden nur Strukturen in der Orthogonalen für die Berechnung berücksichtigt. Dadurch lässt sich die Relation zwischen Instrumentenspitze und Umgebung einschätzen. Dies ist vergleichbar mit dem Konzept Ring. Für das Konzept wurde dieselbe Basisimplementierung verwendet. Die Parameter wurden angepasst, sodass sich die Visualisierung nicht ausdehnen kann. Die im Ring dargestellten grünen und gelben Bereiche wurden entfernt und der innere Radius wurde auf Null gesetzt. Der äußere Radius wurde auf 1,5 cm festgelegt. Ein Segment wird rot dargestellt und nur angezeigt, wenn der Abstand zwischen Instrumentenspitze in Richtung eines Segmentes zu Strukturen einen Zentimeter unterschreitet. Durch die Differenz zwischen äußerem Radius (1,5 cm) und die die Distanz der Abstandsmessung wird gewährleistet, dass die Visualisierung dünnere Strukturen schneidet. Durch diese Schnittebene kann der räumlich Eindruck verbessert werden. Analog zum Ring werden für diese

Konzept 250 Segmente (500 Vertices) untersucht. Anders als in den Konzepten beschrieben ist die Opazität der Visualisierung unabhängig von der Distanz und kann im Vorfeld festgelegt werden.

Kritische Punkte im Konzept Virtual Lighthouses müssen im Vorfeld (zum Beispiel in einer Planungsphase) festgelegt werden. Im Prototypen werden diese durch eine Linie zwischen Punkt und Instrumentspitze markiert. Weiterhin folgt die Implementierung der von Heinrich et al. dargestellten Vorgehensweise. Die Liniendicke nimmt in Richtung des kritischen Punktes zu. Linien werden periodisch ein und ausgeblendet, indem die kritischen Punkte mit Hilfe einer unsichtbaren, um die Nadelspitze rotierenden, Ebene aktiviert werden. Bei einer Aktivierung wird eine Linie sichtbar und blendet selbständig über einen variablen Zeitraum aus [25]. Die Farbkodierung folgt dem zuvor gestellten Vorgehen (diskrete oder kontinuierlich), mit der Ausnahme, dass bei sehr großen Abstand (2cm) die Linie, entsprechend der Arbeit von Heinrich et al. , nicht mehr dargestellt wird. Dies dient dazu die Übersichtlichkeit zu erhalten.

Nach Vorbild der Arbeit von Choi et al. wurde das Konzept des Closest Point entwickelt [14]. Hierfür wird eine weiße Linie zwischen Instrumentenspitze und dem nächstgelegener Punkt auf den umliegenden Strukturen gezeichnet. Weiterhin wird eine grüne Kugel auf dem nächstgelegenen Punkt eingeblendet. Choi et al. berechnen diesen Punkt mit Hilfe einer *Nearest-Neighbor* Suche und einem *k-d-Baum* über die Vertices der umliegenden Strukturen. Je mehr Vertices die umliegenden Strukturen besitzen, desto größer ist die Berechnungsdauer des Closest Point. Weiterhin geht aus der Arbeit von Choi et al. nicht hervor, ob nur die Vertices für die Berechnung des nächstgelegenen Punktes verwendet werden, oder ob auch Punkte auf den Dreiecksflächen zwischen den Vertices berücksichtigt werden. Für diese Arbeit wird daher ein anderer Algorithmus für die Berechnung des nächstgelegenen Punkt verwendet. Dazu werden sehr viele Strahlen aus Richtung der Instrumentenspitze gleichmäßig verteilt in alle Richtungen verflögt, bis diese auf umliegende Strukturen treffen. Die Schnittpunkte werden miteinander verglichen und der Punkt mit geringster Distanz bestimmt. Anschließend wird für den Punkt das zugehörige Dreieck aus dem 3D-Mesh der Strukturen rekonstruiert und der exakte minimale Abstand zwischen Instrumentenspitze und Dreieck berechnet. Unter Berücksichtigung der in der Anforderungsanalyse festgelegten Darstellungsgeschwindigkeit von 60 fps, wurde eine Anzahl von ≈ 1.300 Strahlen für Berechnung bestimmt, wobei die Berechnung auf zwei Frames aufgeteilt wird. Die maximale Berechnungsdauer ist, anderes als in der Arbeit von Choi et al. , unabhängig vom Detailreichtum der Umgebung. Der Abstand zwischen zwei Strahlenden ist abhängig von der Länge des Strahles. Je geringer die Distanz zum Instrument, desto geringer der Abstand zwischen zwei Strahlenden. Bei einer Strahllänge von einem Zentimeter beträgt der Abstand zwischen Strahlenden $\approx 1,28$ mm. Der Durchmesser der Spitze des in diesen Prototypen verwendete Instruments beträgt 1,5 mm und ist somit größer als der durch die Methode abgesuchte Bereich. Choi et al. stellen neben der weißen Linie und der grünen Schnittkugel ein Label dar, welches die Länge der Strecke in roter Schrift im Sichtbereich des Nutzers anzeigt. Für die Darstellung wurde in dieser Arbeit ein *Unity TextMesh* verwendet.

Unabhängig der kombinierten Implementation von Choi et al. , De Paolis et al. und Song et al. wurde ein Label entwickelt, welches die Option besitzt von allen implementierten

Konzepten Distanzinformationen auszulesen und anzuzeigen. Für die Darstellung wurde ebenfalls ein *Unity TextMesh* verwendet. Es sind drei Standardposition des Labels möglich. In der Variante eins wird das Label neben die Instrumentspitze, in Variante zwei neben dem Werkzeugschaft und in Variante drei an eine feste Position im Sichtbereich (links-unten) positioniert. Das Label ist in allen Variationen zum Nutzer orientiert, damit es besser gelesen werden kann.

Für die Konzepte Warn-Symbol und Warning-Frame wird ein Icon oder ein Rahmen mit Hilfe eines Unity-Canvas fest im Sichtbereich positioniert und überlagern alle anderen Visualisierungen. Für die Farbkodierungen können verschiedenen Methoden zur Distanzberechnung verwendet werden. In diesem Prototypen wird eine Distanzberechnung analog zum Konzept Closest-Point verwendet.

Die Abbildung 4.10 zeigt die Implementierungsergebnisse der Konzepte. Das verwendete Lebermodell wurde aus echten CT-Daten im Vorfeld generiert. Um die notwendigen 60 FPS auf der HoloLens zu erreichen, wurden einige Blutgefäße entfernt und das 3D-Mesh der verbleibenden Gefäße stark reduziert.

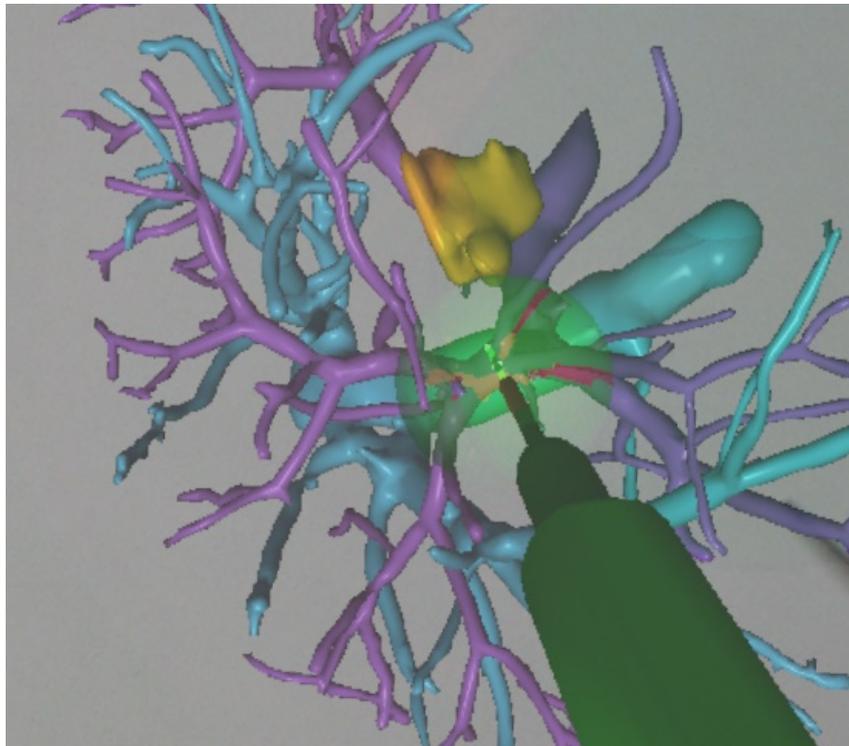
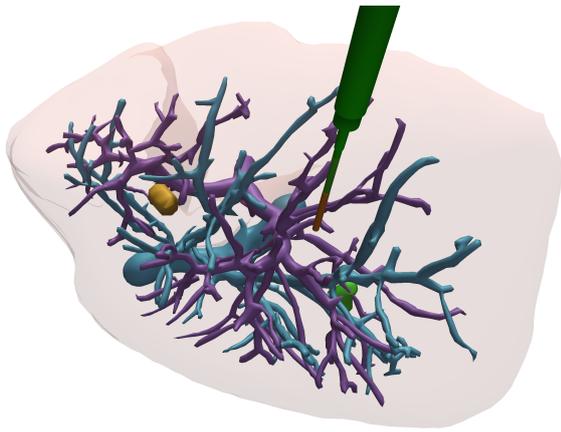


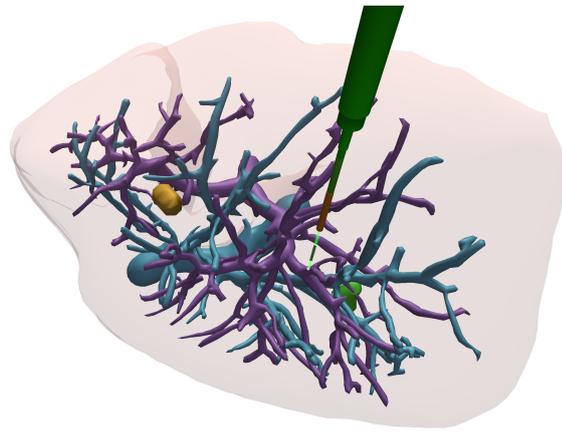
Abbildung 4.9: Visualisierungsergebnis aus Sicht eines Nutzers, welcher die HoloLens verwendet. Das Konzept Map wurde dargestellt.

4.3 Zusammenfassung

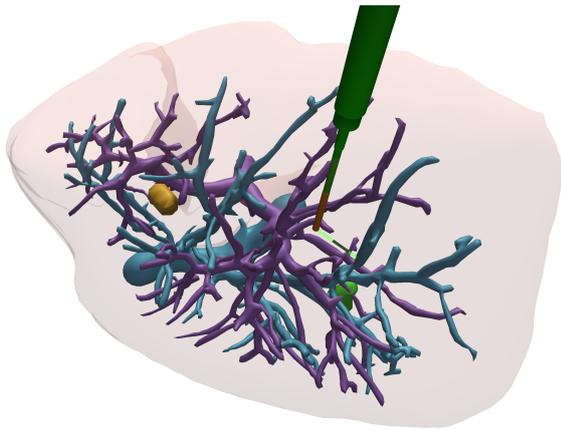
In diesem Kapitel wurde ein Prototyp, bestehend aus drei eigenständigen Anwendungen entwickelt. Die Kernanwendung wurde für die HoloLens umgesetzt. So können verschiedene Visualisierungen berechnet und durch die HoloLens dargestellt werden. Mit der Tracking-Anwendung werden Informationen vom Trackingsystem über eine Netzwerkschnittstelle an die HoloLens-Anwendung übertragen. Weiterhin wurde eine Kontroll-Anwendung entwickelt, mit der verschiedene Steuersignale zur HoloLens über eine Netzwerkschnittstelle übertragen werden können. Eine Registrierung der Koordinatensysteme wurde mit Hilfe eines Duo-Markers realisiert. Dieser enthält IR-Marker, die durch das externe Trackingsystem erfasst werden können. Weiterhin verfügt der Duo-Marker über einen Bildmarker, der durch die HoloLens erfasst werden kann. Anschließend wurden die in Kapitel 3 entwickelten Konzepte implementiert. Die Konzepte wurden so entwickelt, dass diese durch Parameter verändert werden können. Damit ist es möglich, Eigenschaften der Konzepte über die Kontroll-Anwendung zu verändern.



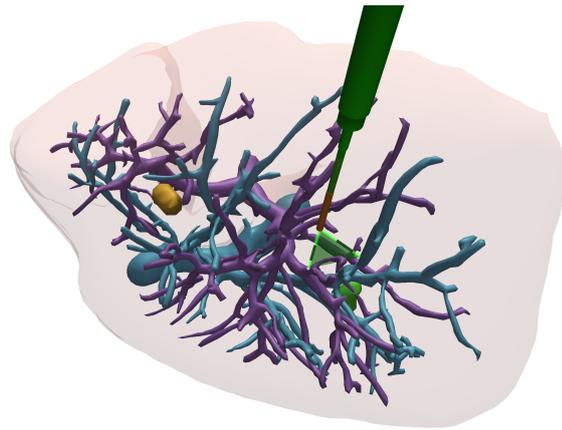
(a) Ohne Visualisierung



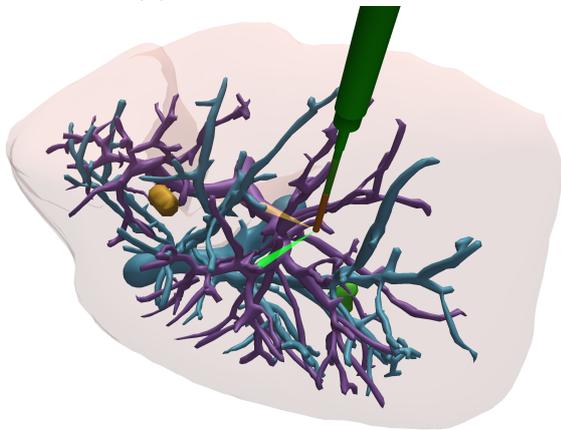
(b) Pointer Ray



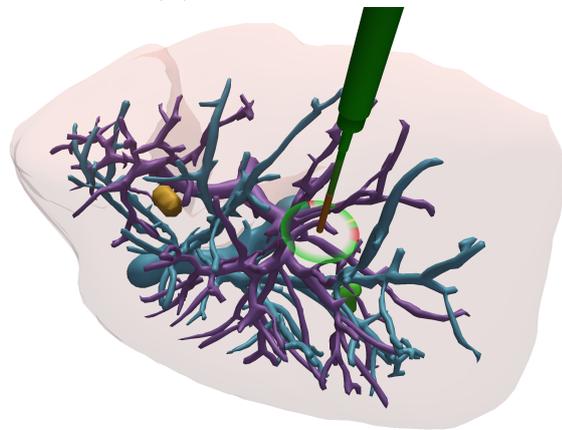
(c) Side-looking Radar



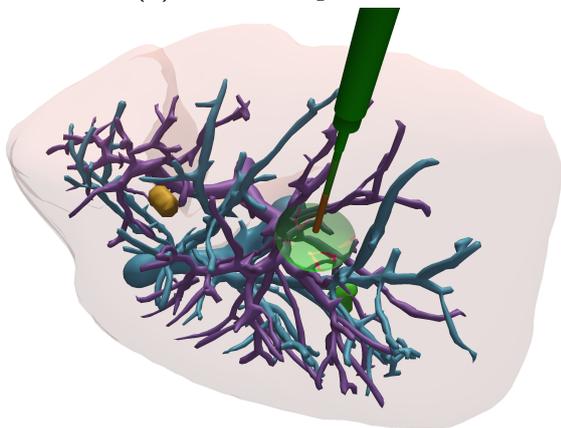
(d) Extended Radar



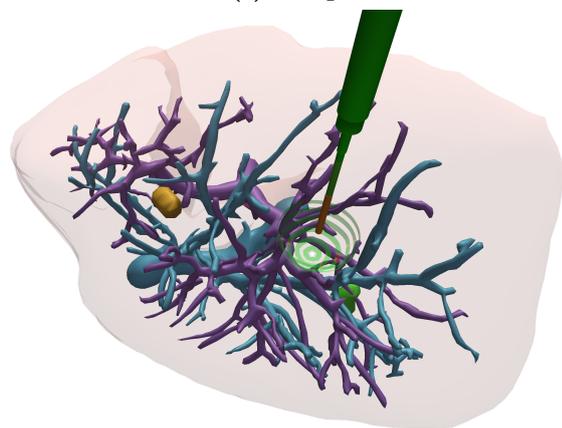
(e) Virtual Lighthouse



(f) Ring



(g) Map



(h) Map mit Ringsegmente

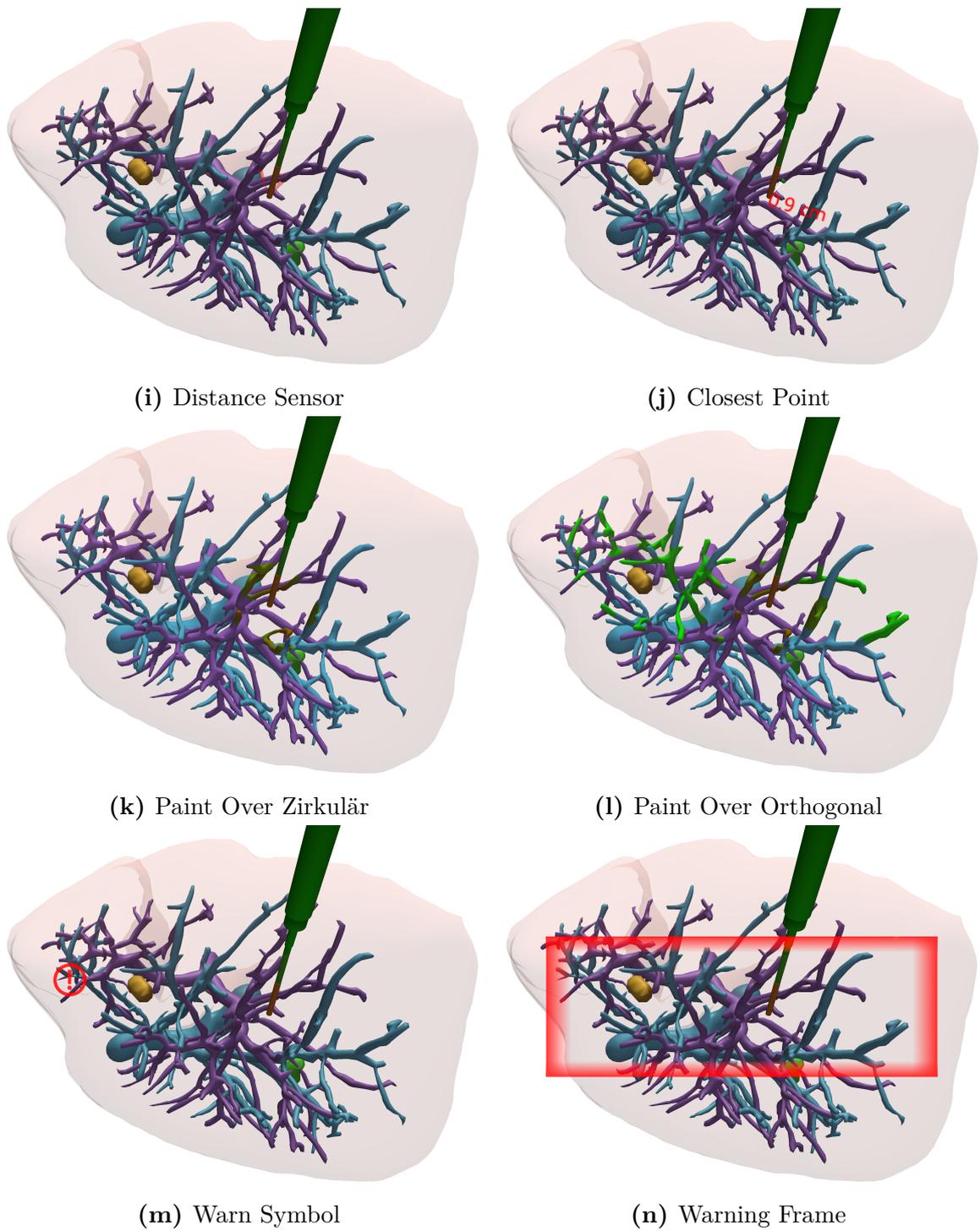


Abbildung 4.10: Screenshots der implementierten Visualisierungskonzepte.

5 Evaluation

In den vorherigen Kapiteln wurde der Prototyp unter Berücksichtigung einer Anforderungsanalyse geplant und implementiert. Die Entwicklung der Konzepte wurde variabel gestaltet, sodass zuerst durch eine Vorstudie, Parameter mit direktem Einfluss auf das Visualisierungsergebnis in diesem Kapitel festgelegt werden. Mit den Ergebnissen wird anschließend eine Qualitative Studie mit Ärzten und eine Quantitative Studie mit Studenten durchgeführt. Daran anschließend wird überprüft, ob der entwickelte Prototyp den in der Anforderungsanalyse festgelegten Anforderung standhält.

5.1 Vorevaluation

Die entwickelten Konzepte lassen Freiheitsgrade in ihrer Anwendung zu. Um eine Evaluation der Konzepte durchzuführen, müssen Freiheitsgrade durch Schwellwerte und Zustände definiert werden. Mit Schwellwerten werden Parameter wie Liniendicke und mit Zuständen werden Parameter, wie die Wahl einer kontinuierlichen oder diskreten Farbskala zusammengefasst. Nachfolgend werden untersuchte Parameter aus den Konzepten gelistet:

Schwellwertbestimmung

- Breite/Durchmesser
- Opazität
- Ausdehnungsgeschwindigkeit
- Rotationsgeschwindigkeit
- Ausblendgeschwindigkeit

Zustände

- Farbkodierung(kontinuierlich/diskret)
- Visualisierungsausrichtung
- Labelpositionierung
- Variation Abstandsbalken

Um Parameter zu bestimmen wurde ein Experiment mit insgesamt 13 Studenten durchgeführt. Nach einer kurzen Einführung in das Trackingsystem und in die HoloLens wurden die implementierten Konzepte vorgestellt und ihre Funktionsweise erklärt. Anschließend wurden die Studenten gebeten ein Nadelwerkzeug in eine virtuell durch die HoloLens dargestellte Leber einzuführen und das Verhalten der Visualisierungen zu beurteilen. Es wurde keine Navigationsaufgabe gestellt. Die Probanden sollten selbst gestellte Interaktionsaufgaben unter Verwendung der Konzepte lösen. Es gab keine Zeitbeschränkung. In Abhängigkeit der Visualisierung konnten zwei bis vier Parameter verändert und ihre favorisierte Einstellung festgelegt werden. Um die Vergleichbarkeit zwischen den Studenten zu vereinfachen wurden für jeden Parameter drei bis fünf Einstellungsmöglichkeiten vordefiniert. Die Reihenfolge der gezeigten Visualisierungen und der zu veränderbaren Parameter wurden zufällig ausgewählt. Der vollständige Fragenkatalog kann dem Anhang entnommen werden. Im Anschluss wurden die Parameter zur Schwellwertbildung durch

Mittelwerte und zur Zustandswahl durch Mehrheitsermittlung bestimmt. Die Ergebnisse können dem Anhang entnommen werden.

Im Anschluss wurde ein Fragebogen an die Probanden ausgegeben, in dem sie eine Bewertung für Konzepte und Teilkonzepte mit Hilfe einer 5-Punkt Likert-Skala abgeben sollten. Als Bewertungsgrundlage wurden sie gebeten die nachfolgende Frage zu beantworten: *Das Konzept unterstützt mich, um den Abstand zu umliegenden Strukturen zu maximieren.* Als Antwortoptionen konnte zwischen *Starke Ablehnung* (ein Punkt), *Ablehnung* (zwei Punkte), *Neutral* (drei Punkte), *Zustimmung* (vier Punkte) und *Starke Zustimmung* (fünf Punkte) gewählt werden. Zu jeder Antwort wurde entsprechend zur Wertung eine Punktzahl notiert. Anhand dieser Bewertungen wurden Mittelwerte gebildet. Die Mittelwerte bilden einen ersten Indikator dafür, welche Konzepte sich am Besten für die Aufgabenstellung (Abstandsmaximierung) eignen. So kann detailliertere Untersuchung für diese Konzepte durchgeführt werden. Ein Konzept wurde ausgewählt, wenn es im Durchschnitt mit *Neutral* oder besser bewertet worden ist. Da die Versuchsteilnehmer keine oder wenig medizinische Erfahrung besitzen, wurde keine engere Eingrenzung der Konzepte getätigt. Nachfolgend werden die resultierenden sieben Visualisierungen aufgelistet. Eine ausführlichere Auflistung der Ergebnisse kann dem Anhang entnommen werden.

Finale Konzepte

- Pointer
- Extended Radar
- Virtual Lighthouses
- Ring
- Minimap
- Closest Point
- Distance Sensor

Nach Rücksprache mit zwei Ärzten wurden Anpassungen getätigt. So wurden die Konzepte Ring und Minimap angepasst, sodass sich die Visualisierungen nicht mehr ausdehnen. Der Radius für den Ring und die Map wurden auf 1,3cm festgelegt. Die Rotationsgeschwindigkeit wurde analog zur Vorarbeit [25] auf 3s pro Umrundung festgelegt. Die Verwendung der Abstandsbalken wurde durch die Studenten und durch die Ärzte mehrheitlich positiv bewertet und wird für die nachfolgende Konzepte Pointer und Radar kombiniert. Das Konzept Pointer wurde in Rücksprache zu den Konzepten Minimap, Ring, Distance Sensor ergänzt. Die zuvor beschriebenen Konzepte werden mit den Ergänzungen und Anpassungen in den nachfolgenden Abschnitten detaillierter evaluiert.

5.2 Qualitative Evaluation

Die in Vorevaluation ausgewählten Konzepte, wurden anschließend in einer Nutzerstudie mit Ärzten genauer untersucht. An dieser Nutzerstudie haben insgesamt drei (zwei männlich, einmal weiblich) Radiologen mit jeweils 3, 6 und 7 Jahren Berufserfahrung teilgenommen.

Es wurde ein zur Vorevaluation ähnliches Szenario verwendet. Die Aufgabe bestand darin ein getracktes Nadelinstrument in eine virtuelle, durch die HoloLens dargestellte Leber zu

navigieren. Als Navigationsziel wurde eine Metastase eingeblendet. Es wurde keine Zeitbegrenzung gesetzt. Die Oberfläche und inneres Gewebe der Leber wurden ausgeblendet. Zur Auswertung wurde hierbei die Methode des Thinking-Aloud-Tests [53] angewendet. Dazu wurden die Teilnehmer gebeten ihre Aktionen, Meinung, und themenbezogene Gedanken laut auszusprechen und mit dem Versuchsleiter zu kommunizieren. Nach jeder Visualisierung wurden die Versuchsteilnehmer gebeten zwei Aussagen zu bewerten:

A1: *Die Visualisierung ist hilfreich, um sich dem Ziel (Metastase) zu nähern und den Abstand zu umliegenden Strukturen zu maximieren.*

A2: *Die Visualisierung unterstützt mich bei der Orientierung und Handhabung meines Instruments innerhalb der dargestellten Strukturen.*

Als Antwortmöglichkeit konnte auf einer 5-Punkt Likert-Skala zwischen *Starke Ablehnung*, *Ablehnung*, *Neutral*, *Zustimmung* und *Starke Zustimmung* gewählt werden. Im Anschluss wurden die Teilnehmer gebeten ein eindeutiges Ranking der gezeigten Visualisierungen unter der Berücksichtigung der Nutzung in einem medizinischen Kontext durchzuführen. Rang eins gibt an, welches Konzept die Teilnehmer am ehesten in einem realen medizinischen Kontext einsetzen würden. Rang sieben das Konzept mit der geringsten Nutzungswahrscheinlichkeit.

5.2.1 Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird zunächst das Feedback des Thinking-Aloud-Tests aller Probanden zusammengefasst und nach Konzept sortiert wiedergegeben. Im Anschluss daran werden die Ergebnisse des Rankings und die Antworten des Fragenkatalogs aufgezeigt.

Thinking-Aloud-Test

Aus dem Thinking-Aloud-Test konnte für jedes der untersuchten Konzepte Feedback ermittelt werden. Diese werden nachfolgend zusammengefasst wiedergegeben.

Pointer: Das Konzept Pointer wurde einzeln und in Kombination als Teilkonzept positiv bewertet. Eine Analogie zwischen bekanntem Vorgehen, wie das einblenden eines Stichkanals aus anderen Bildgebungsverfahren wurde durch den Wiedererkennungswert als hilfreich bezeichnet. Eine Analogie zwischen den Abstandsbalken und einer ähnlichen Kenneichung auf Punktionsnadeln wurde erkannt und als sehr hilfreich bewertet. Weiterhin wurde die Länge der Abstandsbalken richtig eingeschätzt.

Extended Radar: Das Konzept Extended Radar wurde als nicht intuitiv bezeichnet. Die Funktionsweise wurde bei zwei Probanden ohne eine initialen Erklärung falsch verstanden. Weiterhin wurde die Visualisierung als verdeckend und unruhig beschrieben. Weiterhin sollte der Winkel verringert und eine adaptive Rotationsgeschwindigkeit eingeführt werden, sodass die Geschwindigkeit bei kleiner Distanz zwischen Instrumentspitze und dem Radarschnittpunkt mit den umliegenden Strukturen abnimmt und bei großer Distanz zunimmt.

Virtual Lighthouse: Die Eigenschaften des Konzeptes Virtual Lighthouse wurden positiv bewertet. Durch einen Vorbereitungsschritt, in dem Punkte definiert werden müssen, wurde angemerkt, dass die Visualisierung nur so gut wie die Vorbereitung sein kann. Punkte sollten während des Eingriffs ergänzt oder entfernt werden können. Als Ergänzung wurde vorgeschlagen, nur den Punkt mit dem geringsten Abstand zum Instrument anzuzeigen, so könnten sehr viele Punkte im Vorfeld definiert werden ohne das die Übersichtlichkeit verloren ginge.

Map: Das Feedback zum Konzept Map ist unterschiedlich. Einerseits wurde bemängelt, dass die Visualisierung zu viele Informationen gleichzeitig darstellt und überfrachtet ist und die Sicht durch Verdeckung eingeschränkt ist. Weiterhin wurde die Visualisierung, durch dauerhaften Farbwechsel aus allen Segmenten als unruhig beschrieben. Andererseits wurde die Informationsdichte und die Aufbereitung als *Landkarte* auf einer Halbkugel als nützlich eingeschätzt.

Ring: Die Informationsdichte auf dem Ring wurde im Vergleich zur Map als weniger überfrachtet bewertet. Weiterhin war die Ebene, auf die der Ring angezeigt wird, nicht sofort erkenntlich.

Closest Point: Die im Konzept Closest Point dargestellten Linie wurde von einem Probanden als mehrere Linien wahrgenommen. Die anderen Probanden beschrieben die Visualisierung durch den häufigen Positionswechsel der Linie als unruhig. Zusätzlich wurde ein fehlender Tiefeneindruck angegeben und die Ergänzung mit dem Konzept Pointer gewünscht, um eine bessere Orientierung zu erhalten. Weiterhin wurde angegeben, dass eine exakte Distanzangabe mit einem Label nicht notwendig ist.

Distance Sensor: Bei der Visualisierung Distance Sensor wurde positiv bewertet, dass (neben dem Pointer) nur zusätzliche Elemente eingeblendet werden, wenn eine kritische Distanz unterschritten worden ist, da dies eine durch die Probanden gewünschte Roh-Ansicht auf Strukturen gibt. Ein Proband gab an, dass in der Vorbereitungsarbeit zu einem Eingriff ein möglichst idealer Pfad ermittelt wird. Daher ist eine Visualisierung nur an kritischen Bereichen nötig.

Allgemein: Unabhängig der Visualisierungskonzepte gab ein Proband an, dass die für den Prototypen verwendete 3D-Modelle zu viele unwichtige Blutgefäße in den Vordergrund stellen und dadurch die Interaktion erschwert wird. Zudem wurde angemerkt, dass eine Unterscheidung zwischen den Strukturen (Blutgefäße oder Metastasen) durch die Visualisierung hilfreich sein könnte.

Ranking

Nachdem alle Visualisierungskonzepte durch die Probanden analysiert worden sind, wurden sie gebeten ein eindeutiges Ranking der Konzepte durchzuführen. Die Ergebnisse können der Tabelle 5.1 entnommen werden.

Tabelle 5.1: Ergebnisse des Rankings. Das durchschnittliche beste Ranking erzielten die Konzepte Distance Sensor und Ring.

Konzept	Pb1	Pb2	Pb3	Mittlerer Rang
Pointer	Rang 7	Rang 4	Rang 2	Rang 4,33
Extended Radar	Rang 5	Rang 7	Rang 7	Rang 6,33
Ring	Rang 4	Rang 1	Rang 3	Rang 2,66
Map	Rang 1	Rang 6	Rang 5	Rang 4
Closest Point	Rang 2	Rang 5	Rang 6	Rang 4,33
Distance Sensor	Rang 3	Rang 3	Rang 1	Rang 2,33
Virtual Lighthouse	Rang 6	Rang 2	Rang 4	Rang 4

Aussagen

Weiterhin wurden die Probanden gebeten, wie die bereits zuvor beschrieben zwei Aussagen bezüglich der Zielfindung und der Orientierung zu bewerten. Die Ergebnisse können in der Tabelle 5.2 eingesehen werden. Es wurden null Punkte vergeben, wenn die Probanden der Aussage mit *Starker Ablehnung* bewerten. Ein Punkt wurde vergeben, wenn die Aussage mit *Ablehnung* bewertet worden ist. Es wurden zwei Punkte vergeben, wenn eine Aussage mit *Neutral* bewertet worden ist. Bei einer *Zustimmung* werden drei und bei einer *Starken Zustimmung* vier Punkte vergeben.

Tabelle 5.2: Ergebnisse zur Akzeptanz der Aussagen. Die dargestellten Zahlen entsprechen einer Punkteskala.

Konzept	Pb1	Pb1	Pb2	Pb2	Pb3	Pb3	\emptyset	\emptyset
	A1	A2	A1	A2	A1	A2	A1	A2
Pointer	1	1	3	3	4	4	2,67	2,67
Extended Radar	3	3	1	1	1	1	1,67	1,67
Ring	3	2	3	4	4	4	3,33	3,33
Map	3	3	1	1	1	1	1,67	1,67
Closest Point	3	3	3	3	4	0	3,33	2
Distance Sensor	3	2	4	3	4	4	3,67	3
Virtual Lighthouse	1	2	3	3	1	3	1,67	2,67

5.2.2 Diskussion

Mit Hilfe der Ergebnisse des Thinking-Aloud-Tests können, in Kombination mit dem Ranking und den subjektiven Einschätzungen zum Unterstützungspotential der Abstandsmaximierung und Orientierung, Erkenntnisse über die Einsatzpotentiale und Einschränkungen der Konzepte ermittelt werden.

Das Konzept Pointer wurde als wiederkehrendes Teilkonzept positiv bewertet, ebenso die verwendete Darstellungsform mit schwarzen Abstandsbalken. Die Breite der Abstandsbalken ist richtig eingeschätzt worden. Alleinstehend wurde das Konzept unterschiedlich bewertet und erzielte im Ranking die Platzierungen 2,4 und 7. Das Unterstützungspotential bei der Abstandsmaximierung und Orientierung wurde mit *Ablehnung* bis *Starke Zustimmung* bewertet. Ein Interessenskonflikt könnte hierfür ein Grund sein, dass zwischen dem Wunsch nach möglichst vielen verfügbaren Informationen und einer minimal unterstützenden Ansicht vorliegt.

Diese Annahme bestätigt sich bei Betrachtung des Konzepts Map. Dort wurde ebenfalls unterschiedliches Feedback gegeben. Zwei Ärzte beschrieben die Visualisierung als überladen, ein dritter Arzt beschrieb das Konzept als hilfreich. Dieser Unterschied spiegelt sich auch im Ranking und in den Angaben zur Zielführung und Orientierung wieder. Während der Versuchsteilnehmer 1 das Konzept Pointer schlecht bewertete, erfolgte eine bessere Bewertung des Konzept Map.

Zwei Versuchsteilnehmer haben das Konzept Extended Radar ohne eine initiale Erklärung falsch verstanden. Es wurde als nicht intuitiv bezeichnet. Als Konsequenz daraus sollten für eine detaillierte Untersuchung des Konzepts in der quantitativen Evaluation Konzepte zunächst eindeutig erklärt und auf ihre Funktionsweise hingewiesen werden. Im Ranking erzielte das Konzept die schlechteste Platzierung und wurde bei Fragen nach dem Unterstützungspotential zur Abstandsmaximierung und der Orientierung im Durchschnitt mit Ablehnung/Neutral gewertet.

Die Verwendung des Konzepts Closest Point zeigt ebenfalls unterschiedliches Feedback. Die Versuchsteilnehmer beschrieben das Konzept als unruhig, weiterhin wurde angegeben, dass die Darstellung des exakten Abstands mit dem integrierten Label nicht notwendig ist. Das Unterstützungspotential zur Abstandsmaximierung wurde von allen Versuchsteilnehmer mit Zustimmung bewertet. Das Unterstützungspotential zur Orientierung wurde zweimal mit Zustimmung und einmal mit Starke Ablehnung bewertet. Ursache dafür könnte sein, dass das Konzept, wie zu Beginn beschrieben, von allen als unruhig eingeschätzt worden ist. Im Ranking belegte das Konzept eine schlechtere Platzierung. Eine Ursache dafür, dass das Konzept als unruhig beschrieben worden ist, könnte sein, dass nur eine Abstandsinformation zur selben Zeit berücksichtigt wird. In dieser Versuchsumgebung kann es aufgrund vieler Blutgefäße dazu führen, dass viele Regionen zur selben Zeit nah an der Instrumentenspitze sind. Daran anknüpfend ist es möglich, dass diese sich an gegenüberliegenden Seiten befinden. So kann es passieren, dass durch leichte Veränderung des Instruments, die in der Visualisierung dargestellte Linie hin und her springt. Eine Reduzierung der Aktualisierungsrate des Konzepts, könnte den Effekt vermindern. Daraus resultiert, dass Informationen verloren gingen.

Das Konzept Distance Sensor erfüllt gewünschte Anforderungen, nach denen ein Konzept an bereits bekannte Muster anlehnen soll und nicht zu viel der Original-Ansicht verdecken

sollte. Dies zeigt sich auch in den von Versuchsteilnehmern zusammen getragenen Ranking. Mit einem Durchschnittswert von 2,33 erzielte das Konzept die höchste Platzierung. Bei der Frage zum Unterstützungspotential zur Abstandsmaximierung wurde Zustimmung/Starke Zustimmung angegeben. In der anschließenden quantitativen Evaluation sollte überprüft werden, ob mit der im Vergleich zu den Konzepten Map und Ring reduzierte Informationsdichte dennoch gute Ergebnisse hinsichtlich der Abstandsmaximierung und Kollisionsvermeidung erzielt werden kann.

Das Konzept Virtual Lighthouse wurde grundsätzlich positiv und nützlich eingeschätzt. Kritisch wurde betrachtet, dass das Konzept in der dargelegten Art nur zuvor festgelegte Punkte mit einbezieht. Die Flexibilität bei nicht vorher festgelegten Planänderungen ist nicht gegeben. Eine Deaktivierung des Konzepts wäre in einem solchen Szenario notwendig, um mögliche Störquellen zu minimieren. Das Unterstützungspotential hinsichtlich der Abstandsmaximierung zu umliegenden Strukturen wurde im Durchschnitt mit Ablehnung/Neutral eingeschätzt. Weiterhin sollten die Orientierungspunkte, welche zur Verwendung des Konzepts benötigt werden, eigenständig von Versuchsteilnehmern gesetzt werden können. Dies könnte die Vergleichbarkeit für eine Untersuchung erschweren.

Zusammenfassend wurde angemerkt, dass die verwendete Testumgebung alle Blutgefäße als gleichmäßig wichtig darstellt. Für eine detailliertere Untersuchung sollten diese anders dargestellt oder entfernt werden. Weiterhin wurde angemerkt, dass die Konzepte keinen Unterschied zwischen Blutgefäßen und Metastasen machen. Eine Erweiterung der Konzepte diesbezüglich wäre möglich, könnte aber die Visualisierungen durch zusätzliche Inhalte unübersichtlicher machen.

5.3 Quantitative Evaluation

Nach einer qualitativen Einschätzung wurde im nächsten Schritt eine quantitative Evaluation durchgeführt. Dazu wurde eine Nutzerstudie mit Medizinstudenten durchgeführt. Diese Studie hatte zwei primäre Ziele. Zum Einem sollte geprüft werden, ob durch die zuvor entwickelten Visualisierungen eine Verbesserung in der Navigation, Zielgenauigkeit und primär in der Kollisionsvermeidung von umliegenden kritischen Strukturen wie Blutgefäßen messbar ist. Zum anderen soll die Akzeptanz in der Usability der Visualisierungen durch die Benutzer geprüft werden. Während sich Navigationsgenauigkeit, Zielgenauigkeit und Kollisionsvermeidung objektiv messen lassen, ist die Akzeptanz subjektiv und somit für jeden Nutzer unterschiedlich. Für den ersten Teilaspekt wurde den Nutzern die Aufgabe gestellt mit einem getrackten Nadelwerkzeug zu mehreren Punkten innerhalb eines virtuellen Lebermodells zu navigieren und dabei den Abstand von umliegenden Strukturen zu maximieren. So können Messwerte Aufschluss über die Geschwindigkeit, Zielgenauigkeit und Kollisionsvermeidung erzeugt werden. Für den zweiten Teilaspekt wurden die Nutzer gebeten verschiedene Fragen zu ihrem subjektiven Empfinden zu beantworten.

Die in den Vorstudien ermittelten Konzepte wurde mit einer Ausnahme auch für die Quantitative Evaluation verwendet. Das Konzept Virtual Lighthouses wurde für diesen Teil der Evaluation nicht verwendet. Aus der Qualitativen Evaluation ging hervor, dass

dieses Konzept abhängig von den individuellen Präferenzen der Probanden ist. Vorgegebene Punkte wurden von den Probanden kritisiert. Im Zuge der Vergleichbarkeit in den Ergebnissen wäre dies erforderlich. Stattdessen wurde ein Telexperiment ohne Visualisierung ergänzt, sodass insgesamt sieben Durchgänge je Nutzer durchgeführt wurden.

5.3.1 Ablauf

Die Studie begann mit einer kurzen Begrüßung und einer allgemeinen Belehrung und der Aufnahme von demografischen Angaben. So sollten an dieser Studie nur Probanden mit medizinischen Vorwissen teilnehmen, damit auf grundlegendes medizinisches Verständnis zurückgegriffen werden kann. Das inkludiert den Umgang mit medizinischen Werkzeugen und eine daraus fundierte subjektive Einschätzung für die Nutzbarkeit der Visualisierungen im medizinischen Kontext. Insgesamt haben 23 Probanden, alles Medizinstudenten, an der Studie teilgenommen, wobei ein Student aufgrund technischer Probleme während Studie für die nachfolgende Statistiken ausgeschlossen worden ist. Von den verbleibende 22 Studenten waren 8 männlich und 14 weiblich. Alle studieren seit mindestens fünf Fachsemestern im Bereich Medizin.

Im Anschluss zur Begrüßung bekamen die Teilnehmer eine kurze Einführung in den Umgang mit der optischen Trackingkamera und der HoloLens. So sollten mögliche Verständnisfragen oder ein falscher Umgang im Vorfeld ausgeschlossen werden. Um eine korrekte Darstellung der 3D-Inhalte der HoloLens darzustellen, wurde für jeden Probanden eine eigene Kalibrierung hinsichtlich des Augenabstandes durchgeführt. Der Raumspeicher der HoloLens zur eigenen Positionserkennung wurde im Vorfeld durch den Versuchsleiter gelöscht und der aktuelle Raum eingescannt, um ein stabiles Bild zu erzielen. Der Raum wurde, soweit möglich, nur durch künstliches Licht beleuchtet, um mögliche Störquellen von natürlichem Lichteinfall auszuschließen. Im Anschluss bekamen die Probanden Anweisungen und Erläuterungen zum Versuchsaufbau, ihren Aufgaben und Aspekte, welche bei der Durchführung beachtet werden sollen:

- Kollisionsvermeidung mit Strukturen
- Abstandsmaximierung zu Strukturen
- Abstandsminimierung zum Zielpunkt
- Strecke zwischen Punkten minimieren

Als Referenzpunkt wurde zur späteren Auswertung die Spitze der virtuellen Repräsentation des verwendeten Instruments angegeben. Weiterhin wurde der vordere Bereich des virtuellen Instruments orange eingefärbt. In diesem Bereich werden Kollisionen ausgewertet. Nachfolgend wurde das erste Visualisierungskonzept gestartet und dem Probanden erklärt. In einem zeitlich nicht begrenzten Training konnte die Visualisierung erprobt werden. Das Training wurde beendet, nachdem der Teilnehmer nach eigener Aussage angab, das Konzept verstanden zu haben. Für die Navigationsumgebung wurde ein vereinfachtes virtuelles Lebermodell mit Hilfe des AR-Headsets dargestellt. Blutgefäße und Metastasen sollten in diesem Kontext als Hindernisse und zu meidende Strukturen betrachtet werden.

Hierfür wurden die gleichen 3D-Modelle ausgewählt, die auch in der qualitativen Evaluation verwendet wurden. Mit Hilfe des Feedbacks aus dem Thinking-Aloud-Test wurden einige Blutgefäße entfernt, um eine geeignetere Testumgebung zu schaffen. Weiterhin wurde während der gesamten Studie auf der Leberoberfläche ein Einstichsbereich markiert. Dieser soll die initiale Navigationsrichtung vorgeben. Nach dem Training sollte der Aufgabe entsprechend nacheinander zu sechs orange eingefärbten Punkten mit der Hilfe eines Nadelinstruments navigiert werden. Die Abbildung 5.1 stellt dies für das Konzept Pointer und den ersten Punkt dar.

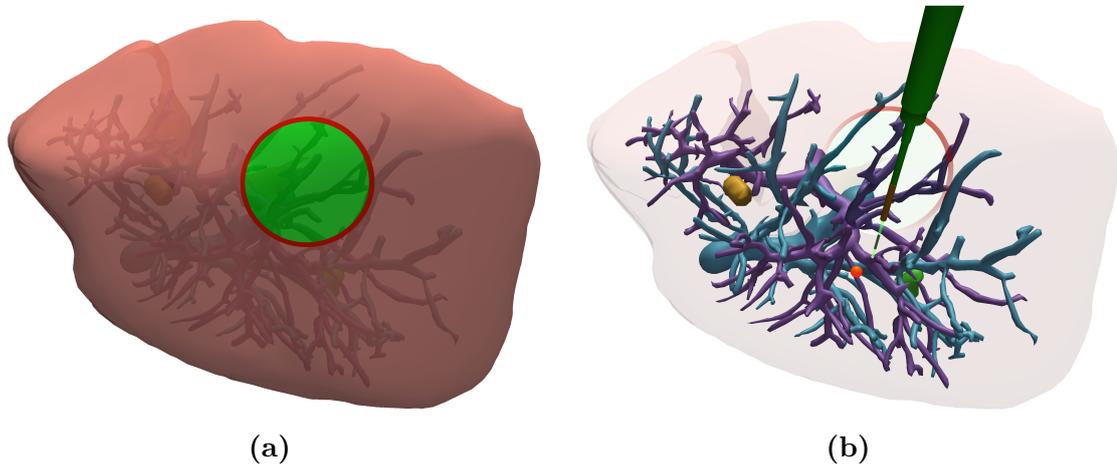
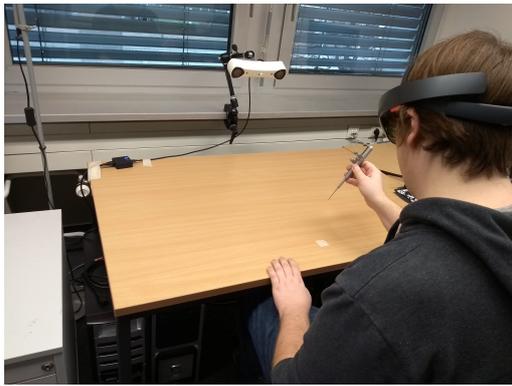


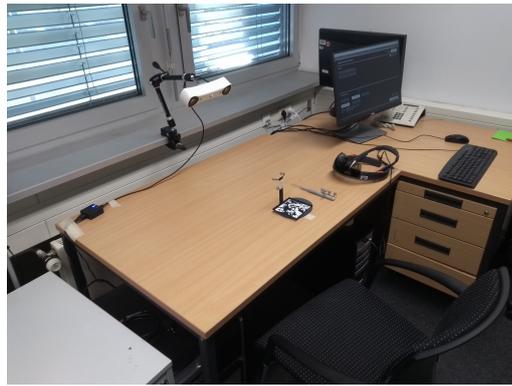
Abbildung 5.1: Screenshots des Visualisierungsaufbaus der Quantitativen Studie aus der Unity-Engine. Der Zielpunkt wurde orange/rot dargestellt. Der Einstichsbereich wurde durch einen roten Ring und eine grüne Einfärbung der Oberfläche markiert. Die Oberfläche der Leber färbt sich transparent, wenn sich der Nutzer mit seinem Werkzeug im Einstichsbereich befindet.

Wurde ein Punkt mit der Instrumentenspitze erreicht sollte dies mit dem Drücken eines Fußschalters bestätigt werden. Wurde der Fußschalter gedrückt, wurde der aktuelle Punkt ausgeblendet und ein neuer Punkt eingebildet. So ist ein neuer Punkt zeitgleich Start- und Endpunkt. Mit bestätigen des letzten Punktes wurde die Navigationsaufgabe pausiert und ein Fragebogen zur Gebrauchstauglichkeit gestellt. Nach Beantwortung aller Fragen wurde ein weiteres Visualisierungskonzept vorgestellt und der Ablauf wiederholte sich wie zuvor beschrieben. Die Navigationsumgebung wurde nach jedem Durchlauf verändert. Insgesamt wurden sieben verschiedene Umgebungen erstellt. Jede Umgebung verwendete eine neues Zielpunkteset. Die Punktesets wurde vergleichbar gestaltet, sodass feste Abstände zwischen den Punkten gewährleistet sind. Weiterhin wurden der Einstichsbereich verändert und die dargestellten Modelle rotiert. Insgesamt wurden drei verschiedene Lebermodelle verwendet, um eine größere Variation in der Umgebung zu erzeugen und einen Lerneffekt der Umgebung zu minimieren. Die Reihenfolge der vorgestellten Navigationskonzepte wurde zufällig gestaltet mit der Einschränkung, dass kein Proband eine bereits zuvor durch einen anderen Probanden getestet Konstellation wiederholte.

Nach Abschluss aller Konzepte wurden die vorgestellten Visualisierungen zunächst kurz mit Hilfe von Abbildungen wiederholt. Abschließend wurden die Probanden gebeten ein finales Ranking aller Visualisierungskonzepte zu bilden. Der subjektive Eindruck zu den



(a)



(b)

Abbildung 5.2: Links: Exemplarischer Teilnehmer führt die Studie durch und interagiert mit einem Instrument innerhalb einer virtuell dargestellten Leber (nur für den Teilnehmer sichtbar) Rechts: Übersicht über den Aufbau. Der Versuchsleiter steuert das Experiment über die Kontrollkomponente.

vorgestellten Konzepten wurde mit Hilfe eines Usability-Fragebogen zur Ermittlung eines *System Usability Scale* - Score (nachfolgend SUS) [12] gemessen. SUS ist eine 5-Punkt Likert-Skala und unterteilt sich in zehn Fragen. Der Fragebogen ist ähnlich zu dem Originalfragebogen aufgestellt, wurde jedoch so angepasst, dass die Fragen den Fokus auf die Visualisierungstechniken legen, anstatt auf das ganze System. Der verwendete Fragenkatalog kann dem Anhang entnommen werden.

Um die vorgestellten Visualisierungskonzepte bewerten zu können, müssen eine Reihe von Information während einer Studie ermittelt werden. Um eine stabile Berechnungszeit von 60 FPS zu gewährleisten, wurde auf eine direkte Berechnung der nachfolgend aufgelisteten Parameter verzichtet. Stattdessen wurden die Bewegungen der Versuchsteilnehmer und die in der Szene dargestellten Elemente aufgezeichnet und in einer anschließenden Simulation unter Verwendung der aufgezeichneten Informationen benötigte Parameter ausgewertet.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde folgende Aspekte untersucht:

Zeit: Es wurde die Zeit zwischen der Bestätigung des ersten und des letzten markierten Punktes innerhalb eines Durchlaufs in Sekunden ausgewertet.

Durchschnittlicher Abstand: Zur Bestimmung des durchschnittlichen Abstands wurde nicht der absolute minimale Wert verwendet, da dieser Parameter bei einer Kollision den Wert null annehmen würde und somit eine geringe Aussagekraft hätte. Stattdessen wurde für jeden Durchlauf des Experimentes die durchschnittliche minimale Distanz ermittelt. Um den Unterschied der Probanden in der Arbeitsgeschwindigkeit, oder mögliches verharren an einer Stelle, zu minimieren wurde nicht für jeden Zeitschritt ein Messwert ermittelt, sondern erst nach einer auf akkumulierten Strecke von 2,5 mm.

Kollision: Zur Bestimmung der Anzahl an Kollisionen wurden die Berührungen des verwendeten virtuellen Instruments mit der Umgebung gezählt. Dazu wurde nur der vordere orange markierte Bereich des Instruments zur Auswertung verwendet (vergleiche Abbildung 5.1 (b)). Weiterhin wurde ein Bereich nach einer Berührung als *beschädigt* markiert. Erneute Berührungen in einem als *beschädigt* markierten Bereich mit einem Sicherheitsradius von einem Zentimeter wurden nicht erneut als Kollision gewertet.

Sicherheitszone: Die Entfernung zwischen Instrumentenspitze und umliegenden Strukturen wurde analog zur Einteilung der Farbkodierung in drei Sicherheitsabstände zusammengefasst ($< 0,5$ cm rot/kritischer Abstand, $0,5$ cm bis 1 cm gelb/mittlerer Abstand, > 1 cm grün/großer Abstand). Zur Auswertung wurde die Zeit, die sich das Instrument in einem dieser Abstände befindet gemessen. Unter Berücksichtigung der Gesamtzeit wurde ein prozentualer Anteil der Aufenthaltsdauer in einer Sicherheitszone bestimmt.

SUS: Die Versuchsteilnehmer wurde nach jedem Konzept gebeten, einen SUS-Fragebogen zu auszufüllen. Die Fragen wurden mündlich vorgetragen und mündlich durch die Teilnehmer beantwortet.

Ranking: Am Ende des Versuchs wurde alle Teilnehmer gebeten, ein Ranking der vorgestellten Konzepte hinsichtlich einer potentiellen Nutzung im medizinischen Kontext durchzuführen. Platz eins beschreibt die beste Platzierung. Platz sieben beschreibt die schlechteste Platzierung.

5.3.2 Ergebnisse

Nachfolgend werden die Ergebnisse der Nutzerstudie ausgearbeitet. Für jeden untersuchten Parameter wurde eine einfaktorische Varianzanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse sind nachfolgend in Tabelle 5.4 zusammengefasst. Eine detaillierte Auflistung der Ergebnisse, inklusive Mittelwerte, Standardabweichung und Standardfehler befindet sich im Anhang.

Zeit

Bei Betrachtung der gemittelten Ergebnisse zeigt sich, dass die Versuchsteilnehmer unter der Verwendung des Konzepts Distance Sensor (43,12 s) die Aufgabe am schnellsten durchführen konnten. Ohne Unterstützung von Konzepten benötigten die Teilnehmer 44,89 Sekunden. Die durchschnittlich längste Bearbeitungszeit wurde unter Verwendung des Konzepts Map (56,88 s) benötigt. Die Abbildung 5.3 stellt die gemittelten Ergebnisse dar. Eine Varianzanalyse zeigt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Konzepten. Die Ergebnisse der Varianzanalyse dieses und der nachfolgend untersuchten Aspekte können der Tabelle 5.4 entnommen werden.

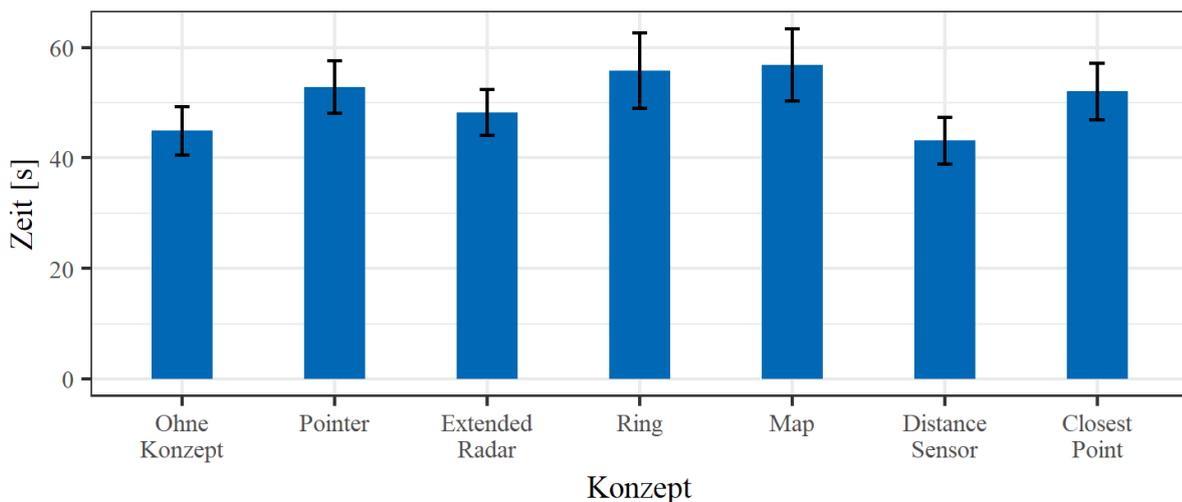


Abbildung 5.3: Mittelwert und Standardfehler der Zeit in Sekunden, welche die Versuchsteilnehmer benötigt haben, um die Navigationsaufgabe unter Verwendung der Konzepte zu lösen.

Kollision

Bei Betrachtung der Anzahl an Kollisionen zwischen Instrument und Umgebung konnten keine signifikanten Unterschiede gefunden werden. Mit dem Konzept Pointer wurden durchschnittlich 5,23 Kollisionen erzeugt. Ohne Unterstützung durch Konzepte konnten vergleichbar viele Kollisionen (5,19) erzeugt werden. Mit dem Konzept Distance Sensor wurden durchschnittlich weniger Kollisionen (2,36) erzeugt. Die Abbildung 5.4 stellt die durchschnittliche Anzahl der Kollisionen dar.

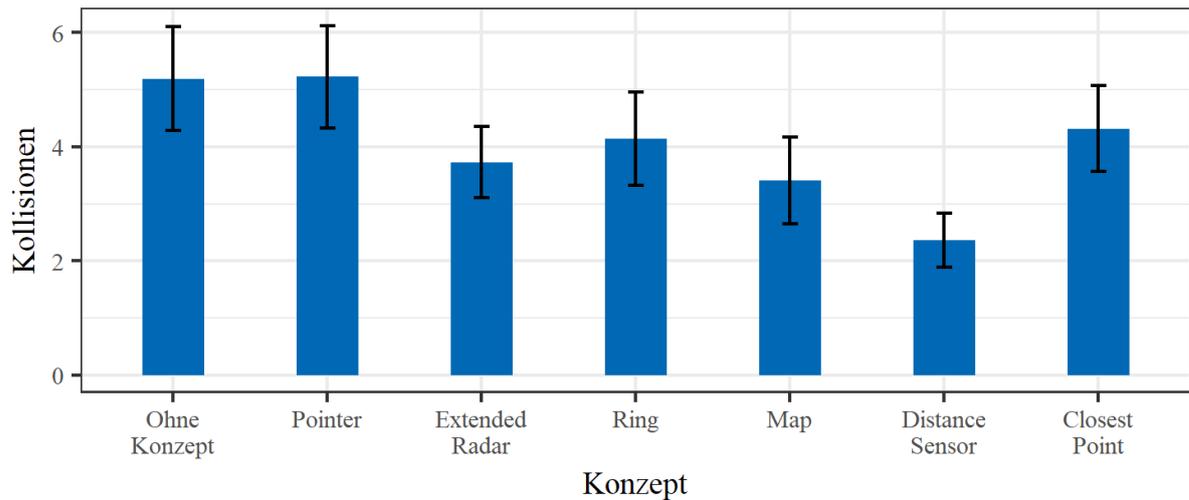


Abbildung 5.4: Mittelwert und Standardfehler der Anzahl von Kollisionen im vorderen orange markierten Bereich des verwendeten Instruments mit der Umgebung unter Verwendung der Konzepte.

Durchschnittlicher Abstand

Die Ergebnisse des durchschnittlichen Abstands (Abbildung 5.5) zwischen den Konzepten sind zueinander ähnlich. Ohne Unterstützung wurde der geringste Abstand mit 9,18 mm eingehalten. Der größte Abstand wurde von den Probanden unter Verwendung des Konzepts Ring 11,47 mm eingehalten. Der ermittelte Standardfehler ist beim Konzept Ring (2,25 mm) im Vergleich zum Durchschnitt der anderen Konzepte (0,96 mm) größer. Es konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Konzepten gefunden werden (Tabelle 5.4).

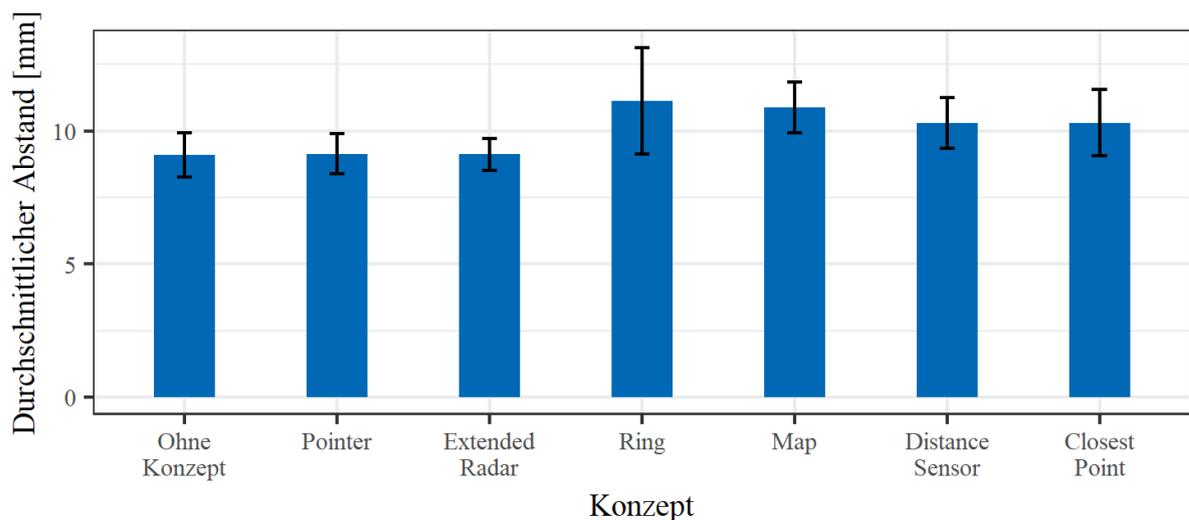


Abbildung 5.5: Mittelwerte und Standardfehler des Zeit unabhängigen durchschnittlichen Abstands, welchen die Versuchsteilnehmer in der Navigationsaufgabe unter Verwendung der Konzepte eingenommen haben.

Sicherheitszone

Bezüglich der untersuchten Sicherheitszonen konnten keine signifikanten Unterschiede gefunden werden. Unter Verwendung des Konzepts Map (40,83%) interagieren die Probanden am längsten innerhalb der Sicherheitszone 1 (grün). In der Sicherheitszone 3 (rot) wurde unter Verwendung des Konzepts Distance Sensor (15,61%) der Aufenthalt mit der Instrumentspitze in diesem Bereich minimiert. Ohne Unterstützung durch Konzepte betrug die durchschnittliche Aufenthaltsdauer in der Zone 3 (23,03%). Die Abbildung 5.6 beschreibt die Aufenthaltsdauer in den einzelnen Zonen in Kombination der drei Sicherheitsstufen.

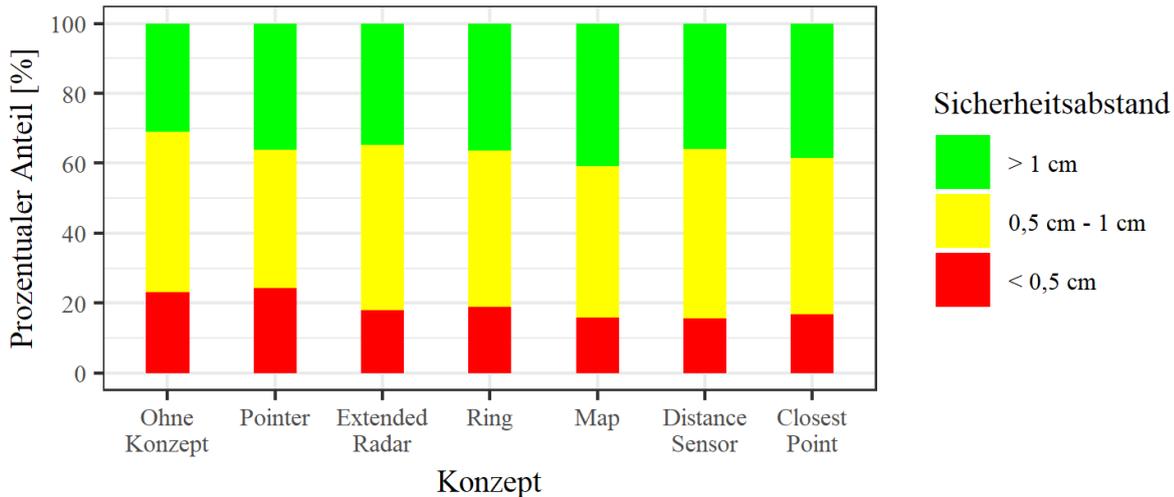


Abbildung 5.6: Prozentuale Darstellung der mittleren Aufenthaltsdauer in den Sicherheitszonen 1 (> 1 cm), 2 (0,5cm - 1 cm) und 3 (< 0,5 cm) unter Verwendung der Konzepte.

SUS

Mit Ausnahme des Konzepts Extended Radar (54,45) liegen alle Konzepte über der von Lewis et al. vorgeschlagene Grenze (62,1) einer mittleren SUS Punktzahl [33]. Die Konzepte Pointer (72,16), Map (68,07), Distance Sensor (69,77) und Closest Point (70,23) liegen auf oder knapp über der von Sauro vorgeschlagenen Grenze (68) [51]. Dieser Wert wird häufig als Referenzwert zum Vergleich genutzt. In Abbildung 5.7 sind die Ergebnisse inklusive der Grenzwerte von Lewis et al., Sauro und eines Vorschlags von Bangor et al. (70,1) [4] dargestellt. Es konnten signifikanten Unterschiede zwischen den Konzepten gefunden werden.

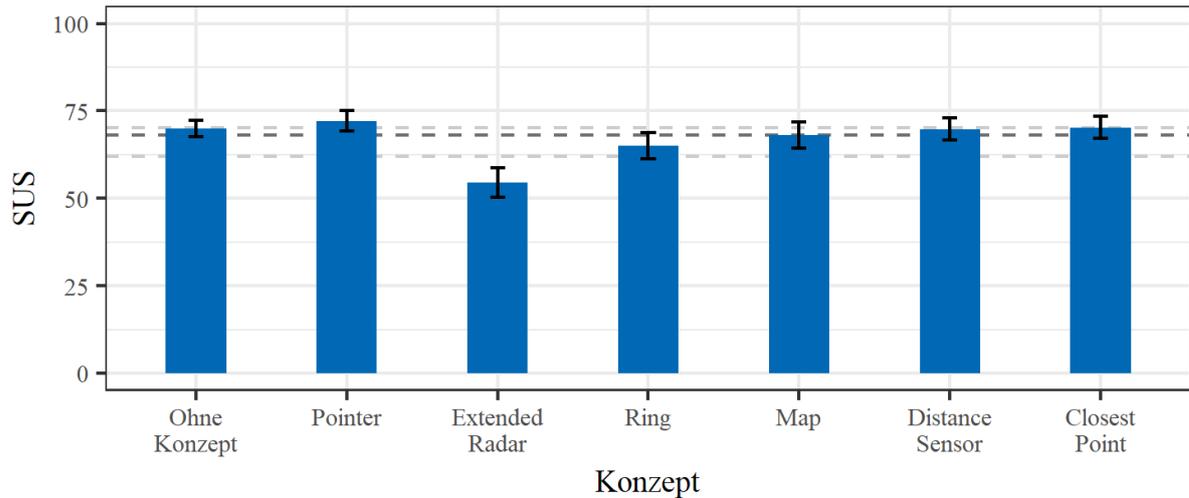


Abbildung 5.7: Visualisierung der mittleren Ergebnisse und Standardfehler aus dem SUS-Fragebogen unter Verwendung der Konzepte. In den hellgrau gestrichelten Linien sind die durchschnittlichen SUS-Ergebnisse von Lewis et al. (62,1) [33] und Bangor et al. (70,1) [4] und in der dunkelgrau gestrichelten Linie die durchschnittlichen SUS-Ergebnisse von Sauro (68) [51] dargestellt. Die Ergebnisse von Sauro werden häufig als Referenzwerte betrachtet.

Ranking

Die Tabelle 5.3 stellt die gemittelten Ergebnisse des Rankings dar. Mit Hilfe einer Varianzanalyse konnten signifikanten Unterschiede gezeigt werden (Tabelle 5.4). Das Konzept Map (Rang 2,59) wurde durchschnittlich am besten bewertet. Das Konzept Extended Radar (Rang 5,45) erzielte im Durchschnitt den letzten Rang. Den Versuchsdurchlauf ohne Unterstützung (Rang 4,95) wurde im Ranking besser platziert, als das Konzept Extended Radar.

Tabelle 5.3: Ergebnisse des Rankings. Das Konzept Map erzielte die durchschnittlich beste Platzierung.

Konzept	Mittlerer Rang	Ranking nach mittlerer Rang
Ohne Konzept	Rang 4,95	Rang 6
Pointer	Rang 4,31	Rang 5
Extended Radar	Rang 5,45	Rang 7
Ring	Rang 3,68	Rang 3
Map	Rang 2,59	Rang 1
Distance Sensor	Rang 3,77	Rang 4
Closest Point	Rang 3,22	Rang 2

Die Ergebnisse der einfaktorielle Varianzanalyse zu den untersuchten Parameter könne der Tabelle 5.4 entnommen werden. Statistisch gesehen konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den Konzepten mit Ausnahme vom Ranking und dem SUS festgestellt werden.

Tabelle 5.4: Ergebnisse der einfaktoriellen Varianzanalyse.

Variable	Df	F	p	sig.	η^2	Effekt
Zeit	6	1,01	0,421		0,034	kleiner Effekt
Minimale Distanz	6	0,593	0,736		0,024	kleiner Effekt
Kollisionen	6	1,773	0,108		0,068	mittlerer Effekt
Zielgenauigkeit	6	0,51	0,8		0,021	kleiner Effekt
Zone 1 (> 1 cm)	6	1,041	0,401		0,041	kleiner Effekt
Zone 2 (0,5cm - 1 cm)	6	1,226	0,296		0,048	kleiner Effekt
Zone 3 (< 0,5 cm)	6	1,76	0,111		0,067	mittlerer Effekt
SUS	6	3,186	0,006	*	0,021	kleiner Effekt
Ranking	6	6.49	< 0,001	*	0,209	großer Effekt

5.3.3 Diskussion

Die Ergebnisse der Nutzerstudie zeigen verschiedene Unterschiede zwischen den Konzepten. Nachfolgend sollen diese ausgearbeitet und diskutiert werden. Daran anschließend werden mögliche Ursachen aufgezeigt, die dazu führen könnten, dass in der einfaktoriellen Varianzanalyse, mit Ausnahme vom *Ranking* und des *SUS*, keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden konnten.

Zeit

Mit Ausnahme des Konzepts Distance Sensor (43,12 s) wurde unter Verwendung der entwickelten Konzepte eine höhere Bearbeitungszeit benötigt. So kann nur mit dem Konzept Distance Sensor eine höhere Effizienz erzeugt werden. Ursache dafür kann sein, dass durch die Hinzugabe zusätzlicher Informationen eine vorsichtiger Arbeitsweise erfolgt und Informationen während der Interaktion überwacht werden. Der größte Informationsgehalt wird mit dem Konzept Map (56,88 s) dargestellt. Die Ergebnisse zeigen für dieses Konzept die längste Bearbeitungszeit. Dies stützt sich auch mit den Ergebnissen des Thinking-Aloud-Test der qualitativen Evaluation. Dort wurde angegeben, dass das Konzept zu viele Informationen zur Verfügung stellt. Ähnliche Aussagen wurde von Versuchsteilnehmern innerhalb dieser quantitativen Evaluation getätigt.

Kollisionen

Bei Betrachtung der Ergebnisse zeigt sich, dass unter der Verwendung der entwickelten Konzepte weniger Kollisionen entstanden sind und diese daher eine höhere Effektivität in der Vermeidung von Kollisionen aufweisen. Ohne eine Unterstützung durch Konzepte wurden durchschnittlich 5,19 Kollisionen erzeugt. Unter Verwendung des Konzept Distance Sensor entstanden nur 2,36 Kollisionen mit der Umgebung. Einzige Ausnahme ist das

Konzept Pointer, bei dem durch Verwendung mehr Kollisionen (5,23) entstanden sind. Grund hierfür könnte sein, dass das Konzept Pointer nur Distanzinformationen vor dem Instrument darstellt. Der seitliche Abstand wird unter Verwendung des Konzeptes nicht betrachtet.

Durchschnittlicher Abstand

Bei Betrachtung des durchschnittlichen Abstands zeigt sich, dass unter Verwendung der entwickelten Konzepte im Vergleich zu einem Versuchsdurchlauf ohne Konzeptunterstützung, ein größerer Sicherheitsabstand eingehalten werden kann. So wurde ohne Unterstützung ein durchschnittlicher Abstand von 9,18 mm eingehalten. Das Konzept Ring erzielte mit 11,47 mm den durchschnittlich größten Sicherheitsabstand (großer Standardfehler). Detailliert zeigt sich, dass die Konzepte Ring, Map, Distance Sensor und Closest Point einen durchschnittlichen Sicherheitsabstand von mehr als 10 mm einhalten konnten. Dies entspricht in der Farbkodierung dem Bereich, der als sicher (grün) eingestuft worden ist. Im Gegensatz zu den anderen Konzepten können diese Konzepte in mehreren Richtungen zielgerichtete Abstandstandwarnungen anzeigen.

Sicherheitszonen

Die Aufenthaltsdauer in der Sicherheitszone 1 (grün) war unter der Verwendung der Konzepte größer. Weiterhin war unter Verwendung der Konzepte die Aufenthaltsdauer in der kritischen Sicherheitszone (rot) mit Ausnahme des Konzeptes Pointer geringer. Wie bereits zuvor beschrieben, können auch hier die fehlenden seitlichen Informationen des Konzeptes Pointer dazu geführt haben, dass Abstand nur im vorderen Bereich ausreichend eingeschätzt werden konnte. Zusammenfassend zeigt sich, dass ähnlich zu den vorherigen Ergebnissen, bei einer Unterstützung durch Konzepten bessere Ergebnisse erzielt werden können.

SUS

Die Ergebnisse aus dem SUS-Fragenbogen können auf unterschiedliche Weise interpretiert werden. Für den Fokus dieser Arbeit wird hier der von Sauro vorgeschlagene Richtwert 68 verwendet [51]. Ein Wert über 68 beschreibt ein überdurchschnittliches Ergebnis. Weitere Richtwerte wurden von Lewis et al. [33] (62,1) und Bangor et al. [4] vorgestellt (70,1). Mit Ausnahme der Konzepte Extended Radar und Ring sind alle Ergebnisse im Rahmen des Richtwerts von Sauro. Das bedeutet, dass die Konzepte im weiten Sinne der Gebrauchstauglichkeit von den Versuchsteilnehmern als hilfreich eingeschätzt worden sind. Die deutliche Ausnahme ist beim Konzept Extended Radar mit 54,54 Punkten sichtbar. Dieser Wert beschreibt, dass die Gebrauchstauglichkeit bei diesem Konzept schwächer ist und die Versuchsteilnehmer mit diesem Konzept weniger zufrieden sind. Dies spiegelt sich in den Ergebnissen des Rankings wieder, mögliche Ursachen werden dort diskutiert.

Ranking

Aus den gemittelten Ergebnissen des Rankings kann ein resultierendes Ranking erstellt werden. In absteigender Reihenfolge wurden die Konzepte Map, Closest Point und Ring als hilfreiche Konzepte eingeschätzt. Alle diese Konzepte präsentieren den Nutzer viele Informationen zur gleichen Zeit. Konzepte mit geringer Informationsdichte wurden schlechter eingeschätzt. Im Vergleich zur qualitativen Studie wurde das Konzept Map, aufgrund der großen Informationsdichte kritisiert und erzielte eine schlechtere Platzierung. Das Konzept Distance Sensor welches in dieser Evaluation eine mittlere Platzierung

erhielt, erzielte in der Qualitativen Evaluation die beste Platzierung. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte der Erfahrungsunterschied zwischen Studenten in der Ausbildung und erfahrenden Ärzten sein. Bei der Bewertung des Konzepts Extended Radar sind die Ergebnisse zwischen dieser und der qualitativen Studie ähnlich. Bei beiden erzielte das Konzept die schlechteste Platzierung, erzielte ein schlechtes SUS Ergebnis und wurde im Thinking-Aloud-Test als nicht intuitiv beschrieben. Bei Betrachtung der anderen untersuchten Parameter erzielte es durchschnittliche Ergebnisse. In der Arbeit von Heinrich et al. erzielte das zugrundeliegende Konzept gute Ergebnisse [25]. Eine Ursache hierfür könnte sein, dass die Einsatzumgebung zu der in dieser Arbeit verwendeten Umgebung sehr unterschiedlich ist. In der Arbeit von Heinrich et al. wurden große Strukturen und eine Resektionshöhle verwendet, wohingegen in dieser Arbeit eher dünnere Strukturen und keine Resektionshöhle verwendet wurde.

Zusammenfassung

Bei der gemeinsamen Betrachtung der untersuchten Parameter *Kollisionen*, *durchschnittlicher Abstand*, *Sicherheitszonen*, *SUS* und *Ranking* stellt sich heraus, dass mit vereinzelt Ausnahmen, unter Verwendung der entwickelten Konzepte bessere Ergebnisse erzielt werden konnten. Bei Betrachtung des Parameters Zeit erhöhte sich, mit Ausnahme des Konzepts Distance Sensor, die Bearbeitungszeit, wenn Konzepte verwendet worden sind. Weiterhin wurde unter Verwendung des Konzepts Distance Sensor weniger Kollisionen verursacht. Dies unterstützt die Einschätzungen der Ärzte aus der qualitativen Evaluation. Werden jeweils die besten drei Konzepte der untersuchten Parameter innerhalb dieser Studie zusammengefasst, dann erzielt das Konzept Map die übergreifend besten Ergebnisse. Die Konzepte Distance Sensor und Map sind sehr unterschiedliche Konzepte. Während mit dem Konzept Map sehr viele Informationen gleichzeitig dargestellt werden, visualisiert das Konzept Distance Sensor, neben dem Teilkonzept Pointer, nur Hinweise wenn eine kritische Distanz unterschritten wird. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass ein Erfahrungskonflikt vorliegt. Unerfahrene Versuchsteilnehmer, wie in dieser qualitativen Studie, könnten eine Visualisierung, mit der viele Informationen dargestellt werden, bevorzugen um eine umfassenden Gesamteinschätzung der aktuellen Lage zu erhalten. Erfahrene Versuchsteilnehmer, wie in der qualitativen Studie, bevorzugen eher die ihnen bekannte Sichtweise mit ergänzenden Informationen. In der qualitativen Studie wurde das Konzept Map von einem Versuchsteilnehmer als hilfreich eingeschätzt und vergab im Ranking den ersten Platz. Bei Betrachtung der Arbeitserfahrung zeigt sich, dass dieser Versuchsteilnehmer mit drei Jahren die geringste Arbeitserfahrung hatte.

Problematik

Anders als zu Beginn der Arbeit angenommen, zeigen die Ergebnisse mit Ausnahme vom *Ranking* und beim *SUS* keine signifikanten Unterschiede. Dies kann auf eine große Streuung der gemessenen Werte und der daraus resultierenden größeren Standardabweichung zurückgeführt werden. Mögliche Ursachen werden nachfolgend diskutiert.

Bei der Versuchsdurchführung wurde darauf geachtet gleichmäßige Bedingungen zu schaffen. So wurde der Versuchsaufbau über das Experiment nicht abgeändert oder umgebaut. Die Registrierung mit Hilfe des Duo-Markers wurde für jeden Versuchsteilnehmer an derselben Position durchgeführt. Natürliches Licht wurde sofern möglich abgedunkelt und der Raum mit gleichmäßigem künstlichem Licht beleuchtet. Ein vollständiger Ausschluss von natürlichem Licht war nicht möglich, daher könnten wechselnde Lichtbedingungen die Positionsbestimmung der HoloLens im Raum beeinflusst haben. Dies stützt sich darauf, dass ein Proband den Versuch vorzeitig Zeit abbrechen musste, da

Probleme in der Positionsbestimmung der HoloLens aufgetreten sind. In abgeschwächter Form könnten ähnliche Probleme unbemerkt auch bei anderen Probanden aufgetreten sein.

Weiterhin wurde der Tragekomfort der HoloLens in dieser Studie nicht berücksichtigt. Cometti et al. evaluierten in einer Nutzerstudie, dass ein Teil der Versuchsteilnehmer nach längere Tragezeit über Nackenschmerzen klagten [15]. Ähnliche Aussagen gaben Teilnehmer dieser Studie an. Dies könnte die Leistung der Versuchsteilnehmer beeinflusst haben. Weiterhin könnte die Länge der Studie Anstrengung oder Müdigkeit bei den Probanden erzeugt haben. Dies könnte zur Folge haben, dass die Ergebnisse gegen Ende der Studie schlechter waren und durch die zufällige Reihenfolge der Konzepte eine größere Streuung der Ergebnisse auftritt. Daran anknüpfend könnte eine unterschiedliche Positionierung der HoloLens auf dem Kopf der Versuchsteilnehmers Einfluss auf die perspektivische korrekte Darstellung der virtuellen Inhalte haben. Die korrekte Darstellung kann nicht von außerhalb überprüft werden und ist von der subjektiven Einschätzung der Versuchsteilnehmer abhängig.

Ein anderer Aspekt wurde bereits im Abschnitt 4.1 beschrieben. Die Darstellung von virtuellen Inhalte mit der HoloLens ist bei normaler Nutzung nicht für den Sichtbereich von weniger 125 cm und 50 cm bei minimaler Bewegung konzipiert worden [58]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Objekte in einer geringeren Distanz bis 10 cm angezeigt. Den Einfluss auf Bildqualität und Ortsstabilität von virtuellen Elementen auf der HoloLens wurde nicht untersucht. Dies könnte jedoch durch eine verzerrte Darstellung Einfluss auf das Gesamtergebnis genommen haben.

Fehlender Kontrast in virtuellen Inhalten könnte ebenfalls für größere Streuung der vorliegenden Daten verantwortlich sein. So wäre es denkbar, dass Versuchsteilnehmer kleine Wechsel der Farben nicht wahrgenommen haben. Ein schwacher Kontrast kann durch die teiltransparente Darstellung mit einem Optical-See-Through Display, wie es in der HoloLens verbaut ist, entstehen.

Weiterhin könnte die Arbeitsposition, die den Versuchsteilnehmern vorgegeben wurde, nicht ideal festgelegt worden sein. Die Teilnehmer saßen auf einem Stuhl und auf dem Tisch vor ihnen wurde das Experiment durchgeführt. Viele der in den entwickelten Konzepten dargestellten Informationen können durch einen Blick von oben nach unten besser wahrgenommen werden, als von einer seitlichen Position.

Die verwendete Testumgebung von Lebermodellen aus echten CT-Daten und die verwendeten Punktesets, zu denen in der Studie navigiert werden sollte, könnten untereinander nicht ausreichend vergleichbar sein. Die künstliche Erstellung einer Testumgebung könnte bessere vergleichbare Aufgaben ermöglichen.

Abschließend könnte die verwendete Testumgebung mit dem dargestellten Lebermodellen eine zu große Herausforderung in der Navigation darstellen. Alle Blutgefäße wurden unabhängig von Größe und Lage als gleichmäßig wichtig eingestuft. Eine Unterscheidung wurde in diesen Prototypen nicht getätigt. Dies stützt sich mit der Aussage eines Arztes aus der qualitativen Evaluation. Als Resultat dazu wurden für diese Studie einige Blutgefäße im Vorfeld entfernt. Eine weitere Reduzierung könnten in zukünftigen Arbeiten andere Ergebnisse erzielen.

5.4 Auswertung der Anforderungsanalyse

Nach einer Evaluation der Konzepte wird nachfolgend überprüft, ob die zu Beginn in der Anforderungsanalyse (vergleiche Abschnitt 3.1.2) ausgearbeiteten Anforderungen erfüllt werden konnten.

Die funktionalen Anforderungen beschreiben die Kernaufgaben, welche der in dieser Arbeit entwickelte Prototyp erfüllen muss. Diese Anforderungen konnten alle umgesetzt werden. So wurde ein Prototyp entwickelt, der mit Hilfe der HoloLens AR-Visualisierungen an einem medizinischen Instrument einblendet und die Abstände zu umliegenden Strukturen darstellt. In der Tabelle 5.5 werden die funktionalen Anforderungen zusammengefasst.

Tabelle 5.5: Zusammenfassung über die Erfüllung der funktionalen Anforderungen.

Funktionale Anforderung	Bedingung erfüllt?	Begründung
Augmented Reality	erfüllt	Es wurde ein Prototyp mit Hilfe der HoloLens entwickelt. Visualisierungen können im Sichtbereich des Nutzers eingeblendet werden.
Instrumenten Tracking	erfüllt	Mit Hilfe eines optischen Trackingsystems kann die Pose von medizinischen Instrumenten bestimmt werden. Über eine Netzwerkschnittstelle werden die Informationen an die HoloLens Anwendung weitergeleitet.
Registrierung	erfüllt	Mit Hilfe eines Duo-Markers kann eine Registrierung zwischen dem verwendeten externen Trackingsystem und der HoloLens durchgeführt werden.
Navigation	erfüllt	Es wurden Visualisierungen erstellt, die den Abstand zwischen Instrument und der Umgebung darstellen.

Die nichtfunktionalen Anforderungen konnten überwiegend erfüllt werden. So bestehen Unterschiede in der Güte der Erfüllung durch die unterschiedlichen Eigenschaften der entwickelten Konzepte. Die Gebrauchstauglichkeit konnte durch die durchgeführten Nutzerstudien gezeigt werden. So konnte mit Hilfe eines SUS-Fragebogens die Zufriedenstellung überprüft werden. Durch Überprüfung der durchschnittlichen Leistungen in den durchgeführten Nutzerstudien, kann eine Einschätzung hinsichtlich Effektivität und Effizienz getätigt werden. Zur Beurteilung der Anforderungen der Performance wurde die durchschnittliche Berechnungszeit der HoloLens Anwendung für ein Bild und die durchschnittliche Verfügbarkeit neuer Trackinginformationen ausgewertet. Dazu sind für jedes Konzept 600 aufeinanderfolgender Frames überwacht und die Berechnungszeit und Verfügbarkeit neuer Trackinginformationen aufgezeichnet worden. Daraus konnten anschließend Durchschnittswerte berechnet werden. Die Ergebnisse können dem Anhang entnommen werden. Die Anforderungen zu den Visualisierungsaspekten wurden bei der

Entwicklung der Konzepte berücksichtigt. In der Tabelle 5.6 werden die nichtfunktionalen Anforderungen zusammengefasst und überprüft ob die Anforderung erfüllt wurde.

Tabelle 5.6: Zusammenfassung über die Erfüllung der funktionalen Anforderungen.

Nichtfunktionale Anforderung	Bedingung erfüllt?	Begründung
Gebrauchstauglichkeit		
Zufriedenstellung	überwiegend erfüllt	Die Ergebnisse des SUS-Fragebogen zeigen mit Ausnahme des Konzepts Extended Radar durchschnittliche Ergebnisse.
Effektivität	überwiegend erfüllt	Ein vergrößerter Abstand zu umliegenden Strukturen und eine geringe Anzahl an Kollisionen konnte unter Verwendung der entwickelten Konzepte erreicht werden (Ausnahme: Konzept Pointer).
Effizienz	teilweise erfüllt	Mit einer Unterstützung durch die entwickelten Konzepte konnten weniger Kollisionen und ein vergrößerter Abstand erzielt werden. Die Bearbeitungszeit war unter Verwendung der Konzepte länger. Das Konzept Distance Sensor erzeugte weniger Kollisionen und hatte die kürzeste Bearbeitungszeit.
Performance		
Darstellungsgeschwindigkeit	überwiegend erfüllt	Mit Ausnahme des Konzepts Closest Point (31 FPS) kann unter Verwendung der Konzepte und der verwendeten Testumgebungen eine Darstellungsgeschwindigkeit von durchschnittlich 60 FPS erreicht werden.
Trackinglatenz	überwiegend erfüllt	In der Regel enthalten mehr als 81% der berechneten Frames aktualisierte Trackinginformationen.
Robustheit	überwiegend erfüllt	Die Anwendung erzeugt keine Programmabstürze. Eine fehlerhafte Lagebestimmung durch die Holo-Lens kann zum Abbruch der Anwendung führen.
Visualisierungsaspekte		
Minimalansicht	überwiegend erfüllt	Die Konzepte wurden so konzipiert, dass möglichst wenig virtueller Inhalt dargestellt wird. Das Konzept Map verstößt zum Teil dagegen und wurde in der qualitativen Evaluation aufgrund der hohen Informationsdichte kritisiert.
Farbkodierung	erfüllt	Die entwickelten Konzepte besitzen eine einheitliche Farbkodierung.

6 Schlussfolgerungen

6.1 Zusammenfassung

Einführend wurden zunächst essentielle Grundlagen, die zum Verständnis dieser Arbeit notwendig sind, erarbeitet. Dazu wurde eine Einführung in das Thema Augmented Reality gegeben. Anschließend wurden Arbeiten mit dem AR-HMD HoloLens, die Teil aktueller Forschung sind, betrachtet und Ansätze aus verwandten Arbeiten zusammengetragen.

Nachfolgend wurden mit Hilfe einer Anforderungsanalyse grundlegende Funktionen an einen Prototypen und Rahmenrichtlinien zur Erstellung verschiedener Konzepte ausgearbeitet. Unter Einbezug verwandter Arbeiten wurden bestehende Konzepte erweitert und eigene Konzepte ergänzt.

Anschließend wurde in einem Implementierungskapitel der Entwicklungsprozess des Prototypen und der Konzepte beschrieben. Der Prototyp wurde durch eine Kombination aus drei eigenständigen Teilanwendungen entwickelt. Diese erfüllen unterschiedliche Aufgaben, wie die Darstellung der AR-Inhalte und Konzepte auf der HoloLens, die Fernsteuerung einzelner Konzepte oder die Bereitstellung von Trackinginformationen. Alle in Kapitel 3 ausgearbeiteten Konzepte wurden für die AR-Anwendung auf der HoloLens umgesetzt.

Die Konzepte wurden mit vielen Freiheitsgraden entwickelt. Daher wurde in einer vorgezogenen Nutzerstudie mit Studenten zunächst geeignete Parameter ermittelt und potentiell geeignete Konzepte ausgewählt. In einer zweiten, qualitativen Nutzerstudie wurde mit drei Ärzten die zuvor ermittelten Konzepte evaluiert und qualitative Einschätzungen eingeholt. In einer anschließenden quantitativen Evaluation wurde mit 23 Medizinstudenten überprüft, mit welchem Konzept bessere Ergebnisse hinsichtlich der Nutzerzufriedenstellung, Effektivität und Effizienz erzielt werden können. In der qualitativen Evaluation erzielte das Konzept Distance Sensor die besten Ergebnisse, während in der quantitativen Evaluation das Konzept Map die besseren Ergebnisse erzielte. Ursache dafür könnte ein Erfahrungsunterschied zwischen Studenten und erfahrenen Ärzten sein. Anschließend wurde überprüft, ob der realisierte Prototyp, die in der Konzeption aufgestellten Anforderungen erfüllt. Es konnte gezeigt werden, dass die Anforderungen überwiegend erfüllt worden sind. Unterschiede zeigen sich durch die Verwendung verschiedener Konzepte. Nicht jedes Konzept erfüllt alle Anforderungen.

6.2 Fazit und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene AR-Visualisierungen für ein HMD entwickelt und ihre Eignung bezüglich der Distanzeinschätzung für die Navigation von chirurgischen Instrumenten untersucht. Im Rahmen zweier Nutzerstudien wurden im Kontext eines simulierten medizinischen Eingriffs, bereits bestehenden Konzepte und neu entwickelte Visualisierungen miteinander verglichen.

Im Unterschied zu den Vorarbeiten von Heinrich et al. [25], hat das erweiterte Konzept Extended Radar in dieser Arbeit schlechtere Ergebnisse erzielt. So wurde das Konzept vor allem in den subjektiven Einschätzungen durch die erstellten Rankings und durch die Ergebnisse des SUS-Fragebogens als nicht intuitiv eingeschätzt. Mögliche Ursache dafür könnte sein, dass das Konzept für eine andere Einsatzumgebung konzipiert worden ist. Die Ergänzung einer Resektionswand, wie sie in der Arbeit von Heinrich et al. verwendet wurde, könnte andere Ergebnisse erzeugen. Das Konzept Closest Point aus der Arbeit von Choi et al. [14] wurde für den Rahmen dieser Arbeit in vergleichbarer Art entwickelt. In der qualitativen Studie wurde es von Ärzten als unruhig beschrieben und erzielte im Ranking eine schlechte Platzierung. Im Ranking der quantitativen Evaluation erzielte es eine gute Platzierung. Hinsichtlich des durchschnittlichen Abstands, Anzahl an Kollisionen und der Bearbeitungsdauer, konnte mit dem Konzept durchschnittliche Ergebnisse erzielt werden. Ähnlich zum Konzept Extended Radar wäre es möglich, dass die Einsatzumgebung für dieses Konzept nicht ideal ist. So wurden in der Arbeit von Choi et al. anstatt vieler kleiner Blutgefäße, große Strukturen wie das Phantom einer Wirbelsäule verwendet. Starke Änderungen der Position des Closest Point könnten in dem von Choi et al. verwendeten Aufbau seltener auftreten. Die Konzepte Distance Sensor und Map zeigten die vielversprechendsten Ergebnisse im Rahmen dieser Arbeit. Das Konzept Map erzielte in der quantitativen Evaluation sehr gute Ergebnisse in der subjektiven Einschätzung und gute Ergebnisse hinsichtlich der Anzahl an Kollisionen und des durchschnittlichen Abstands. In der qualitativen Evaluation erzielte das Konzept Distance Sensor die beste Platzierung im Ranking. Weiterhin erzielte es in der quantitativen Evaluation die besten Ergebnisse hinsichtlich der Bearbeitungszeit und der Anzahl an Kollisionen. Dabei wird ein Interessenskonflikt deutlich. Das Konzept Map besitzt im Vergleich zu den anderen Konzepten die größte Informationsdichte, während das Konzept Distance Sensor über eine geringe Informationsdichte verfügt und nur bei Unterschreitung eines Sicherheitsabstandes zusätzliche Elemente einblendet. Es kann die Vermutung aufgestellt werden, dass Studenten weniger Erfahrung im Umgang mit medizinischen Instrumenten und dem einschätzen des Abstands zwischen umliegende Strukturen und dem Instrument besitzen und daher eine Visualisierung bevorzugen, die übergreifend mehr Informationen darstellt. Erfahrene Ärzte hingegen könnten eher eine reduzierte Visualisierung bevorzugen, die nur in kritischen Situationen zusätzliche Navigationshinweise darstellt. Diese Vermutung sollte in weiteren Studien mit einem Fokus auf die beiden Konzepte überprüft werden.

Dennoch konnten in der quantitativen Evaluation keine signifikanten Ergebnisse ermittelt werden. Dies könnte vielfältige Ursachen haben. So könnte die verwendete Testumgebung nicht ausreichend vergleichbar gewesen sein. Weiterhin wurden Objekte mit der HoloLens, anders als vom Hersteller empfohlen, in einer sehr geringen Distanz dargestellt. Der Einfluss auf die Objektstabilität und Darstellungsqualität sollte in nachfolgenden Studien untersucht werden. Mit der im Februar 2019 erschienene *HoloLens 2* könnten

ebenfalls Verbesserungen hinsichtlich der Objektstabilität erzielt werden. Weitere Ursachen, dass keine signifikanten Ergebnisse gefunden wurden, sind in Abschnitt 5.3.3 aufgeführt.

Die Verwendung von Augmented Reality mit HMD's wie der HoloLens, zeigt großes Potential. Meulstee et al. und Moosburner et al. untersuchten die HoloLens hinsichtlich der Genauigkeit und den Einsatz in einem Operations-Szenario [38] [42]. Generell zeigt sich, dass die aktuelle Hardware noch nicht die gewünschten Anforderungen voll umfassend erfüllen. Das Feedback von Ärzten außerhalb des Thinking-Aloud-Test's war positiv, ebenso war das Feedback zum Gesamtprototypen in der quantitativen Studie mit wenigen Ausnahmen überwiegend positiv.

Zusammenfassend zeigt sich, dass mit dem Einsatz von Augmented Reality, der HoloLens und geeigneten Visualisierungskonzepten, der Abstand eines medizinischen Instruments zu umliegenden Risikostrukturen vergrößert und die Anzahl an Kollisionen minimiert werden kann. Die aufgestellten Anforderungen konnten überwiegend erfüllt werden. Weiterführende Entwicklungen und Untersuchungen sind notwendig um praxistaugliche Aussagen zu tätigen.

Literaturverzeichnis

- [1] Atracsys LLC. spryTrack SDK RC6. [Online] <https://atracsys.com>. [Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [2] E. Azimi, T. Song, C. Yang, and O. Dianat. Endodontic guided treatment using augmented reality on a head-mounted display system. *Healthcare Technology Letters*, 2018.
- [3] R. T. Azuma. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators & Virtual Environments*, 6(4):355–385, 1997.
- [4] A. Bangor, P. T. Kortum, and J. T. Miller. An empirical evaluation of the system usability scale. *Intl. Journal of Human–Computer Interaction*, 24(6):574–594, 2008.
- [5] C. Bichlmeier, S. M. Heining, M. Feuerstein, and N. Navab. The virtual mirror: a new interaction paradigm for augmented reality environments. *IEEE Transactions on Medical Imaging*, 28(9):1498–1510, 2009.
- [6] E. A. Bier, M. C. Stone, K. Pier, W. Buxton, and T. D. DeRose. Toolglass and magic lenses: the see-through interface. In *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 73–80. ACM, 1993.
- [7] O. Bimber and R. Raskar. Modern approaches to augmented reality. In *ACM SIG-GRAPH 2006 Courses*. ACM, 2006.
- [8] D. Black, J. Hettig, M. Luz, C. Hansen, R. Kikinis, and H. Hahn. Auditory feedback to support image-guided medical needle placement. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 12(9):1655–1663, 2017.
- [9] R. Bogdanova, P. Boulanger, and B. Zheng. Depth perception of surgeons in minimally invasive surgery. *Surgical innovation*, 23(5):515–524, 2016.
- [10] F. Bork, B. Fuers, A.-K. Schneider, F. Pinto, C. Graumann, and N. Navab. Auditory and visio-temporal distance coding for 3-dimensional perception in medical augmented reality. In *2015 IEEE international symposium on mixed and augmented reality*, pages 7–12. IEEE, 2015.
- [11] M. Broder. Clinical outcomes and resource utilization associated with laparoscopic and open colectomy using a large national database. *Annals of Surgery*, 247(5):819–824, 2008.
- [12] J. Brooke. Sus-a quick and dirty usability scale. In W. Jordan, B. Thomas, B. A. Weerdmeester, and B. A. McClelland, editors, *Usability evaluation in industry*, pages 189–194. London: Taylor and Francis, 1996.
- [13] B. Cho, M. Oka, N. Matsumoto, R. Ouchida, J. Hong, and M. Hashizume. Warning navigation system using real-time safe region monitoring for otologic surgery. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 8(3):395–405, 2013.

- [14] H. Choi, B. Cho, K. Masamune, M. Hashizume, and J. Hong. An effective visualization technique for depth perception in augmented reality-based surgical navigation. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 12(1):62–72, 2016.
- [15] C. Cometti, C. Paizis, A. Casteleira, G. Pons, and N. Babault. Effects of mixed reality head-mounted glasses during 90 minutes of mental and manual tasks on cognitive and physiological functions. *PeerJ*, 6:e5847, 2018.
- [16] M. E. de Oliveira, H. G. Debarba, A. Läderrmann, S. Chagué, and C. Charbonnier. A hand-eye calibration method for augmented reality applied to computer-assisted orthopedic surgery. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 15(2):e1969, 2019.
- [17] L. T. De Paolis and V. De Luca. Augmented visualization with depth perception cues to improve the surgeon’s performance in minimally invasive surgery. *Medical & biological engineering & computing*, pages 1–19, 2018.
- [18] J. Decker, L. Poggemeyer, A. Hopper, B. Lich, S. Aldana, N. Brower, B. McIlhargey, and B. Langer. Microsoft HoloLens. [Online] <https://docs.microsoft.com/en-us/hololens/>, 2018. [Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [19] G. Deib, A. Johnson, M. Unberath, K. Yu, S. Address, L. Qian, G. Osgood, N. Navab, F. Hui, and P. Gailloud. Image guided percutaneous spine procedures using an optical see-through head mounted display: proof of concept and rationale. *Journal of neurointerventional surgery*, 10(12):1187–1191, 2018.
- [20] DIN EN ISO 9241-11: 2018-11. Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 11: Gebrauchstauglichkeit: Begriffe und Konzepte. Beuth Verlag, Berlin, 2018.
- [21] B. J. Dixon, M. J. Daly, H. Chan, A. D. Vescan, I. J. Witterick, and J. C. Irish. Surgeons blinded by enhanced navigation: the effect of augmented reality on attention. *Surgical Endoscopy*, 27(2):454–461, 2013.
- [22] R. Dörner, W. Broll, P. Grimm, and B. Jung. *Virtual und augmented reality (VR/AR): Grundlagen und Methoden der Virtuellen und Augmentierten Realität*. Springer-Verlag: 241-294, 2014.
- [23] J. T. Gibby, S. A. Swenson, S. Cvetko, R. Rao, and R. Javan. Head-mounted display augmented reality to guide pedicle screw placement utilizing computed tomography. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 14(3):525–535, 2019.
- [24] C. Hansen, S. Zidowitz, F. Ritter, C. Lange, K. Oldhafer, and H. K. Hahn. Risk maps for liver surgery. *International journal of computer assisted radiology and surgery*, 8(3):419–428, 2013.
- [25] F. Heinrich, G. Schmidt, K. Bornemann, A. Roethe, I. Essayed, and C. Hansen. Visualization concepts to improve spatial perception for instrument navigation in image-guided surgery. *Proceedings of SPIE Medical Imaging: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling [to be published]*, 2019.

- [26] M. Herrlich, P. Tavakol, D. Black, D. Wenig, C. Rieder, R. Malaka, and R. Kikinis. Instrument-mounted displays for reducing cognitive load during surgical navigation. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 12(9):1599–1605, 2017.
- [27] R. E. Kalman. A new approach to linear filtering and prediction problems. *Journal of basic Engineering*, 82(1):35–45, 1960.
- [28] M. Kersten-Oertel, S. J. Chen, and D. L. Collins. An evaluation of depth enhancing perceptual cues for vascular volume visualization in neurosurgery. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 20(3):391–403, 2014.
- [29] E. Kruijff, J. E. Swan, and S. Feiner. Perceptual issues in augmented reality revisited. In *2010 IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality*, pages 3–12. IEEE, 2010.
- [30] T. Kuzhagaliyev, N. T. Clancy, M. Janatka, K. Tchaka, F. Vasconcelos, M. J. Clarkson, K. Gurusamy, D. J. Hawkes, B. Davidson, and D. Stoyanov. Augmented reality needle ablation guidance tool for irreversible electroporation in the pancreas. In *Medical Imaging 2018: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling*, volume 10576, page 1057613. International Society for Optics and Photonics, 2018.
- [31] P. Lamata, L. Félix, V. Sojar, P. Makowski, L. Massoptier, S. Casciaro, W. Ali, T. Stüdeli, J. Declerck, O. Elle, O. Jackov Elle, B. Edwin, and B. Edwin. Use of the resection map system as guidance during hepatectomy. *Surgical endoscopy*, 24:2327–37, 02 2010.
- [32] K. Lawonn, M. Luz, B. Preim, and C. Hansen. Illustrative visualization of vascular models for static 2d representations. In *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, pages 399–406. Springer, 2015.
- [33] J. R. Lewis and J. Sauro. The factor structure of the system usability scale. In *International conference on human centered design*, pages 94–103. Springer, 2009.
- [34] M. A. Lin, A. F. Siu, J. H. Bae, M. R. Cutkosky, and B. L. Daniel. Holoneedle: Augmented reality guidance system for needle placement investigating the advantages of three-dimensional needle shape reconstruction. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 3(4):4156–4162, 2018.
- [35] Magic Leap, Incorporated . Magic Leap One. [Online] <https://www.magicleap.com/>. [Letzter Zugriff 22.01.2019].
- [36] D. Manzey, S. Röttger, J. E. Bahner-Heyne, D. Schulze-Kissing, A. Dietz, J. Meixensberger, and G. Strauss. Image-guided navigation: the surgeon’s perspective on performance consequences and human factors issues. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 5(3):297–308, 2009.
- [37] Meta. Meta 2. <https://www.metavision.com/>. [Online; Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [38] J. W. Meulstee, J. Nijssink, R. Schreurs, L. M. Verhamme, T. Xi, H. H. K. Delye, W. A. Borstlap, and T. J. J. Maal. Toward holographic-guided surgery. *Surgical Innovation*, 26(1):86–94, 2019.
- [39] Microsoft Corporation. HoloToolkit 2017.4.0.0. [Online] <https://github.com/Microsoft/MixedRealityToolkit-Unity>. [Letzter Zugriff 10.03.2019].

- [40] Microsoft Corporation. Visual Studio 2017. [Online] <https://visualstudio.microsoft.com>. [Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [41] P. Milgram, H. Takemura, A. Utsumi, and F. Kishino. Augmented reality: A class of displays on the reality-virtuality continuum. In *Telem manipulator and Telepresence Technologies*, volume 2351, pages 282–293. International Society for Optics and Photonics, 1994.
- [42] S. Moosburner, C. Remde, P. Tang, M. Queisner, N. Haep, J. Pratschke, and I. M. Sauer. Real world usability analysis of two augmented reality headsets in visceral surgery. *Artificial Organs*, 2019.
- [43] Novarad. Novarad’s OpenSight Augmented Reality System is the First Solution for Microsoft HoloLens 510(k) Cleared by the FDA for Medical Use. [Online] <https://www.novarad.net/novarads-opensight-augmented-reality-system-is-the-first-solution-for-microsoft-holens-510k-cleared-by-the-fda-for-medical-use>, 2018. [Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [44] Y.-L. Park, S. Elayaperumal, B. Daniel, S. C. Ryu, M. Shin, J. Savall, R. J. Black, B. Moslehi, and M. R. Cutkosky. Real-time estimation of 3-d needle shape and deflection for mri-guided interventions. *IEEE/ASME Transactions On Mechatronics*, 15(6):906–915, 2010.
- [45] M. Pollefeys. Microsoft HoloLens facilitates computer vision research by providing access to raw image sensor streams with Research Mode. [Online] <https://www.microsoft.com/en-us/research/blog/microsoft-hololens-facilitates-computer-vision-research-by-providing-access-to-raw-image-sensor-streams-with-research-mode/>. [Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [46] B. Preim and C. Botha. *Visual Computing for Medicine: Theory, Algorithms, and Applications*. Morgan Kaufmann Publishers, 2013.
- [47] PTC Incorporated. Optimizing Target Detection and Tracking Stability. [Online] <https://library.vuforia.com/content/vuforia-library/en/articles/Solution/Optimizing-Target-Detection-and-Tracking-Stability.html/>. [Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [48] PTC Incorporated. Vuforia SDK 7.2.20. [Online] <https://www.vuforia.com/>. [Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [49] T. Ropinski, F. Steinicke, and K. Hinrichs. Visually supporting depth perception in angiography imaging. In *International Symposium on Smart Graphics*, pages 93–104. Springer, 2006.
- [50] I. M. Sauer, M. Queisner, P. Tang, S. Moosburner, O. Hoepfner, R. Horner, R. Lohmann, and J. Pratschke. Mixed reality in visceral surgery: development of a suitable workflow and evaluation of intraoperative use-cases. *Annals of surgery*, 266(5):706–712, 2017.
- [51] J. Sauro. *A practical guide to the system usability scale: Background, benchmarks & best practices*. Measuring Usability LLC Denver, CO, 2011.
- [52] D. J. Simons and C. F. Chabris. Gorillas in our midst: Sustained inattention blindness for dynamic events. *perception*, 28(9):1059–1074, 1999.

- [53] M. Someren, Y. Barnard, and J. Sandberg. *The Think Aloud Method - A Practical Guide to Modelling Cognitive Processes*. Academic Press Inc, 1994.
- [54] Surgical Science Sweden AB. LapSim®. [Online] <https://surgicalscience.com/systems/lapsim/>. [Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [55] O. M. Tepper, H. L. Rudy, A. Lefkowitz, K. A. Weimer, S. M. Marks, C. S. Stern, and E. S. Garfein. Mixed reality with hololens: where virtual reality meets augmented reality in the operating room. *Plastic and reconstructive surgery*, 140(5):1066–1070, 2017.
- [56] M. Tönnis. *Augmented Reality : Einblicke in die Erweiterte Realität*. Informatik im Fokus. Springer: 43-159, 2010.
- [57] A. Turner, N. Schonning, M. Zeller, E. Cowley, and B. Bray. Holographic rendering. [Online] <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/rendering>. [Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [58] A. Turner, M. Zeller, E. Cowley, and B. Bray. Hologram stability. [Online] <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/hologram-stability>. [Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [59] Unity Technologies ApS. Unity 2018.1.6f1. [Online] <https://unity3d.com/de/get-unity/download/archive>. [Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [60] U.S. Food and Drug Administration. September 2018 510(k) Clearances. [Online] <https://www.fda.gov/MedicalDevices/ProductsandMedicalProcedures/DeviceApprovalsandClearances/510kClearances/ucm622746.htm>, 2018. [Letzter Zugriff 10.03.2019].
- [61] D. W. F. Van Krevelen and R. Poelman. A survey of augmented reality technologies, applications and limitations. *International journal of virtual reality*, 9:1–20, 2010.
- [62] L. W. Way, L. Stewart, W. Gantert, K. Liu, C. M. Lee, K. Whang, and J. G. Hunter. Causes and prevention of laparoscopic bile duct injuries: analysis of 252 cases from a human factors and cognitive psychology perspective. *Annals of surgery*, 237(4):460, 2003.
- [63] B. Wentink. Eye-hand coordination in laparoscopy - an overview of experiments and supporting aids. *Minimally Invasive Therapy & Allied Technologies*, 10(3):155–162, 2001.
- [64] M. Zeller, A. Turner, and B. Bray. HoloLens hardware details. [Online] <https://docs.microsoft.com/en-us/windows/mixed-reality/hololens-hardware-details>. [Letzter Zugriff 10.03.2019].