

JOHANNES PATZSCHKE

**Exploration medizinischer
Bildaten in der virtuellen
Realität**

MASTERARBEIT

im Studiengang

COMPUTERVISUALISTIK

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Fakultät für Informatik

Institut für Simulation und Graphik

4. Mai 2016



INF

FAKULTÄT FÜR
INFORMATIK

Johannes Patzschke

johannes@jopat.de

Matrikelnummer: 191564

Exploration medizinischer Bilddaten in der virtuellen Realität

Masterarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 4. Mai 2016

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim
Jun.-Prof. Dr. Christian Hansen

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim
Patrick Saalfeld, M. Sc.

Kurzfassung

In der vorliegenden Arbeit werden die Möglichkeiten zur Exploration medizinischer Daten in der virtuellen Realität untersucht. Hierfür werden Interaktionskonzepte, angelehnt an aktuelle Forschungsarbeiten, entwickelt und prototypisch umgesetzt. Im Fokus liegen hierbei die Manipulation (Translation, Rotation & Skalierung) sowie Vermessung (Distanz, Winkel) medizinischer 2D- und 3D-Strukturen. Wichtige Aspekte sind der Grad der Immersion sowie die Usability der konzipierten Interaktionstechniken. Die entwickelte Software greift auf aktuelle Technologien, wie räumliche stiftbasierte Eingabegeräte (*zSpace*) oder rotations- sowie positionsverfolgende Head-Mounted Displays (*Oculus Rift*) zurück, um eine intuitive und immersive Umgebung zu schaffen. Die anschließende Evaluierung umfasst qualitative sowie quantitative Methodiken. Deren Auswertung zeigt, dass sich virtuelle Umgebungen für die Untersuchung medizinischer Daten eignen und somit ein vielversprechendes Thema für die Medizin darstellen.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	i
Abbildungsverzeichnis	v
1 Einleitung	1
2 Medizintechnischer Hintergrund	4
2.1 Bildakquirierung	4
2.1.1 Modalitäten	4
2.1.2 Umgang mit medizinischen Daten	6
2.2 Exploration	7
2.3 Vermessung in der Medizin	8
3 Grundlagen und verwandte Arbeiten	9
3.1 Visuelle Wahrnehmung	9
3.1.1 Stereoskopisches Sehen	10
3.1.2 Tiefenwahrnehmung	11
3.2 Virtuelle Realität	13
3.2.1 Immersion	14
3.2.2 Geschichtlicher Rückblick	14
3.2.3 Ausgabegeräte	16
3.2.4 Eingabegeräte	17
3.2.5 Einsatzgebiete	17
3.3 Interaktion	18
3.3.1 Universelle Aufgaben der Interaktion	19
3.3.2 WIMP	19
3.3.3 Post-WIMP	20
3.3.4 3D-Interaktion	20
3.4 Usability	23
4 Konzeption	25

4.1	Zielstellung	25
4.2	Anforderungsanalyse	25
4.3	Entwurf der virtuellen Umgebung	27
4.4	Textuelles Feedback	28
4.5	Adaption der Techniken	28
4.5.1	3D WIMP	29
4.5.2	Selektion	30
4.5.3	Manipulation	31
4.5.4	Vermessung	32
4.6	DICOM-Ebene	34
4.6.1	Ebenenwechsel	34
4.6.2	Transferfunktion	35
5	Implementierung	36
5.1	Unity	36
5.2	Entwicklung des Moduls <i>DICOMtoUnity</i>	37
5.3	Exploration der Daten	40
5.3.1	Selektion und Manipulation	40
5.3.2	Vermessung	41
6	Evaluierung	42
6.1	Versuchsaufbau	43
6.2	Durchführung	45
6.3	Ergebnisse	45
6.3.1	Technik	48
6.3.2	Translation & Rotation	48
6.3.3	Vermessung	48
6.3.4	Schichtbildauswahl	49
6.4	Verbesserungen	49
7	Zusammenfassung und Ausblick	51
7.1	Bewertung der Ergebnisse	51
7.2	Zukünftige Fragestellungen	52
	Quellenverzeichnis	53
	Literatur	53
	Online-Quellen	57
A	Quellcodeausschnitte	59
B	Material zur Nutzerstudie	61

C Inhalt der DVD

67

D Eidesstattliche Erklärung

68

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schematische Darstellung zur Erzeugung von Röntgenbildern [41]. . .	5
2.2	Auszug eines Headers einer DICOM-Datei und Visualisierung der enthaltenen Pixeldaten. (Screenshot aufgenommen vom DICOM-Viewer „MicroDICOM“ [65])	6
3.1	Sichtfelder der menschlichen Wahrnehmung.	10
3.2	Auswirkung der verschiedenen Platzierung eines Objektes auf das wahrgenommene Bild.	11
3.3	Links: Beispiel für <i>Image Blur</i> . Rechts: Illustration zur Tiefenwahrnehmung [19].	12
3.4	Links: Das erste HMD von Sutherland [52]. Rechts: Der Datenhandschuh von Zimmermann et. al. [60].	14
3.5	Links: Der <i>Nintendo Power Glove</i> . Rechts: Person bei der Nutzung der <i>CAVE</i>	15
3.6	Entwicklung der <i>Oculus Rift</i> . Development Kit 1 & 2 sowie die Release Version.	17
4.1	Konzeptzeichnung des Fenstersystems.	29
4.2	Virtuelle DICOM-Ebene mit Kreisauswahl sowie Anzeige und Manipulation der Transferfunktion.	34
5.1	Aufbau der Pixeldaten im Speicher sowie deren visuelle Repräsentation.	39
5.2	Links: Vermessungspfeil mit <i>Toon Shading</i> . Rechts: Vermessungspfeil mit Standard Shader.	41
6.1	Aufbau der Szene: (a) Kurzanleitung (b) Aktuelle Aufgabe (c) Medizinisches Object (d) Schichtbildfenster (e) Knopf zum Zurücksetzen der Szene.	43
6.2	Links: Kreisauswahl ohne Hervorhebung. Rechts: Kreisauswahl mit grüner Hervorhebung des relevanten Segments.	44
6.3	Durchschnittliche Bewertung der einzelnen Bereiche und Mittelwert aller Bewertungskriterien.	46

6.4	Durchschnittlicher Wert jeder Frage bzw. Aussage.	47
6.5	Beziehung von Arbeitsweise zu gemessenen Zeiten und Genauigkeiten.	48
6.6	Erweiterung der kreisförmigen Auswahl, um eine Möglichkeit die Schichtzahl in Einzelschritten zu ändern.	50

Kapitel 1

Einleitung

Wer denkt nicht gern an seine Kindheit zurück? Damals besaß man ein schier unerschöpfliches Vermögen an Vorstellungskraft und Fantasie. Willkürliche Kissenstapel wurden zu Festungen, sonst leblose Gegenstände waren lebendig und generell schien die ganze Welt ein einziger Spielplatz zu sein. Erst mit dem Älterwerden wurden die realen Gegebenheiten samt deren Einschränkungen bewusster wahrgenommen. Eine Möglichkeit, diese Eingrenzungen zumindestens teilweise zu umgehen, bietet die virtuelle Realität (VR).

Auch wenn das Thema bereits seit den 1960ern wissenschaftlich untersucht wird, kamen VR-Technologien hauptsächlich in Forschung und Militär zum Einsatz. Erst 2012 mit der Ankündigung der Virtual Reality Brille *Oculus Rift* wuchs das öffentliche Interesse. Es folgten weitere Head-Mounted Displays (HMD) und auch neue bzw. überarbeitete Eingabegeräte entstanden. Doch inwieweit sind diese neuartigen Technologien für die Mensch-Computer-Interaktion wirklich notwendig?

Bisher werden digitale Inhalte größtenteils über zweidimensionale Darstellungen wahrgenommen. Dies hat den Nachteil, dass wichtige Informationen über 3D-Objekte schlechter wahrgenommen werden. Beispielsweise wird im medizinischen Bereich überwiegend mit Schichtbildern gearbeitet, aus denen sich der Arzt dann mental ein dreidimensionales Modell bilden muss [2]. Zwar existieren bereits 3D-Visualisierungen zu medizinischen Objekten, die durch bestimmte Tiefenhinweise deren Form und Ausmaße deutlicher vermitteln, doch sind diese immer noch an die Limitierungen eines zweidimensionalen Bildschirms gebunden. Hier bieten HMDs den entscheidenden Vorteil, da sie sich das stereoskopische Sehen des Menschen sowie den Effekt der Bewegungsparallaxe zunutze machen, um dreidimensionale Darstellungen konkreter präsentieren zu können.

Doch nicht nur Ausgabegeräte, sondern auch Eingabegeräte spielen eine wichtige Rolle in der virtuellen Realität. Während eine einfache Computermaus nur beschränkte Eingabemöglichkeiten bietet, ermöglichen neuartige Technologien den

gesamten Körper (Ganzkörpertracking der *Microsoft Kinect*) bzw. Teile des Körpers (Handtracking der *Leap Motion*) als Eingabegerät zu nutzen. Auch wenn die 3D-Interaktion ein komplexes Themengebiet darstellt und noch viel Forschungspotenzial bietet, können natürlichere Interaktionstechniken die kognitive Distanz zwischen Nutzeraktion und Systemfeedback verringern. Dadurch können wiederum komplexere mentale Modelle aufgebaut werden, welche die Mensch-Computer-Interaktion insgesamt effizienter gestalten [36]. Weitere Herausforderungen ergeben sich auch aus der eingeschränkten Sicht bei der Verwendung eines HMDs, da hier die Bedienbarkeit des Eingabegeräts eine entscheidende Rolle spielt.

Die vorliegende Arbeit untersucht die Möglichkeit eine intuitive und immersive Umgebung zur Exploration medizinischer Daten zu erschaffen. Hierfür werden unter Berücksichtigung aktueller Forschungsarbeiten Interaktionstechniken entwickelt, die eine präzise räumliche stiftbasierte Interaktion ermöglichen. Zusätzlich wird die virtuelle Umgebung an die Gegebenheiten eines positions- sowie rotationsverfolgenden Head-Mounted Displays angepasst. Weiterhin muss ein Framework entwickelt werden, welches die Einbindung medizinischer Datensätze in die Programmierumgebung ermöglicht.

Das Bewegungsspektrum unterliegt dabei einigen Einschränkungen. Aus technischer Sicht können die Gerätschaften nur in einem begrenztem Raum getrackt werden. Zudem wird die Laufbewegung des Nutzers im virtuellen Raum unterbunden, da es hier zur sogenannten *Motion Sickness* kommen kann. Weiterhin werden die Erstellung sowie das Rendering der 3D-Modelle nur indirekt in dieser Arbeit betrachtet.

Die Arbeit untergliedert sich in folgende Kapitel:

Kapitel 2 geht auf medizintechnische Hintergründe, wie Bildakquirierung, Datenspeicherung sowie Vermessung im medizinischen Kontext, ein.

Kapitel 3 beschäftigt sich mit den Grundlagen der visuellen Wahrnehmung und gibt einen Überblick über das Thema der virtuellen Realität. Zudem werden bestehende Interaktionsformen sowohl in 2D als auch 3D vorgestellt, die für die Konzeption eine Rolle spielen. Das Kapitel schließt mit einer Erläuterung zur Usability ab.

Kapitel 4 beginnt mit einer Anforderungsanalyse, um im Anschluss daran entsprechende Interaktionstechniken entwickeln zu können. Dabei werden vorhandene Interaktionskonzepte übernommen bzw. an die gestellten Ziele angepasst.

Kapitel 5 erläutert auszugsweise wichtige Aspekte des Implementierungsvorgangs. Hierfür werden die verwendeten Frameworks kurz vorgestellt und Teile der Umsetzung der Interaktionsformen näher beschrieben.

Kapitel 6 befasst sich mit der Evaluierung des entstandenen Prototypen. Dies umfasst die Auswahl der Evaluierungsmethoden, die Vorbereitung, Durchführung sowie die Resultate der Auswertung.

Kapitel 7 fasst die Arbeit zusammen und formuliert eine abschließende Bewertung zu den Ergebnissen der Arbeit. Anschließend folgt ein Abschnitt, der sich mit möglichen zukünftigen Fragestellungen beschäftigt.

Kapitel 2

Medizintechnischer Hintergrund

Bevor man über virtuelle Realität oder Interaktion in eben diesem Medium reden kann, gilt es zunächst die medizinischen Grundlagen zu erläutern. Hierfür werden in Kapitel 2.1 verschiedene Techniken vorgestellt, um medizinische Bilddaten zu erhalten. Weiterhin gehen die folgenden Kapitel auf Besonderheiten medizinischer Daten bzw. Strukturen ein und klären den Begriff der Exploration im Bezug auf medizinische Daten.

2.1 Bildakquirierung

Als Wilhelm Conrad Röntgen 1895 die sogenannten *X-Strahlen* bzw. Röntgenstrahlen entdeckte, führte dies zu einer Revolution in der Medizin. Vor allem der diagnostische Bereich profitierte nachhaltig von dieser und den darauf folgenden Entdeckungen [18]. Der Einsatz von Röntgenstrahlen gestattete es Aufnahmen innerer Strukturen zu erlangen, ohne chirurgische Maßnahmen ergreifen zu müssen. In den frühen 1970ern etablierten dann Allan MacLeod Cormack und Godfrey Hounsfield das Prinzip der Computertomographie (CT) und ermöglichten somit überlagerungsfreie zwei- sowie dreidimensionale Darstellungen [41, 49]. Über die Jahre fanden weitere bildgebende Verfahren, wie beispielsweise die Magnetresonanztomographie (MRT) oder die Sonographie (Ultraschall), ihren Weg in die Diagnostik. All diese Verfahren und weitere sind heutzutage aus der diagnostischen Medizin nicht mehr wegzudenken, weshalb im folgenden Kapitel kurz auf diese Techniken eingegangen wird.

2.1.1 Modalitäten

Das grundlegende Verfahren zur Bildakquirierung ist die einfache Anwendung der Röntgenstrahlung, um zweidimensionale Projektionen von Objekten zu erzeugen.

Hierfür wird das zu untersuchende Objekt der Röntgenstrahlung ausgesetzt und gemessen wie stark diese Strahlung absorbiert wird. Abbildung 2.1 veranschaulicht diesen Vorgang schematisch. Die Helligkeitswerte des resultierenden Bildes hängen dabei von der Stärke der Röntgenstrahlung sowie der Absorption der Strahlung in den verschiedenen Strukturen innerhalb des Objekts ab [18]. Beispielsweise absorbieren knöcherne Strukturen einen Großteil der ankommenden Strahlung, sodass es hier zu einer geringen Schwärzung kommt. Das resultierende Negativbild ist somit nur an solchen Stellen dunkel, die ein hohes Maß an Röntgenstrahlung durchgelassen haben, wie es auch in Abbildung 2.1 zu sehen ist.

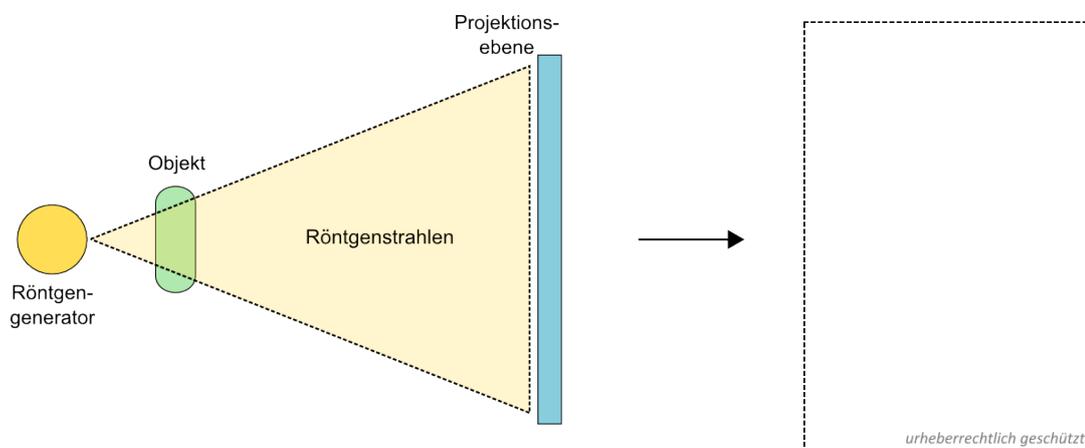
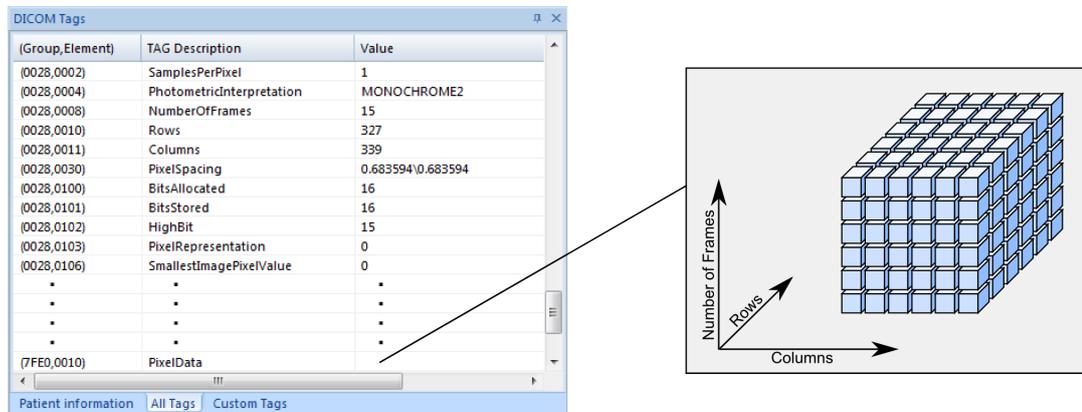


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung zur Erzeugung von Röntgenbildern [41].

Ein weiteres weitverbreitetes Verfahren ist die Magnetresonanztomographie, welche mithilfe der Erzeugung und Manipulation von Magnetfeldern Bilder generieren kann. MRT-Aufnahmen eignen sich vor allem zur Darstellung von Weichgewebe, da hier die größten Kontrastwerte erreicht werden können. Zudem setzt sie den Patienten keiner gefährlichen Strahlung aus, wie es bei einer CT-Untersuchung der Fall ist. Jedoch sind Patienten mit metallischen Implantaten von der Möglichkeit einer MRT ausgeschlossen [18, 49].

Die Sonografie nutzt Schallwellen zur Bildakquise. Hierfür werden hochfrequente Schallwellen (Ultraschallwellen) in den Körper des Patienten ausgesendet und die Stärke sowie die Rückkehrzeit des Echos gemessen. Neben einfachen Bildern können mithilfe der Doppler-Sonografie auch Flussrichtungen und -geschwindigkeiten visualisiert werden [18]. Zudem werden die gemessenen Werte unmittelbar dargestellt, sodass Betrachtungen zu Bewegungen innerer Strukturen möglich sind.

Das nächste Kapitel geht darauf ein, wie mit den erhalten Bilddaten umgegangen wird.



(Group,Element)	TAG Description	Value
(0028,0002)	SamplesPerPixel	1
(0028,0004)	PhotometricInterpretation	MONOCHROME2
(0028,0008)	NumberOfFrames	15
(0028,0010)	Rows	327
(0028,0011)	Columns	339
(0028,0030)	PixelSpacing	0.683594\0.683594
(0028,0100)	BitsAllocated	16
(0028,0101)	BitsStored	16
(0028,0102)	HighBit	15
(0028,0103)	PixelRepresentation	0
(0028,0106)	SmallestImagePixelValue	0
.	.	.
.	.	.
.	.	.
.	.	.
(7FE0,0010)	PixelData	

Abbildung 2.2: Auszug eines Headers einer DICOM-Datei und Visualisierung der enthaltenen Pixeldaten. (Screenshot aufgenommen vom DICOM-Viewer „MicroDICOM“ [65])

2.1.2 Umgang mit medizinischen Daten

Mit der Anzahl der bildgebenden Verfahren steigt auch die Menge der Daten, die verarbeitet werden müssen. Weiterhin führen die unterschiedlichen Modalitäten und medizinischen Gerätschaften, welche nicht immer vom selben Hersteller sind, zu einer Heterogenität im Bezug auf einen Standard zur Verwaltung medizinischer Daten. All diese Faktoren erschweren den Umgang mit diesen Daten, da sie zum einen nicht einheitlich verarbeitet und zum anderen nur schwierig weiter gegeben werden können. Um diesen Problemen entgegen zu wirken, formten 1985 das *American College of Radiology* und die *National Electrical Manufacturers Association* ein Komitee zur Entwicklung eines Standards für medizinische Daten [63]. Der von ihnen verabschiedete Standard von 1985 entwickelte sich dann 1993 zum *Digital Imaging and Communications in Medicine*-Standard (DICOM) weiter [61, 63].

DICOM führte zu einer immensen Verbesserung des medizinischen Arbeitsablaufes. Neben einer einheitlichen Schnittstelle, bietet der neue Standard eine Möglichkeit Daten auf einfache Weise zu übertragen, ob nun innerhalb einer Institution oder zur weiteren Verarbeitung an eine andere Einrichtung, spielt dabei keine Rolle.

Jede DICOM-Datei besteht aus mehreren aneinander gereihten Datenelementen. Jedes Datenelement beinhaltet einen sogenannten *Data Tag* (kurz: *Tag*), der jedes Element eindeutig identifizieren kann, seinen Namen und einen zugehörigen Wert. Die Werte können einfache Nummern bzw. Zeichenketten sein, aber auch Arrays. Der *Tag* wird durch eine achtstellige Zahlenfolge repräsentiert, wobei die ersten vier Ziffern die Zugehörigkeit zu einer bestimmten Gruppe und die letzten vier Ziffern die spezifische Elementnummer in der jeweiligen Gruppe ausdrücken [69]. Beispielsweise trägt das Element *0028 0010* aus Abbildung 2.2 den Namen *Rows* und den

spezifischen Wert 327. Die Ziffern 0028 des Elements zeigen, dass es zur Gruppe der Bildverarbeitungselemente gehört. Die restlichen vier Ziffern 0010 dienen dann zur Zuordnung in der jeweiligen Gruppe.

Das für die Visualisierung und Bildverarbeitung wichtigste Element ist *PixelData*. Hier sind alle gemessenen Werte in einem eindimensionalen Array abgespeichert. Vorstellen kann man sich dieses Array jedoch als dreidimensionalen Quader, wie er in Abbildung 2.2 zu sehen ist. Aus diesem Konstrukt können mithilfe der Elemente aus Gruppe 0028 die einzelnen Schichtbilder, wie z. B. das Bild aus Abbildung 2.1, ausgelesen werden. In Kapitel 5.2 wird das Herauslesen der Pixeldaten genauer betrachtet.

Im Zusammenhang mit den gemessenen Daten kommt auch die sogenannte Transferfunktion zum tragen. Die gemessenen Pixeldaten umfassen meist einen vierstelligen Wertebereich. Diese Pixeldaten werden üblicherweise über Grauwerte auf dem Computer dargestellt. Gängige Bildschirme können jedoch nur 255 verschiedene Grauwerte darstellen, sodass nicht alle Daten gleichzeitig visualisiert werden können. Dies reguliert die Transferfunktion und wird für einfache Funktionen auch Fensterung genannt. Hierfür wird ein Teilbereich aus dem originalen Datensatz genommen und auf die verfügbaren Grauwerte umgerechnet. Dabei kann es entweder zu einer Stauchung oder Streckung des ausgewählten Bereiches kommen.

2.2 Exploration

Schlägt man den Begriff *Exploration* im Duden nach, finden sich die Synonyme *Erforschung* und *Prüfung* [64]. Doch inwieweit sind diese Begriffe relevant für die Medizin? Bevor die bildgebenden Verfahren ihren Weg in die medizinische Diagnostik fanden, mussten sich Ärzte über andere Wege Klarheit über den Gesundheitszustand eines Patienten verschaffen. Chirurgischen Methoden waren das Mittel der Wahl, aber gefährdeten die Gesundheit des Patienten zusätzlich. Die richtige Diagnose hängt von zahlreichen Faktoren ab, sodass jede Information wichtig sein kann. Um eben diese Richtigkeit zu prüfen oder sogar erst festzustellen, ist die Bildgebung heute ein unerlässliches Werkzeug geworden. Die verschiedenen Visualisierungen, die aus den Daten aus CT, MRT usw. gewonnen werden können, helfen Diagnosen zu stellen und sind eine schnelle sowie nicht-invasive Alternative zu chirurgischen Eingriffen. Dabei ist jedoch zu beachten, dass eine zu hohe Strahlungsbelastung durch die Röntgenstrahlung einer CT-Untersuchung ebenfalls gesundheitliche Schäden verursachen kann. Insgesamt ist die Erforschung bzw. Exploration von medizinischen Daten von großer Bedeutung und kann sowohl für die Diagnostik als auch die Weiterbildung bestehender sowie angehender Ärzte äußerst nützlich sein.

2.3 Vermessung in der Medizin

In der medizinischen Routine werden dreidimensionale anatomischen Modelle noch mental von Schnittbildern konstruiert [2, 15]. Dies resultiert aus dem Faktor, dass in den Schnittbildern jedes Detail sichtbar ist, wohingegen eine entsprechende 3D-Darstellung durch Integration der Bilddaten erzeugt worden ist und somit gewisse Ungenauigkeiten innehält. Aus diesem Grund werden Vermessungsaufgaben hauptsächlich in der 2D-Ebene durchgeführt. Auch wenn diese Ebenen beliebig im Objekt platziert sein können, geben sie nur eine grobe Vorstellung über die realen Ausmaße der zu untersuchenden Struktur [38].

Vor allem für die diagnostische Medizin oder die Therapieplanung spielen Messungen eine entscheidende Rolle [38]. Beispielsweise werden Sicherheitsabstände zwischen Tumoren und naheliegenden kritischen Strukturen bestimmt, um etwaige Komplikation abschätzen zu können. Auch die Vermessung von Winkeln in Gelenken zählt zur medizinischen Routine und gibt Aufschluss über potenzielle Fehlstellungen oder anderen Schäden. Weiterhin zählen die Zahnmedizin, Dermatologie und auch die Rechtsmedizin zu den Bereichen in denen die Vermessung von medizinischen Objekten und Strukturen von Relevanz ist [46].

Kapitel 3

Grundlagen und verwandte Arbeiten

Die folgenden Kapitel klären die grundlegenden Begriffe, die für das Verständnis dieser Arbeit notwendig sind. Dabei werden relevante wissenschaftliche Arbeiten referenziert, um einen Überblick über vorhandene sowie aktuelle Entwicklungen zu geben.

Zunächst wird die menschliche Wahrnehmung, speziell die visuelle Wahrnehmung, näher betrachtet. Im Anschluss daran wird der Begriff der virtuellen Realität näher beschrieben. Dabei wird neben einer allgemeinen Definition auch ein kurzer geschichtlicher Überblick sowie eine Aufzählung von Anwendungsbereichen gegeben. Danach folgen Kapitel zu Interaktionstechniken aus Computersystemen und bekannten Paradigmen in diesem Bereich. Abschließend folgt ein kurzes Kapitel zur Usability.

3.1 Visuelle Wahrnehmung

Der Mensch nimmt seine Umgebung über verschiedenste Sinne wahr. Die dabei anfallende Menge an Informationen muss nicht nur aufgenommen, sondern auch vom Gehirn verarbeitet werden. Etwa 80% dieser Informationen werden über visuelle Reize aufgenommen [68], weshalb das Auge damit der wichtigste Bestandteil unserer Wahrnehmung ist. Somit ist es auch verständlich, dass ein Großteil der Mensch-Computer-Interaktion über visuelle Stimuli geschieht. Gerade das Erschaffen von virtuellen Welten ausschließlich über die vier anderen Grundsinne ist nur schwer realisierbar. Denn während haptisches und akustisches Feedback häufig Anwendung findet, werden gustatorische (Schmecken) sowie olfaktorische (Riechen) Reize nur selten im Bereich Mensch-Computer-Interaktion eingesetzt.

Im menschlichen Sichtfeld werden nicht alle Objekte gleich scharf wahrgenom-

men. Es existiert der sogenannte Bereich des *scharfen Sehens*, indem Dinge besonders detailliert wahrgenommen werden können. Dieser Bereich lässt sich auf die im Auge befindliche *Fovea centralis* (deutsch: Sehgrube) zurückführen. Hier ist die Konzentration von Sehzellen am größten, sodass das Gesehene höher aufgelöst wahrgenommen werden kann [7]. Insgesamt entspricht das Sichtfeld, welche beide Augen zusammen wahrnehmen, einem Kreis mit einem Durchmesser von 120° . Betrachtet man die gesamte horizontale Ausdehnung des Gesichtsfeldes beträgt diese insgesamt 200° [30]. Abbildung 3.1 zeigt die vertikale sowie horizontale Reichweite der Sichtfelder.

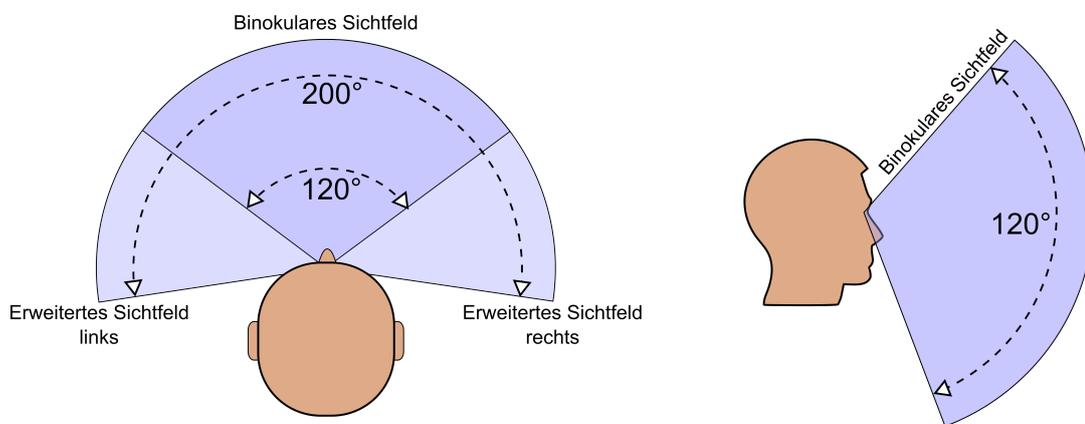


Abbildung 3.1: Sichtfelder der menschlichen Wahrnehmung.

Der Begriff der virtuellen Realität wird häufig mit sogenannten Head-Mounted Displays in Verbindung gebracht, da diese einen hohen Grad der Immersion unterstützen können. Solche Displays machen sich das stereoskopische Sehen des Menschen zunutze, um trotz zweidimensionaler Darstellungen einen Eindruck von Dreidimensionalität zu erzeugen. Die folgenden Kapitel betrachten diesen Aspekt des Sehens genauer und gehen auch auf verwandte Themengebiete ein.

3.1.1 Stereoskopisches Sehen

Obwohl unsere beiden Augen zur gleichen Zeit unterschiedliche Bilder aufnehmen, nehmen wir dies nur bedingt wahr. Das menschliche Gehirn verarbeitet die beiden separaten Aufnahmen zu einem Gesamtbild. Ein Vorteil, der daraus entsteht, ist die Möglichkeit Entfernungen präziser wahrzunehmen und Objekte im Sichtbereich dreidimensional erscheinen zu lassen. Ein wichtiger Faktor ist dabei der Bereich des *scharfen Sehens*. Denn nicht alle Objekte, die im Sichtfeld auftauchen, werden gleich scharf wahrgenommen. Mithilfe der sogenannten *Konvergenz*, dem sich Kreuzen der beiden Sichtstrahlen, sowie der *Akkommodation*, der Anpassung der Brechkraft der

Linse, können gezielt Punkte bzw. kleinere Bereiche fixiert werden [7]. All diese Faktoren werden auch von aktuellen 3D-Technologien ausgenutzt, um beispielsweise einem Kinofilm, welcher auf eine flache Leinwand projiziert wird, dennoch Tiefe zu verleihen. Abbildung 3.2 zeigt wie sich die unterschiedliche Platzierung von Objekten auf die wahrgenommene Position auswirkt. Die Stereoskopie ist somit einer der wichtigsten Aspekte, die es bei der Entwicklung von neuartigen Displaytechnologien zu berücksichtigen gilt. Im folgenden Kapitel werden noch andere Faktoren beschrieben, welche zur Tiefenwahrnehmung beitragen.

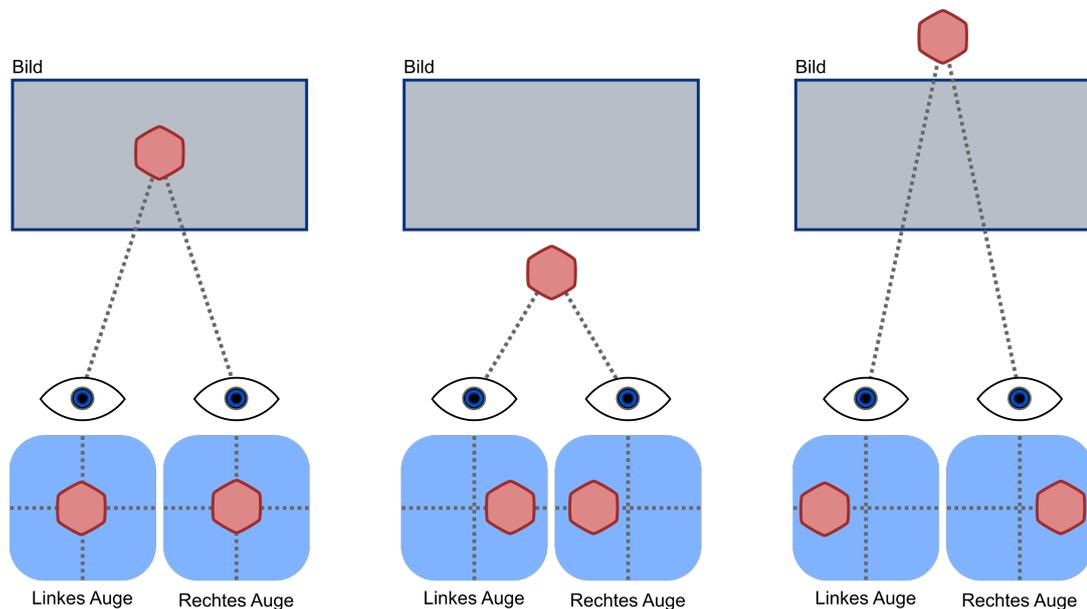


Abbildung 3.2: Auswirkung der verschiedenen Platzierung eines Objektes auf das wahrgenommene Bild.

3.1.2 Tiefenwahrnehmung

Neben der Stereoskopie macht sich der Mensch auch andere Informationen zunutze, um seine Umgebung dreidimensional wahrnehmen zu können. Diese Informationen werden auch Tiefenhinweise genannt und unterscheiden sich wiederum in monokulare und binokulare Tiefenhinweise. Die folgenden Ausführungen sind aus verschiedenen literarischen Werken sinngemäß entnommen wurden. Zur Übersichtlichkeit wurde die Gesamtheit der hier verwendeten Literatur in einer Fußnote zusammengefasst ¹.

¹„Virtual and Augmented Reality (VR/AR)“ [21], „Einführung in die Wahrnehmungs-, Lern- und Werbe-Psychologie“ [28], „Einführung in die Wahrnehmungspsychologie : Sinne, Körper, Bewegung“ [47], „Virtual Reality Technology and Applications“ [30] & „Interaktive Systeme - Band

Die monokularen Hinweise lassen sich auch mit nur einem Auge wahrnehmen und ermöglichen die Wahrnehmung von Tiefe, selbst in zweidimensionalen Darstellungen. Mithilfe von *Verdeckung* können Vordergrund- und Hintergrundobjekte voneinander unterschieden werden. Dargestellte *Schatten* geben Hinweise zur Form, aber können auch dazu beitragen die relative Position zu anderen Objekten abschätzen zu können. Weiterführende Experimente dazu finden sich in der Veröffentlichung von Leonard Wanger [55]. Weiterhin helfen der *Texturgradient* und die *Linearperspektive* verschiedene Tiefen wahrzunehmen. Dabei beruhen beide Hinweise auf dem Prinzip, dass kleiner dargestellte Objekte als weiter entfernt wahrgenommen werden. Abbildung 3.3 zeigt ein Beispiel für *Image Blur* (deutsch: Bildverwischung bzw. verschmiertes Bild), das bei weit entfernten Objekten auftritt. Die Formen im Hintergrund erscheinen dabei verschwommen und erhalten einen leichten Blaustich. Ein weiterer oft auftretender Tiefenhinweis ist die sogenannte *Bewegungsparallaxe*. Dies kann sehr gut während der Autofahrt beobachtet werden, indem die sich bewegenden Objekte aus dem Fenster verfolgt werden. Weit entfernte Dinge bewegen sich hier anscheinend deutlich langsamer. Dieser Effekt wird u. a. auch bei 2D-Videospielen genutzt, um verschiedene Tiefenebenen zu erzeugen.



Abbildung 3.3: Links: Beispiel für *Image Blur*. Rechts: Illustration zur Tiefenwahrnehmung [19].

Doch nicht nur Tiefenhinweise, sondern auch kulturelle Einflüsse sowie gesammelte Erfahrungen beeinflussen die Wahrnehmung. In Abbildung 3.3 wird ein Jäger samt vermeintlicher Beute dargestellt. Während die meisten die Gazelle als Ziel des Jägers erachten, erscheint für einen anderen Teil der Befragten der Elefant als Ziel. Grund dafür ist die Nähe des Speers und das fehlende Wissen über die Größenverhältnisse der dargestellten Lebewesen.

All die genannten Hinweise und Informationen ermöglichen es dem Menschen seine Umgebung dreidimensional wahrzunehmen. Ein großer Teil dieser Tiefenhinweise findet schon lange Anwendung in Computersystemen. Wie relevant die *Stereoskopie*

1: Grundlagen, Graphical User Interfaces, Informationsvisualisierung“ [9]

für zukünftige Systeme bzw. für die virtuelle Realität ist, wird in den folgenden Kapiteln näher betrachtet.

3.2 Virtuelle Realität

Bevor spezielle Aspekte der virtuellen Realität (VR) erklärt werden, gilt es zunächst den Begriff an sich näher zu erläutern. In einer perfekten virtuellen Umgebung würde jedes vom Computer generierte Objekt als real wahrgenommen werden. All unsere Sinne würden auf die Illusion reagieren und sie als echt erachten. Ivan Sutherland beschreibt den ultimativen Bildschirm wie folgt:

„The ultimate display would, of course, be a room within which the computer can control the existence of matter. A chair displayed in such a room would be good enough to sit in. Handcuffs displayed in such a room would be good enough to confine, and a bullet displayed in such a room would be fatal.“ [53]

Auch wenn dieses Bild noch nicht vollkommen der Realität entspricht, haben die sich VR-Anwendungen zu echtzeitfähigen Applikationen entwickelt, die unter der direkten Kontrolle des Nutzers stehen [36]. Vier Schlüsselemente spielen dabei eine entscheidende Rolle für die virtuelle Erfahrung [48].

Zum ersten die *fiktive Welt* an sich. Meist durch irgendein technisches System realisiert, sind hier auch real inszenierte Schauplätze von Relevanz..

Ein zweiter Aspekt ist die empfundene *Immersion*. Darunter zählen neben der mentalen auch die physische Immersion und sorgen für ein Gefühl der Präsenz in der virtuellen Umgebung.

Weiterhin sind das *sensorische Feedback* sowie die *Interaktivität* wichtige Charakteristika, die den Erfahrungswert der virtuellen Realität beeinflussen.

All diese Aspekte sind wichtig für die Qualität der VR und spiegeln sich in den zwei parallel entwickelten Technologiesträngen wider. Im ersten Gebiet geht es vor allem um die Entwicklung von immersiven Eingabegeräten, die möglichst natürliche bzw. intuitive Bedienungsweisen ermöglichen sollen. Der zweite Bereich konzentriert sich hingegen auf die Entwicklung von Ausgabegeräten, welche für die menschliche Wahrnehmung immer realere Rückmeldungen produzieren sollen. Beiden Bereiche werden sowohl durch Weiterentwicklungen in Soft- und Hardware voran getrieben, weshalb im folgenden Kapitel wichtige Meilensteine für die Entwicklung von virtuellen Realitäten vorgestellt werden sollen. Im Anschluss daran folgen genauere Erläuterungen zu aktuellen Technologien, die für die Arbeit von Bedeutung sind. Der letzte Abschnitt behandelt noch einige Einsatzgebiete, in denen VR eine Rolle spielt.

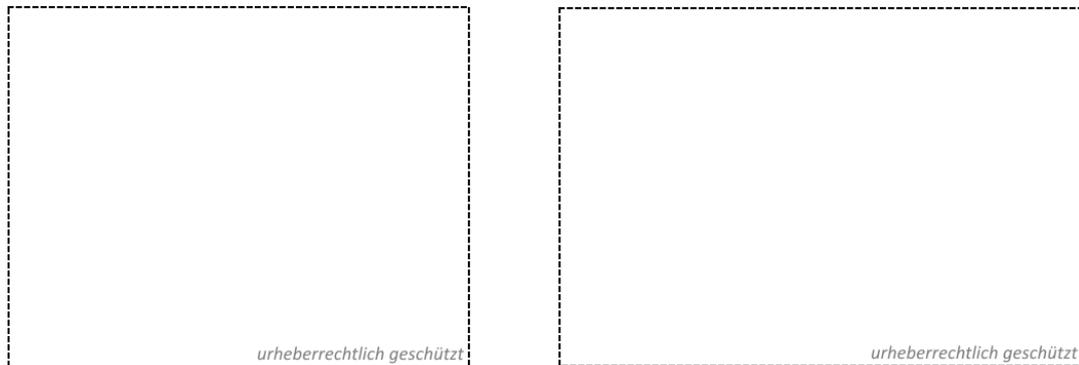


Abbildung 3.4: Links: Das erste HMD von Sutherland [52]. Rechts: Der Datenhandschuh von Zimmermann et. al. [60].

3.2.1 Immersion

Ein weiterer Aspekt, der besonders für virtuelle Umgebungen von Relevanz ist, ist das Gefühl der Präsenz. Bestehend aus Immersion und Involvement, zu deutsch etwa Einbindung oder Einbeziehung, bewerten die beiden Kriterien wie sehr sich der Nutzer mit der virtuellen Umgebung identifizieren kann. Anders ausgedrückt bestärkt das Gefühl der Präsenz die gegebenen Umstände als real wahrzunehmen, wie es beispielsweise auch in Träumen der Fall sein kann. Doch welchen Vorteil bietet ein hohes Maß an Immersion und Einbeziehung? Zum einen erhöht es die auftretenden Lerneffekte, die das prozedurale Gedächtnisses betreffen [42], und zum anderen führen die realistischeren Umgebungen in Zusammenhang mit einer egozentrischen Perspektive zu einer besseren Leistungsfähigkeit [50].

3.2.2 Geschichtlicher Rückblick

Eine wichtige Entwicklung im Bereich der virtuellen Realität kam von dem US-amerikanischen Wissenschaftler Ivan Sutherland. In den 1960ern entwickelte er ein Head-Trackted Head-Mounted Display [52]. Damit kreierte er das erste Ausgabegerät, welches sich das stereoskopische Sehen des Menschen zunutze macht, und zudem das Sichtfeld, auf Basis der Kopfbewegung des Nutzers, ändert. Auch wenn die dargestellten Grafiken noch aus sehr primitiven Drahtgittermodellen bestanden, war es für damalige Verhältnisse eine revolutionäre Entwicklung.

Die Person, von der oft gesagt wird den Begriff der VR geprägt zu haben, ist Jaron Lanier². Er gründete 1984 die Firma *VPL Research* (Visual Programming Lab Research) und setzte sich das Ziel die Programmierung von VR-Anwendungen

²<http://www.vrs.org.uk/virtual-reality-profiles/vpl-research.html> (Stand: 06.03.2016)

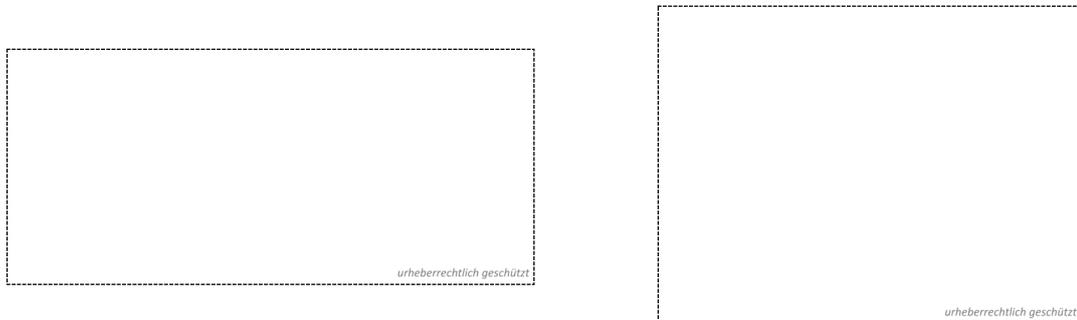


Abbildung 3.5: Links: Der *Nintendo Power Glove*⁵. Rechts: Person bei der Nutzung der *CAVE*⁶.

einer breiteren Masse zugänglich zu machen³. Mit der Hilfe von Thomas Zimmermann und weiteren Forschern entstanden zu dieser Zeit wichtige Entwicklungen im Bereich der VR. So erschien 1987 die Veröffentlichung von Zimmermann und Laniar in der sie ihren *DataGlove* beschrieben [60], der die Interaktion mit virtuellen Objekten ermöglichte. Er unterstützte sechs Freiheitsgrade und gab darüber hinaus taktiles Feedback in Form von Vibrationen. Ein Artikel in der *Scientific American* von Jim Foley über den Datenhandschuh machte die Technologie bzw. den Begriff der VR zudem in einem breiteren Menschenkreis bekannt [14]. Zudem entwickelte *VPL Research* ein fortgeschritteneres HMD mit dem Namen *EyePhone*.

Mit dem *Nintendo Power Glove* für das *Nintendo Entertainment System* (NES) erschien 1989 der erste kommerziell verfügbare Datenhandschuh⁴. Auch wenn die Technik ohne große Probleme funktionierte, fehlten entsprechende Anwendungen, welche die Nutzung des Handschuhs rechtfertigen konnten [25, 56]. Bestehende Spiele für das *NES* funktionierten deutlich besser mit dem Standard-Controller und spezifische Anwendungen waren rar. Zwar stellte der *Power Glove* einen kommerziellen Misserfolg dar, aber verbleibt ein wichtiger Bestandteil in Technologie- und Videospielekreisen.

Die nächste Entwicklung, die wir betrachten, ist der von Sensable Technologies entwickelte *Personal Haptic Interface Mechanism* (PHANTOM) [27]. Das Gerät gleicht einem Stift, der in einer Halterung fest montiert ist, sich aber dennoch frei bewegen lässt. Das Neuartige war jedoch, dass das Gerät Widerstände simulieren konnte. Beispielsweise konnte die Bewegung des Stiftes erschwert bzw. blockiert

³https://en.wikipedia.org/wiki/VPL_Research (Stand: 06.03.2016)

⁴<http://thepowerofglove.com/> (Stand: 06.03.2016)

⁵<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d3/NES-Power-Glove.jpg> (Stand: 06.03.2016)

⁶https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6d/CAVE_Crayoland.jpg (Stand: 06.03.2016)

werden, sobald virtuelle Hindernisse auftauchten.

Head-Mounted Displays waren nicht die einzigen Ausgabegeräte, welche für die Darstellung von virtuellen Umgebungen geeignet waren. 1992 wurde auf der SIGGRAPH-Konferenz erstmalig ein projektorbasiertes Display vorgestellt. Das an der Universität von Illinois entwickelte System *CAVE* (CAVE Automatic Virtual Environment) stellte einen vielversprechenden und interessanten Ansatz dar, um virtuelle Realität erfahren zu können. Von mindestens drei Projektionswänden (vorne, links, recht) umgeben, konnte der Nutzer mit einer Stereobrille die computergenerierte Umgebung erkunden, ohne dass das Gewicht oder die Kabel eines HMDs störten [8].

In den folgenden Jahren geriet das Thema VR immer weiter in den Hintergrund und war in der allgemeinen Bevölkerung wenig bis gar nicht von Relevanz. Grund waren vor allem die immensen Kosten der Technologie, die eine private Anschaffung nahezu unmöglich machten, und der bisher eher forschungsorientierte Ansatz der Entwicklungen. Auch wenn das Thema immer wieder in popkulturellen Erzeugnissen, wie beispielsweise im Film *The Matrix*⁷ (1999) auftauchte, ging die mediale Aufmerksamkeit um das Thema der virtuellen Realität zurück.

Erst 2012 mit der Kickstarter-Kampagne zur *Oculus Rift* begann erneut ein Hype um VR. Das Projekt erreichte bereits nach vier Stunden das gesetzte Ziel von 250 000\$⁸. Mit zahlreichen namenhaften Unterstützern überzeugte das Projekt auch viele technikbegeisterte Menschen. Daraufhin entstanden in den folgenden Jahren immer mehr Geräte, die sich dem Vorantreiben der virtuellen Realität verschrieben hatten. Die Kapitel 3.2.3 und 3.2.4 listen noch einmal die aktuellsten sowie für diese Arbeit relevantesten Entwicklungen auf und beschreiben sie kurz.

3.2.3 Ausgabegeräte

Als Ausgabegeräte sind vor allem Head-Mounted Displays für diese Arbeit interessant, da sie zum einen eine immersive Umgebung ermöglichen und zum anderen auch noch wenig Platz benötigen. Zudem stellen diese Technologien einen deutlich geringeren Kostenfaktor dar, als zum Beispiel die *CAVE* oder das *zSpace*, welches außerdem nur eine begrenzte Umgebung dreidimensional darstellen kann.

Weiterhin ist das *Samsung Gear*-Headset für eine interaktive virtuelle Umgebung eher ungeeignet, da es im Gegensatz zur *HTC Vive* und *Oculus Rift* nur eine begrenzte Anzahl an Eingabemöglichkeiten bzw -geräten anbietet. Die verbleibenden HMDs weisen nahezu die gleichen Spezifikationen auf, sodass die Wahl der Gerätschaft nach deren Verfügbarkeit getroffen wurde. Während für die Oculus verschiedene erhältliche Entwicklerversionen existierten, waren Prototypen der HTC Vive nur für ausgewählte Entwickler zugänglich. Insgesamt waren drei Versionen der Rift

⁷<http://www.imdb.com/title/tt0133093/> (Stand: 06.03.2016)

⁸<http://www.bbc.co.uk/news/technology-19085967> (Stand: 06.03.2016)

für eine breitere Masse verfügbar. Diesen Versionen, wie sie auch in Abbildung 3.6 zu sehen sind, umfassen das Development Kit 1 & 2 sowie die Release Version. Im Rahmen dieser Arbeit wird mit der zweiten Entwicklerversion (DK2) gearbeitet, da die finale Version erst zum Ende des Bearbeitungszeitraumes erschienen ist.

3.2.4 Eingabegeräte

Für die Eingabe standen die *Leap Motion* und der Stylus vom *zSpace* zur Verfügung. Da die Exploration medizinischer Daten möglichst präzise Geräte benötigt, wurden die zur Auswahl stehenden Geräte dahingehend untersucht. Zudem musste berücksichtigt werden, dass das Eingabegerät während der Nutzung nicht sichtbar ist, da der Nutzer durch das HMD nur die virtuelle Welt sieht.

Frühe Testläufe zeigten bereits, dass die Leap Motion keine konsistenten Trackingergebnisse liefern konnte, was sie für die vorliegende Arbeit unbrauchbar macht. Somit konzentriert sich die Arbeit auf Interaktionskonzepte, welche mit dem Stylus vom *zSpace* umgesetzt werden können. Auch wenn der Stift lediglich drei Knöpfe anbietet, ist er dank seiner Präzision für die Interaktion in immersiven Umgebungen geeignet.

3.2.5 Einsatzgebiete

Der Einsatz virtueller Welten findet bereits in vielen Bereichen, wenn auch teilweise nur experimentell, statt, weshalb einige von ihnen im folgenden aufgelistet und näher erläutert werden.

Bekanntester Sektor ist die Videospiegelindustrie, für dessen Markt auch die *Oculus Rift* sowie die *HTC Vive* ausgelegt sind. Zudem brachte *Nintendo* mit der *Wii*

⁹https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/ae/Oculus_Rift_Developer_Version_-_Front.jpg (Stand: 01.05.2016)

¹⁰https://en.wikipedia.org/wiki/File:Oculus_Rift_development_kit_2.jpg (Stand: 01.05.2016)

¹¹<http://blogs-images.forbes.com/davidewalt/files/2016/03/oculus-rift-vr-headset-1200x698.jpg> (Stand: 01.05.2016)



Abbildung 3.6: Entwicklung der *Oculus Rift*. Development Kit 1⁹ und 2¹⁰ sowie die Release Version¹¹.

Remote ein kommerziell erfolgreiches Eingabegerät auf den Markt, das auch in anderen Bereichen Verwendung fand und die Aufmerksamkeit vieler Hobbyentwickler erregte. Bis heute ist die Spieleindustrie eine treibende Kraft für den Bereich der virtuellen Realität.

Ein weiterer Bereich der schon frühzeitig Simulationen einsetzte und die Forschung in diesem Gebiet vorantreibt ist das Militär. Schon in den späten 1920ern and 1930ern nutzte das Militär Flugsimulatoren, welche mithilfe mechanischer Vorrichtungen Nachtflüge unter realen Bedingungen simulierte [62]. Auch heute noch werden verschiedenste Technologien eingesetzt um Soldaten beispielsweise für die Steuerung eines Panzers oder Schiffes auszubilden. Unter den verwendeten Geräten befindet sich auch die *Oculus Rift*, welche als billige und praktische Alternative verwendet wird.¹²

Für die *Medizin* werden virtuelle Umgebungen genutzt, um Phobien, wie beispielsweise Höhenangst, zu bekämpfen¹³. Auch Posttraumatische Belastungsstörungen werden mithilfe von VR-Lösungen behandelt [6, 43, 44]. Der Patient wird so keiner direkten Gefahr ausgesetzt, sodass der Stresslevel und das Schamgefühl kein so hohes Maß annehmen [36]. Weiterhin können Mediziner mithilfe von haptischen Eingabegeräten, wie beispielsweise dem *Geomagic Touch* (früher Sensable Phantom Omni)¹⁴, für Operationen sowie andere Eingriffe trainieren und somit Erfahrung sammeln, ohne die Gesundheit der Patienten gefährden zu müssen¹⁵. Vor allem der Bereich der Laparoskopischen Chirurgie profitiert vom Einsatz von VR-Technologien [4].

Es existieren noch weitere Bereiche in denen die Bedeutung von VR zunimmt. Eine Übersicht sowie weiterführende Erläuterungen sind in [6] zu finden.

3.3 Interaktion

Für eine effektive Mensch-Computer-Kommunikation sind passende Interaktionstechniken unabdingbar. Während in den frühen 1950ern noch Lochkarten Eingaben übermittelten [54], stehen heutzutage komplexe grafische Benutzerschnittstellen zur Verfügung. Zudem können heutige Eingabegeräte eine größere Zahl an Freiheitsgraden abbilden. Diese Fülle an Möglichkeiten führt zu einer Vielzahl von Interaktionstechniken, die je nach Anwendungsgebiet unterschiedliche Vor- bzw. Nachteile bieten können. Im Folgenden sollen zunächst klassische Konzepte der Interaktion

¹²<http://www.wearable.com/vr/how-vr-is-training-the-perfect-soldier-1757> (Stand: 06.03.2016)

¹³<http://www.faz.net/aktuell/technik-motor/viele-einsatzgebiete-mit-der-virtual-reality-brille-angst-abbauen-13526990.html> (Stand: 06.03.2016)

¹⁴<http://www.geomagic.com/en/products/phantom-omni/overview> (Stand: 06.03.2016)

¹⁵<http://www.techrepublic.com/article/10-ways-virtual-reality-is-revolutionizing-medicine-and-healthcare/> (Stand: 06.03.2016)

vorgestellt werden, die auch noch heute ihre Gültigkeit haben. Im Anschluss daran folgen Ausführungen zu immersiveren Techniken, die gerade für den Bereich VR relevant sind.

3.3.1 Universelle Aufgaben der Interaktion

Der Bereich der Interaktion kann in vier allgemeingültige Aufgaben unterteilt werden [4]:

Navigation Bestehend aus der Wegfindung und der tatsächlichen Ausführung einer Bewegung von A nach B.

Selektion Auswahl bzw. Spezifikation ein oder mehrerer virtueller Objekte.

Manipulation Alle Aufgaben, welche die Eigenschaften eines Objekts (Position, Form, Orientierung etc.) verändern.

Systemkontrolle Handlungen bzw. Aktionen, die Systemvariablen beeinflussen.

Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf die Bereiche der Selektion und Manipulation, welche in separaten Abschnitten näher betrachtet werden. Für Kliniker hat die Navigation gegenüber der Manipulation nur eine geringe Priorität bei der Exploration medizinischer Daten [15]. Zudem wird das Bewegen des virtuellen Ichs nicht immer positiv wahrgenommen. So können hier Schwindelgefühle oder Übelkeit auftreten, welche zu einer unangenehmen Benutzererfahrung führen. Einzige Navigationsmöglichkeit ist durch das Head-Tracking der Oculus Rift gegeben.

3.3.2 WIMP

Ein bis heute relevantes Konzept, welches die Mensch-Computer-Interaktion maßgeblich geprägt hat, ist *WIMP* [25]. Der Name ergibt sich aus den vier Komponenten des Konzepts: *Windows*, *Icons*, *Menus* und *Pointer*. Für die damaligen 2D-Anwendungen entwickelt, ist das hauptsächlich über Maus und Tastatur gesteuerte Konzept bis heute wichtiger Bestandteil vieler Anwendungen [54]. Auch wenn das Interaktionskonzept damals dafür sorgte, Computerprogramme für eine größere Zielgruppe erreichbar zu machen, weist es heute einige Defizite auf. Beispielsweise sind die Interaktionskonzepte für die Manipulation von 3D-Objekten eher ungeeignet und einige Möglichkeiten der Kommunikation, wie Spracheingaben, werden gar nicht erst berücksichtigt [54]. Aus diesen Limitierungen entstand die Notwendigkeit weiterführende Benutzerschnittstellen zu entwickeln.

3.3.3 Post-WIMP

In diese Kategorie fallen Benutzerschnittstellen, die auf mindestens eine alternative Interaktionsmöglichkeit wie Gestensteuerung, Spracheingabe oder Augensteuerung zurückgreifen [10, 54]. Beispiel hierfür wäre ein Fahrsimulator der über Pedalen und Lenkrad gesteuert wird und sich so vom üblichen WIMP-Paradigma unterscheidet. Auch wenn bei solchen UIs die initiale Lernkurve steiler sein kann, kann es für erfahrende Nutzer den Vorteil einer geringeren kognitiven Belastung innehalten [54].

3.3.4 3D-Interaktion

Vor 1980 wurde nahezu jede Mensch-Computer-Interaktion über Maus und Tastatur vorgenommen und spielte sich hauptsächlich im zweidimensionalen Raum ab [36]. Bis 1997 entstanden dann zwar viele Ansätze für die Interaktion mit 3D-Objekten, doch waren diese eher unausgereift und weniger intuitiv [17].

Heute sind 3D-Eingabegeräte in nahezu jedem Bereich anzutreffen, sodass auch die Interaktionstechniken den entsprechenden Anforderungen gerecht werden müssen. Im folgenden werden aktuelle Selektions-, Manipulations- und Vermessungstechniken genauer untersucht.

Selektion

Die Selektion von Objekten kann auf verschiedenste Weisen realisiert werden. Eine natürliche und intuitive Form der Selektion stellt das *Grabbing* dar [13]. Wie der Name bereits impliziert, können Objekte direkt gegriffen und dadurch ausgewählt werden. Diese Form der Selektion bietet sich vor allem für Anwendungen an, in denen die relevanten Objekte in Armreichweite liegen und von einer direkten Interaktion profitieren können. Hingegen gestaltet sich die Auswahl entfernter Objekte als schwierig. Hierfür existieren verschiedene Modifikationen, wie beispielsweise die *Go-Go Arm-extension*-Technik [3], welche den Arm künstlich verlängert. Ab einem eingestellten Abstand vom Ausgangspunkt bewegt sich die virtuelle Hand schneller in die gewünschte Richtung. Dieses Wachstum kann entweder linear oder auch exponentiell geschehen [37].

Ein anderer Ansatz zur Selektion bildet das *Raycasting* aus dem Bereich der *Action-at-a-distance*-Techniken (AAAD) [32]. Hierfür wird, ausgehend vom getrackten Objekt, ein Strahl in die Szene verschossen, dessen Trefferpunkt die Auswahl bestimmt. Zur besseren Identifikation des Schnittpunktes können hierbei getroffene Objekte eingefärbt [32] oder temporär vergrößert werden. Auch die Erweiterung des Strahls zu einem Kegel kann eine bessere Interaktion gewährleisten, da hier kleinere Objekte besser ausgewählt werden können [37]. Aber auch *Ray-Snapping* kann bei der Auswahl von kleinen Objekten hilfreich sein [58]. Ein Nachteil der Raycasting-

Methode ist die erschwerte Auswahl von verdeckten Objekten. Eine Erweiterung, die sich diesem Problem annimmt, ist der *Bending Ray*, der durch Bézierkurven gebogene Selektionslinien ermöglicht. Auch die *World-In-Miniature* (WIM) würde, durch eine zusätzliche Miniaturansicht der Umgebung, die Auswahl verdeckter Objekte ermöglichen [4, 13, 31, 45].

Während *Grabbing*-Methoden aus egozentrischer Perspektive geschehen und eine intuitivere Manipulation ermöglichen, werden *Raycasting* und *WIM* als exozentrische Methoden bezeichnet, die eine präzisere Selektion ermöglichen [13]. Eine Verbindung dieser beiden Ansätze findet sich in der *HOMER*-Technik (Hand-centered Object Manipulation Extending Ray-casting) [3], welche auch häufig in virtuellen Umgebungen Anwendung findet. Die Auswahl erfolgt hierbei über eine *Raycasting*-Technik, wodurch das Objekt temporär in Reichweite gebracht wird, um dann mit egozentrischen Interaktionsformen Manipulationsaufgaben vollziehen zu können.

Manipulation

Für genauere Betrachtungen wird die Manipulation in drei Aufgaben unterteilt, die im folgenden einzeln betrachtet werden.

TRANSLATION Die Verschiebung von Objekte kann entweder direkt oder indirekt gesteuert werden. Bei der direkten Translation werden die Bewegungen des 3D-Eingabegerätes direkt auf die Position des Objekts übertragen. Dies ermöglicht eine natürliche und intuitive Form der Interaktion, weist jedoch Nachteile bezüglich Präzision und Bewegungsbereich auf. Für die Erweiterung des Bereiches können die oben erwähnten Konzepte, wie beispielsweise *WIM* oder *Go-Go arm-extension*, verwendet werden. Eine präzisere Platzierung von Objekten wird durch *Snapping*-Methoden erreicht. Dabei kann sich die Position an anderen Objekten oder ein zugrundeliegendes Gitter orientieren [31]. Andere Techniken können die Dimensionen begrenzen, die von der Translation betroffen sind. Dies ist vor allem für die Verschiebung in die Tiefe von Relevanz, da hier die begrenzte Armreichweite den größten Nachteil darstellt. Das *Fishing Reel*-Konzept (dt. Angelspulen-Konzept) behandelt das eben genannte Problem, indem es beim gleichzeitigen Gedrückthalten zweier Knöpfe nur die Bewegung in die Tiefe ermöglicht [3, 45].

Die indirekten Methoden manipulieren die Position eines Objektes über Widgets oder Steuerelemente. So können bei der Auswahl eines Objektes Pfeile erscheinen, dessen Betätigung das betreffende Objekt in die gezeigte Richtung verschiebt. Weiterhin zählen numerische Eingaben, welche die Position spezifizieren, zu den indirekten Ansätzen der Translation. Auch wenn diese Methode eine hohe Präzision ermöglichen, führen sie zu einer weniger immersiven Benutzererfahrung und nutzen die Vorteile eines 3D-Eingabegerätes nur bedingt aus. Dadurch fällt diesen Methoden im Rahmen dieser Arbeit nur eine geringe Bedeutung zu.

ROTATION Für die Exploration von Daten ist die Möglichkeit der Rotation unverzichtbar. Im Gegensatz zur Translation und Skalierung sind Ansätze zur Durchführung einer Rotation meist weniger intuitiv. Lediglich egozentrische Methoden, bei denen sich die Orientierung nach der Drehung des Eingabegeräts richtet, sind leicht erlernbar und natürlich anwendbar. Jedoch sind diese Methoden nicht für jedes Eingabegeräte geeignet, so können kabelgebundene oder anisotropische Geräte nicht gleichermaßen gut in jede Dimension rotiert werden. Beispielsweise gestaltet sich die Rotation eines 3D-Stiftes um dessen Längsachse als schwierig, zudem wird zusätzlich die Zeigefunktion vernachlässigt bzw. unbrauchbar gerendert.

Weitere Techniken, welche auch in Kombination mit *Raycasting*-Methoden funktionieren, sind *Mesh-Grab*, *Arcball-3D* und *Scaled-HOMER* [22, 57]. Letztere ist eine Erweiterung des oben erläuterten *HOMER*-Konzepts. Diese Methode berücksichtigt zusätzlich die Rate der Bewegungsänderung und verringert bzw. vergrößert die Manipulation des Objektes dementsprechend. Ein Beispiel hierfür ist ein kugelförmiger Sensor, dessen Drehungen auf das Objekt übertragen werden, wobei die Drehgeschwindigkeit den Grad der Rotation beeinflusst. Mit *Mesh-Grab* können Oberflächenpunkte direkt erfasst werden und erzeugen eine Art Gelenkverbindung. Der Abstand zwischen Selektor und Trefferpunkt bleiben ab diesem Moment konstant, sodass sich das Objekt wie an einem Stock befestigt verhält. Für die Rotation mit dem *Arcball-3D* wird eine möglichst kleine Kugel, welche als Interaktionselement dient, um das betreffende Objekt erzeugt. Die Bewegungen auf der Kugeloberfläche werden dann direkt auf das eingeschlossene Objekt angewendet. Dadurch ist der *Arcball-3D* nicht nur intuitiv, sondern kann auch bei stark verzweigten bzw. konkaven Objekten angewendet werden. [22]

SKALIERUNG Die Skalierung von Objekten finden meist über Widgets statt [4]. Dabei erscheinen nach der Selektion interaktive Elemente in Objektnähe, welche Skalierungen in verschiedene Dimensionen ermöglichen. Entsprechende Elemente können auch durchgängig aktiv sein, wie es beispielsweise bei Systemfenstern der Fall ist. Diese werden an der Ecke bzw. am Rahmen skaliert. Weiterhin besteht die Möglichkeit der impliziten Skalierung, indem Objekte durch Translation näher an den Nutzer herangebracht werden.

Vermessung

Gegenüber der Selektion und Manipulation stellt die Vermessung ein weniger stark erforschtes Thema dar. Die Konzepte die für den Kontext der Arbeit von Bedeutung sind, werden im folgenden näher erläutert. Ein wichtiges Konzept für die Platzierung von Vermessungspfeilen ist das *Rubberbanding* [11]. Nachdem der Startpunkt der Vermessung ausgewählt ist, verfolgt der Endpunkt den Initiator der Auswahl bis

der Endpunkt ebenfalls platziert wurde. Dabei aktualisieren sich Länge, Orientierung und gegebenenfalls Masszahl der Vermessung in Echtzeit, sodass eine stetige Rückmeldung an den Nutzer gegeben ist. Alternativ kann eine entsprechende Messlinie auch erst nach dem Setzen von Start- und Endpunkt erzeugt werden, wie es bereits prototypisch im *LiverPlanner* [2], einer VR-Umgebung zur Planung von Leberresektionen, implementiert ist.

Häufige Anwendung in Zusammenhang mit Vermessungstechniken finden auch *Snapping*-Methoden, da dies nicht nur die Präzision erhöht, sondern auch positive Auswirkungen auf die Geschwindigkeit der Messung hat. Weitere Erweiterungen umfassen die variable Skalierung sowie Platzierung des angezeigten Messwertes angepasst an die jeweilige Länge der Vermessungspfeile [40]. Bezüglich der Genauigkeit sind zudem Interaktionsformen hilfreich, die eine direkt-manipulative Platzierung ermöglichen, wie z. B. die Eingabefelder für die Eingabe der gewünschten Maßzahl oder der Position der Messpfeile [40].

Auch für die Visualisierung der Vermessungspfeile existieren verschiedene Ansätze, die im folgenden exemplarisch genannt werden. Für die Darstellung von Distanzen bieten sich vor allem *Distance Lines* und *Interactive Rulers* an [39]. Dabei existieren auch für die Darstellung der *Distance Lines* verschiedene Ansätze [40], die je nach Einsatzgebiet verschiedene Vor- bzw. Nachteile aufweisen.

3.4 Usability

Ein wichtiger Aspekt, der bei der Entwicklung von Mensch-Computer-Interaktionen beachtet werden sollte, ist die sogenannte *Usability*. In der dazugehörigen ISO Norm wird sie folgendermaßen definiert:

Usability: „Extent to which a product can be used by specified users to achieve specified goals with effectiveness, efficiency and satisfaction in a specified context of use“ (DIN ISO 9241-11¹⁶).

Wie der Definition zu entnehmen ist, spielen Effektivität, Effizienz sowie Zufriedenheit eine entscheidende Rolle bei der Betrachtung von Usability-Aspekten. Um diese Anforderungen bestmöglich zu erfüllen, wurde sich bei der Konzeption des Prototypen an die 9 Richtlinien von Molich und Nielsen gehalten [34]. Der erste Punkt fordert einen *einfachen und natürlichen Dialog* mit dem Nutzer. Die präsentierten Informationen sollten dem Anwender kompakt, deutlich und in logischer Reihenfolge präsentiert werden, ohne irrelevante Hinweise zu beinhalten. Das System soll die *Sprache der Nutzer* sprechen. Fachbegriffe oder Handlungsweisen sind somit in der entsprechenden Nutzergruppe angesiedelt und vermitteln ein vertrautes

¹⁶<https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:9241:-11:ed-1:v1:en>

Gefühl. Weiterhin gilt es die *kognitive Belastung minimal* zu halten, um den Benutzer nicht zu überfordern. Das System sollte einen *konsistenten Aufbau* vorweisen und an den entsprechenden Stellen das richtige *Feedback geben*. Erfahrenen Nutzern sollten *Abkürzungen* bzw. *Shortcuts* angeboten werden, um Aufgaben effektiver erledigen zu können. Zudem ist es wichtig, *Ausgänge* zu möglicherweise ungewollten Systemzuständen *aufzuzeigen*. Die beiden letzten Punkte fordern zum einen *klare Fehlermeldungen* und zum anderen die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines *Fehlers* überhaupt erst zu *minimieren*.

Kapitel 4

Konzeption

Wie sich bereits aus den vorherigen Abschnitten erschließt, spielen die effiziente Benutzbarkeit und die intuitive Bedienbarkeit eine entscheidende Rolle. In diesem Kapitel wird zunächst die voraussichtliche Zielgruppe der Software erläutert, um daraus die Anforderungen an die virtuelle Umgebung und die Interaktionstechniken abzuleiten. Im Anschluss daran werden bestehende Techniken adaptiert bzw. neue Möglichkeiten der Interaktion entwickelt. Die entwickelten Konzepte wurden bereits während der Entstehung prototypisch umgesetzt, sodass frühzeitig Erkenntnisse gewonnen wurden, welche die weitere Entwicklung der Umgebung und Interaktion beeinflussten.

4.1 Zielstellung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Exploration medizinischer Daten in einer immersiven virtuellen Umgebung. Mögliche Anwendungsbereiche umfassen die Therapieplanung sowie Diagnostik, aber auch die Verwendung als Ausbildungswerkzeug für angehende Mediziner ist vorstellbar. Die potenzielle Zielgruppe setzt sich somit aus Ärzten bzw. Klinikern sowie Medizinstudenten zusammen. Welche Anforderungen hierfür von Bedeutung sind, werden im nächsten Abschnitt erläutert.

4.2 Anforderungsanalyse

Bevor die Interaktionstechniken konzipiert werden können, gilt es die benötigten Anforderungen an diese zu ermitteln. Hierfür werden zunächst allgemeine Voraussetzungen, die an eine interaktive Umgebung gestellt werden, betrachtet.

Zur Gewährleistung einer positiven Benutzererfahrung muss die Software in *Echtzeit* ablaufen. Für einfache Desktopanwendungen genügen bereits 15 Bilder pro Sekunde (frames per second; FPS), um als echtzeitfähig bezeichnet werden zu können

[1]. Für virtuelle Umgebungen, welche für VR-Headsets vorgesehen sind, sollten es jedoch mindestens 50 FPS sein, um Echtzeitfähigkeit garantieren und eventuellem Unwohlsein vorzubeugen zu können [26].

Zusätzlich sollte die Software zu jeder passenden Zeit entsprechendes *Feedback* liefern. Dies trägt nicht nur zur Wahrnehmung der Echtzeitfähigkeit bei, sondern versichert dem Nutzer, dass das Programm noch läuft und auf ihn reagiert [56].

Gute Interaktionstechniken zeichnen sich vor allem durch ihre *Intuitivität* aus. Dabei ist ein hoher Grad der *Natürlichkeit* von Vorteil, aber sollte sich dennoch nicht vollständig an dem realen Gegenstück orientieren, da dies sogar zu Einschränkungen führen kann [3, 4]. Zudem profitieren Computersysteme vom *Multiplier Effect*, der es ihnen ermöglicht die Limitierungen der realen Welt aufzuheben und so einen Mehrwert zu schaffen [20]. Somit sollte der Grad der Natürlichkeit soweit maximiert werden, dass die Intuitivität nicht darunter leidet und weiterhin die Möglichkeiten von Computersystemen optimal genutzt werden. Hinzu kommt, dass Ärzte bzw. Kliniker neue Techniken eher annehmen, wenn sie leicht erlernbar sind und deren Anwendung als nicht anstrengend wahrgenommen wird [15].

Zur Leistungssteigerung und angenehmeren Benutzererfahrung trägt ein hoher Grad der *Immersion* bei. Die virtuelle Umgebung sollte ein in sich geschlossenes System darstellen, damit der Nutzer sich auf die Aufgabe konzentrieren kann und nicht durch äußere Gegebenheit oder Inkonsistenzen in der generierten Welt abgelenkt wird. Zudem führt Immersion zu einer natürlichen Interaktionsweise mit medizinischen Daten [15]. Näheres dazu in Abschnitt 4.3.

Bei der Konzipierung der verschiedenen Interaktionstechniken ist es wichtig, die Ansprüche der voraussichtlichen Zielgruppe zu berücksichtigen. Wie in Abschnitt 4.1 erörtert, sind vorrangig Mediziner für die Verwendung der Software geplant. Da die medizinische Routine aus vielen zeitkritischen Aufgaben besteht, gilt es unhandliche bzw. umständliche Arbeiten zu vermeiden. Weiterhin sollten sich Fachsprache und Visualisierungen den Erwartungen der Mediziner anpassen. Somit gilt es die Konzeption *zielgruppenkonform* zu gestalten.

Im folgenden werden die einzelnen Interaktionsformen betrachtet, um gegebenenfalls zusätzliche Anforderungen aus ihnen zu erschließen.

SELEKTION Die virtuelle Umgebung kann einen theoretisch unbegrenzten Raum abbilden. Dadurch kann der resultierende Arbeitsbereich sehr weitläufig werden. Auch wenn in der vorliegenden Arbeit die Umgebung auf einen Raum überschaubarer Größe begrenzt wird, ist es wichtig sowohl nahe als auch weit entfernte Ziele selektieren zu können. Aus diesem Grund sollte das Programm eine *globale Selektion* ermöglichen.

MANIPULATION Im Umgang mit medizinischen Daten sind präzise Manipulations-

möglichkeiten unerlässlich. Wie oben bereits erläutert wurde, bietet die Medizin nur wenig Raum für unhandliche Arbeiten. Aus diesem Grund ist die *Präzision* der verschiedenen Interaktionstechniken zur Manipulation von großer Bedeutung.

VERMESSUNG Ähnlich der Manipulation sind bei der Vermessung Präzision und intuitive Bedienbarkeit wichtig.

Zusammengefasst werden folgende Anforderungen an die konzipierten Interaktionstechniken und die Software gestellt:

Echtzeit Die Software sollte mindestens 50 FPS unterstützen.

Feedback Jede wichtige Aktion bzw. Interaktion soll entsprechende Rückmeldungen geben.

Intuitivität & Natürlichkeit Die Ausführung der verschiedenen Interaktionen soll sich möglichst natürlich anfühlen und gleichzeitig leicht erlernbar bzw. anwendbar sein.

Immersion Konsistenter sowie glaubwürdiger Aufbau der virtuellen Szene.

Zielgruppenkonform Anpassung der Software an die Ansprüche und Vorstellungen der Zielgruppe.

Globale Selektion Sowohl nahe als auch weit entfernte Objekte sollten leicht selektierbar sein. Die Auswahl von Objekten soll somit allumfassend möglich sein.

Präzision Gewährleistung einer möglichst hohen Genauigkeit bei der Manipulation und Vermessung von Objekten.

4.3 Entwurf der virtuellen Umgebung

Gemäß den formulierten Anforderungen muss die virtuelle Umgebung entsprechend konstruiert sein. Zunächst sollte die Umgebung nicht zu abstrakt gestaltet werden. Zum einen führen Szenen, welche als Grundlage einen realen Raum aufweisen, zu einem höheren Grad der Immersion, da die Umgebung dank der Vertrautheit eher angenommen wird. Generell ist die Leistung in realistischeren virtuellen Umgebungen höher [50]. Zudem hat sich während der Entwicklung gezeigt, dass offene und größere Räume bevorzugt werden sollten, da diese weniger bedrückend wirken und kein Unwohlsein während der Nutzung hervorrufen.

Weiterhin orientiert sich der Aufbau der virtuellen Szene am realen Arbeitsplatz, um einerseits die Eingewöhnungszeit zu verringern und andererseits die Orientierung

während der Nutzung zu erleichtern. So dient der virtuelle Tisch als Orientierungshilfe, da durch das HMD die reale Welt nur bedingt wahrgenommen werden kann, ohne den Arbeitsplatz erst umständlich ertasten zu müssen. Dadurch ist es auch leichter eine angenehme Arbeitsposition einzunehmen. Denn das Ablegen des Ellenbogens in Zusammenarbeit mit dem Präzisionsgriff¹ erleichtert nicht nur die Arbeit, sondern gestalten sie auch effizienter [2].

Wie bereits in den vorherigen Kapiteln beschrieben wurde, kann sich der Nutzer nur über Kopfbewegungen in der Szene bewegen und arbeitet demzufolge in einer sitzenden Haltung. Diese Position und die überwiegende Arbeit in Armreichweite begünstigt die Propriozeption² des Nutzers. Die Arbeit in Armreichweite bringt zudem weitere Vorteile, wie eine erhöhte Präzision bei Drehbewegungen, stärkere Wahrnehmung von Stereoskopie sowie Tiefenhinweisen und das Gefühl einer direkteren Relation zwischen Armbewegung und virtueller Objektbewegung [33].

Die eben genannte Stereoskopie wird durch die Oculus Rift ermöglicht und unterstützt eine bessere Tiefenwahrnehmung, welche für eine korrekte und schnelle räumliche Wahrnehmung [55] notwendig ist. Um diese weiter zu steigern, werden noch weitere Tiefenhinweise genutzt. Für den späteren Prototypen sind deswegen Objektschatten, Verdeckungen, Linearperspektive und Bewegungsparallaxe als Bestandteil der virtuellen Umgebung geplant.

4.4 Textuelles Feedback

Damit der Nutzer Feedback in Form von Nachrichten oder Warn- bzw. Fehlermeldungen erhalten kann, werden Information direkt auf dem HMD angezeigt. Beispielsweise soll der Nutzer eine Warnung erhalten, wenn der Stift den Trackingbereich verlässt, um auf etwaige Ungenauigkeiten vorbereitet zu sein. Das Textfenster ist zudem fest im Sichtbereich des Nutzers fixiert, damit es nicht übersehen werden kann. Um die Sicht nicht zu stark zu beeinträchtigen, wird das Fenster temporär und semitransparent dargestellt.

4.5 Adaption der Techniken

Entsprechend den Anforderungen und technischen Gegebenheiten müssen die Interaktionstechniken zur Selektion, Manipulation sowie Vermessung entwickelt bzw. adaptiert werden. Der bereits in Abschnitt 3.2.4 vorgestellte Stylus dient hierbei als

¹Griffe, die sich die Feinmotorik von Zeigefinger und Daumen zu Nutze machen, um kleine sowie schmale Objekte präzise manipulieren zu können [12]. Dazu zählt auch der Grobe Spitzgriff oder Drei-Punkte-Griff, wie er beim Führen eines Stiftes zum Einsatz kommt [5, 51].

²Körperwahrnehmung des Menschen bzw. die Wahrnehmung von Körperteilen bezüglich ihrer Position und Bewegung [33].

Eingabegeräte. Durch die geringe Anzahl der verfügbaren Knöpfe, muss das Verhalten kontextsensitiv konzipiert werden, um dennoch alle benötigten Anforderungen erfüllen zu können. In den folgenden Abschnitten gehen wir auf die einzelnen Interaktionstechniken ein und betrachten zudem weitere Konzepte, die für den Entwurf des Prototypen verwendet werden.

4.5.1 3D WIMP

Durch die begrenzte Anzahl der Eingabeknöpfe ist es schwierig alle wichtigen Interaktionen allein durch verschiedene Tastendrücke abzubilden. Um weiterhin die Lernkurve angenehmer zu gestalten und dem Nutzer in der ungewohnten virtuellen Umgebung dennoch altbekannte Konzepte anbieten zu können, werden Elemente aus *WIMP* übernommen.

Ein zentraler Baustein stellt die Darstellung in Fenstern dar, welche wie bei einer Desktopanwendung über eine Titelleiste und einen Fensterrahmen verfügen. Wie Abbildung 4.1 zeigt, beinhalten die Fenster Elemente aus bekannten Anwendungen, wie z. B. dem Schreibprogramm *Word* von Microsoft. Die dargestellten Icons in der Titelleiste dienen einerseits dem rückgängig machen einer Manipulation und andererseits zum Löschen des jeweiligen Fensters samt dem enthaltenem Objekt. Wie diese selektiert werden, wird im Abschnitt 4.5.2 erläutert. Ein weiteres bekanntes

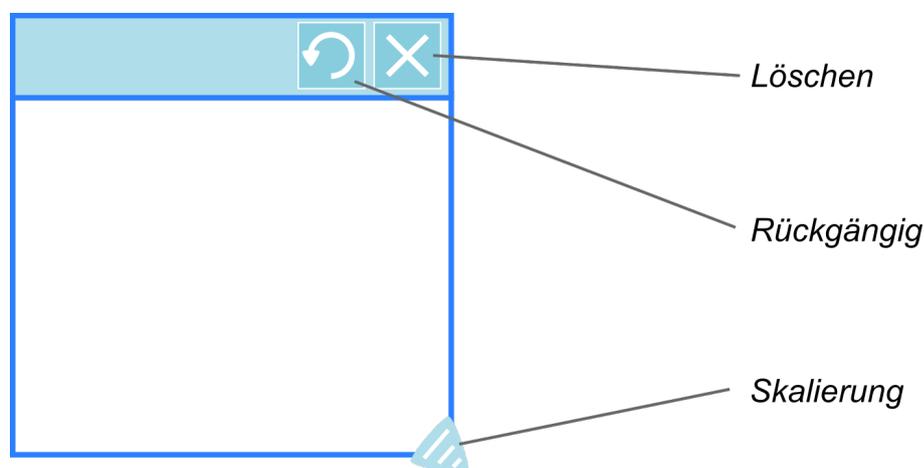


Abbildung 4.1: Konzeptzeichnung des Fenstersystems.

Element befindet sich in den Ecken der Fenstersysteme. Nähert sich das Selektionelement hier an, erscheint ein interaktives Element, welches die Skalierung des Fensters und somit auch die Vergrößerung bzw. Verkleinerung des enthaltenen Objekts ermöglicht. Wie diese und weitere Manipulationsmöglichkeiten funktionieren, wird in Abschnitt 4.5.3 näher beschrieben.

4.5.2 Selektion

Für die Umsetzung der Selektion bieten sich mehrere aus den in Kapitel 3.3.4 vorgestellten Konzepte an. Eine natürliche Selektionform würde mit dem *Grabbing* erreicht werden. Durch die Form des Stylus müsste die Funktion zwar eher einem *Picking* folgen, aber könnte dennoch die selben Techniken und Erweiterungen ausnutzen. Um die Anforderung einer globalen Selektion zu erfüllen, sollte zusätzlich eine *Arm-Extension*-Methode, welche die Auswahl entfernter Objekte ermöglicht, verwendet werden. Dies führt jedoch zu einem Problem mit den physischen Gegebenheiten des Arbeitsplatzes. Durch die Nähe zum zSpace ist es nicht möglich den Arm vollends auszustrecken ohne den Trackingbereich zu verlassen oder das zSpace mit dem Stift zu berühren. Ein mögliche Lösung wäre es weiter vom zSpace entfernt zu sitzen bzw. dieses weiter nach hinter zu verschieben. Das wiederum hat aber zur Folge, dass mit zunehmender Distanz die Genauigkeit des Trackings rapide abnimmt. Dadurch wäre die Anforderung der Präzision nicht mehr erfüllbar. Ein weiterer Lösungsansatz wäre es, den Schwellenwert für die Armverlängerung innerhalb des verfügbaren Raumes zu setzen. Dadurch verringert sich jedoch auch der Platz, indem präzise Selektionen bzw. 1-zu-1 Umsetzungen von realen zu virtuellen Stiftbewegungen, möglich sind. Da die genannten Ansätze nicht vollends für die Selektion geeignet sind, betrachten wir im folgenden Abschnitt raycast-basierende Methoden.

Durch die gegebene längliche Form des Stiftes, bietet sich dieser als natürliches Zeigewerkzeug an. Während der Entwicklung des Prototypen zeigte sich bereits, dass sich die Raycast-Methode, selbst ohne Erweiterungen, als Selektionskonzept eignet. Durch die hohe Präzision des Stiftes und den begrenzten Arbeitsraum konnten selbst entfernte sowie kleine Objekte problemlos ausgewählt werden. Zudem wird die Selektion dahingehend unterstützt, dass jedes Objekt über ein eigenes Fenster verfügt, dessen Titelleiste ebenfalls selektierbar ist und einer Mindestgröße entsprechen muss. Andere Erweiterungen, wie beispielsweise das *Ray-Snapping* hingegen könnten zu Problemen führen, da medizinische Strukturen, gerade Gefäßbäume, sehr verzweigt sein können, sodass das Snapping zu oft das Ziel wechseln könnte. Betrachtet man weiterhin mögliche Szenarien, so ist wahrscheinlicher, dass sich während der Anwendung auf spezielle Strukturen, wie einzelne Organe, konzentriert wird. Dadurch ist die Anzahl der zu untersuchenden Objekte meist gering, sodass kritische Verdeckungen weniger häufig auftreten sollten. Komplizierte Techniken, wie das *Ray-Snapping* oder *WIM*, könnten sich für den Mediziner als unnötig kompliziert herausstellen. Aus diesen Gründen und der gegebenen intuitiven Handhabung vom Raycasting in Zusammenarbeit mit Stiftinteraktion, ist das Konzept auch ohne Erweiterungen für den Prototypen umsetzbar.

Für die Selektion muss weiterhin betrachtet werden, wie sich das Objekt bei der Auswahl verhält. In der ursprünglichen Variante, veränderte die Selektion die Posi-

tion des Objektes, sodass dessen Mittelpunkt sich zum Trefferpunkt des Raycastings bewegte. Dies erschwerte nicht nur die korrekte Positionierung, sondern entsprach auch nicht den Erwartungen des Nutzers. Die Selektion wurde aus diesem Grund dahingegen geändert, dass die 3D-Modelle direkt am Trefferpunkt angefasst werden können, was die Auswahl deutlich vereinfacht.

Zur verbesserten Nutzbarkeit, verfügt das Selektionskonzept über verschiedene Feedbackmechanismen. Zum einen ändert sich die Farbe eines Objekts, sobald es vom Strahl getroffen wird. Dadurch weiß der Nutzer stets, welche Struktur er bei Betätigung des Knopfes auswählen würde. Weiterhin gibt der Stift haptisches Feedback in Form einer leichten Vibration, wenn ein neues Objekt vom Raycasting erfasst wird, was die 3D-Interaktion zusätzlich verbessert [2]. Zur Visualisierung des Raycastings wird der ausgesendete Strahl halbtransparent in die Szene gerendert, um die Selektion präziser gestalten zu können.

Nachdem das Konzept für die Selektion besteht, beschäftigt sich der folgende Abschnitt mit den Manipulationsmöglichkeiten eines selektierten Objekts.

4.5.3 Manipulation

Für die Konzipierung der verschiedenen Manipulationstechniken wird, wie in Kapitel 3.3.4, jede Aufgabe separat betrachtet.

TRANSLATION Die Möglichkeit der Verschiebung eines Objekts beginnt mit dessen Selektion. Sobald eine Struktur durch Gedrückthalten des Selektionsknopfes ausgewählt wird, folgt der Trefferpunkt den Bewegungen des Stiftes. Die Orientierung des Objektes bleibt dabei unverändert, da Translation und Rotation als separate Aufgaben angesehen werden und dies eine bessere Kontrolle ermöglicht. Anders verhält sich das beim dazugehörigen Fenster. Da dieses eine zweidimensionale Ebene darstellt, wird sie automatisch in Richtung der Nutzers gedreht. Dies hat den Vorteil, dass hier keine perspektivischen Verzerrungen auftreten und die Elemente der Titelleiste stets sichtbar sind und durch einfachen Knopfdruck selektiert werden können.

Eine Translation kann zudem auch über die Verschiebung des jeweiligen Fensters erreicht werden. Hierfür muss die Titelleiste selektiert werden, um sie dann beliebig verschieben zu können. Das bekannte Konzept der Verschiebung über das Fenstersystem gestaltet das Programm nicht nur intuitiver, sondern verringert zusätzlich die Wahrscheinlichkeit einer kompletten Verdeckung der Interaktionsmöglichkeiten.

ROTATION Die Mechanik der Rotation stellt einen zentralen Bestandteil der zu entwickelnden Interaktionsformen dar. Sie wird über den zweiten verfügbaren Knopf initialisiert, um sie unabhängig von anderen Manipulationen ausführen zu können. Für die Rotation wurde ein Konzept entwickelt, welches sich an der *Arcball-3D*-Methode orientiert.

Die originale Technik macht es nur schwer möglich, das Objekt mit nur einer Selektion ohne nachzufassen um 360° zu drehen, da nur Punkte auf der Kugeloberfläche als Trefferpunkte dienen und der Stift schwer hinter die Kugel platziert werden kann. Die vorgenommene Abwandlung der Technik umgeht dieses Defizit, indem nur der initiale Trefferpunkt als Referenz dient. Sobald ein Oberflächenpunkt selektiert wurde, behält dieser die Distanz zum Stift und dient fortan als Referenzpunkt. Zudem entsteht ein Sichtvektor vom Mittelpunkt des zu rotierenden Objekts zum Referenzpunkt. Jede Bewegung des Stiftes wirkt sich nun auch auf die Orientierung des Objektes aus, da der initiale Sichtvektor immer wieder in Richtung Referenzpunkt ausgerichtet wird. Vorstellen kann man sich das mit folgendem Szenario: An das Ende eines Stocks wird ein Magnet befestigt. Weiterhin existiert ein positionsgebundener Magnet, welcher frei im Raum schwebt. Bewegt man nun den ersten Magnet um den zweiten, kann man beobachten wie sich dieser immer wieder neu ausrichtet.

Ein Vorteil dieser Technik ist es, dass die Rotation verschiedene Präzisionsstufen ermöglicht. Je nach Entfernung des Referenzpunktes zum Mittelpunkt des Objekts, führen Stiftbewegungen zu unterschiedlich großen Rotationen. Weiterhin können Objekte bei Bedarf schnell um 180° gedreht werden, indem der Referenzpunkt durch den Mittelpunkt bewegt wird. Diese Flexibilität macht die konzipierte Technik sowohl für Laien als auch fortgeschrittene Nutzer effektiv anwendbar.

SKALIERUNG Wie bei der Translation von Objekten, werden für die Skalierung zwei verschiedene Ansätze verfolgt. Im ersten Ansatz wird eine implizite Skalierung durch die Annäherung des Nutzers an das Objekt bzw. durch das Heranziehen des Objekts ermöglicht. Dies ist durch einfache Kopfbewegungen oder die Translation der Struktur in Richtung Nutzer möglich. Der zweite Ansatz wird mithilfe der Fenstersysteme realisiert. Nähert sich der ausgesendete Strahl den Ecken des Fensters erscheint ein Dreieck, welches ausgewählt werden kann, um so durch Ziehen oder Schieben die Größe des Fensters sowie des dazugehörigen Objekts zu verändern.

4.5.4 Vermessung

Die Vermessung von Objekten wird mit dem dritten und letzten Knopf des Stylus initialisiert. Sie stellt ein zentrales Konzept des Prototyps dar und teilt sich in die Vermessung von Distanzen sowie von Winkeln.

DISTANZMESSUNG Zur Platzierung der Vermessungspfeile wird die in Kapitel 3.3.4 vorgestellte *Rubberbanding*-Technik verwendet. Durch Betätigen des Vermessungsknopfes wird der Startpunkt der Vermessung an Position des Raycast-Trefferpunktes gesetzt. Solange nun der Knopf gedrücktgehalten wird, folgt der Endpunkt der Spitze des Strahls, wobei die initiale Trefferdistanz erhalten bleibt, sodass der Endpunkt

wie an einem Stock hängt. Erst durch das Loslassen des Knopfes wird der Endpunkt an die entsprechende Position platziert. Während der Vermessung werden die repräsentativen Pfeile je nach Länge entsprechend skaliert, wobei minimale bzw. maximale Größen berücksichtigt werden. Dadurch wird garantiert, dass selbst sehr kleine Messungen vorgenommen werden können und größere Distanzen nicht zu riesigen Vermessungsobjekten führen, welche die Szene oder andere Objekte verdecken. Die Größe sowie Position des dargestellten Messwerts richtet sich ebenso nach der Länge der Distanz. Bei kleineren Distanzen befindet sich die Messzahl mittig oberhalb der Verbindungslinie und für größere Distanzen innerhalb der Linie.

WINKELMESSUNG Neben der Vermessung von Distanzen soll auch die Vermessung von Winkeln ermöglicht werden. Hierfür muss ein zusätzlicher Punkt spezifiziert werden. Dies wird ermöglicht indem zunächst ein Distanzmesser platziert und im Anschluss daran dessen Verbindungslinie selektiert wird. Dann kann der dritte Punkte ähnlich den anderen Vermessungspfeilen platziert werden. Dadurch wird die Notwendigkeit eines zusätzlichen Knopfes oder eines Moduswechsels vermieden.

Wie die medizinischen Strukturen können die Vermessungspfeile jederzeit verschoben werden. Dies dient nicht nur zur Justierung der Vermessung, sondern kann auch dazu dienen das Vermessungsinstrument zu löschen. Da die Vermessungselemente kein eigenes Fenster haben, sondern objektgebunden sind, werden sie mithilfe einer schwellenwertbasierenden Distanzfunktion entfernt. Ist also die Distanz zwischen Vermessungspfeil und medizinischem Objekt über einem festgelegten Schwellenwert, wird der Pfeil samt zugehöriger anderer Pfeile gelöscht. Durch das in Abschnitt 4.4 erläuterte Nachrichtensystem, wird dem Nutzer zudem angezeigt, wann der entsprechende Schwellenwert überschritten ist. Dieser Löschvorgang hat den Vorteil keine weiteren Steuerelemente oder Objekte zu benötigen und ist zudem intuitiv und schnell ausführbar.

Weiterhin unterstützen die Vermessungspfeile *Snapping*-Methoden, um die Präzision und Ausführungsgeschwindigkeit zu verbessern. Dabei geschieht das eigentliche Snapping erst beim Loslassen des Vermessungsknopfes. Dies hat den Grund, dass sonst während der Messung Inkonsistenzen zwischen Raycast und Pfeilposition auftreten. Somit verliert der Nutzer Kontrolle über die Ausführung der Messung, was schlechte Einwirkungen auf die Benutzererfahrung hat. Stattdessen wird während der Vermessung die voraussichtliche Snapping-Position mit einer Linie oder einem halbtransparenten Pfeil angezeigt, sodass der Nutzer weiß, wo sich der Pfeil, nach dem Loslassen des Knopfes, hinbewegt. Dadurch hat der Nutzer die volle Kontrolle während der Nutzung, aber misst gleichzeitig nicht die Vorteile vom Snapping.

4.6 DICOM-Ebene

Nicht nur dreidimensionale Objekte sollen exploriert werden können, sondern auch die Untersuchung dazugehöriger Schichtdaten ist von Relevanz. Hierfür werden die Schichten in einem separatem Fenster angezeigt, welches wie die anderen Systeme frei platzierbar ist. Für die axialen, sagittalen sowie coronalen Schichten sind jeweils eigene Fenster vorgesehen, um sie unabhängig voneinander manipulieren zu können. Wichtigste Interaktionsform, welche für die Schichtdatensätze möglich sein sollte, ist das traversieren durch die jeweiligen Schichten.

4.6.1 Ebenenwechsel

Der ursprüngliche Ansatz sah vor, zunächst einen beliebigen Punkt in der Ebene durch gedrückthalten des Selektionsknopfes auszuwählen. Wird nun der Stift auf einen anderen Punkt in der Ebene gerichtet, bestimmt die Entfernung zum initialem Trefferpunkt wie schnell durch den Datensatz traversiert wird. Dies war für die präzise Auswahl von Schichten schwierig durchführbar und ermöglichte es nicht in einer beliebige Ebene wechseln zu können. Aus diesem Grund entstand ein zweites

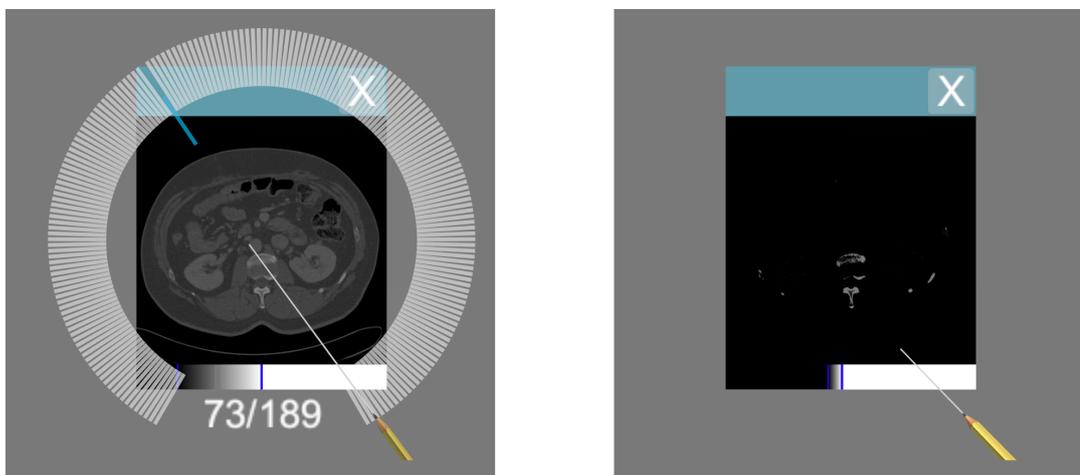


Abbildung 4.2: Virtuelle DICOM-Ebene mit Kreisauswahl sowie Anzeige und Manipulation der Transferfunktion.

Konzept, welches vom *Marking Menu* [23] inspiriert ist. Klickt der Nutzer auf die Ebene erscheint ein Kreismenü, wie es in Abbildung 4.2 zu sehen ist. Nun kann man durch einfaches Zeigen zur jeweiligen Schicht wechseln. Dabei wird der Wechsel erst durchgeführt, wenn man auf das entsprechende Ringsegment zeigt. Somit gibt es um den Mittelpunkt eine Zone, welche die Schichtauswahl nicht beeinflusst, sodass der Strahl vom Raycast hier durchgeführt werden kann, um beispielsweise direkt

von Schicht 14 zu Schicht 80 zu wechseln. Durch den kreisförmigen Aufbau ist die Darstellung vieler Einzelelemente möglich, was durch einen hierarchischen Aufbau noch erweitert werden kann.

4.6.2 Transferfunktion

Eine weitere Interaktionsmöglichkeit mit dem Schichtbilddatensatz, bildet die Manipulation der angewendeten Transferfunktion. Hierfür wird unter dem Fenster eine Schwarz-Weiß-Skala (siehe Abbildung 4.2) angezeigt, deren Begrenzungen verschoben werden können. Dies geschieht durch Klicken in die Skala, wobei sich die jeweils nächste Begrenzung zur selektierten Position bewegt.

Kapitel 5

Implementierung

In den folgenden Abschnitten werden Frameworks erläutert, die bei der Umsetzung des Prototyps Verwendung fanden. Anschließend werden auszugweise konkrete Implementierungen der verschiedenen Interaktionstechniken vorgestellt, die im Rahmen dieser Arbeit umgesetzt werden konnten.

5.1 Unity

Für die Umsetzung der entwickelten Konzepte kam die Spiele-Engine *Unity*¹ von *Unity Technologies* zum Einsatz. Vorrangig für die Entwicklung von digitalen Spielen gedacht, ist das Framework auch für die Umsetzung interaktiver Anwendungen, die einen anderen Fokus als bloße Unterhaltung haben, geeignet. In der aktuellsten Version 5.3.4 ermöglicht *Unity* die Entwicklung für eine Vielzahl von Plattformen, darunter alle gängigen Betriebssysteme (Windows, Mac, Linux), die aktuelle Generation von Spielekonsolen (Wii U, Playstation 4, Xbox One), mobile Geräte (Android, iOS) und einen Webplayer, der die Ausführung der Anwendung im Browser ermöglicht. Weiterhin finden sich auch fortgeschrittene Beleuchtungsmodelle, wie beispielsweise *real-time Global Illumination* oder *Physicall Based Shading*, in den aktuellen Versionen der Spiele-Engine², sodass auch visuell anspruchsvolle Anwendungen möglich sind. Mit einem großen Katalog an Spielen, die mit *Unity* umgesetzt wurden, und namenhaften Partnern, wie Nintendo, Oculus, Intel sowie Microsoft, ist anzunehmen, dass die Spiele-Engine auch in Zukunft für zahlreiche Anwendungen genutzt wird.

Neben den oben genannten Gründen zeichnet sich *Unity* auch durch eine einfache Bedienbarkeit und einen umfangreichen Asset-Store aus. Der Store bietet eine Vielzahl von teilweise kostenlosen Ressourcen (3D-Modelle, Texturen, Scripte, Sounds

¹<https://unity3d.com/> (Stand: 04.04.2016)

²<http://blog.digitaltutors.com/unity-udk-cryengine-game-engine-choose/> (Stand: 04.04.2016)

etc.) an, sodass Prototypen schnell entwickelt werden können, um erste Eindrücke zur Bedienbarkeit der Software zu gewinnen. All diese Gründe tragen zur Entscheidung bei, den zugrundeliegenden Prototypen mit *Unity* umzusetzen. Zudem wird seit Version 5.1 die *Oculus Rift* nativ unterstützt, sodass hier die VR-Anbindung von vornherein gegeben ist.

Bevor auf konkrete Implementierungen eingegangen wird, gilt es zunächst grundlegende Begrifflichkeiten in Zusammenhang mit *Unity* zu erläutern, die für das weitere Verständnis notwendig sind.

Scene (dt. Szene) Enthält die Objekte, die in der Anwendung benötigt werden. Für ein Videospiel könnte beispielsweise jeder Level eine eigene *Szene* darstellen. Dahingegen können Anwendungen auch nur aus einer Szene bestehen, wie es beim vorliegenden Prototypen der Fall ist.

GameObject (dt. Spielobjekt) Jedes Objekt in einer *Szene* ist ein *Spielobjekt*. Darunter fallen nicht nur sichtbare Objekte, wie 3D-Modelle, UI-Elemente oder andere Strukturen, sondern auch Objekte die eine spezielle Logik enthalten. Beispiel hierfür wäre ein *Spielobjekt*, welches Zeiten misst oder Einstellungen speichert.

Script (dt. Skript) Jedes *Spielobjekt* kann durch *Skripte* erweitert werden. Diese geben zusätzliche Funktionalitäten oder benutzen vorhandene Komponenten eines *Spielobjekts*. Hier geschieht die eigentliche Programmierung der Software. Dabei können die Sprachen *C#* oder *JavaScript* verwendet werden.

Life Cycle (dt. Lebenszyklus) *Skripte* erben standardmäßig von der Klasse *MonoBehaviour*. Diese stellt Funktionen bereit, die zu vorbestimmten Zeiten des Lebenszyklus eines *Skripts* ausgeführt werden. Für den vorliegenden Prototypen sind *Awake* (Aufruf beim Start der Szene), *Start* (vor dem ersten Frame) und *Update* (in jedem Frame) von Relevanz.

Diese und weiterführende Informationen finden sich in der Dokumentation zur *Unity-Engine*³. Zudem bietet die Tutorial-Website⁴ Erklärungen zu relevanten Themen.

5.2 Entwicklung des Moduls *DICOMtoUnity*

Für die Exploration medizinischer Daten ist es wichtig, verfügbare Schichtbilddatensätze betrachten zu können. Diese, meist im DICOM-Format (*.dcm) gespeicherten Daten, werden von *Unity* nicht nativ unterstützt, sodass hierfür ein eigenes Framework entwickelt werden musste. Zwar existieren einige Open Source Bibliotheken,

³<http://docs.unity3d.com/Manual/index.html> (Stand: 04.04.2016)

⁴<https://unity3d.com/learn/tutorials/>

wie openDICOM.NET⁵, Grassroots DICOM⁶, DICOM#⁷ und EvilDICOM⁸, die das Format unterstützen, aber diese sind entweder veraltet oder bieten nur ein unzureichende Menge an Funktionalitäten für die Bildverarbeitung an. Letztlich wurde sich dazu entschieden, EvilDICOM für den grundlegenden Umgang mit DICOM-Dateien zu verwenden und darauf aufbauend ein Framework zu entwickeln, welches die Pixeldaten handhabt. Die Bibliothek ermöglicht das Auslesen der verschiedenen *Data Tags* samt den dazugehörigen Werten, vermisst aber Funktionen, die für die Bildverarbeitung von Relevanz sind. Somit mussten jene Funktionalitäten, die für die Extraktion einzelner Schichten notwendig sind, selbst entwickelt werden. Das hierfür entwickelte Framework *DICOMtoUnity* wurde in *C#* programmiert und in einer *Dynamic Link Library (DLL)* kompiliert, um es in *Unity* einbinden zu können.

Jede DICOM-Datei stellt ein eigenes Objekt dar. Nachdem im Konstruktor die Datei mithilfe von EvilDICOM eingelesen wurde, werden die wichtigsten *Data Tags* als Objektattribute abgespeichert. Wie der folgende Quellcodeausschnitt zeigt, benötigt man hierfür nur die Gruppen- und Identifikationsnummer sowie den Datentypen, um die Werte auslesen zu können:

```
1 // Einlesen der DICOM-Datei und Extraktion eines einzelnen Tags
2 file = EvilDICOM.Core.DICOMObject.Read(@fileName);
3 width = (ushort) file.FindFirst("00280011").DData;
```

Derzeit wird nur ein kleiner Teil der verfügbaren *Tags* ausgelesen und verwendet, da beispielsweise patientenspezifische Daten für den Prototypen nicht relevant sind. Durch die einfache Architektur ist es jedoch ohne Probleme möglich für zukünftigere Versionen des Frameworks zusätzliche *Tags* verfügbar zu machen. Weiterhin werden die Pixeldaten für die weitere Verwendung in einen separaten Container gespeichert, wie im folgenden Quellcodeausschnitt zu sehen ist:

```
1 // Auslesen der Pixeldaten in eine Byte-Array
2 byte[] byteBuffer;
3 using (MemoryStream pixelStream = file.PixelStream as MemoryStream) {
4     byteBuffer = pixelStream.ToArray();
5 }
6
7 // Speicherung der Pixeldaten in separaten [ushort]-Array 'pixels'
8 Buffer.BlockCopy(byteBuffer, 0, pixels, 0, byteBuffer.Length);
```

Wichtigster Bestandteil des Frameworks sind die Funktionen zum Auslesen einzelner Schichten. Auch wenn Bilder mithilfe von eindimensionalen Arrays erzeugt werden

⁵<http://opendicom.sourceforge.net/about.html>

⁶<https://sourceforge.net/projects/gdcm/>

⁷<https://sourceforge.net/projects/dicom-cs/>

⁸<http://www.rexcardan.com/evildicom/>

können, liegen gerade die coronalen sowie sagittalen Pixeldaten nicht hintereinander im *pixels*-Array. Abbildung 5.1 veranschaulicht diese Stückelung an einem Datensatz, der in jede Richtung (axial, coronal, sagittal) jeweils drei Schichtbilder enthält. Während das Auslesen der axialen Schichtbilder ohne Schleifen auskommt, da hier die Daten einer Schicht hintereinander im Speicher liegen, benötigt das Zusammenfügen der coronalen Schicht eine und der sagittalen Schicht zwei *for*-Schleifen. Der dazugehörige Quellcode findet sich auszugsweise in Anhang A bzw. im Projekt *DI-COMtoUnity* auf der beiliegenden DVD.

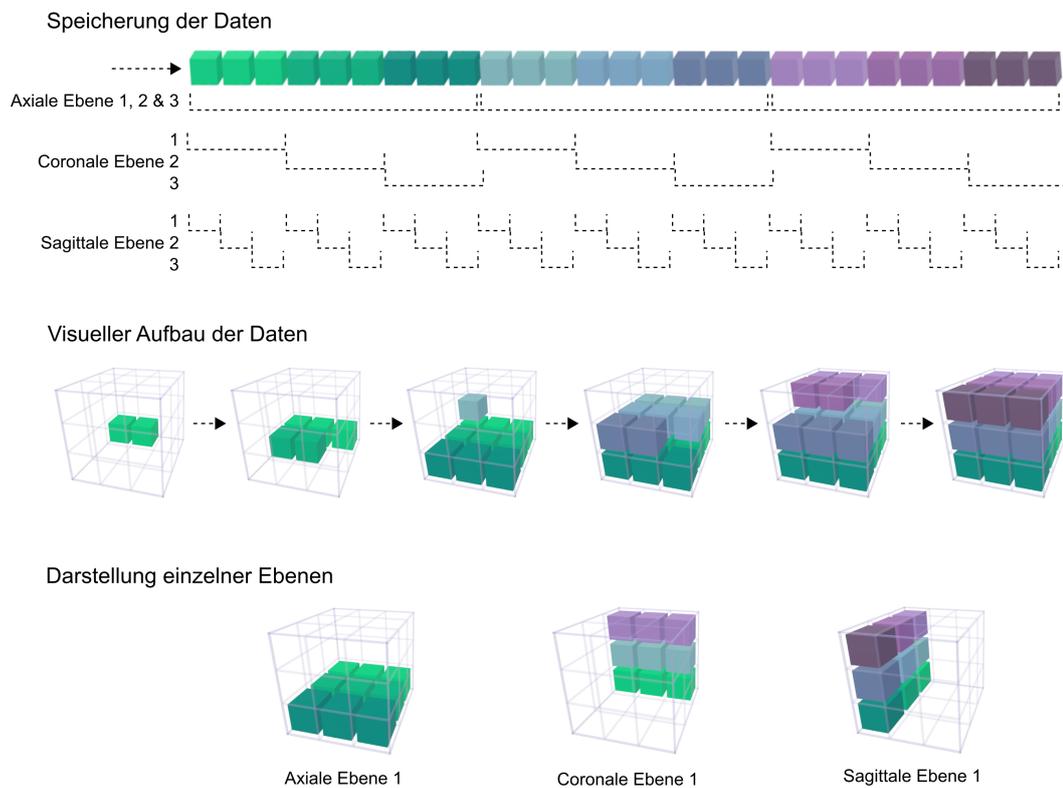


Abbildung 5.1: Aufbau der Pixeldaten im Speicher sowie deren visuelle Repräsentation.

5.3 Exploration der Daten

Im folgenden Abschnitt wird genauer auf die Umsetzung einiger Interaktionstechniken eingegangen. Auf eine detaillierte Erläuterung zum gesamten Implementierungsvorgang wird verzichtet, um den Fokus auf relevante Teilaspekte zu beschränken und diese ausführlicher beschreiben zu können.

Hierfür wurden vor allem solche ausgewählt, die einen maßgeblichen Beitrag zur Funktionalität des Programms haben und die selbstgesetzten Ziel unterstützen.

5.3.1 Selektion und Manipulation

Um mit den verschiedenen *GameObjects* interagieren zu können, musste zunächst die Mechanik zur Selektion implementiert werden. Hierfür sind die beiden Klassen *StylusInteraction* und *StylusRaycast* zuständig. Letztere ist nur einmal pro Szene vertreten und übernimmt die Auswahl aktiver Objekte. Mithilfe der von Unity bereitgestellten Funktion *Physics.Raycast()*⁹, ermittelt die Funktion alle getroffenen Objekte entlang des Vorwärtsvektors, der vom Stylus ausgeht. Dabei findet bereits eine Filterung statt, da nur Objekte als relevant wahrgenommen werden, die von der Basisklasse *StylusInteraction* stammen. Diese Klasse stellt zudem die notwendigen Funktionalitäten bereit, welche die Interaktion mit dem Stylus ermöglichen. Zum einen überwacht die Klasse den Status des jeweiligen Objektes, zu welchem es mithilfe eines Skripts zugeordnet ist. Die implementierten Zustände unterscheiden sich in passiv, aktiv und hervorgehoben, wobei nie zwei Objekte gleichzeitig aktiv bzw. hervorgehoben sein können. Durch diese Unterscheidung kann jedes Spielobjekt ein eigenes Verhalten je Zustand implementieren, sodass sich beispielsweise bei der Auswahl eines Objekts dessen Farbe oder Form ändern kann. Weiterhin erbt jedes Skript die Funktion *interactionUpdate*. Ähnlich der *Update*-Funktion von Unity wird sie für jeden Frame ausgeführt, solange ein Objekt im aktiven Zustand ist. Hier werden die Routinen programmiert, die für die Interaktion mit dem Objekt zuständig sind. Dabei können je nach gedrücktem Knopf verschiedene Interaktionen stattfinden. Im Folgenden gehen wir näher auf die Implementation der Rotationsmechanik ein. Ausschlaggebend für das Rotationsverhalten ist der Trefferpunkt mit dem Objekt, wenn der Rotationsknopf gedrückt wird. Dadurch wird das Spielobjekt in den aktiven Zustand versetzt und an der Position des Trefferpunktes entsteht ein Referenzpunkt. Während des gesamten Rotationsvorgangs bleibt die Distanz zwischen Referenzpunkt und Spitze des Stylus gleich. Zusätzlich wird pro Frame der Richtungsvektor zwischen Mittelpunkt des Spielobjekts und Referenzpunkt berechnet. Mithilfe dieser Vektoren ist es möglich die Rotation eines Objekts zu bestimmen

⁹<http://docs.unity3d.com/ScriptReference/Physics.Raycast.html> (Stand 03.04.2016)

und anzuwenden. Hierfür wird auf die Funktion *Quaternion.FromToRotation()*¹⁰ zurückgegriffen. Vereinfacht ausgedrückt sind Quaternions die komplexe Repräsentation eines Punktes in einem 4-dimensionalen Raum [35]. Quaternions haben gegenüber den Eulerwinkeln den entscheidenden Vorteil, dass es nicht zum sogenannten *Gimbal Lock*-Problem kommen kann. Denn bei bestimmten Ausrichtungen der Rotationsachsen kann es vorkommen, dass die eulerschen Winkel einen Freiheitsgrad verlieren. Dagegen ermöglichen Quaternions zu jeder Zeit jede Rotation und realisieren diese auch effizienter [35].

5.3.2 Vermessung

Wie in Kapitel 4.5.4 beschrieben, werden die Vermessungspfeile mithilfe des Rubberbanding-Konzepts platziert. Besonderheit der Implementierung besteht aus dem differenzierten Rendering der Vermessungspfeile. Wie in Abbildung 5.2 zu sehen ist, erhalten die Vermessungsobjekte durch das *Toon Shading* [24, 29] eine klare Abgrenzung zu anderen Strukturen.

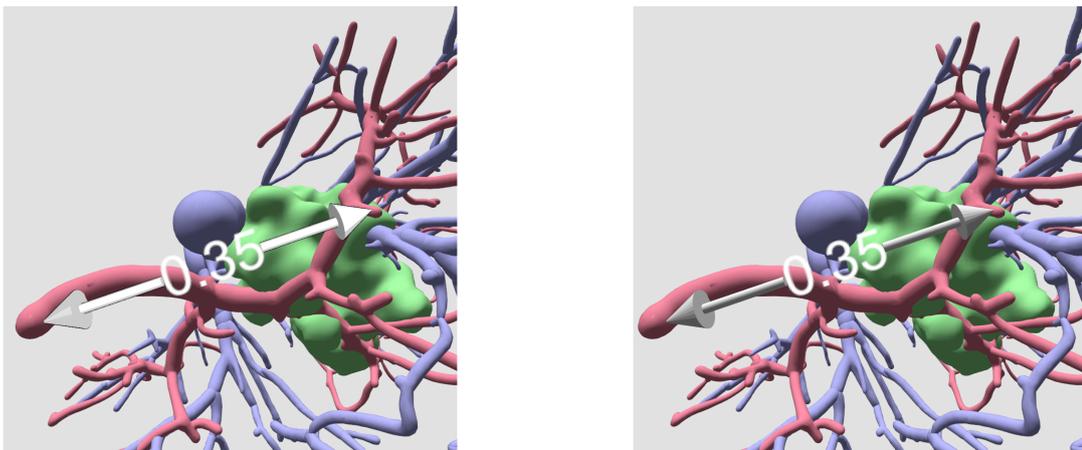


Abbildung 5.2: Links: Vermessungspfeil mit *Toon Shading*. Rechts: Vermessungspfeil mit Standard Shader.

Auch wenn die Tiefenwahrnehmung durch das *Toon Shading* nicht unterstützt wird, hilft die Darstellungweise bei der schnellen Identifikation der Vermessungsobjekte, was wiederum zu einer Effektivitätssteigerung führen kann.

¹⁰<http://docs.unity3d.com/ScriptReference/Quaternion.FromToRotation.html>
(Stand: 06.04.2016)

(Stand:

Kapitel 6

Evaluierung

Vorhandene Software kann auf verschiedene Weisen evaluiert werden. Während man grundsätzlich zwischen qualitativer und quantitativer Evaluierung unterscheidet, ist auch eine Kombination beider Varianten von Vorteil. Allgemein unter „Mixed-Method Evaluation“ zusammengefasst, können kombinierte Methoden fünf verschiedene Ziele verfolgen [16]. Für die Evaluierung des entwickelten Prototyps sollen verschiedene Facetten betrachtet werden, weshalb zwei komplementäre Methode zum Erkenntnisgewinn gewählt wurden.

Qualitative Erkenntnisse werden mithilfe der „Thinking Aloud“-Methode gewonnen. Sie ist eine der am häufigsten eingesetzten Methoden und bietet neben einer einfachen sowie flexiblen Anwendbarkeit auch robuste Ergebnisse [66]. Ein Fragebogen liefert zusätzlich quantitative Informationen. Hierbei werden hauptsächlich Fragen zum Bereich der Usability und zum Gefühl der Präsenz gestellt. Nähere Erläuterungen dazu finden sich im Kapitel 6.1. Weiterhin werden während der Bearbeitung der Aufgaben die Geschwindigkeit sowie die Genauigkeit der Probanden ermittelt, um weitere quantitative Daten zu erhalten.

Erkenntnisse zum entwickelten Prototypen wurden in verschiedenen Entwicklungsstadien gewonnen. Vor der Fertigstellung des Prototypen halfen offene Interviews mit insgesamt 3 Experten bereits erste Anmerkungen sowie Verbesserungsvorschläge zur Software zu erhalten. Die Auswertung mithilfe des Fragebogens sowie den technischen Messungen fand lediglich im eigentlichen Evaluationprozesses nach der Fertigstellung des Prototyps statt. In den folgenden Kapiteln werden Versuchsaufbau sowie Durchführung genauer betrachtet. Zudem folgt eine Auswertung der Ergebnisse und mögliche Verbesserungen der Software werden angesprochen.

Wohingegen qualitative Erkenntnisse bereits während der Entwicklung durch Experten im Bereich der Mensch-Computer-Interaktion geliefert wurden, fand die Auswertung mithilfe des Fragebogens sowie den technischen Messungen lediglich im eigentlichen Evaluationprozesses nach der Fertigstellung des Prototyps statt. In den folgenden Kapiteln werden Versuchsaufbau sowie Durchführung genauer betrach-

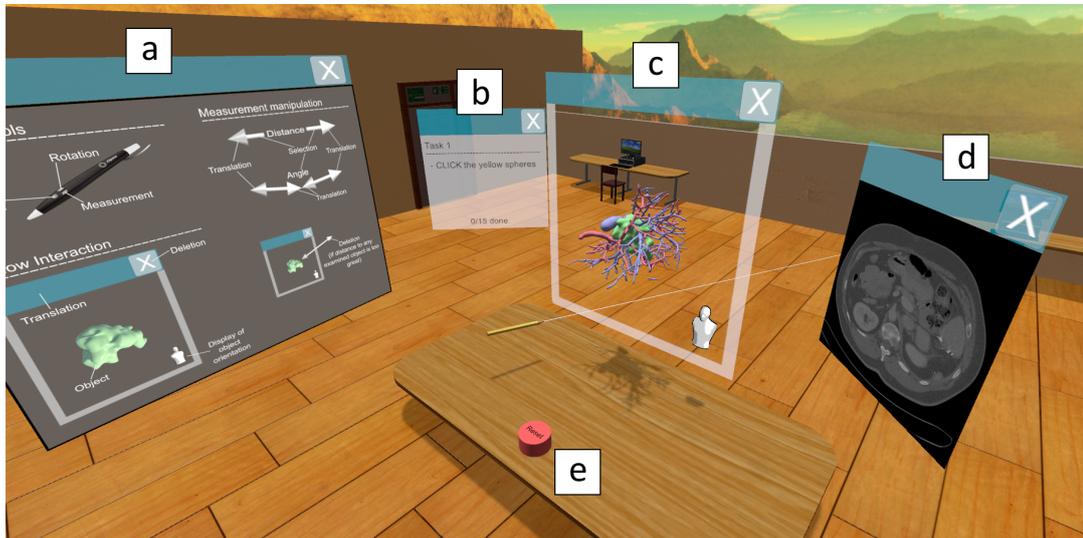


Abbildung 6.1: Aufbau der Szene: (a) Kurzanleitung (b) Aktuelle Aufgabe (c) Medizinisches Object (d) Schichtbildfenster (e) Knopf zum Zurücksetzen der Szene.

tet. Zudem folgt eine Auswertung der Ergebnisse und mögliche Verbesserungen der Software werden angesprochen.

6.1 Versuchsaufbau

Wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, spielen die Usability und der Grad der Immersion eine wichtige Rolle für die Evaluierung des Prototyps. Um die primären Interaktionstechniken der Software testen zu können, sind die Aufgaben entsprechend ausgelegt und verlangen den häufigen Einsatz von Selektions-, Translations-, Rotations- und Vermessungstechniken. Im virtuellen Raum werden dem Probanden verschiedene Objekte präsentiert. Zum einen unterstützen zwei Hilfsfenster, welche die aktuelle Aufgabe sowie eine Kurzübersicht zur Steuerung zeigen, den Nutzer bei der Bearbeitung der Aufgaben. Dies ist notwendig, da mit dem HMD die normalerweise abgedruckten Anleitungen bzw. Aufgabenstellungen nur schwer zugänglich sind. Zum anderen ist vor allem das 3D-Modell im Zentrum der Szene wichtig. Weiterhin existiert ein Fenster zur Darstellung des zugehörigen Schichtdatensatzes, welches ebenfalls für die Bearbeitung der Aufgaben benötigt wird. Abbildung 6.1 zeigt den Aufbau der Szene.

Der Evaluierungsprozess besteht aus insgesamt vier Aufgaben und unterstützt den Vorgang der Exploration von medizinischen Daten. Die Schwierigkeit nimmt pro Aufgabe zu, sodass Probanden erst nach und nach komplexere Herangehens-

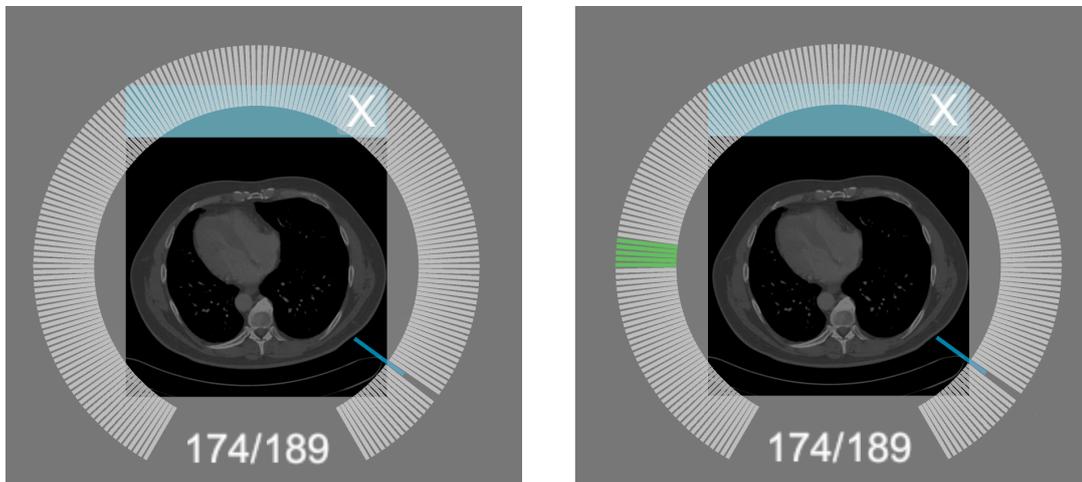


Abbildung 6.2: Links: Kreisauswahl ohne Hervorhebung. Rechts: Kreisauswahl mit grüner Hervorhebung des relevanten Segments.

weisen entwickeln müssen und nicht schon zu Beginn von der neuartigen Situation sowie den unbekanntem Interaktionstechniken überfordert sind. Nach einer kurzen Eingewöhnungsphase, um sich mit der grundlegenden Steuerung vertraut zu machen, erscheinen im 3D-Modell nacheinander gelbe Kugeln. Diese müssen von der Testperson gefunden und selektiert werden. Hierbei sind einfache Rotations- und Selektionstechniken vonnöten. In der zweiten und dritten Aufgabe müssen Distanzen bzw. Winkel zwischen Kugeln gemessen werden. Neben den Anforderungen, die bereits in der ersten Aufgabe von Relevanz sind, spielen die Vermessungstechniken, aber auch Translationstechniken eine Rolle. In der letzten Aufgabe werden alle Techniken kombiniert abgefragt. In einzelnen Schichten des vorliegenden Bilddatensatzes werden Kugeln dargestellt, welche entweder selektiert oder vermessen werden müssen. Zur Hilfestellung werden unterschiedlich große Segmente der Kreisauswahl grün eingefärbt, wie es in Abbildung 6.2 zu sehen ist. Diese Einfärbung simuliert zugleich das Fachwissen des Arztes, da dieser bei der Betrachtung von Bilddaten ungefähr weiß, welche Regionen genauer untersucht werden sollen. Dies resultiert aus der Tatsache, dass Bilddaten nur erhoben werden, wenn es bereits eine klare Fragestellung, wie beispielsweise eine Verdachtsdiagnose, gibt. Nachdem alle Aufgaben erfüllt sind, werden den Probanden einige abschließende Fragen in Form eines Evaluationsbogens (Anhang B) präsentiert.

Der Evaluationsbogen setzt sich dabei aus mehreren Abschnitten zusammen. Im ersten Abschnitt werden demografische Daten, wie Alter, Geschlecht sowie gesammelte Erfahrung mit relevanten Themengebieten, erfasst. Im Anschluss daran kommen Fragen, um den Grad der Präsenz ermitteln zu können. Hierfür wurde

die Gruppe der Kontrollfaktoren aus der Veröffentlichung von Witmer und Singer [59] verwendet. Für die Evaluierung wird speziell dieser Bereich herangezogen, da er im Bezug auf Interaktion die größten Übereinstimmungen ausweist. Der letzte Abschnitt enthält Aussagen zur Bewertung der Usability. Diese leiten sich aus der ISONORM 9241/110 [67] ab. Dabei wird lediglich der Bereich der Individualisierbarkeit vernachlässigt, da dieser im Prototypen nicht abgebildet wird. Der gesamte Fragenbogen findet sich im Anhang B. Der gesamte Fragebogen verwendet eine einheitliche Skala, die von -3 bis 3 reicht. Durch die ungerade Anzahl an Werten, ist es dem Probanden auch möglich eine neutrale Bewertung abzugeben.

6.2 Durchführung

Um die Vergleichbarkeit und Konsistenz der Testergebnisse zu gewährleisten, wurden alle Durchläufe nach einem festgelegtem Schema durchgeführt. Bevor es zur eigentlichen Bearbeitung der Aufgaben ging, gab es einen Überblick über die Software. Dazu zählten Erläuterungen zu den beiden Gerätschaften, der Oculus Rift und dem Stylus vom zSpace, sowie eine kurze Beschreibung zu den geplanten Anwendungsfeldern der Software. Hierbei wurde vor allem der Stylus genauer gezeigt, da dieser später während die Anwendung aktiv ist nicht mehr betrachtet werden kann. Zudem kam es vor, dass der Stift nicht korrekt getrackt werden konnte, sodass den Probanden vorab eine spezielle Geste¹ gezeigt wurde, die dieses Problem zeitweise behebt.

Nach diesen Informationen galt es den ersten Teil des Fragebogens sowie die Aufgabenstellungen (Anhang B) durchzulesen. Anschließend wurden die Nutzer darauf hingewiesen, dass Fragen jederzeit gestellt und jegliche Gedanken, Verbesserungsvorschläge, Kritiken etc. geäußert werden können. Nach einer kurzen Eingewöhnungszeit im virtuellen Raum ging es zu den eigentlichen Aufgaben der Evaluierung über. Während der Bearbeitung wurde der Proband bei Problemen vom Versuchsleiter unterstützt. Im letzten Schritt sollte der Fragebogen vollständig ausgefüllt werden, womit der Evaluationsprozess auch endete.

6.3 Ergebnisse

Für den Evaluierungsprozess wären vorrangig Personen aus der Zielgruppe von Bedeutung gewesen. Doch durch die medizinische Routine, welche wenig Spielraum für Aktivitäten abseits des Krankenhauses lässt, war es nicht möglich eine repräsentative Anzahl an Probanden der Zielgruppe zu erreichen. Aus diesem Grund setzt sie

¹Der Stift musste senkrecht vor das zSpace gehalten werden, damit beide Infrarot-LEDs des Stifts wieder im Sichtbereich sind.

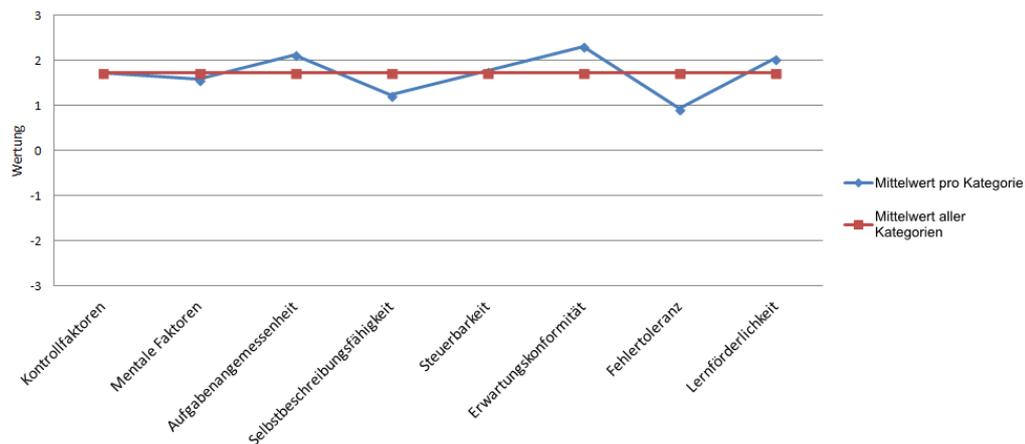


Abbildung 6.3: Durchschnittliche Bewertung der einzelnen Bereiche und Mittelwert aller Bewertungskriterien.

die Gruppe der Probanden aus Personen zusammen, welche im Umgang mit dem Computer geübt sind und in mindestens einem der drei Bereiche (VR, medizinische Daten, 3D-Eingabegeräte) ausreichend Erfahrung besitzen. Insgesamt wurden 13 Personen (10 männliche, 3 weibliche) getestet. Im Durchschnitt waren die Probanden 30 Jahre alt und besaßen durchschnittlich 18 Jahre Erfahrung in der Nutzung von Computern. Weitere gemittelte Erfahrungswerte für die virtuelle Realität, Umgang mit medizinischen Daten und Interaktion mithilfe von 3D-Eingabegeräten entsprachen zwei, fünf bzw. drei Jahren. Zunächst werden die erfassten quantitativen Daten betrachtet. Für die Auswertung des Fragebogens wurden die Angaben zum Grad der Ermüdung sowie zur Verzögerung zwischen Aktion und Ergebnis invertiert eingerechnet, da hier niedrige Werte als positiv erachtet werden.

Wie man der Abbildung 6.3 entnehmen kann, schloss der Prototyp insgesamt positiv ab. Mit einem Mittelwert von 1,72 und einer maximalen Abweichung von 0,79 (Fehlertoleranz) vom Mittelwert, liegt die Bewertung deutlich im positiven Bereich. Vorallem *Aufgabenangemessenheit* und *Erwartungskonformität* konnten hier die besten Bewertungen erreichen. Im Gegenteil dazu stehen *Selbstbeschreibungsfähigkeit* sowie *Fehlertoleranz*, welche die beiden größten negativen Abweichungen vom Mittelwert darstellen. Betrachtet man nun die durchschnittlichen Werte pro Frage, wie sie in Abbildung 6.4 zu sehen sind, erkennt man einen deutlichen Abfall im Bereich *Fehlertoleranz*. Vor allem die letzte Aussage (*gibt [keine] konkrete[n] Hinweise zur Fehlerbehebung*) ist mit einem durchschnittlichen Wert von -0,23 nicht nur die niedrigste, sondern auch die einzige Bewertung unter dem neutralen Wert 0.

Speziell diese Aussage, aber auch die Bewertungen zur *Fehlertoleranz* bzw. zur *Selbstbeschreibungsfähigkeit* lassen sich auf die Einfachheit des Prototypen sowie auf

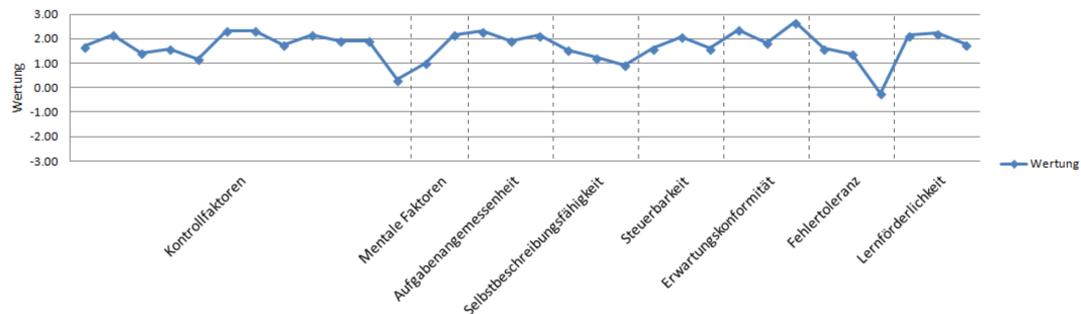


Abbildung 6.4: Durchschnittlicher Wert jeder Frage bzw. Aussage.

die Durchführungsweise der Evaluation zurückführen. Die Software gibt nur kurze bis keine Fehlermeldungen und bietet bei Fehlern nicht immer eine passende Lösung an. Zudem wurde die Kurzanleitung nur selten genutzt, da sie nicht im primären Sichtfeld des Probanden lag und Erklärungen hauptsächlich vom Versuchsleiter gegeben wurden.

Während der Evaluierung kam es zudem öfter zu Trackingproblemen, sodass der Stylus für eine kurze Zeit nicht genutzt werden konnte. Diese Problematik spiegelt sich auch in der Bewertung der Kontrollfaktoren wider. Hier wurde die letzte Frage (*Wie sehr beeinträchtigen die Gerätschaften...*) durchschnittlich mit 0,33 bewertet. Zudem beeinflussten die Trackingprobleme die gemessenen Zeiten der Aufgaben, sodass betroffene Abschnitte heraus gerechnet werden mussten. Die Analyse der verschiedenen Zeiten sowie den durchschnittlichen Abweichungen bei den Messaufgaben zeigte, dass längere Bearbeitungszeiten zu genaueren Ergebnissen führt. Nimmt man nun jedoch die Beobachtungen zur Arbeitsweise jedes Probanden hinzu, ergibt sich eine andere, weniger offensichtliche Erkenntnis. Grundsätzlich konnte man zwei unterschiedliche Vorgehensweisen erkennen. Der Großteil der Probanden nutzte die Möglichkeiten der virtuellen Realität voll aus und änderte den Blickwinkel sowie die Distanz zum primären Untersuchungsobjekt häufig. Beispielsweise wurden hier die Objekte deutlich näher herangezogen, wenn die Vermessungspunkte genauer platziert werden sollten. Im Gegensatz dazu arbeiteten 38% der Probanden auf eine starrere Art und Weise. Ähnlich einer Desktop-Anwendung wurden hier die Objekte in eine initiale Position gebracht und während der Evaluation kaum bis gar nicht mehr verschoben. Beide Arbeitsweisen beeinflussen sowohl die Durchführungszeiten als auch die Genauigkeiten der Messungen. Wie Abbildung 6.5 zeigt, benötigen die Probanden, welche mit unterschiedlichen Distanzen arbeiten, im Durchschnitt zwar länger, aber erreichen eine höhere Genauigkeit sowohl für die Distanzmessung als auch für die Winkelmessung.

Neben den quantitativen Daten gaben auch die Aussagen der Versuchspersonen Aufschluss über wichtige Aspekte des Prototypen. Diese qualitativen Angaben

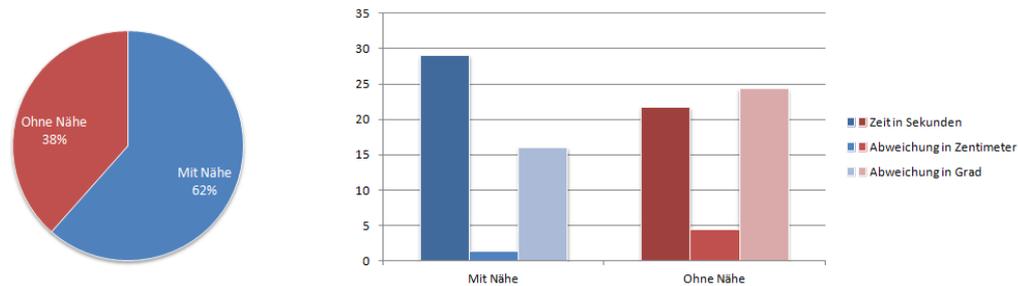


Abbildung 6.5: Beziehung von Arbeitsweise zu gemessenen Zeiten und Genauigkeiten.

wurden gruppiert und werden in den folgenden Kapiteln ausgewertet.

6.3.1 Technik

Großer Kritikpunkt der sich sowohl in den Aussagen der Probanden als auch in den Fragebögen widerspiegelt, ist das inkonsistente Tracking des Stiftes. Das willkürliche Auftreten und die teilweise lange Dauer der Störung führte während der Evaluation zu starken Problemen. Auch wenn die Stiftbewegung und Interaktion anfangs als sehr angenehm empfunden wurde, trübten die später auftretenden Probleme den positiven Eindruck. Ein weiterer technischer Kritikpunkt bezog sich auf die Display-Auflösung der Oculus Rift. Hier wurde das Bild oft als unscharf bzw. die Bewegung als verschwommen wahrgenommen.

6.3.2 Translation & Rotation

Die Grundtechniken der Manipulation wurden insgesamt sehr positiv wahrgenommen. So wurden die Techniken zur Translation und Rotation als intuitiv sowie leicht erlernbar beschrieben. Vor allem die realitätsnahe Umsetzung, also das Stift- sowie Kopfbewegungen und Drehungen dem realen Vorbild folgten, wurden als angenehm empfunden. Die Verschiebung mithilfe der Titelleiste wurde hingegen etwas bemängelt, da hier die Übersicht abnimmt wenn man sich zu nah vor dem Fenster befindet.

6.3.3 Vermessung

Das Erstellen und Platzieren der Pfeile wurde als einfach und intuitiv empfunden. Zudem half die differenzierte Darstellung, um klar zwischen Objekt und eigenhändig platzierten Pfeilen zu unterscheiden. Ein oft angesprochener Punkt war das fehlende Snapping, um so eine höhere Genauigkeit erreichen zu können. Weitere Kritikpunkte betrafen die Umwandlung zum Winkelmesser, da es hier oft schwierig war den

Bereich zwischen den Pfeilspitzen genau zu treffen, die teilweise ungünstige Platzierung der Beschriftung sowie den fehlenden Halbkreis zwischen den beiden Schenkeln des Winkelmessers.

6.3.4 Schichtbildauswahl

Die Auswahl der Schichtbilder über den kreisförmigen Selektor ist insgesamt äußerst positiv bewertet wurden. Hervorgehoben wurden die Einfachheit, Übersichtlichkeit sowie Neuartigkeit der Interaktionsform. Auch wenn die einzelnen Schichten meist recht schnell und präzise ausgewählt werden konnten, traten auch Schwierigkeiten auf. Eine unruhige Hand, beispielsweise durch fehlendes Abstützen, oder die Bewegung, die beim Loslassen eines Knopfes auftrat, erschwerte die Auswahl einer einzigen Schicht. Betroffene Probanden würden eine Möglichkeit bevorzugen, in kleineren Schritten durch den Datensatz traversieren zu können.

6.4 Verbesserungen

Hinsichtlich der Selbstbeschreibungsfähigkeit sowie der Fehlertoleranz hat der Prototyp noch Verbesserungspotential, um eine bessere Usability gewährleisten zu können. Deutlichere und häufigere Hilfstexte, die neben potenziellen Fehlern auch die Handhabung der Werkzeuge erklären, würden das Programm auch ohne Hilfe besser nutzbar machen. Weiterhin sollten alternative Ein- sowie Ausgabegeräte danach untersucht werden, ob sich hier passendere Lösungen anbieten. Als Ausgabegeräte bieten sich die aktuelleren Entwicklungsstände von bestehenden HMDs an. Für den getrackten Stift sollte eine stabilere Alternative gefunden werden, um Verzögerungen und Störungen in zukünftigen Prototypen vermeiden zu können.

Um die Auswahl der Vermessungspfeile bzw. -teile zu vereinfachen, könnte der einfache Raycast in einen Conecast verwandelt werden. Dies würde das potenzielle Auswahlvolumen erhöhen und ermöglicht eine einfachere Selektion. Ein weiteres Problem, welches vermehrt auftrat, war die gezielte Auswahl einer einzelnen Schicht im Schichtbilddatensatz. Mit der Erweiterung zweier zusätzlicher Bedienelemente wie sie in Abbildung 6.6 zu sehen sind, könnte man eine präzisere Auswahl gewährleisten.

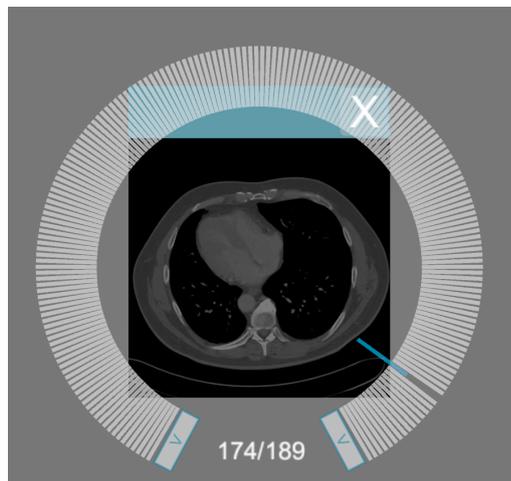


Abbildung 6.6: Erweiterung der kreisförmigen Auswahl, um eine Möglichkeit die Schichtzahl in Einzelschritten zu ändern.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde sich mit dem Thema der Exploration medizinischer Daten in einer virtuellen Umgebung auseinandergesetzt. Hierfür wurden zunächst die medizintechnischen Grundlagen erläutert, welche sich mit dem Bereich der Bildverarbeitung überschneiden. Zudem folgten Ausführungen zum Thema der virtuellen Realität und den Interaktionstechniken, welche in diesem Medium von Relevanz sind.

Aus diesen Grundlagen wurden anschließend Konzepte entwickeln, um eine möglichst intuitive und immersive Umgebung zur Exploration medizinischer Daten zu gestalten. Die Entwicklung der Interaktionstechniken berücksichtigte die aktuellen Fortschritte im Bereich der VR und konzentrierte sich auf die Aspekte der *Usability*. Zudem wurden die Eigenheiten der Zielgruppe berücksichtigt.

Basierend auf den entwickelten Konzepten entstand ein Prototyp, dessen Implementation auszugsweise dokumentiert worden ist. Danach wurden geeignete Methoden vorgestellt, welche für die Evaluierung der Software und somit der entwickelten Interaktionstechniken genutzt wurden. Im Anschluss daran erfolgte die Nutzerstudie mit abschließender Auswertung und Erläuterungen zu Verbesserungsmöglichkeiten bezüglich des Prototyps.

7.1 Bewertung der Ergebnisse

Der entwickelte Prototyp ermöglicht die interaktive Untersuchung medizinischer Daten. Dabei können sowohl dreidimensionalen Objekte als auch zweidimensionale Schichtbilddatensätze exploriert werden. Neben der grundlegenden Manipulation (Translation, Rotation, implizite Skalierung) ist auch die Vermessung von Distanzen sowie Winkeln möglich. Wie die Evaluierung zeigt, wurden die Konzepte bzw. Interaktionstechniken sehr positiv wahrgenommen. Sie sind intuitiv anwendbar und ermöglichen eine präzise Kontrolle bzw. Untersuchung der Szene. Dennoch hat die

Software Verbesserungspotenzial. Neben der teilweise unzuverlässigen Technik, die durch ausgereifere bzw. genauere Geräte ersetzt werden sollte, muss die Software dem Nutzer weitere Funktionalitäten bieten. Darunter fallen u. a. Techniken, die den Umgang mit dem Programm erleichtern. Beispielsweise eine Snapping-Funktion für präzisere Messarbeiten oder auch frequentere Feedbacknachrichten, die den aktuellen Status anzeigen oder Hilfstellungen geben.

Insgesamt zeigt der Prototyp bereits, dass VR ein vielversprechendes Thema für die Medizin ist. Um diese These jedoch zu beweisen, gilt es weitere Forschungen anzustellen, wobei die vorliegende Arbeit ein Teil der Grundlage darstellen kann.

7.2 Zukünftige Fragestellungen

Der vorliegende Prototyp umfasst eine Grundmenge an Funktionalitäten, welche für die Exploration medizinischer Daten nützlich sind. Potenzielle Erweiterungen umfassen die Möglichkeit der Annotation von Objekten oder die Platzierung beliebiger Schnittebenen. Hier bietet sich vor allem die Annotation für weitere Untersuchungen an, da der Stylus handschriftliche Eingaben ermöglichen würde.

Weiterhin wäre eine Registrierung zwischen den Schichtbildern und dem 3D-Objekt eine hilfreiche Erweiterung. So können je nach Präferenz des Nutzers interessante Punkte in einem der Medien untersucht und gleichzeitig im Gegenstück repräsentiert werden. Diese Synchronisation würde auch die Berechnung einer einheitlichen Maßzahl unterstützen.

Im Zusammenhang mit virtuellen Realitäten wäre zudem das Thema des kollaborativen Arbeitens von Interesse. Anstatt einfache Bilder zu übertragen oder gemeinsam auf einen Bildschirm zu arbeiten, würde die Erweiterung um einen virtuellen Raum einen vielversprechenden Ansatz darstellen. Reale Distanzen könnten somit virtuell überwunden werden, sodass die Zusammenarbeit in einer immersiven Umgebung stattfinden kann. Die Hinzunahme der kürzlich erschienenen *HTC Vive*¹ könnte zudem zusätzliche Freiheiten bieten. Da man hier nicht positionsgebunden ist, sondern sich durch einfaches Laufen durch die virtuelle Umgebung bewegen kann, wären komplexere Szenarien denkbar. Beispielsweise ein virtueller Operationssaal, indem Experten auf anschauliche Weise neuartiges Wissen vermitteln können, ohne physisch wirklich anwesend sein zu müssen.

Insgesamt stellt die virtuelle Realität einen vielversprechenden Themenkomplex dar, welches mit den jüngsten technologischen Fortschritten präsenter ist denn je. Dabei profitieren neben der Medizin noch weitere Bereiche von den neuartigen Möglichkeiten, sodass man auf zukünftige Forschungen bzw. Technologien in diesem Bereich gespannt sein kann.

¹<https://www.htcvive.com/de/> (Stand: 20.04.2016)

Quellenverzeichnis

Literatur

- [1] Tomas Akenine-Möller, Eric Haines und Naty Hoffman. *Real-time rendering*. CRC Press, 2008 (siehe S. 26).
- [2] Bernhard Reitinger et al. „Liver Surgery Planning Using Virtual Reality“. In: *IEEE Computer Graphics and Applications* 6 (2006), S. 36–47 (siehe S. 1, 8, 23, 28, 31).
- [3] Doug A Bowman und Larry F Hodges. „An evaluation of techniques for grabbing and manipulating remote objects in immersive virtual environments“. In: *Proceedings of the 1997 symposium on Interactive 3D graphics*. 1997, 35–ff (siehe S. 20, 21, 26).
- [4] Doug A Bowman u. a. „New Directions in 3D User Interfaces.“ In: *IJVR* 5.2 (2006), S. 3–14 (siehe S. 18, 19, 21, 22, 26).
- [5] Anita Reiter Eigenheer, Adele Diday-Nolle, Doris Slatosch & Susanne Breier. *Handrehabilitation: Für Ergotherapeuten und Physiotherapeuten, Band 1: Grundlagen, Erkrankungen, Ausgabe 3*. Springer-Verlag, 2014 (siehe S. 28).
- [6] Frederick P Brooks Jr. „What’s real about virtual reality?“. In: *Computer Graphics and Applications* 19.6 (1999), S. 16–27 (siehe S. 18).
- [7] Vicki Bruce, Patrick R Green und Mark A Georgeson. *Visual perception: Physiology, psychology, & ecology*. Psychology Press, 2003 (siehe S. 10, 11).
- [8] Carolina Cruz-Neira, Daniel J Sandin und Thomas A DeFanti. „Surround-screen projection-based virtual reality: the design and implementation of the CAVE“. In: *Proceedings of the 20th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM. 1993, S. 135–142 (siehe S. 16).
- [9] Bernhard Preim & Raimund Dachsel. *Interaktive Systeme - Band 1: Grundlagen, Graphical User Interfaces, Informationsvisualisierung*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010 (siehe S. 12).

- [10] Bernhard Preim & Raimund Dachselt. *Interaktive Systeme - Band 2: User Interface Engineering, 3D-Interaktion, Natural User Interfaces*. 2. Aufl. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010 (siehe S. 20).
- [11] James D. Foley, Andries van Dam, Steven K. Feiner & John F. Hughes. *Computer Graphics: Principles and Practice*. 2. Addison-Wesley Professional, 1995 (siehe S. 22).
- [12] H Henrik Ehrsson, Anders Fagergren und Hans Forssberg. „Differential fronto-parietal activation depending on force used in a precision grip task: an fMRI study“. In: *Journal of Neurophysiology* 85.6 (2001), S. 2613–2623 (siehe S. 28).
- [13] Alex Olwal Steven Feiner. „The flexible pointer: An interaction technique for selection in augmented and virtual reality“. In: *Proc. UIST'03*. 2003, S. 81–82 (siehe S. 20, 21).
- [14] James D Foley. „Interfaces for Advanced Computing.“ In: *Scientific American* 257.4 (1987), S. 126–35 (siehe S. 15).
- [15] Luigi Gallo, Giuseppe De Pietro und Ivana Marra. „3D interaction with volumetric medical data: experiencing the Wiimote“. In: *Proceedings of the 1st international conference on Ambient media and systems*. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics und Telecommunications Engineering). 2008, S. 14 (siehe S. 8, 19, 26).
- [16] Jennifer C Greene, Valerie J Caracelli und Wendy F Graham. „Toward a conceptual framework for mixed-method evaluation designs“. In: *Educational evaluation and policy analysis* 11.3 (1989), S. 255–274 (siehe S. 42).
- [17] Chris Hand. „A survey of 3D interaction techniques“. In: *Computer graphics forum*. Bd. 16. 5. Wiley Online Library. 1997, S. 269–281 (siehe S. 20).
- [18] Martin Wetzke & Christine Happle. *BASICS Bildgebende Verfahren*. 2. Elsevier, 2013 (siehe S. 4, 5).
- [19] William Hudson. „Pictorial depth perception in sub-cultural groups in Africa“. In: *The Journal of Social Psychology* 52.2 (1960), S. 183–208 (siehe S. 12).
- [20] Robert JK Jacob u. a. „Reality-based interaction: a framework for post-WIMP interfaces“. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. 2008, S. 201–210 (siehe S. 26).
- [21] Ralf Dörner, Wolfgang Broll, Paul Grimm & Bernhard Jung. *Virtual and Augmented Reality (VR/AR)*. Springer Vieweg, 2013 (siehe S. 11).
- [22] Nicholas Katzakis u. a. „Mesh-Grab and Arcball-3D: Ray-based 6-DOF object manipulation“. In: *Proceedings of the Asia Pacific conference on computer-human interaction*. 2013, S. 129–136 (siehe S. 22).

- [23] Gordon Kurtenbach und William Buxton. „User learning and performance with marking menus“. In: *Proceedings of the SIGCHI conference on Human factors in computing systems*. 1994, S. 258–264 (siehe S. 34).
- [24] Jeff Lander und GRAPHIC CONTENT. „Shades of disney: Opaquing a 3d world“. In: *Game Developer Magazine* 7.3 (2000), S. 15–20 (siehe S. 41).
- [25] Joseph J LaViola Jr. „Bringing VR and spatial 3D interaction to the masses through video games“. In: *Computer Graphics and Applications, IEEE* 28.5 (2008), S. 10–15 (siehe S. 15, 19).
- [26] Stefan Marks, Javier E Estevez und Andy M Connor. „Towards the Holodeck: fully immersive virtual reality visualisation of scientific and engineering data“. In: *Proceedings of the 29th International Conference on Image and Vision Computing New Zealand*. 2014, S. 42–47 (siehe S. 26).
- [27] Thomas H Massie und J Kenneth Salisbury. „The phantom haptic interface: A device for probing virtual objects“. In: *Proceedings of the ASME winter annual meeting, symposium on haptic interfaces for virtual environment and teleoperator systems*. Bd. 55. 1. Chicago, IL. 1994, S. 295–300 (siehe S. 15).
- [28] Horst O. Mayer. *Einführung in die Wahrnehmungs-, Lern- und Werbe-Psychologie*. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2005 (siehe S. 11).
- [29] Morgan McGuire und Andi Fein. „Real-time rendering of cartoon smoke and clouds“. In: *Proceedings of the 4th international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*. ACM. 2006, S. 21–26 (siehe S. 41).
- [30] Matjaž Mihelj, Domen Novak und Samo Beguš. *Virtual Reality Technology and Applications*. Springer Netherlands, 2014 (siehe S. 10, 11).
- [31] Mark Mine. „ISAAC: A virtual environment tool for the interactive construction of virtual worlds“. In: *UNC Chapel Hill Computer Science Technical Report TR95-020* (1995) (siehe S. 21).
- [32] Mark Mine. „Working in a virtual world: Interaction techniques used in the chapel hill immersive modeling program“. In: *University of North Carolina* (1996) (siehe S. 20).
- [33] Mark R Mine, Frederick P Brooks Jr und Carlo H Sequin. „Moving objects in space: exploiting proprioception in virtual-environment interaction“. In: *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co. 1997, S. 19–26 (siehe S. 28).
- [34] Rolf Molich und Jakob Nielsen. „Improving a human-computer dialogue“. In: *Communications of the ACM* 33.3 (1990), S. 338–348 (siehe S. 23).

- [35] Daniel Pletinckx. „Quaternion calculus as a basic tool in computer graphics“. In: *The Visual Computer* 5.1-2 (1989), S. 2–13 (siehe S. 41).
- [36] Doug A. Bowman, Ernst Kruijff, Joseph J. LaVioal Jr. & Ivan Poupyrev. *3D user interfaces: theory and practice*. Addison-Wesley, 2004 (siehe S. 2, 13, 18, 20).
- [37] Ivan Poupyrev u. a. „The go-go interaction technique: non-linear mapping for direct manipulation in VR“. In: *Proceedings of the 9th annual ACM symposium on User interface software and technology*. 1996, S. 79–80 (siehe S. 20).
- [38] Bernhard Preim und Dirk Bartz. *Visualization in medicine: theory, algorithms, and applications*. Morgan Kaufmann, 2007 (siehe S. 8).
- [39] Bernhard Preim und Charl P Botha. *Visual Computing for Medicine: Theory, Algorithms, and Applications*. Newnes, 2013 (siehe S. 23).
- [40] Bernhard Preim u. a. „Interaktive und automatische Vermessung in medizinischen 3d-Visualisierungen.“ In: *Sim Vis*. 2001, S. 361–374 (siehe S. 23).
- [41] Prof. Dr. Bernhard Preim. „Skripte zur Vorlesung "Medical Visualization"“. In: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. 2015 (siehe S. 4, 5).
- [42] Eric D Ragan u. a. „The effects of higher levels of immersion on procedure memorization performance and implications for educational virtual environments“. In: *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 19.6 (2010), S. 527–543 (siehe S. 14).
- [43] Greg M Reger u. a. „Effectiveness of virtual reality exposure therapy for active duty soldiers in a military mental health clinic“. In: *Journal of traumatic stress* 24.1 (2011), S. 93–96 (siehe S. 18).
- [44] Albert Rizzo u. a. „Virtual reality goes to war: A brief review of the future of military behavioral healthcare“. In: *Journal of clinical psychology in medical settings* 18.2 (2011), S. 176–187 (siehe S. 18).
- [45] Warren Robinett und Richard Holloway. „Implementation of flying, scaling and grabbing in virtual worlds“. In: *Proceedings of the 1992 symposium on Interactive 3D graphics*. 1992, S. 189–192 (siehe S. 21).
- [46] Ivo Rössling. „Vermessung von medizinischen Segmentierungen für die chirurgische Interventionsplanung und Dokumentation“. Diss. Magdeburg: Otto-von-Guericke-Universität, Aug. 2015 (siehe S. 8).
- [47] Rainer Schönhammer. *Einführung in die Wahrnehmungspsychologie : Sinne, Körper, Bewegung*. UTB, 2013 (siehe S. 11).
- [48] William R Sherman und Alan B Craig. *Understanding virtual reality: Interface, application, and design*. Elsevier, 2002 (siehe S. 13).

- [49] Zang-Hee Cho, Joie P. Jones & Manbir Singh. *Foundations of Medical Imaging*. A Wiley-Interscience publication, 1993 (siehe S. 4, 5).
- [50] Mel Slater u. a. „Immersion, presence, and performance in virtual environments: An experiment with tri-dimensional chess“. In: *ACM virtual reality software and technology (VRST)*. Citeseer. 1996, S. 163–172 (siehe S. 14, 27).
- [51] Hyunyoung Song u. a. „Grips and gestures on a multi-touch pen“. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*. 2011, S. 1323–1332 (siehe S. 28).
- [52] Ivan E Sutherland. „A head-mounted three dimensional display“. In: *Proceedings of the December 9-11, 1968, fall joint computer conference, part I*. ACM. 1968, S. 757–764 (siehe S. 14).
- [53] Ivan E. Sutherland. „The Ultimate Display“. In: *Proceedings of the IFIP Congress*. 1965, S. 506–508 (siehe S. 13).
- [54] Andries Van Dam. „Post-WIMP user interfaces“. In: *Communications of the ACM* 40.2 (1997), S. 63–67 (siehe S. 18–20).
- [55] Leonard Wanger. „The effect of shadow quality on the perception of spatial relationships in computer generated imagery“. In: *Proceedings of the symposium on Interactive 3D graphics*. ACM. 1992, S. 39–42 (siehe S. 12, 28).
- [56] Daniel Wigdor und Dennis Wixon. *Brave NUI world: designing natural user interfaces for touch and gesture*. Elsevier, 2011 (siehe S. 15, 26).
- [57] Curtis Wilkes und Doug A Bowman. „Advantages of velocity-based scaling for distant 3D manipulation“. In: *Proceedings of the 2008 ACM symposium on Virtual reality software and technology*. 2008, S. 23–29 (siehe S. 22).
- [58] Chadwick A Wingrave u. a. „Exploring individual differences in raybased selection: strategies and traits“. In: *Virtual Reality, 2005. Proceedings. VR 2005. IEEE*. 2005, S. 163–170 (siehe S. 20).
- [59] Bob G Witmer und Michael J Singer. „Measuring presence in virtual environments: A presence questionnaire“. In: *Presence: Teleoperators and virtual environments* 7.3 (1998), S. 225–240 (siehe S. 45).
- [60] Thomas G Zimmerman u. a. „A hand gesture interface device“. In: *ACM SIGCHI Bulletin*. Bd. 18. 4. 1987, S. 189–192 (siehe S. 14, 15).

Online-Quellen

- [61] *About DICOM*. URL: <http://dicom.nema.org/Dicom/about-DICOM.html> (besucht am 18.01.2016) (siehe S. 6).

- [62] Jim Bauman. *Military applications of virtual reality*. URL: http://www.hitl.washington.edu/projects/knowledge_base/virtual-worlds/EVE/II.G.Military.html (besucht am 07.03.2016) (siehe S. 18).
- [63] *DICOM PS3.1 2015c - Introduction and Overview*. URL: <http://dicom.nema.org/medical/dicom/current/output/pdf/part01.pdf> (besucht am 18.01.2016) (siehe S. 6).
- [64] Bibliographisches Institut GmbH. *Exploration, die*. URL: <http://www.duden.de/rechtschreibung/Exploration> (besucht am 21.01.2016) (siehe S. 7).
- [65] *MicroDicom*. URL: <http://www.microdicom.com/> (besucht am 18.01.2016) (siehe S. 6).
- [66] Jakob Nielsen. *Thinking Aloud: The #1 Usability Tool*. URL: <https://www.nngroup.com/articles/thinking-aloud-the-1-usability-tool/> (besucht am 25.02.2016) (siehe S. 42).
- [67] Jochen Prümper. *ISONORM 9241/110-S*. URL: http://www.usetree.de/wp-content/uploads/2015/09/Methode_Isonorm-Fragebogen.pdf (besucht am 22.02.2016) (siehe S. 45).
- [68] *Sensorische Reize: Die fünf Basissinne*. URL: <http://corporate-senses.com/sensorische-reize/> (besucht am 09.03.2016) (siehe S. 9).
- [69] Roni Zaharia. *DICOM is Easy - Chapter 3: DICOM Elements*. URL: <http://dicomiseasy.blogspot.de/2011/11/introduction-to-dicom-chapter-iii-dicom.html> (besucht am 19.01.2016) (siehe S. 6).

Anhang A

Quellcodeausschnitte

```
1 // Auslesen einer axialen Schicht
2 public ushort[] getAxialSlice(int sliceIndex) {
3
4     // Bestimmung der Byte-Anzahl und Anlegen des Bildarrays
5     var imageBytes = width * height * 2;
6     ushort[] slice = new ushort[imageBytes / 2];
7
8     // Positionsbestimmung und Kopieren der Schichtdaten
9     var offset = imageBytes * sliceIndex;
10    Buffer.BlockCopy(pixels, offset, slice, 0, imageBytes);
11
12    return slice;
13 }
```

```
1 // Auslesen einer coronalen Schicht
2 public ushort[] getCoronalSlice(int sliceIndex) {
3
4     // Bestimmung der Byte-Anzahl und Anlegen des Bildarrays
5     var imageBytes = width * frames * 2;
6     ushort[] slice = new ushort[imageBytes / 2];
7
8     // Bestimmungen der Verschiebungen
9     var sliceOffset = width * sliceIndex * 2;
10    var rowOffset = width * height * 2;
11
12    // Kopieren einzelner Datenreihen
13    var i_ = frames - 1;
14    for(var i = 0; i < frames; i++, i_--) {
15        Buffer.BlockCopy( pixels, sliceOffset + i * rowOffset,
```

```
16         slice, width * 2 * i_,
17         width * 2);
18     }
19
20     return slice;
21 }
```

```
1 // Auslesen einer sagittalen Schicht
2 public ushort[] getSagittalSlice(int sliceIndex) {
3
4     // Bestimmung der Byte/Pixel-Anzahl und Anlegen des Bildarrays
5     var imagePixels = height * frames;
6     var imageBytes = imagePixels * 2;
7     var orthogonalImagePixels = width * height;
8     ushort[] slice = new ushort[imagePixels];
9
10    // Kopieren einzelner Pixel
11    var index = imagePixels - 1;
12    for (var d = 0; d < frames; d++) {
13        for (var h = 0; h < height; h++) {
14            slice[index--] = pixels[sliceIndex + h * width + d *
15                orthogonalImagePixels];
16        }
17    }
18    return slice;
19 }
```

Anhang B

Material zur Nutzerstudie

Dieser Anhang beinhaltet folgende Elemente:

- Aufgabenblatt zur Nutzerstudie
- Evaluationbogen zur Nutzerstudie

Aufgabenblatt

- Exploration medizinischer Daten in der virtuellen Realität -

Vorbereitung: Machen Sie sich mit den **virtuellen Gegebenheiten** und den vorhandenen **Interaktionsmöglichkeiten** vertraut. Detaillierte Informationen erhalten Sie vom Versuchsleiter.

Aufgabe 1: In dem Objekt werden nach und nach **gelbe Kugeln** auftauchen. Ihre Aufgabe besteht darin, diese anzuklicken. Jeder Klick zerstört die jeweilige Kugel und generiert gleichzeitig eine Neue an einer anderen Position. Die Aufgabe endet wenn **insgesamt 15 Kugeln** angeklickt wurden.

Aufgabe 2: In dem Objekt werden nun **zwei gelbe Kugeln** dargestellt. Ermitteln Sie den **kürzesten Abstand** der beiden Kugeln zueinander. Sind Sie mit Ihrer Messung zufrieden, teilen Sie dies dem Versuchsleiter mit, um fortzufahren. Insgesamt müssen Sie **5 Kugelpaare** vermessen.

Aufgabe 3: In dem Objekt werden jetzt **zwei gelbe Kugeln** und **eine rote Kugel** dargestellt. Ermitteln Sie den **Winkel** zwischen diesen Punkten, wobei die rote Kugel den Scheitelpunkt repräsentiert. Sind Sie mit Ihrer Messung zufrieden, teilen Sie dies dem Versuchsleiter mit, um fortzufahren. Insgesamt müssen **3 Winkel** vermessen werden.

Aufgabe 4: In der letzten Aufgabe werden alle vorherigen Anforderungen, d. h. **Selektion, Vermessung von Distanzen** und **Winkeln**, noch einmal kombiniert abgefragt. Im vorliegenden Datensatz werden nacheinander **gelbe** bzw. **rote Kugeln** erscheinen. Finden Sie die Kugeln in einem Schichtbild des **grün hervorgehobenen Segments** und reagieren Sie entsprechend. Insgesamt gilt es **15 Aufgaben** zu erfüllen.

Die Software...	-3	-2	-1	0	1	2	3	Die Software...
Aufgabenangemessenheit								
bietet nicht alle Funktionen, um die anfallenden Aufgaben effizient zu bewältigen.	<input type="checkbox"/>	bietet alle Funktionen, die anfallenden Aufgaben effizient zu bewältigen.						
erfordert überflüssige Eingaben.	<input type="checkbox"/>	erfordert keine überflüssigen Eingaben.						
ist schlecht auf die Anforderungen der Arbeit zugeschnitten.	<input type="checkbox"/>	ist gut auf die Anforderungen der Arbeit zugeschnitten.						
Selbstbeschreibungsfähigkeit								
liefert in unzureichendem Maße Informationen darüber, welche Eingaben zulässig oder nötig sind.	<input type="checkbox"/>	liefert in zureichendem Maße Informationen darüber, welche Eingaben zulässig oder nötig sind.						
bietet auf Verlangen keine situationsspezifischen Erklärungen, die konkret weiterhelfen.	<input type="checkbox"/>	bietet auf Verlangen situationsspezifische Erklärungen, die konkret weiterhelfen.						
bietet von sich aus keine situationsspezifischen Erklärungen, die konkret weiterhelfen.	<input type="checkbox"/>	bietet von sich aus situationsspezifische Erklärungen, die konkret weiterhelfen.						
Steuerbarkeit								
erzwingt eine unnötig starre Einhaltung von Bearbeitungsschritten.	<input type="checkbox"/>	erzwingt keine unnötig starre Einhaltung von Bearbeitungsschritten.						
ermöglicht keinen leichten Wechsel zwischen einzelnen Menüs oder Masken.	<input type="checkbox"/>	ermöglicht einen leichten Wechsel zwischen einzelnen Menüs oder Masken.						
erzwingt unnötige Unterbrechungen der Arbeit.	<input type="checkbox"/>	erzwingt keine unnötigen Unterbrechungen der Arbeit.						
Erwartungskonformität								
erschwert die Orientierung, durch eine uneinheitliche Gestaltung.	<input type="checkbox"/>	erleichtert die Orientierung, durch eine einheitliche Gestaltung.						

Die Software...	-3	-2	-1	0	1	2	3	Die Software...
informiert in unzureichendem Maße über das, was sie gerade macht.	<input type="checkbox"/>	informiert in ausreichendem Maße über das, was sie gerade macht.						
lässt sich nicht durchgehend nach einem einheitlichen Prinzip bedienen.	<input type="checkbox"/>	lässt sich durchgehend nach einem einheitlichen Prinzip bedienen.						
Fehlertoleranz								
liefert schlecht verständliche Fehlermeldungen.	<input type="checkbox"/>	liefert gut verständliche Fehlermeldungen.						
erfordert bei Fehlern im großen und ganzen einen hohen Korrekturaufwand.	<input type="checkbox"/>	erfordert bei Fehlern im großen und ganzen einen geringen Korrekturaufwand.						
gibt keine konkreten Hinweise zur Fehlerbehebung.	<input type="checkbox"/>	gibt konkrete Hinweise zur Fehlerbehebung.						
Lernförderlichkeit								
erfordert viel Zeit zum Erlernen.	<input type="checkbox"/>	erfordert wenig Zeit zum Erlernen.						
erfordert, dass man sich viele Details merken muss.	<input type="checkbox"/>	erfordert nicht, dass man sich viele Details merken muss.						
ist schlecht ohne fremde Hilfe oder Handbuch erlernbar.	<input type="checkbox"/>	ist gut ohne fremde Hilfe oder Handbuch erlernbar.						

Weitere Bemerkungen:

.....

.....

.....

.....

.....

Vielen Dank für Ihre Teilnahme an der Studie!

Anhang C

Inhalt der DVD

- Stammverzeichnis
 - ├─ □ Masterarbeit_digital.pdf
 - ├─ □ Masterarbeit_druck.pdf
 - Masterarbeit im PDF-Format (Keine Färbung der Dokumentreferenzen in der Druckversion)*
 - ├─ □ LaTeX
 - Masterarbeit im LaTeX-Format*
 - ├─ □ DICOMtoUnity
 - Projektdateien zum Framework DICOMtoUnity*
 - └─ □ MedExVR
 - Projektdateien zum Unity-Prototypen*

- Datei
- Verzeichnis

Anhang D

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre eidesstattlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße Zitate entsprechend kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Magdeburg, 4. Mai 2016

Johannes Patzschke

