



OTTO VON GUERICKE
UNIVERSITÄT
MAGDEBURG

INF

FAKULTÄT FÜR
INFORMATIK

Institut für Simulation und Grafik

Abschlussarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (M.Sc.)

Verwendbarkeit von myoelektrischer Gestensteuerung im Operationssaal

Vorgelegt von	Julian Hettig
Matrikelnummer	202325
am	11. Mai 2015
Erstgutachter	Jun.-Prof. Dr. Christian Hansen
Zweitgutachter	Prof. Dr. Bernhard Preim
Betreuer	André Mewes (M. Sc.)

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Stellen sind als solche kenntlich gemacht. Alle Bilder und Skizzen wurden selbst erstellt und nicht aus anderen Quellen entnommen.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und auch nicht veröffentlicht.

Magdeburg, den 11. Mai 2015

(Julian Hettig)

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Zielsetzung	4
1.2	Aufbau der Arbeit	5
2	Grundlagen und Stand der Technik	7
2.1	Mensch-Maschine-Interaktion	7
2.2	Gestische Benutzerschnittstellen	9
2.3	Muskulatur des Unterarms	11
2.4	Medizinische Eingabegeräte	12
2.4.1	Mechanische Schalter an medizinischen Geräten	12
2.4.2	Myoelektrische Eingabegeräte	13
2.4.3	Kamera-basierte Eingabegeräte	18
2.4.4	Touchscreens	19
2.5	Vergleich von Studien zu berührungslosen Bildnavigationssystemen	20
2.6	Diskussion	21
3	Anforderungsanalyse	25
3.1	Klinische Anforderungen	25
3.1.1	Arbeitsablauf und Analyse	27
3.1.2	Anforderungen an ein System zur Interaktion mit medizinischen Bilddaten	31
3.2	Technische Anforderungen	32
3.2.1	Einheitliche Schnittstelle für unterschiedliche Eingabegeräte	33
3.2.2	Kriterien für eine klinische Software	34
3.2.3	Natürliche und berührungslose Interaktion	35
3.2.4	Analyse des Myo-Armbands	36
3.3	Kriterienkatalog	36
3.4	Diskussion	38

4	Konzeption und Umsetzung	39
4.1	Entwicklungswerkzeuge	39
4.1.1	User-Centered-Design Prozess	40
4.1.2	Myo-Armband Software Development Kit	40
4.2	Hardwareschnittstelle	41
4.2.1	Beschreibung der Hardwarechnittstelle	41
4.2.2	Implementierung der Hardwarechnittstelle	43
4.3	Datenanalyse und -logger	43
4.4	Gesten und Funktionen	44
4.4.1	Gesten des Myo-Armbands	45
4.4.2	Abbildung von Gesten auf deren Funktion	46
4.5	Visual Interaction Application	47
5	Evaluation	49
5.1	Hypothesen	49
5.2	Beschreibung der Benutzungsstudien	50
5.2.1	Funktionsstudie	50
5.2.2	Interaktionsstudie	52
5.3	Auswertungen und Ergebnisse	53
5.3.1	Funktionsstudie	54
5.3.2	Interaktionsstudie	58
5.3.3	Klinischer Test	61
5.4	Beurteilung des Systems durch einen Arzt	64
5.5	Diskussion	65
6	Zusammenfassung und Ausblick	69
6.1	Ausblick	70
A	Anhang A: Fragebögen	73
A.1	Funktionsstudie	73
A.1.1	Demographische Fragen	73
A.1.2	Erfahrung in folgenden Bereichen	73
A.1.3	Tragekomfort des Myo-Armbands	74
A.2	Interaktionsstudie	74
A.2.1	Demographische Fragen	74
A.2.2	Häufigkeit der Benutzung	74

A.2.3 Bewertung der einzelnen Gesten	75
B Anhang B: Aufgaben der Evaluation	77
C Anhang C: Beschreibung der Unterarmmuskulatur	81
Abbildungsverzeichnis	89
Literaturverzeichnis	91

Kurzfassung

Die Mensch-Maschine-Interaktion mit medizinischen Bilddaten in einer sterilen Umgebung stellt eine herausfordernde Aufgabe dar, welche oft an einen Assistenten weitergeleitet oder direkt vom Operateur ausgeführt wird. Die Geräte im Operationssaal sind dabei in sterile Plastikfolie eingehüllt, wodurch dieser Prozess behindert wird und in zeitaufwändigen und ineffizienten Arbeitsschritten enden kann. Um dieses Problem zu adressieren, wird in dieser Arbeit ein medizinischer Bildbetrachter vorgestellt, welcher vollständig und berührungslos mit einem myoelektrischen Armband (Myo-Armband Thalmic Inc.) zur Gestensteuerung bedient wird. Entworfen wurde dieses System auf Basis eines vierstufigen Benutzer-zentrierten Entwicklungsprozesses, der ausgehend von einer klinischen und technischen Analyse Anforderungen definiert. Diese fungieren als Basis für die Konzeption und Entwicklung einer Anwendung, die parallel und abschließend evaluiert wurde. Zur Umsetzung werden eine Schnittstelle zur Anbindung unterschiedlicher Eingabegeräte und ein minimales Gestenalphabet präsentiert, um grundlegende Navigations-Funktionen mit radiologischen Bilddaten und 3D-Planungsmodellen auszuführen. Zwei quantitative Benutzungsstudien dienen der Evaluation des Armbands, dem vorgestellten Gestenalphabet und der klinischen Verwendbarkeit. Die Ergebnisse dieser Evaluation belegen die Anwendbarkeit des vorgestellten Systems und liefern wichtige Aspekte für zukünftige Forschungsarbeiten im Bereich Mensch-Maschine Interaktion Computer-assistierter Anwendungen.

1 Einleitung

Die direkte Interaktion mit radiologischen Bilddaten und 3D-Planungsmodellen in einer sterilen Umgebung wie einem Operationssaal (OP) ist eine herausfordernde Aufgabe für den operierenden Arzt. Steuereinheiten zur Kontrolle von Operationstisch oder Bildnavigation und Monitore sind in transparente Plastikfolie eingehüllt und erschweren dadurch die Interaktion. Eine oft angewandte Alternative ist das Delegieren der Aufgabe an einen Assistenten im OP oder in einem nicht-sterilen benachbarten Kontrollraum (indirekte Interaktion). Bei komplexen Situationen muss der Chirurg mitunter den sterilen Bereich des OPs verlassen, um sich selbst vor dem Computer einen Überblick zu verschaffen. Dabei können Missverständnisse bei der Kommunikation sowie unnötige Wege durch das Verlassen des OPs entstehen, welche in zeitaufwändigen und ineffizienten Arbeitsschritten enden [1, 2]. Die direkte Interaktion mittels Maus und Tastatur ist keine Option, da diese Eingabegeräte einen zusätzlichen Keimherd darstellen [3, 4].

Bereits Anfang der 1990er Jahre sind erste Konzepte zur berührungslosen Steuerung von medizinischen Entscheidungssystemen entworfen worden [5]. Diese Systeme bestanden aus einem kleinen tragbaren Computer, dessen Daten auf einem Head-Mounted Display (HMD) angezeigt und mit Spracheingabe gesteuert wurden. Seit dieser Zeit sind in vielen Bereichen technische Fortschritte entstanden, sodass ein solches Konzept verwirklicht werden konnte [6].

Das Fundament dieser Entwicklung liegt in der Multimediaindustrie, die Geräte wie Smartphones, moderne HMDs, verschiedene Spezialekameras (z. B. Tiefen- und hochauflösende Kameras) und unterschiedlichste Eingabegeräte bereitstellt, um neue Schnittstellen zwischen Mensch und Computer (engl. Human-Computer Interaction (HCI)) zu schaffen. Parallel zu dieser Entwicklung hat in den letzten Jahren ein Paradigmenwechsel begonnen, der bestehende Prinzipien wie Windows-Icons-Menus-Pointer (WIMP) durch neue, natürliche Nutzerschnittstellen (engl. Natural User Interface

(NUI)) zu ergänzen oder gar zu ersetzen versucht [7]. Im Bereich Medizin befassen sich Forschungsgruppen mit Computer-assistierter Chirurgie (CAS) und erforschen unter anderem die Interaktion zwischen Chirurgen und Computern. Eines der gesetzten Ziele dabei ist die Optimierung und Verbesserung bestehender sowie die Entwicklung neuer Interaktionsräume.

1.1 Zielsetzung

In dieser Arbeit wird der Umgang mit intraoperativen Bild- und Planungsdaten während einer neuroradiologischen Intervention genauer untersucht. Darüber hinaus werden neue Konzepte zur berührungslosen Interaktion entwickelt, welche die alten, berührungintensiven Konzepte bzw. die indirekte Interaktion mit Hilfe eines Assistenten ersetzen. Dabei spielen an dieser Stelle Eingabegeräte zur Gestensteuerung eine bedeutende Rolle, da diese eine natürliche, gestische Schnittstelle bieten und gleichzeitig keinen zusätzlichen Keimherd darstellen.

Zur Lösung dieser Problematik wurden mehrere Kamera-basierte Systeme vorgestellt [8, 9, 10, 11, 12, 13, 14], die mittels Bildanalyse eine berührungslose, gestische Schnittstelle zwischen Chirurg und Computer ermöglichen. Diese weisen jedoch Einschränkungen auf, z. B. in Bezug auf Verdeckung der Sichtlinie (Bereich zwischen Kamera und Chirurg) und der damit verbundenen schlechteren oder nicht vorhandenen Gestenerkennung. Zudem muss dem Nutzer das Interaktionsvolumen (Volumen in dem die Gesten als solche erkannt werden) als Arbeitsraum bekannt sein.

Ziel dieser Arbeit ist es, den oben beschriebenen Problemen anderer Systeme entgegen zu wirken und eine Alternative mittels einer myoelektrischer Gestensteuerung zu präsentieren. Dazu wird eine Anwendung vorgestellt, die vollständig mit einem neuartigen myoelektrischen Armband (Myo-Armband Thalmic Inc. [15]) und einem minimalen Gestenalphabet gesteuert wird. Der Vorteil des Myo-Armbands, im Vergleich zu Kamera-basierten Systemen, besteht Dank der genutzten Bluetooth-Technologie in einem größeren Interaktionsraum im OP, ohne Probleme mit der Sichtlinie oder der Positionierung der Kameras. Zusätzlich wird ein steriles Umfeld erhalten, da sich das Armband vollständig unter der sterilen Kleidung des Chirurgen befindet.

Für die Umsetzung wird ein vierstufiger nutzerorientierter Entwicklungsprozess genutzt, der ausgehend von einer Analyse der Ausgangssituation verschiedene Anforderungen an eine Anwendung definiert. Basierend auf diesen, wird ein Konzept zur Gestensteuerung erarbeitet und eine prototypische Software entwickelt, welche abschließend einer Evaluation unterzogen wird.

1.2 Aufbau der Arbeit

Auf Basis der beschriebenen Zielsetzung gestaltet sich der Aufbau der Arbeit wie folgt: In **Kapitel 2** werden allgemeine Grundlagen zur Mensch-Maschine-Interaktion und speziell für den medizinischen Bereich beschrieben, gefolgt von einer Erläuterung und Definition gestischer Benutzerschnittstellen. Zum Verständnis der genutzten myoelektrischen Gestensteuerung wird die Unterarmmuskulatur und deren Wirkungsweise erklärt. Weiter umfasst dieses Kapitel eine Übersicht zum Stand der Technik im OP und verschiedener alternativer Eingabegeräte, die für medizinische Anwendung genutzt werden oder genutzt werden könnten.

In **Kapitel 3** wird die in dieser Arbeit durchgeführte Anforderungsanalyse beschrieben. Diese dient der Definition von Rahmenbedingungen, welche für medizinische Anwendungen zu beachten sind. Dabei werden die klinischen Anforderungen bezüglich Arbeitsabläufen und Bildnavigation im OP sowie die technischen Anforderungen an eine einheitliche Schnittstelle und klinische Software genauer betrachtet. Letztere dienen als Entwurfsgrundlage für die Konzeption und Implementierung einer passenden Hardwareschnittstelle. Zudem werden Evaluationskriterien bzgl. der Anforderungen an eine Anwendung aufgestellt, die in zwei Benutzungsstudien überprüft wurden.

Kapitel 4 beschreibt den Entwurf und die Implementierung einer Hardwareschnittstelle zur Anbindung unterschiedlicher Eingabegeräte. Darauf folgen die Vorstellung eines minimalen Gestenalphabets und die damit zusammenhängende Abbildung der einzelnen Gesten mit ihren entsprechenden Funktionen. Zusammengefügt werden diese beiden Komponenten in einer Anwendung zur Darstellung von medizinischen Bild- und 3D-Planungsmodellen, welche als Forschungswerkzeug für den Vergleich unterschiedlicher Eingabegeräte und Interaktionsarten dient.

Eine Beschreibung der aufgestellten Hypothesen zur Verwendbarkeit der Anwendung und des Myo-Armbands im medizinischen Kontext ist in **Kapitel 5** erläutert. Ausgehend von den aufgestellten Evaluationskriterien wurden zwei quantitative Benutzungsstudien entwickelt und durchgeführt. Diese werden mit Aufbau, Durchführung sowie Auswertung beschrieben und diskutiert. Zusätzlich wurde ein klinischer Test am Institut für Neuroradiologie der Universitätsklinik Magdeburg durchgeführt, bei dem das Myo-Armband während drei Interventionen getragen wurde, um den direkten Einsatz im OP zu evaluieren.

Den Abschluss der Arbeit bildet **Kapitel 6** mit einer Zusammenfassung der gewonnenen Kenntnisse zur Verwendung myoelektrischer Gestensteuerung im OP und einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten.

2 Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel befasst sich mit den Grundlagen, welche für das Verständnis dieser Arbeit notwendig sind. Im ersten Abschnitt wird der Begriff Mensch-Maschine-Schnittstelle eingeführt. Im Anschluss daran folgen eine Erläuterung zu gestischen Benutzerschnittstellen sowie eine Definition von Gesten. Daraufhin wird in Abschnitt 2.3 die Muskulatur des Unterarms erläutert, die für den myoelektrischen Prozess und die Elektromyographie (EMG) der genutzten Gesten wichtig ist. In Abschnitt 2.4 ist eine Übersicht zu verschiedenen Eingabegeräte zur berührungslosen Interaktion im Operationssaal und deren Technik gegeben. Dabei liegt der Fokus auf dem Myo-Armband als myoelektrisches Eingabegerät zur Gestensteuerung. Zusammenhängend mit diesen Eingabegeräten, werden verschiedene verwandte Arbeiten gezeigt, welche die Bereiche berührungslose, alternative Interaktion mit medizinischen Bildsystemen und myoelektrische Gestensteuerung behandeln. Anschließend befasst sich Abschnitt 2.5 ausführlicher mit Studien zur berührungslosen Interaktion anderer Systeme. Abgeschlossen wird dieses Kapitel mit einer Diskussion der einzelnen Techniken, Geräte und verwandten Arbeiten.

2.1 Mensch-Maschine-Interaktion

Den Anfang der Schnittstellen mit denen Menschen und Maschinen interagieren machten gegen Ende des 19. Jahrhunderts mechanische Schalter und Lochkarten, mit denen die ersten Maschinen programmiert wurden. Eine Weiterentwicklung war die Kommandozeile, die eine Eingabe über Tastatur an Terminals erlaubte. Heutzutage werden die meisten handelsüblichen PCs mit Maus oder Tastatur gesteuert, was zunehmend durch Geräte, wie Touchscreens, erweitert wird. Diese technische Entwicklung bietet

nun die Möglichkeit, einen Schritt weiter zu gehen und andere Schnittstellen zur Interaktion zu schaffen. Ein bis dato weit verbreitetes Prinzip ist das sogenannte WIMP, welches ein Akronym für die englischen Begriffe Window, Icon, Menu und Pointer darstellt. Dabei wird die Interaktion bzw. ein Bedienkonzept für eine grafische Benutzeroberfläche (engl. Graphical User Interface (GUI)) beschrieben. Die entsprechenden Programme in Fenstern (Window) aufgebaut und besitzen Symbole (Icon), welche Funktionen beschreiben. Menüs (Menu) bieten eine zusätzliche Auswahl von Funktionen und die Interaktion mit der mit der Benutzeroberfläche wird mit Zeigern (Pointer) realisiert[7].

Durch die Verfügbarkeit von neuen Techniken und Eingabegeräten ist mit natürlichen Benutzerschnittstellen (NUI) ein neues Bedienkonzept eingeführt worden, das dem Nutzer eine andere, natürliche Interaktion mit einem Computer erlaubt, welche speziell auf einen einzigen Arbeitsablauf, eine Funktion oder eine Anwendung angepasst sind. Hierbei geht es primär um eine einfache und natürliche Interaktion, welche die Grenzen (z. B. begrenzter Interaktionsraum) eines Nutzers reduzieren sowie seine Möglichkeiten verstärken soll. Der Begriff **natürlich** ist hierbei genauer zu betrachten, da dieser je nach Zusammenhang falsch verstanden werden kann. Laut Wigdor und Wixon 2011 [7] ist er nicht als Imitation der realen Welt zu verstehen, sondern vielmehr als Erfahrung die für einen Nutzer generiert wird. Die daraus entstehenden Technologien sollen die bereits vorhandenen Fähigkeit des Menschen besser nutzen, den Pfad vom Laien zum Experten optimieren und bezüglich eines speziellen Aufgabenkontextes allen Bedürfnissen nachkommen. Dabei soll ein sofortiges Erfolgserlebnis eintreten und nicht erst eine zeitaufwändige Übungsphase durchlaufen werden [7].

Ein weiteres Konzept der Post-WIMP Schnittstellen wurde von Jacob et al. 2008 [16] als sogenannte Realitäts-basierte Interaktion (engl. Reality-Based Interaction (RBI)) vorgestellt. Neue Interaktionsstile werden auf Basis des vorhandenen Wissens der realen, nicht digitalen Welt entwickelt. Dabei wird Nutzen aus dem Verständnis der einfachen Physik (Reibung, Gravitation oder Geschwindigkeit), dem eigenen Körper (Position der Extremitäten), der Umwelt (Objekte und Entfernungen) und anderer Menschen (soziale Fähigkeiten) gezogen.

Mensch-Maschine-Interaktion in sterilen Umgebungen

In Bezug auf die Interaktion mit Computern in sterilen Umgebungen, wie es in einem OP der Fall ist, kann WIMP nicht einfach genutzt werden, da durch übliche Eingabegeräte wie Maus und Tastatur ein zusätzlicher Keimherd entstünde [3, 4]. Daher ist bei der direkten Steuerung eines Angiographiesystems (durch den interventionellen Radiologen) von Operationstisch, Bildgebung und Bildinteraktion ein technischer Rücksprung zu sehen, da weiterhin Schaltpulte (vgl. Abschnitt 2.4.1) mit elektrischen Schaltern, Hebeln, kleinen Touchscreens und Fußpedalen zur Einstellung von Geräteparametern eingesetzt werden. Diese sind in sterile Plastikfolie eingehüllt, wodurch unter Umständen der Zugang und die Bedienung erschwert wird [1]. Jedem einzelnen Modul sind hierbei spezielle Funktionen zugewiesen, welche die Interaktion für oft genutzte Funktionalitäten wie beispielsweise das Bewegen des Tisches erleichtern und im Gegensatz dazu, müssen selten genutzte Funktionen erst gesucht werden.

2.2 Gestische Benutzerschnittstellen

Gesten begleiten einen großen Teil der täglichen zwischenmenschlichen Kommunikation, indem sie zur Unterstützung von Sprache, dem Veranschaulichen von Handlungen, der Beschreibung von Größen oder als alleinstehendes Kommunikationsmittel dienen. Eine Klassifikation solcher gestischen Handbewegungen wurde von Marcel 2002 [17] vorgestellt. Dabei sind die Gesten anhand ihrer Ausdrucksstärke von **Kommandogesten**, über **sprachbegleitende Gesten** bis hin zu Gesten der **Gebärdensprache** unterteilt. Eine weitere Einteilung der Gesten kann laut Wagner et al. 2014 [18] über die Anatomie, folglich die Hand- bzw. Armbewegung erfolgen. Diese kontinuierliche Bewegung lässt sich in folgende diskrete Phasen einteilen und klassifizieren:

- **Ruheposition:** Stabile Position, aus der die Geste begonnen wird.
- **Vorbereitungsphase:** Phase, in welcher eine Bewegung von der Ruhephase weg vorgenommen wird.
- **Gestenbewegung:** Bewegung, die den höchsten Aufwand erfordert, kommunikativ ist und die Information enthält.
- **Halten:** Bewegungslose Phase vor oder nach der Gestenbewegung.

- **Rücknahme- und Erholungsphase:** Bewegung der Hände zurück in die Ruheposition, entfällt bei aufeinanderfolgenden Gesten.

Eine solche Einteilung spielt bei der menschlichen und besonders bei der technischen Erkennung von Gesten eine große Rolle. Auf Basis von Gesten wird seit einigen Jahren an neuen Schnittstellen (NUIs) geforscht, um Computer mit Hand-, Arm- oder Körperbewegungen zu steuern. Dabei sind nach Preim und Dachsel 2015 [19] folgende drei Definitionen für die Beschreibung von Gesten und Konzepten von Bedeutung:

1. Eine **Geste** ist die Bewegung von Händen und Armen – ggf. auch weiterer Körperteile, wie Kopf, Augen und Lippen – aufgrund einer kommunikativen Absicht. Damit enthält die Bewegung als solche signifikante Informationen, die an den Computer übermittelt werden.
2. **Gesten-Schnittstellen** sind Benutzungsschnittstellen, die Menschen das Interagieren mit Computern durch Bewegung ihres Körpers erlauben.
3. Ein **Gestenalphabet** ist eine Menge von konfliktfreien, unterscheidbaren und erlernbaren Gesten, mit denen eine überschaubare Menge an Funktionen für eine bestimmte Applikation, Anwendungsdomäne oder anwendungsübergreifend für ein bestimmtes Betriebssystem aktiviert werden kann.

Neben diesen Definitionen und Klassifikationen von Gesten wurden von Quek et al. 2002 [20] sowie Karam und Schraefel 2005 [21] eine **Taxonomie von Gesten** für Mensch-Computer-Interaktion entworfen, die wiederum verschiedene Typen von Gesten umfasst:

- **Deiktische Gesten:** Zeige- und Verweisgesten, die zur Selektion von Objekten genutzt werden können.
- **Manipulative Gesten:** Steuerung und Veränderung von Objekten, wobei eine direkte Bindung zwischen Bewegung und Manipulation vorhanden sein muss.
- **Symbolische Gesten:** Auslösung eines Befehls oder Modulwechsels mittels Symbol/Zeichen; diese können statisch oder dynamisch sein.
- **Gebärdensprache:** Sequenz von symbolischen Gesten, die keine Funktion auslösen sondern als eigene Sprache dienen.
- **Sprachbegleitende Gesten:** Gestik, die das gesprochene Wort unterstützt.

Neben all diesen Klassifikationen ist die Gestenform ein weiteres Unterscheidungsmerkmal. Darunter fallen Finger-, Freihand-, Geräte-, Kopf-, Gesichts-, Augen-, Fuß- und Körpergesten. Je nach Anwendungsfall und Interaktionsart kann aus diesen Formen ein passendes Gestenalphabet entwickelt werden. Abschließend sind noch die Vor- und Nachteile in Bezug auf gestische Interaktion mit Computern zu nennen. Positiv kann bei Gesten ein intuitiver Gebrauch, die Parallelität bei der Ausführung, die Kontaktlosigkeit und die Schnelligkeit bewertet werden. Hingegen sind die Sichtbarkeit, das Erlernen und Behalten, das fehlende Feedback, die fehlende Abgrenzung zu unbewussten Gesten, die Ermüdung sowie eine geringe Präzision und Komplexität negative Aspekte, die es zu berücksichtigen gilt [19].

Die in dieser Arbeit genutzten Handgesten sind in Bezug auf den intuitiven Gebrauch und die Kontaktlosigkeit gut geeignet. Eine detaillierte Betrachtung der einzelnen Gesten und entsprechenden Funktionen ist in Abschnitt 4.4 gegeben. Nachfolgend wird nun die Unterarmmuskulatur erläutert, welche durch Kontraktionen myoelektrische Signale erzeugt und dem Myo-Armband als Eingabe dienen.

2.3 Muskulatur des Unterarms

Der menschliche Unterarm besteht aus unterschiedlichen Arten von Muskelgruppen, welche für die Drehung, die Beugung und die Streckung des Arms sowie für die Hand- und Fingerbewegung zuständig sind. Daher ist die Unterarmmuskulatur, aufgrund der genutzten Handgesten (vgl. Abschnitt 4.4) in dieser Arbeit, von besonderem Interesse. Medizinisch gesehen kann die Unterarmmuskulatur nach Platzer 2009 [22] anhand ihrer Lage zu verschiedenen Gelenken, nach ihrem Ansatz und ihrer Funktion in drei Gruppen unterteilt werden:

1. Muskeln, die am Radius (Speiche) ansetzen und nur für Bewegungen der Unterarmknochen in Frage kommen.
2. Muskeln, die den Metacarpus (Mittelhand) erreichen und eine Bewegung der Handwurzel ermöglichen.
3. Muskeln, die bis zu den Phalangen (Fingerknochen) gelangen und für die Fingerbewegung verantwortlich sind.

In dieser Arbeit sind für die Erkennung der Muskelaktivitäten mit Hilfe eines Elektromyogramms (Abschnitt 2.4.2), zur Realisierung einer myoelektrische Gestensteuerung, die zweite und dritte Muskelgruppe von Interesse, da Hand- und Fingerbewegungen als Gesten genutzt werden.

Eine übersichtliche Erläuterung der Unterarmmuskulatur ist in Anhang C gegeben. Dazu sind die einzelnen Muskelstränge grafisch dargestellt und ihre Wirkung, in Bezug auf die genutzten Gesten (vgl. Abschnitt 4.4) beschrieben.

2.4 Medizinische Eingabegeräte

Dieser Abschnitt gibt eine Übersicht zu verschiedenen Techniken und Eingabegeräten, welche eine Alternative zu Maus und Tastatur bieten. Den Anfang macht das derzeit genutzte Schaltpult am Operationstisch eines Angiographiesystems für eine Durchleuchtungs-Intervention (digitale Subtraktionsangiographie (DSA)) in der Neuroradiologie. Danach liegt der Fokus auf myoelektrischen Eingabegeräten, speziell dem Myo-Armband, das in dieser Arbeit zur Interaktion genutzt wird. Abschließend folgen Kamera-basierte und Touchscreen-Systeme.

2.4.1 Mechanische Schalter an medizinischen Geräten

Medizinische Geräte in OPs besitzen zur Interaktion meist mechanische Schalter oder Fußpedale, mit denen die Steuerung durchgeführt wird. Zum Beispiel bei Ultraschallgeräten, Magnetresonanztomographie (MRT)-Geräten oder Angiographiesystemen. In Bezug auf **neuroradiologische Interventionen** wird nachfolgend letztgenanntes Angiographiesystem detailliert beschrieben.

Zur Steuerung eines Angiographiesystems mit Operationstisch, Bildgebung und Bildnavigation umfangreiche Schaltpulte verwendet, wie es in Abbildung 2.1 zu sehen ist. Diese bestehen aus unterschiedlichen Modulen mit Bedienknöpfen und Fußpedalen, um eine Interaktion mit der Anlage zu ermöglichen.

Jedes Modul kann variabel am Tisch angebracht werden, sodass eine gewünschte Konfiguration vorhanden ist. Die dargestellte Variante sieht wie folgt aus: Die Steuerung des Tisches (Höhe, Drehung, Neigung) befindet sich links mit **Joysticks**



Abbildung 2.1: Verschiedene Module des Schaltpults am Operationstisch eines Artis Q Angiographiesystems von Siemens [23], Institut für Neuroradiologie, Universitätsklinikum Magdeburg.

und **Knöpfen**. Die darauf folgenden drei Module sind für die Konfiguration des C-Arms notwendig, um die Position des Armes und Aufnahmefensters oder die passende Aufnahmesequenz einzustellen. Zwischen den Modulen befindet sich ein kleiner **Touchscreen-Monitor**, der weitere Optionen zur Verfügung stellt. Auf der rechten Seite befinden sich zwei große Joysticks, welche für die Bildnavigation gedacht sind. Ihre Funktionalität imitiert die einer normalen Computermaus. Die Auslösung der Bildaufnahme geschieht mit den **Fußpedalen**, die der behandelnde Arzt an seiner aktuellen Arbeitsposition frei auf dem Boden positionieren kann, um seinen Platz am Patienten nicht verlassen zu müssen.

2.4.2 Myoelektrische Eingabegeräte

Der Begriff Myoelektrik bezeichnet das elektrische Potential von Muskelzellen, welche durch biochemische Prozesse entsteht. Ausgelöst wird dieses Phänomen durch Entspannung und Kontraktion der Muskelfasern. Die entstehende Spannung liegt dabei im Mikrovoltbereich und kann zum Beispiel zur Ansteuerung von Armprothesen oder zur Erkennung von Muskelerkrankungen (Oskoei und Hu 2007 [24]) genutzt werden. Gemessen werden die elektrischen Signale mit der sogenannten Elektromyographie-Technik, welche nachfolgend genauer beschrieben werden.

Elektromyographie

Unter EMG ist die messtechnische Erfassung von Potentialschwankungen im Muskel zu verstehen (Mühlau 1990 [25]). Diese Messung schließt die Ableitung, Aufzeichnung und Auswertung von Muskelpotentialen mit ein. Unter medizinischen Gesichtspunkten

dient die EMG der Diagnostik von Funktionsstörungen der motorischen Einheiten, der Erkennung von Muskelerkrankungen und Erkrankungen des Nervensystems. Zudem können die gewonnenen Daten dazu genutzt werden, um myoelektrische Prothesen zu steuern.

Zur Messung stehen zwei Varianten zur Verfügung: Die erste, **invasive** Variante arbeitet mit feinen Nadelelektroden, die direkt in den Muskel gestochen werden und die Potentialänderungen einzelner Fasern messen können. Dies wird auch als Einzel-fasermiografie bezeichnet. Die zweite Variante hingegen ist **nicht-invasiv** und misst die Potentialänderungen auf der Haut mit einzelnen oder mehreren Oberflächenelektroden. Im Vergleich ist diese Methode unpräziser, da das Aktionspotential mehrerer Fasern, ganzer Muskeln oder Muskelgruppen gemessen wird [26].

Myoelektrische Eingabegeräte machen sich diese Technik zu nutzen. Primär wird jene Art der Eingabe zur Steuerung von Rollstühlen, Armprothesen, Griffkontrolle und klinischen Anwendungen zur Diagnose genutzt (Oskoei und Hu 2007 [24]). Andere Arbeiten befassen sich mit der Signalanalyse [27, 28, 29, 30] oder myoelektrischen Gestensteuerung eines Computers [31, 32]. Mit dem Myo-Armband, welches nachfolgend genauer betrachtet wird, könnte sich diese Forschung intensivieren, da ein solches Gerät kostengünstig erhältlich und keine aufwändigen Konfigurationen mit einzelnen Elektroden notwendig ist.

Myo-Armband

Das Myo-Armband (Abbildung 2.2) ist ein von der Firma Thalmic Labs Inc. [15] entwickeltes tragbares Elektromyogramm, welches in der Lage ist Handbewegungen aus der Kontraktion der Unterarmmuskulatur (siehe Abschnitt 2.3) abzuleiten. Das Armband besteht aus acht EMG-Sensoren (Medical Grade Stainless Steel EMG sensors [33]), die auf der Hautoberfläche die elektrischen Muskelaktivitäten messen. Zusätzlich sind Inertialsensoren (Highly sensitive nine-axis Inertial Measurement Unit (IMU) [33]) verbaut, welche einen 3-Achsen-Gyrometer, einen 3-Achsen-Beschleunigungsmesser und einen 3-Achsen-Magnetometer enthalten. Die erzeugten Signale werden direkt im Armband verarbeitet und anschließend via Bluetooth auf einen PC übertragen. Die gesendeten Datenpakete enthalten neben vordefinierten Gesten (siehe Gestenkatalog Abschnitt 4.4.1) auch die Rohdaten der EMG-Sensoren und können

mit Hilfe des bereitgestellten Software Development Kit (SDK) (Abschnitt 4.1) weiterverarbeitet werden [34].

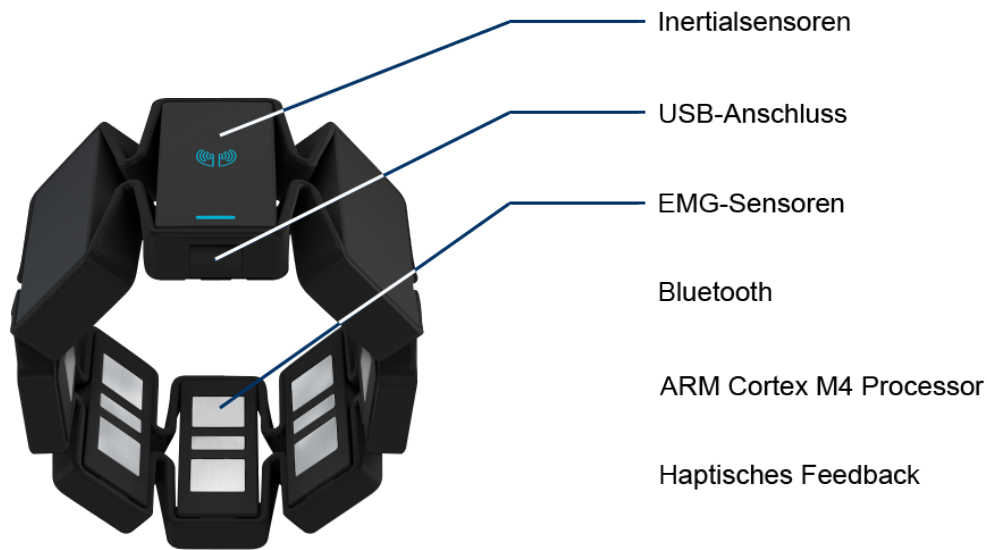


Abbildung 2.2: Das Myo-Armband von Thalmic Labs Inc. (Bildquelle: Thalmic Labs Inc. [15])

Verwandte Arbeiten zur myoelektrischen Gestensteuerung

Die Anwendungen im Bereich myoelektrische Gestensteuerung erstrecken sich von Signalanalyse, über Arm- und Handprothesen, bis hin zur eigentlichen Kontrolle eines Roboters oder einer Software. Eine umfangreiche Übersicht zu verschiedenen Forschungsbereichen für myoelektrisch gesteuerte Systeme wurde von Oskoei und Hu 2007 [24] vorgestellt. Sie zeigen, welcher Nutzen bei der Rehabilitation durch die Analyse von myoelektrischen Signalen entsteht. Weiter untersuchen sie unterschiedliche Verfahren zur Mustererkennung und die darauf basierende Steuerung mit myoelektrischen Signalen. Ein weiterer Bestandteil ihrer Arbeit ist die Übersicht zu den Anwendungsfeldern wie Prothesen- und Rollstuhlsteuerung, Griffkontrolle, Gesten-basierte Schnittstellen, der Diagnostik und klinische Anwendung.

Verschiedene Arbeiten zur Analyse myoelektrischer Signale mit Hilfe unterschiedlicher Modelle wurden von Chen et al. 2007 [29] (Bayes-Klassifikator), von Naik et al. 2010 (Unabhängigkeitsanalyse) [30] oder Samadani und Kulic 2014 [28] (Hidden Markov

Model) vorgestellt. Speziell Naik et al. präsentieren eine neue Technik, um dem Problem der Signalüberlagerung bei schwacher Muskelaktivität entgegen zu wirken, da bis dato vorhandene Verfahren unzuverlässig oder nicht nutzbar sind. Ihr Vorschlag untersucht die myoelektrischen Signale mittels Unabhängigkeitsanalyse (engl. Independent Component Analysis (ICA)). Basierend auf Blind Source Separation (BSS) zur Klassifikation, ist ihr Verfahren in der Lage, kleinste Muskelaktivitäten (siehe Abbildung 2.3) zu erkennen und zu klassifizieren. Ihre Ergebnisse zeigen, dass selbst eine Muskelaktivität von 20% des Maximum Voluntary Contraction (MVC), was der maximalen Kraft eines angespannten Muskels entspricht, ausreicht, um mit Hilfe ihres Verfahrens die entsprechende Fingerbewegung zu erkennen.



(a) Versuchsaufbau (b) Bewegung des Mittelfingers (c) Bewegung des Ringfingers (d) Bewegung des kleinen Fingers

Abbildung 2.3: Aufbau und Fingerbewegung der MVC-Studie. (Quelle: [30])

Eine der ersten Arbeiten in Bezug auf myoelektrische Gestensteuerung wurde von Wheeler 2003 [31] vorgestellt. Darin werden zwei Neuro-elektrische Schnittstellen zur virtuellen Gerätesteuerung präsentiert. Beide basieren auf den Daten eines Elektromyogramms, welche vom Unterarm des Nutzers aufgenommen und verarbeitet werden. Mittels mustererkennendem Algorithmus ist die entwickelte Software in der Lage, vordefinierte Gesten zu unterscheiden. Beide Schnittstellen wurden mit Nutzerstudien analysiert, um die Verwendbarkeit dieser Technologie zu evaluieren. Für die erste Schnittstelle und Nutzerstudie wurde ein Ärmel entwickelt, der vier Trocken-Oberflächenelektroden (freier Hautkontakt) eingenäht hat (siehe Abbildung 2.4(a)). Dadurch befanden sich diese immer an der gleichen Position des Arms und wurden nicht verschoben. Diese Konfiguration wurde dazu genutzt, einen virtuellen Steuerknüppel eines Flugsimulators mit den Richtungen links, rechts, oben und unten zu steuern.

Die zweite Schnittstelle nutzte eine aufwändigere Konfiguration mit acht Feucht-Oberflächenelektroden (fest auf die Haut geklebt), um das Signal-Rausch-Verhältnis



Abbildung 2.4: Konfigurationen für unterschiedliche myoelektrische Steuerung. a) zeigt den Aufbau der ersten Studie mit entwickeltem Ärmel zur Kontrolle eines virtuellen Steuerknüppels eines Flugsimulators. b) zeigt die aufgeklebten Elektroden die zur Erkennung von Tastatur Anschlägen genutzt wurden. (Quelle: [31])

der aufgenommenen EMG-Daten zu verbessern (siehe Abbildung 2.4(b)). Hier wurden die Elektroden bei jedem Versuch erneut auf die Haut geklebt, was zu Variationen bei der Positionierung führte. Diese Konfiguration wurde genutzt, um eine virtuelle Tastatur zu bedienen. Das heißt, der Proband tippte die Zahlen 0-9 und Enter auf eine aufgemalte Tastatur. In beiden Studien wurden ausführliche Evaluierungen zur Positionierung der Elektroden, zur Erkennung der Signale sowie zur Funktion und Nutzung der Gesten durchgeführt. Diese Ergebnisse bieten eine ausführliche Übersicht zur Verwendbarkeit myoelektrischer Gestensteuerung.

Eine weitere Arbeit von Oskoei und Hu 2015 [32] befasst sich mit zeitlich bedingter Erschöpfung von Muskeln. Damit hängen Schwankungen der myoelektrischen Signale zusammen, die bei langanhaltender Belastung entstehen, wie zum Beispiel beim Spielen von Videospiele. Das von ihnen vorgestellte System passt dazu, nach einem adaptiven Schema, erschöpfungsbedingte Schwankungen im myoelektrischen Signal und den Klassifikationskriterien an, um eine stabile Performanz zu erhalten. In einer Studie konnten sie zeigen, dass ihr System im Vergleich zu einem System ohne Anpassung, eine 10% höhere Erfolgchance und eine 40% geringere Fehlerrate aufweist. Diese Erkenntnisse könnten dazu beitragen, beispielsweise die Rehabilitation nach einem Schlaganfall mit einem solchen System zu verbessern.

Zur Auswahl von passenden Handgesten wurde von Castro et al. 2015 [27] eine aktuelle Studie vorgestellt. Darin wurden vier Probanden ohne neurologische oder muskuläre

Erkrankungen untersucht. Für den Test wurden fünf EMG-Elektrodenpaare am Unterarm angebracht, welche die Signale mit 1.000 Hz aufnahmen und anschließend mit einem Bessel-Filter vorverarbeiten. Jeder Proband musste zehn unterschiedliche Gesten ausführen, von denen fünf als Finger- und fünf als Handgesten (Abbildung 2.5) bezeichnet werden können. Die durchgeführte Datenanalyse ergab eine durchschnittliche Sensitivität von 80,0% und eine Spezifität von 97,8% der einzelnen Gesten. Ihre Arbeit zeigt, dass die Auswahl einer Menge an Handgesten mit guter Erkennungsrate für die effektive Steuerung einer Handprothese notwendig ist und daraus geschlossen werden kann, welche Art von Gesten geeignet oder mit einer hohen Fehlerrate verbunden sind.

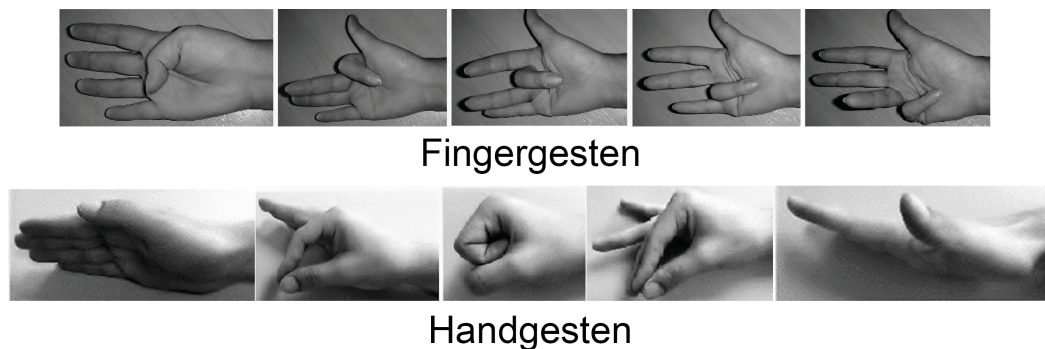


Abbildung 2.5: Genutzte Finger- und Handgesten der Studie zur Auswahl von passenden myoelektrischen Gesten (Quelle: [27]).

2.4.3 Kamera-basierte Eingabegeräte

Einen Großteil der Gesten-basierten Eingabegeräte machen Kamera-basierte Systeme aus. Dabei werden eine oder mehrere Kameras genutzt, um einen Benutzer zu erkennen. Diese Systeme arbeiten mit 2D- sowie 3D-Daten. Mittels Verfahren aus der 2D- und 3D-Bildanalyse werden, Finger-, Hand-, Arm- und Körperbewegungen von Nutzern als Geste erkannt und dienen der Steuerung einer Software. Für die Erzeugung von 3D-Daten können beispielsweise nachfolgend aufgelistete Techniken eingesetzt werden:

Streifenprojektion Das Prinzip von strukturiertem Licht basiert auf der Projektion und Erkennung eines Musters (Streifenmuster) auf 3D-Objekten. Mittels Triangulation lässt sich daraufhin die Topologie des Objekts ableiten, welche durch

die Abbildung eines Punktes (x,y) in Objektkoordinaten auf eine Pixelkoordinate (i,j) beschrieben wird [35].

Laufzeitverfahren Das Prinzip der Lichtlaufzeit (eng. Time Of Flight (TOF)) nutzt die Geschwindigkeit von Licht bzw. die Zeitdifferenz zwischen einem ausgesendeten und empfangenen Lichtpuls zur Berechnung von Distanzen. Aufgebaut sind die meisten TOF-Kameras aus den drei Komponenten Lichtemitter (intensitätsmoduliertes Infrarotlicht zur Ausleuchtung der Szene), Optik (verschiedene Linsen im Objektiv) und Sensor (Messung der Lichtlaufzeit für jeden einzelnen Pixel) [36].

Die Geräte, welche von einem solchen Kamera-basierten System genutzt werden, erstrecken sich von einfachen Webcams über Stereo-Kamera-Systeme bis hin zu moderneren Geräten wie der Microsoft Kinect 1 und 2 [8, 11, 12] sowie dem Leap Motion Controller [10]. Letztere wurden speziell für die Gestenerkennung entwickelt.

Ein Kamera-basiertes System zur Navigation in medizinischen Bilddaten mittels Tiefenkamera wurde von Soutschek et al. 2008 [9] vorgestellt. Das entwickelte System erkennt und klassifiziert fünf Gesten, welche zur Translation und Rotation sowie Bewegung und Nutzung eines Zeigers verwendet werden. Ihre Evaluation zeigt eine Klassifikationsrate von 94,3% der einzelnen Gesten und eine Bildwiederholrate von zehn Bildern pro Sekunde, was ihren Anforderungen genügt. Ein weiteres vergleichbares System wird von Gallo et al. 2008 [8] präsentiert. Sie nutzen die Microsoft Kinect als Kamera für ihre Anwendung (Abbildung 2.6(c)). Die Funktionen zur Bildexploration bestehen aus Zeigen, Vergrößern, Verschieben, Rotieren, Anpassen der Bildfensterung sowie der Definition interessanter Bereiche im Bild. Weitere Arbeiten im Bereich Kamera-basierte Systeme [13, 10, 11, 12] verfolgen vergleichbare Ansätze, unterscheiden sich jedoch meistens nur in der genutzter Hardware (siehe Abbildung 2.6 a und b) und den definierten Gesten zur Interaktion.

2.4.4 Touchscreens

Im Vergleich zu oben erwähnten Systemen, sind Touchscreens bereits in Operationssälen vertreten (CAScination [39] und Brainlab [40]). Sie werden für die Interaktion mit verschiedenen Programmen zur Bildaufnahme, Navigation mit Planungsdaten oder zur Anzeige von intra- oder präoperativen Bilddaten genutzt. Hierbei sind jedoch



Abbildung 2.6: Die Abbildungen (a) und (b) zeigen den Leap Motion Controller [37] und eine Microsoft Kinect V2 [38], die für ein Kamera-basiertes System im Operationssaal in Frage kommen. Abbildung (c) (Bildquelle: [8]) zeigt eine Anwendung, die mittels Kinect eine Interaktion mit medizinischen Bilddaten umsetzt.

einige Einschränkungen vorhanden. Zum einen sind die eingesetzten Geräte nicht Multitouch-fähig, d. h. die Eingabe kann immer nur mit einem Finger erfolgen. So können durch Smartphone Gebrauch dem Nutzer bekannte Gesten wie beispielsweise zum Vergrößern nicht verwendet werden. Zum anderen, sind die Monitore in sterile Plastikfolie eingepackt und der Chirurg trägt Gummihandschuhe, was die Bedienung erschwert.

2.5 Vergleich von Studien zu berührungslosen Bildnavigationssystemen

Wissenschaftliche Arbeiten mit Fokus auf die Evaluation einer Anwendung im medizinischen Kontext, das heißt mit Nutzerstudien, die Experten miteinbeziehen und in klinischen Szenarien stattfinden, sind kaum vorhanden. Ein Großteil der Auswertung liegt auf der Bewertung der implementierten Algorithmen. Diese Ergebnisse liefern Aussagen über die Wertigkeit von Algorithmen oder einzelner Gesten, welche als Voraussetzung der Funktion eines Systems gesehen werden kann. Entscheidend für eine klinische Anwendung ist jedoch die Funktionsweise und Einsetzbarkeit eines Systems unter gegebenen Rahmenbedingungen.

Eine sehr umfangreiche klinische Studie wurde von Tan et al. 2012 [13] durchgeführt. Sie entwickelten einen Prototyp, der mittels Microsoft Kinect eine berührungslose

Schnittstelle zur Manipulation medizinischer Bilddaten bereitstellt. Die Interaktion erfolgt mittels Bewegungstracking, welches von Handgesten des Chirurgen ausgelöst wird. In ihrer Studie nahmen 29 Radiologen teil und führten während Routineuntersuchungen verschiedene Aufgaben aus. Darunter fielen das Durchsuchen von Schnittbildern, das Anpassen der Fensterung, das Verschieben und Zoomen der Schnittbilder und das Vermessen von Strukturen. Untersucht wurden dabei die Effizienz des Prototyps sowie das Aufzeigen von Vor- und Nachteilen beim Einsatz. Ihr System wurde von 69% der Teilnehmer als nützlich empfunden. Andere Daten der Studie umfassen eine Einschätzung der Komplexität der Anwendung sowie personenbezogene Informationen.

Die Arbeit von Jacob et al. 2013 [14] stellen eine Benutzbarkeitsstudie eines Systems zur Handgestenerkennung vor. Ihre Anwendung stellt zehn gegensätzliche Gesten, d. h. fünf Gestenpaare für 2D-Rotation, Anpassung der Helligkeit der Bilddaten, Durchsuchen der Schnittbilder wie auch Sequenzen und Zoomen bereit. Die Studie fokussierte sich auf verschiedene Navigationsaufgaben und eine Evaluation der Genauigkeit der einzelnen Gesten. Die Resultate zeigen, dass eine sehr hohe Erkennungsrate von ihrem System erreicht wurde. Weiter wurden die Gesten von den Probanden in Bezug auf Lernaufwand und Einprägbarkeit als gut bewertet, jedoch sind diese weniger gut auszuführen.

Im Vergleich zu Arbeiten, die einzelne Gesten für unterschiedliche Funktionen nutzen, wird von Ruppert et al. 2012 [41] eine Kamera-basierte Anwendung vorgestellt, welche eine Computermaus imitiert. Dabei sind die Bewegung der Maus sowie die Maustasten auf unterschiedlichen Gesten abgebildet. Ihre Untersuchung beschreibt die Nutzung des Systems zur Bildnavigation bei vier Tumorentfernungen. Das System wurde erfolgreich verwendet, jedoch fehlen Belege in Bezug auf die angewendete Interaktion sowie Erklärungen zur genauen Benutzung. Sie zeigen jedoch auf, dass keine ungewollten Gesten erkannt wurden und auch Probleme durch einen eingeschränkten Interaktionsraum bestehen.

2.6 Diskussion

In diesem Kapitel wurden verschiedene Grundlagen, Techniken und Geräte vorgestellt, welche für eine berührungslose Interaktion in einem Operationssaal in Betracht

gezogen werden können. Dazu wurde im Allgemeinen und im medizinischen Kontext beschrieben, welche Schnittstellen für die Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) in Frage kommen. Anschließend wurden gestische Benutzerschnittstellen mit einigen Definitionen zu Gesten, zur Gestensteuerung und unterschiedlichen Eingabe erläutert. Als Grundlage für die Handgesten, die in dieser Arbeit genutzt werden, dient die Beschreibung der Unterarmmuskulatur mit ihren einzelnen Muskelgruppen, welche für die Erkennung mittels Elektromyogramm eine Rolle spielen. Die Eingabegeräte, welche für einen OP-Einsatz in Frage kommen erstrecken sich von speziellen Schaltpulten am Operationstisch über Touchscreens bis hin zu neueren Verfahren, die Nutzen aus der Entwicklung von Eingabegeräten der Unterhaltungsindustrie ziehen. Der Fokus dieser Betrachtung liegt dabei auf der myoelektrischen Eingabe mittels Myo-Armband zur berührungslosen Interaktion. Die ebenfalls beleuchteten Kamera-basierten Systeme bieten bereits Verfahren, um auf 2D- sowie 3D-Daten eine Gestensteuerung umzusetzen.

Die hier aufgezeigten verwandten Arbeiten zeigen auf Basis ihrer Konzeption Möglichkeiten, wie eine berührungslose Interaktion im OP umgesetzt werden könnte. Myoelektrische Eingabe hingegen wurde bisher primär in der Forschung eingesetzt, um kleinere Konfigurationen wie einen **Joystick** oder eine **Tastatur** umzusetzen und zu testen. Andere Arbeiten befassen sich dagegen intensiver mit der Signalanalyse oder der Verbesserung von bereits etablierten Anwendungsfelder wie der Prothetik, Griffkontrolle oder klinischen Diagnostik von Muskel- und Nervenerkrankungen.

Ohne den Anspruch auf eine Vollständigkeit der Liste sind noch weitere Eingabemöglichkeiten zu nennen. Dazu zählen beispielsweise Inertialsensoren, die von Schwarz et al. 2011 [42] zur Entwicklung eines Systems genutzt wurden, welches in der Lage ist, vorgemachte Gesten zu erlernen und diese einer Funktion zuzuweisen. Kotwicz et al. 2014 [43] stellen ein ähnliches System vor, jedoch mit einem festen Gestenalphabet. Hierbei befinden sich die Sensoren auf der Hand des Operators, welcher mittels Handbewegung durch Bilddaten navigieren kann. **Sprachsteuerung** wurde unter anderem in Kombination mit einem Kamerasystem von Hötker et al. 2013 [44] als multimodaler Ansatz analysiert. Ein weiterer Vertreter aus der Unterhaltungsindustrie ist die **Nintendo Wiimote**. Diese wurde von Hansen et al. 2008 [45] zur Steuerung einer Software im Operationssaal genutzt, um mit medizinischen Bilddaten zu interagieren. Auch die Möglichkeit des Verfolgens der Augenbewegung mittels Eye-Tracking als Eingabegerät zu nutzen, wurde beispielsweise schon von Jacob et

al. 2003 [46] untersucht.

In Bezug auf ein klinisches Szenario haben die meisten Arbeiten einen Mangel an ausschlaggebenden Studien. Diese Arbeit soll an diesem Punkt angreifen und eine Evaluation der Implementierung in klinisch orientierten bzw. klinischen Szenario durchführen.

3 Anforderungsanalyse

In diesem Kapitel werden zwei Anforderungsanalysen beschrieben, welche die Basis der Entwicklung einer Anwendung zur berührungslosen Interaktion im Operationssaal mit einem myoelektrischen Eingabegerät bilden. Eine **klinische** Anforderungsanalyse (Abschnitt 3.1) befasst sich mit den Abläufen einer **neuroradiologischen Intervention**, den Bedingungen der Bildinteraktion sowie den Arbeitsgeräten in einem Operationssaal. Eine **technische** Anforderungsanalyse (Abschnitt 3.2) bildet hingegen die Grundlage für die Konzeptionen einer einheitlichen Hardwareschnittstelle und einer einfachen Interaktion mit einem System zur berührungslosen Interaktion. Schließlich wurde aus den Anforderungen ein Kriterienkatalog abgeleitet, welcher später dem Entwurf und der Durchführung einer Evaluation dient.

3.1 Klinische Anforderungen

Zur Definition der klinischen Anforderungen wurden drei Methoden genutzt. Eine anfängliche Analyse fand auf Basis einer Literaturrecherche statt. Dabei wurden die Online-Portale PubMed und Google-Scholar sowie der Onlinekatalog der Universitätsbibliothek genutzt, um nach Schlüsselworten wie **Arbeitsflussanalyse** (engl. workflow analysis), **Gesten-basierten** (engl. gesture) und **berührungslosen Interaktion** (engl. touch-free/less interaction) im medizinischen Kontext zu suchen. Diese Literatur hat dazu beigetragen, klinische Abläufe besser beschreiben und mögliche Probleme oder Schwachstellen im Operationssaal aufzeigen zu können.

Im zweiten Schritt wurde Videomaterial von verschiedenen Eingriffen des Instituts für Neuroradiologie der Universitätsklinik Magdeburg¹ gesichtet. Diese Aufnahmen und Protokolle zeigen verschiedene Arbeitsabläufe unterschiedlicher neuroradiologischer

¹Bereitgestellt von Christian Hansen und Antje Hübler, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

Eingriffe und decken u.a. bereits einige Schwachstellen im normalen Arbeitsablauf auf.

Für die dritte Methode hospitierte der Autor bei drei unterschiedlichen Eingriffen (Coiling eines Aneurysmas, periradikuläre Infiltration an der Wirbelsäule und Embolisation einer arteriovenösen Malformation) am Institut für Neuroradiologie und sprach Personal und Ärzten des Instituts. Es ist festzustellen, dass viele Schritte bei den meisten Eingriffen wiederholt werden und sich Muster zeigen. Jedoch ist jede Operation aufgrund des Patienten mit individuellen Krankheitsbild und operierendem Chirurgen einzigartig, wodurch die Definition fixer Arbeitsabläufe erschwert wird.

Für den Einsatz in klinischen Anwendungen, d. h. für die Benutzung in einem Operationssaal, werden verschiedene Anforderungen an ein System gestellt. Ein sehr wichtiges Kriterium ist dabei die **Sterilität des Arbeitsumfeldes**. Aus diesem Grund sind Instrumente sterilisiert und einzeln verpackt oder es werden Einweginstrumente genutzt, die nach Gebrauch direkt entsorgt werden. Größere Geräte wie beispielsweise Monitore in einem Operationssaal, die einen zusätzlichen Keimherd darstellen, werden in sterile Plastikfolie eingepackt (siehe Abbildung 3.1). Bei einfachen Monitoren als Anzeigegerät stellt dies kein Problem dar. Wird jedoch mit einem Touchscreen interagiert, ist eine Einschränkung bei der Bedienung vorhanden. Hinzu kommt, dass auch sämtliche Steuergeräte am Operationstisch in sterile Folie eingepackt werden müssen. Dabei wird durch das Verrutschen und Zurechtziehen der Folie die Bedienung dieser Elemente erschwert, was wiederum zu einer Behinderung im Arbeitsablauf führt.

Neben der Sterilität ist die **Dauer des Eingriffs** von Bedeutung, da diese in direkter Verbindung mit der Patientenbelastung steht. Diese sollte möglichst gering gehalten werden, um Infektionen durch offene Wunden, Komplikationen durch Blutverlust oder Anästhesie und den dadurch verlängerten Krankenhausaufenthalt zu vermeiden. Zudem hängen diese Faktoren mit einer Erhöhung der Behandlungskosten zusammen, die ebenfalls gering gehalten werden sollten. Weitere Faktoren sind neue Techniken und Systeme, die versuchen sollten, **keine unnötige Belastung für den Chirurgen** darzustellen. Das bedeutet, der behandelnde Arzt sollte bei seiner Arbeit unterstützt und nicht mit zusätzlichen Aufgaben und Aufwand belastet werden.

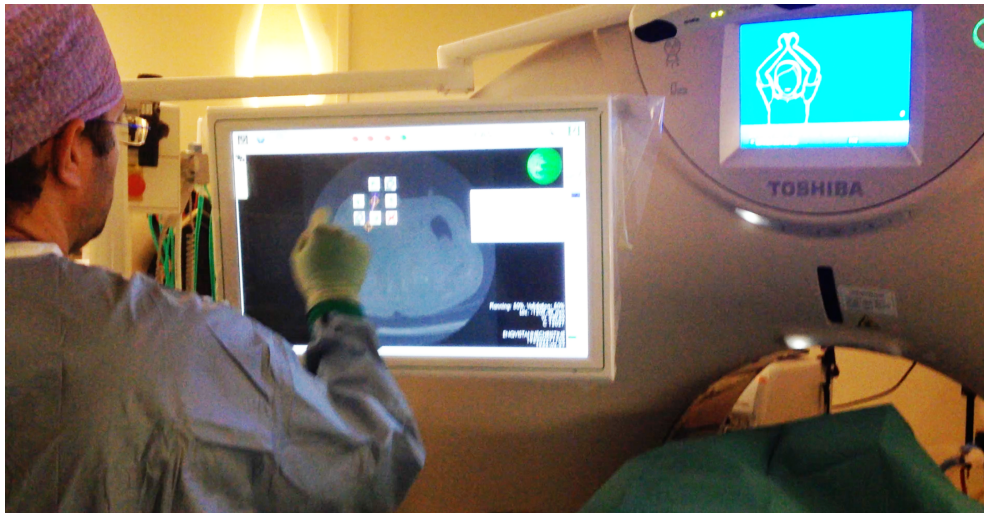


Abbildung 3.1: Die Abbildung zeigt einen Operateur der mit Gummihandschuhen auf einem eingehüllten Touchscreen interagiert. (Bildquelle: CAScination AG, mit freundlicher Genehmigung von Dr. Matthias Peterhans)

3.1.1 Arbeitsablauf und Analyse

Wie eingangs erwähnt, gehört die Definition des Arbeitsablaufes mit zu den essentiellen klinischen Anforderungen. Die individuellen Unterschiede bei der Einzigartigkeit jeder Operation stellen eine Hürde dar, die es zu umgehen gilt. Jeder Eingriff ist von Arzt zu Arzt unterschiedlich und von der Art des Eingriffs abhängig. Dennoch ist es möglich allgemeingültige Kriterien und Situationen zu extrahieren, welche in einem sogenannten **Surgical Process Model (SPM)** abgebildet werden können. Ein SPM stellt dabei das Modell eines chirurgischen Eingriffs dar. Neumuth und Meixensberger 2009 [47] validieren in ihrer Arbeit verschiedene Vorgehensmodelle und bewerten diese. Aufbauend darauf, befassen sich Neumuth et al. 2011 [48] ausführlicher mit dieser Thematik und erstellen Konzepte, um generische, durchschnittliche SPM zu erzeugen, welche die klinische, technische und administrative Entscheidungsfindung unterstützen. Diese sind jedoch aufgrund der Varianz für einen Einzelfall nicht auf hilfreich.

Speziell für die Analyse dieser Arbeit wurden neuroradiologische Interventionen unter Nutzung des Artis Q Angiographiesystems [23] der Universitätsklinik Magdeburg untersucht. Ein Beispiel für einen allgemeinen Arbeitsschritt bei einem minimalinvasiven Eingriff ist das Legen eines Katheters. Dabei werden einige Aufnahmen mit

der Angiographie-Anlage gemacht, um den Weg der Katheterspitze zu verfolgen. Ein weiterer regelmäßig genutzter Vorgang ist die Steuerung des Operationstisches (sofern dieser elektronisch verstellbar ist), um eine bessere und ergonomischere Arbeitsposition zu erreichen. Bei einer minimalinvasiven und navigierten Operation ist die Interaktion mit den präoperativen sowie intraoperativen medizinischen Bild- und Planungsdaten wichtig. Die letzten beiden Arbeitsschritte werden nun (auf Basis der Videoanalyse und Hospitationen) genauer beschrieben, um diese Arbeitsabläufe zu definieren.

Steuerung von Operationstisch und Bildgebung

Die Positionierung des Operationstisches und des C-Arms des Angiographiesystems ist für die Qualität der Bildgebung wichtig. Im Vergleich zur Navigation in den Bilddaten bestehen hier weniger Probleme, da hier primär ergonomische Faktoren zum Tragen kommen. Die Position des Operationstisches dient dazu, den Patienten optimal zu platzieren, sodass der Operateur problemlos arbeiten kann. Bei der Bildgebung wird die Position des C-Arms bestimmt, das Programm ausgewählt und die automatische Aufnahme mittels Fußpedal gestartet. Dieser Schritt findet während einer Operation gelegentlich bis häufig statt [1]. Je nach Bedingungen an der zu operierenden Stelle muss der C-Arm oder der Patient neu positioniert werden, um die Übersicht zu erhöhen. Hierbei ist ein hohes Maß an Genauigkeit erforderlich, damit die Geräte nicht miteinander kollidieren oder der Patient verletzt wird. Demzufolge ist eine Gestensteuerung für diese Interaktion nicht geeignet.

Navigation mit Bilddaten

Die Navigation mit intraoperativen Bilddaten und präoperativ erstellten Planungsdaten ist für minimalinvasive Eingriffe sehr wichtig, um sich einen Überblick über Lage und Orientierung von Organen, Gefäßen sowie Werkzeugen zu verschaffen. In vielen Fällen nutzt der Operateur dazu das in Abschnitt 2.4.1 beschriebene Schaltpult am Operationstisch oder ein Ultraschallgerät. Dazu kann es direkt oder indirekt durch einen Assistenten bedient werden.

Eine weitere Möglichkeit ist die Benutzung eines Touchscreens. Dabei sind jedoch die sterile Folie und die Gummihandschuhe des Chirurgen im Weg und erschweren

die Interaktion. In beiden Fällen verliert der Chirurg jedoch kurzzeitig den Fokus auf den Patienten, da er sich über den Patient zum Gerät hin strecken oder seinen Platz am Patienten und den Werkzeugen verlassen muss, um in einem Vorraum auf einen Bildschirm zu sehen.

Eine weitere Alternative der indirekten Navigation sind verbale Kommandos an Assistenten im Kontrollraum (O'Hara et al. 2014 [2]), welche direkt am PC mit der Visualisierung interagieren und auf Kommandos des Chirurgen die Darstellung anpassen. Diese Art der Navigation birgt Probleme in der Verständigung zwischen Chirurg und Assistent, was die Dauer des Eingriffs erhöht und den Arbeitsfluss behindert. Im schlimmsten Fall ist der Chirurg dazu gezwungen, den sterilen Operationsbereich zu verlassen, um am PC selbst mit der Visualisierung zu interagieren. Dies geschieht meist, während komplexer Situationen einer Operation, welche einen genaueren und intensiveren Blick auf die Daten verlangen. Zudem kommt es vor, dass eine Absprache mit einem weiteren Arzt nötig ist, um das weitere Vorgehen zu diskutieren und ein bestmögliches Ergebnis für den Patienten zu erwirken (Beobachtung während des klinischen Tests: unübersichtliche Verzweigungen der Malformation im Gehirn). Ein weiterer Fall, der hier nicht betrachtet wird, ist die Kommunikation zwischen Arzt und Assistent über **Hand- und Fußzeichen**, welche oft im interventionellen MRT eingesetzt wird, aufgrund der Lautstärke im MRT-Raum.

Beispiel für Probleme bei einem Arbeitsablauf

Durch das digitale Informationszeitalter bestehen immer mehr Möglichkeiten Arbeitsabläufe zu analysieren, um Probleme aufzudecken und diese mit entsprechenden Optimierungsverfahren zu beheben. Diese Tatsache wurde von Lemke und Vannier 2006 [49] aufgegriffen und gezeigt, an welchen Stellen in Arbeitsabläufen Engpässe vorhanden sind und wie eine mögliche Lösung dafür aussehen kann. Auf Basis der Arbeitsfluss-Analyse von Hübler et al. 2014 [1] sind nachfolgende Storyboards [50] in den Abbildungen 3.2 bis 3.4 entstanden, die Probleme bei einem Eingriff an einem neuroradiologischen Institut beschreiben. Die gezeigte Intervention beschreibt das Legen eines Katheters bei einer minimalinvasiven Gefäßoperation. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um einen Standard-Arbeitsablauf, sondern um ein Szenario, bei dem bessere Mensch-Computer-Schnittstellen helfen könnten, neue unterstützende Systeme in den Ablauf zu integrieren.

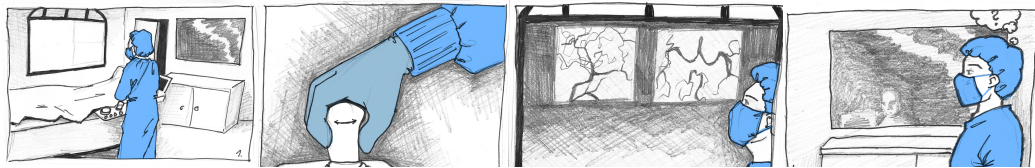


Abbildung 3.2: Zur Vorbereitung eines Eingriffs muss ein Katheter gelegt werden. Dazu werden mit einer Angiographie-Anlage Aufnahmen gemacht. Nach der Aufnahme blättert die Chirurgin mit den Hebeln am Schaltpult (Abschnitt 2.4.1) in den Daten. Sie versucht dabei auf den großen Bildschirmen zu erkennen, welche Blutgefäße zur Zielstruktur führen. Da die Bilder nicht eindeutig interpretierbar sind, benötigt sie eine zweite Meinung von einem Kollegen, der sich nicht im Operationsaal befindet.

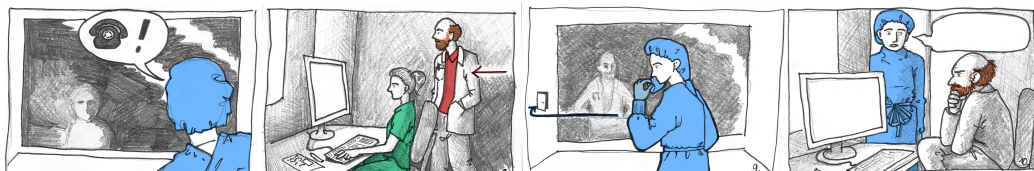


Abbildung 3.3: Durch die Scheibe zum nicht sterilen Kontrollraum wird die Assistentin gebeten einen Kollegen zu rufen. Sobald dieser Zeit hat, kommt er in den Kontrollraum zur Assistentin. Durch die Verbindungstür zwischen den beiden Räumen, wird nun versucht zu diskutieren, wie die entdeckte Problematik zu beheben ist. Dabei wird nur der Mundschutz der sterilen Chirurgin beiseite gezogen. Nun wird erklärt, bis wohin der Katheter bereits geführt wurde und an welcher Stelle dabei Hilfe benötigt wird.

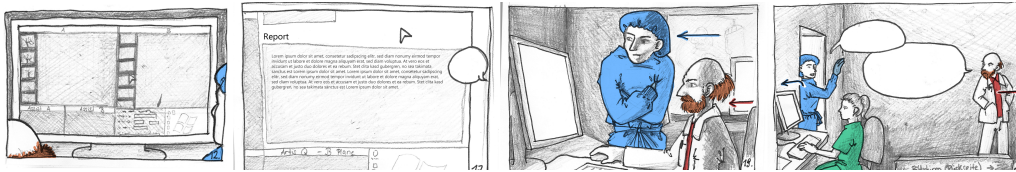


Abbildung 3.4: Auf der Workstation werden die Bilder der aufgenommenen Bildebenen angezeigt und begutachtet. Zudem wird erklärt, welche Beobachtungen gemacht wurden. Um sich ein besseres Bild von der Patientenanatomie zu machen, werden die Patientenakte geöffnet und die Befunde nachgelesen. Die Chirurgin möchte nun die präoperativen Daten anderer Modalitäten genauer betrachten und begibt sich direkt aus dem sterilen OP in den nicht sterilen Kontrollraum, um direkt an der Workstation zu arbeiten. Nach der Diskussion über die nächsten Schritte des Eingriffs begibt sich die Chirurgin zurück in den OP (hierbei muss nicht zwangsläufig neue sterile Kleidung angezogen werden, sondern nur neue Handschuhe und ein neuer Mundschutz) und der Kollege verlässt den Kontrollraum.

3.1.2 Anforderungen an ein System zur Interaktion mit medizinischen Bilddaten

Aus der oben beschriebenen Analyse der Navigation in medizinischen Bilddaten sowie den Arbeiten von Wachs et al. 2008 [51], Tan et al. 2012 [13], Jacob et al. 2013 [14] und Iannesi et al. 2014 [52] lassen sich verschiedene Funktionen für diese Arbeit ableiten. Das bedeutet Funktionen für die Interaktion mit intra- sowie präoperativen Bilddaten. Dabei sind diese in zwei Kategorien zu unterteilen: Zum einen sind es Interaktionen mit 2D-Bilddaten, bspw. Schichtbilder eines Computertomographie (CT) oder MRTs. Zum anderen die Interaktion mit 3D-Planungsmodellen, bspw. direktes Volumenrendering eines Gefäßbaums. Nachfolgend sind diese Funktionen in Tabelle 3.1 aufgelistet und kurz beschrieben. Diese beinhalten beispielsweise das Durchsuchen einzelner Schichtbilder, um die Position einer Struktur auszumachen oder die Drehung eines 3D-Planungsmodells, um Optionen in Bezug auf nachfolgende Arbeitsschritte abzuwägen.

Weitere Interaktion mit den Bilddaten, wie das Zeigen auf eine interessante Struktur, werden meist ohne die Benutzung eines Zeigers durchgeführt. Stattdessen wird direkt auf den Monitor gedeutet. Auch die Anpassung von Fensterung sowie Generierung

Tabelle 3.1: Zusammenfassung der Funktionen, die für die Interaktion mit Bild- und Planungsdaten notwendig sind. Dabei sind die Funktionen in 2D (Interaktion mit Schnittbildern) und 3D (Interaktion mit Planungsmodellen) unterteilt.

	Funktionen	Beschreibung
2D	Blättern	Navigation durch die einzelnen Schnittbilder <i>Interaktion: (vor / zurück)</i>
	Verschieben	Verschieben eines Schnittbilds <i>Interaktion: (Links / Rechts / Oben / Unten)</i>
	Zoomen	Vergrößern / Verkleinern eines Schnittbilds <i>Interaktion: (+ / -)</i>
3D	Rotieren	Drehen eines 3D-Planungsmodells <i>Interaktion: (Roll / Pitch / Yaw)</i>
	Zoomen	Vergrößern / Verkleinern eines 3D-Planungsmodells <i>Interaktion: (+ / -)</i>

intraoperativer 3D-Modelle aus den CT- und Angiographie-Daten geschieht in vielen Fällen automatisch, ohne einen direkten Eingriff des Operateurs bzw. der Hilfe eines Assistenten. Aufgrund der genutzten Gestensteuerung mittels Myo-Armband werden Funktionen wie **Selektion** einer interessanten Struktur, die **Bemaßung** eines Durchmessers oder Sicherheitsabstands sowie komplexere Arbeitsabläufe wie die **virtuelle Resektion**, **Multiplanare Reformation** oder **Clipping** von 3D-Modellen in dieser Arbeit nicht beachtet.

3.2 Technische Anforderungen

Der zweite Aspekt der Anforderungsanalyse bezieht sich auf die technische Umsetzung des Systems. Dabei liegt der Fokus auf einer Schnittstelle, die es ermöglichen soll, unterschiedliche Geräte anzubinden. Der Vorteil eines solchen Systems ist die Vergleichbarkeit einer Funktion und der entsprechenden Eingabe mit verschiedener Hardware. Die hier beschriebenen technischen Anforderungen beziehen sich jedoch ausschließlich auf ein Software-Werkzeug, welches Forschungszwecken dient und nicht für den klinischen Einsatz gedacht ist. Dennoch besteht die Möglichkeit, klinische Szenarien damit

nachzustellen. Nachfolgend sind die Anforderungen an eine einheitliche Schnittstelle zur Anbindung mehrerer Geräte beschrieben. Weiter werden Richtlinien erläutert, die ein System für den klinischen Einsatz erfüllen muss, um einen reibungslosen Ablauf zu gewährleisten. Anschließend sind Definitionen gegeben, welche eine natürliche und berührungslose Interaktion für ein solches System festlegen. Den Abschluss der technischen Anforderungen bildet die Analyse des Myo-Armbands.

3.2.1 Einheitliche Schnittstelle für unterschiedliche Eingabegeräte

Unterschiedliche Geräte bringen unterschiedliche Anforderungen an ein System und dessen Hard- sowie Software mit, wie zum Beispiel eine unterschiedliche Verbindungsmodalität wie USB-Kabel oder Bluetooth. Zudem sind mitunter zusätzliche Stromanschlüsse oder weitere Verbindungen notwendig. Hierbei ist grundsätzlich die klinische Anforderung der oben genannten Sterilität zu beachten, um keinen zusätzlichen Keimherd zu erzeugen. Aus softwaretechnischer Sicht sind komplett unabhängige und abstrahierte Konzepte notwendig, um verschiedene Geräte mit demselben Werkzeug nutzen zu können.

Probleme sind hierbei jedoch Unterschiede in der Funktionsweise, welche sich zum Beispiel in der Initialisierung und Aktualisierung der Geräte widerspiegeln. Müssen die aktualisierten Werte vom Gerät **explizit abgefragt** (engl. pull) werden oder liefert es diese mittels **Ereignis** (engl. event) automatisch? Davon abhängig ist eine Schnittstelle notwendig, die mit diesen Bedingungen umgehen kann. Entsprechend sind **Entwurfsmuster**, **Systemarchitekturen** und **Vererbungshierarchien** (abstrakten oder Interfaceklassen) genauer zu betrachten.

Zusammengefasst soll eine einheitliche Schnittstelle folgende Punkte erfüllen:

1. **Unabhängigkeit:** Eine Schnittstelle darf nicht von einer speziellen Hardware (z. B. USB 3.0 oder DirectX 11 fähige Grafikkarte) oder Software (auch Betriebssystem)abhängig sein, damit eine Interaktion mit dem System möglich ist. Das bedeutet allerdings auch, dass das Hostsystem (PC auf dem die Anwendung läuft) entsprechend ausgestattet sein muss.

2. **Abstraktion:** Eine Schnittstelle soll die Funktionalität bereitstellen, welche vom System benötigt wird, ohne die spezifischen Eigenschaften eines Gerätes berücksichtigen zu müssen.
3. **Einfache Aktualisierung:** Eine Schnittstelle soll immer die aktuellen Werte liefern, die entsprechend von der Software genutzt werden können.

Auf Basis dieser drei Kriterien ist nachfolgend in Kapitel 4 die Konzeption und Umsetzung eines Software-Werkzeugs beschrieben.

3.2.2 Kriterien für eine klinische Software

Für die Entwicklung klinischer Software wurden von Niederlag et al. 2014 [53] Richtlinien definiert, die in Bezug auf verschiedene Qualitätsanforderungen im Design und Entwicklungsprozess beachtet werden müssen.

Für die Bildaufnahme ist die Kompatibilität zu standardisierten Austauschformaten für Bilddaten (Digital Imaging and Communications in Medicine (DICOM)) oder Planungsdaten (Oberflächenvisualisierung) von großer Bedeutung. Zusätzlich ist eine Kompatibilität zu anderen Bildgebungsmodalitäten wie z. B. Ultraschall notwendig. Weiterhin muss die Echtzeitfähigkeit des Systems gesichert sein, d. h. die Instrumentenbewegung muss mittels Tracking-System direkt in den Planungsdaten zu sehen sein. Anders ausgedrückt: die visuelle Darstellung (Rendering) der Daten muss ohne Wartezeiten erfolgen. In Bezug auf gestisch-gesteuerte Anwendungen darf die Latenz bei der Erkennung nicht zu groß sein, um die Interaktion nicht zu verlangsamen. Allgemeine Qualitätsanforderungen an ein solches System wurden von Niederlag et al. 2014 [53] wie folgt beschrieben und lassen sich entsprechend auf diese Arbeit beziehen:

- **Performanz:** Zeitliche Bedingungen, d. h. echtzeitfähige Verarbeitung. Die Reaktion auf die ausgeführte Geste muss ohne Verzögerung zu sehen sein.
- **Robustheit:** Ausfallsicherheit und Abschätzung von Fehlern. Durch den Nutzer ausgelöste Fehler (z. B. falsche Geste für eine Funktion) dürfen die Software nicht zum Absturz bringen.

- **Benutzbarkeit:** Leichte Wiederverwendbarkeit und Bedienung. Die Benutzung der Gesten zur Steuerung der Software muss einfach zu merken und unkompliziert sein.
- **Erweiterbarkeit:** Berücksichtigung neuer Modalitäten und Algorithmen. Die Software sollte weitere Funktionen und Eingabegeräte bereitstellen bzw. einbinden können.
- **Integrierbarkeit:** Einbindung in bereits bestehende Systeme. Die Software, bzw. die Schnittstelle sollte so gestaltet sein, dass sie von anderen Systemen problemlos eingebunden und verwendet werden kann.

Auf Basis dieser Anforderungen sind verschiedene Open-Source Toolkits für computerassistierte Interventionen entstanden, die spezielle Funktionalitäten für medizinische Software verfügbar machen. Das Visualization Toolkit (VTK) [54] zur Visualisierung medizinischer Bilddaten: das Insight Segmentation and Registration Toolkit (ITK) [55] für die Bereitstellung von Algorithmen zur Datenverarbeitung und speziellere Varianten wie beispielsweise das Image-Guided Surgery Toolkit (IGSTK) [56] oder Medical Imaging Interaction Toolkit (MITK) [57], die anwendungsspezifische Funktionen zur Bildverarbeitung oder Anbindung von Tracking-Systemen anbieten.

3.2.3 Natürliche und berührungslose Interaktion

Wie eingangs erwähnt, sind natürliche Benutzerschnittstellen anwendungsspezifisch angepasst [7]. Dementsprechend sind für die berührungslose Interaktion zur Navigation medizinischer Bilddaten entsprechende Konzepte zu entwickeln. Der Chirurg soll also mit geringem Aufwand das System bedienen können, um damit den gewünschten Effekt (d. h. eine entsprechende Darstellung der Anatomie) zu erhalten. Neben der Erreichung eines Ziels sind auch die Belastung durch die Interaktion sowie der aufzubringende Lernaufwand von Bedeutung. Daher müssen diese beiden Faktoren minimiert oder gar beseitigt werden, um eine bereitwillige Nutzung des Systems durch einen operierenden Chirurgen zu bewirken. Auf Basis einer natürlichen Benutzerschnittstelle ist ein Gestenalphabet bzw. eine Abbildung von Geste und Funktion für das Myo-Armband zu entwickeln, welches einfach zu erlernen ist, die Navigation der Bilddaten erlaubt und dem Nutzer beim Erreichen seiner Ziele ein unterstützendes Feedback gibt.

3.2.4 Analyse des Myo-Armbands

Das Myo-Armband als Eingabegerät hat gegenüber Kamera-basierten Systemen einige Vorteile: Der Interaktionsraum ist größer, da keine Sichtlinie und kein festes Interaktionsvolumen definiert sind. Das vom SDK bereitgestellte Gestenalphabet ist auf fünf Gesten begrenzt. Diese Tatsache kann als Vorteil gesehen werden, da nur wenige und immer gleiche Gesten vorhanden sind. Es kann jedoch auch als Nachteil betrachtet werden, da keine freien Gesten für eine spezielle Funktion entwickelt werden können, was dementsprechend einen gewissen Grad an Freiheit nimmt. Unter klinischen Aspekten besteht bei der Sterilität ein großer Vorteil, da kein zusätzlicher potentieller Keimherd entsteht. Weiter kann die genutzte Bluetooth-Technologie für die Datenübertragung in Operationssälen störungsfrei verwendet werden [58].

3.3 Kriterienkatalog

Ein Kriterienkatalog gestaltet die Grundlage für den Systementwurf eines Prototyps und der Entwurf einer Evaluation dessen Implementierung. Dazu sind aus der klinischen und technischen Anforderungsanalyse Faktoren abzuleiten, die für ein System einen festen Rahmen definieren, welcher im OP eingesetzt werden soll. Diese sind wiederum für jeden Anwendungsfall und für die damit verbundene Operation verschieden. Dennoch sollte das Ziel eines computergestützten Systems klar definiert sein, um seinen Nutzen zu maximieren. Der in dieser Arbeit untersuchte Anwendungsfall befasst sich mit der intraoperativen und berührungslosen Interaktion mit medizinischen Bilddaten, was zusammengefasst den in Tabelle 3.2 aufgelisteten Kriterien entspricht.

In Kombination mit der Evaluation soll dieser Kriterienkatalog dazu beitragen, eine Aussage über die Verwendbarkeit einer myoelektrischen Gestensteuerung mittels Myo-Armband im OP zu treffen.

Tabelle 3.2: Anforderungen an die Software auf Basis der oben beschriebenen Analyse.

(K = klinische Aspekte; T = technische Aspekte)

Nr.	Kriterium	Beschreibung	Typ
1	Sterilität	Das genutzte Eingabegerät zur Gestensteuerung darf keinen zusätzlichen Keimherd darstellen.	K
2	Zeit	Das entwickelte System darf die Zeit für die Bildinteraktion im Vergleich zu einem vorhandenen System nicht erhöhen.	K
3	Kosten	Die Anschaffungs- und Betriebskosten des entwickelten Systems müssen gering sein.	KT
4	Unabhängigkeit	Die entwickelte Schnittstelle darf nicht von spezieller Hardware bzw. Software abhängig sein und sollte quelloffene und standardisierte Frameworks benutzen.	T
5	Abstrakt	Die entwickelte Schnittstelle muss die bereitgestellte Funktionalität abstrahieren und darf keine gerätespezifischen Teile beinhalten.	T
6	Erweiterbarkeit	Die entwickelte Schnittstelle muss in Bezug auf die Anbindung neuer Eingabegeräte sowie Funktionalität erweiterbar sein.	KT
7	Gestenalphabet	Das Gestenalphabet sollte einfach und auf die entsprechende Funktionalität angepasst sein.	KT
8	Qualitätsanforderungen	Die Qualitätsanforderungen an klinische Software müssen eingehalten werden. (vgl. 3.2.2)	T
9	OP-Tauglichkeit	Das Myo-Armband sollte für den Einsatz im Operationssaal geeignet sein.	KT
10	Tragekomfort	Das Myo-Arbands sollte selbst bei längerem Tragen keine Belastung für den Nutzer darstellen.	KT
11	Trainingszeit	Die Trainingszeit sollte möglichst kurz und ein Lerneffekt deutlich sichtbar sein.	T

3.4 Diskussion

In diesem Kapitel wurden eine klinische und technische Anforderungsanalyse beschrieben, welche das Fundament für die Konzeption einer Anwendung zur berührungslosen Interaktion mit dem Myo-Armband im OP bilden. Zur Definition der klinischen Anforderungen wurde eine Literaturrecherche durchgeführt, Videoaufnahmen von verschiedenen neuroradiologischen Interventionen analysiert und mehrfach bei unterschiedlichen Interventionen am Institut für Neuroradiologie der Universitätsklinik Magdeburg hospitiert. Die daraus abgeleiteten klinischen Anforderungen umfassen die **Sterilität** des Arbeitsumfeldes, die **Dauer** der Intervention, sowie die **Belastung** für Patient und operierenden Arzt. Fokussiert wurde dabei die Interaktion mit medizinischen Bilddaten und Planungsdaten während einer Operation, welche mit Funktionen zum Durchsuchen, Verschieben, Zoomen und Rotieren gesteuert werden.

Eine technische Anforderungsanalyse konzentrierte sich hingegen auf die Rahmenbedingungen an klinische Software und der Definition einer einheitlichen Hardware-schnittstelle. Dazu wurden Kriterien wie **Unabhängigkeit**, **Abstraktion** und **einfache Aktualisierung** an die Schnittstelle und Qualitätsanforderungen wie **Performanz**, **Robustheit**, **Benutzbarkeit**, **Erweiterbarkeit** und **Integrierbarkeit** an das System festgelegt. Zudem wurde untersucht, welche Anforderungen von einer natürlichen Interaktion ausgehen und welche Herausforderungen das Myo-Armband als Eingabegerät darstellt.

Abschließend wurden alle definierten Kriterien in einem Kriterienkatalog zusammengeführt, der dem Entwurf eines Systems und einer Evaluation dient.

4 Konzeption und Umsetzung

Die Entwicklung einer Anwendung für den medizinischen Einsatz kann mittels vierstufigem nutzerorientierten Prozess durchgeführt werden, der im ersten Abschnitt genauer beschrieben wird. In Kapitel 3.1 wurde eine Analyse der aktuellen Situation in Operationssälen bei neuroradiologischen Interventionen beschrieben und daraus Anforderungen an die Entwicklung gestellt. Davon ausgehend, setzt sich dieses Kapitel mit der Konzeption eines Softwareprototyps für Forschungszwecke auseinander, welcher eine berührungslose Gestensteuerung evaluiert. Im ersten Abschnitt werden die genutzten Entwicklungswerkzeuge, Bibliotheken und der Entwicklungsprozess erläutert. In Abschnitt 4.2 folgt eine detaillierte Beschreibung der entworfenen Schnittstelle zur Anbindung verschiedener Eingabegeräte. Ein weiterer wichtiger Baustein ist ein Datenlogger, dessen Funktion zur Analyse der Anwendung in Abschnitt 4.3 beschrieben ist. Anschließend wird in Abschnitt 4.4 genauer auf die einzelnen Gesten sowie die Funktionen eingegangen und wie diese aufeinander abgebildet werden. Abschließend sind der entwickelte Prototyp und dessen Komponenten beschrieben.

4.1 Entwicklungswerkzeuge

Zur Entwicklung der Hardwareschnittstelle sowie des Prototypen zur Anzeige und Interaktion mit medizinischen Bilddaten wurden verschiedene Bibliotheken, Toolkits und Programmiersprachen genutzt. Die komplette Anwendung wurde mit der IDE Microsoft Visual Studio 2013 [59] in C++ implementiert. Makefiles wurde mit CMake in der Version 3.1.0 [60] erstellt. Für die grafische Benutzeroberfläche und Teile der Hardwareschnittstelle wurde die Qt-Bibliothek in der Version 5.4 [61] verwendet. Sowohl die Visualisierung der medizinischen Bilddaten als auch der Dateizugriff auf DICOM-Dateien wurde mit Hilfe des VTK in Version 6.1 [54] umgesetzt.

4.1.1 User-Centered-Design Prozess

Der verwendete nutzerorientierte Entwicklungsprozess ist ein nach DIN EN ISO 9241-210 [62] vierstufiger iterativer Prozess, dessen Ziel der Entwurf eines interaktiven Produktes mit hoher Benutzerbarkeit ist. In Abbildung 4.1 sind die vier Stufen als Ablaufdiagramm dargestellt. Die Analyse wurde im vorherigen Kapitel im klinischen und technischen Kontext beschrieben. Zudem wurden daraus entsprechende Anforderungen an das System definiert. In diesem Kapitel ist, auf Basis dieser Anforderungen, die Konzeption eines Prototyps erläutert. Die Evaluation des Prozesses liefern die in Kapitel 5 erläuterten Benutzungsstudien, die parallel und abschließend die Entwicklung begleiteten.

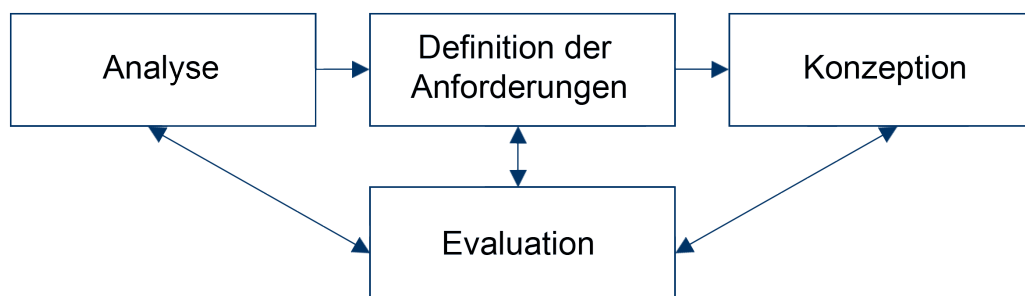


Abbildung 4.1: Vereinfachte Darstellung des vierstufigen nutzerorientierten Entwicklungsprozesses nach DIN EN ISO 9241-210 [62]

4.1.2 Myo-Armband Software Development Kit

Für den Zugriff auf die Daten und die Funktionen des Myo-Armbands wird ein SDK bereitgestellt. Dieses wurde für die Entwicklung in der Version 0.8.1 genutzt, zusammen mit der entsprechenden Firmware. Dabei besteht die Möglichkeit jeden Sensor des Armbands direkt anzusprechen, um die Daten auszulesen oder die fertigen Gestendaten (d. h. die erkannte Geste) zu nutzen. Zu diesen Sensordaten gehören die Signale der acht EMG- sowie der drei Inertialsensoren. Weitere Funktionen sind vorhanden, um das haptische Feedback des Armbands zu nutzen und verschiedene Status zu variieren, wie beispielsweise eine durchgängige Erkennung der Gesten zu erlauben oder das Gerät mit einer entsprechenden Geste zu sperren. Eine simplere Variante die Funktionalität des Armbands zu testen, ohne eine eigene Anwendung zu programmieren, bietet das auf LUA basierende Myo-Skript [34].

4.2 Hardwareschnittstelle

Die Hardwareschnittstelle sollte wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, eine Abstraktion zwischen Visualisierung und Logik schaffen sowie die Möglichkeit bieten ohne viel Änderungsaufwand verschiedene Geräte anbinden zu können. Um dies umzusetzen, kann ein **Sender- und Empfänger-Prinzip** verwendet werden, das im nachfolgenden Abschnitt genauer beschrieben ist.

4.2.1 Beschreibung der Hardwareschnittstelle

Die komplette Trennung zwischen Logik und Darstellung ist in der Informatik ein weitverbreitetes Konzept, welches zum Beispiel als Strukturierung, wie **Modell-Präsentation-Steuerung** (engl. Model View Controller (MVC)), verschiedene **Entwurfsmuster** und **Client-Server-Anwendungen**, umgesetzt werden kann. Als gute Trennung einer Hardwareschnittstelle bietet sich aus der Anforderungsanalyse (Abschnitt 3.2) das letztgenannte Modell an.

Der **Server (Sender)** dient dabei auf Seiten der Logik als steuerndes Element. Ein Eingabegerät wird gerätespezifisch eingebunden, mit allen notwendigen Mechanismen zur Aktualisierung, Gestenerkennung und -Verarbeitung. Tritt das zuvor definierte Ereignis auf, wird z. B. eine Geste bzw. der Verlauf einer Geste erkannt, welche die Parameter der Visualisierung verändern, wird dies an den **Client (Empfänger)** weitergeleitet. Dieser ist im Gegensatz zum Server ausschließlich für die Visualisierung zuständig, was einer Anwendung der empfangenen Werte auf die Daten bedeutet, um den gewünschten Effekt zu erhalten.

Als Beispiel wird vom Server eine **nächste Bild-Geste** erkannt und an den Client die neue Schichtbildnummer gesendet. Dieser muss nur noch die Anzeige des neuen Schichtbilds ausführen. Im Falle der einfachen Datenübertragung ist keine bidirektionale Kommunikation oder Rückkopplung notwendig, da lediglich die Anzeige aktualisiert wird. Jedoch wird durch das visuelle als auch das haptische Feedback eine entsprechende Reaktion an den Nutzer weitergeleitet.

In Abbildung 4.2 ist das entworfene **Client-Server-Konzept** schematisch dargestellt.

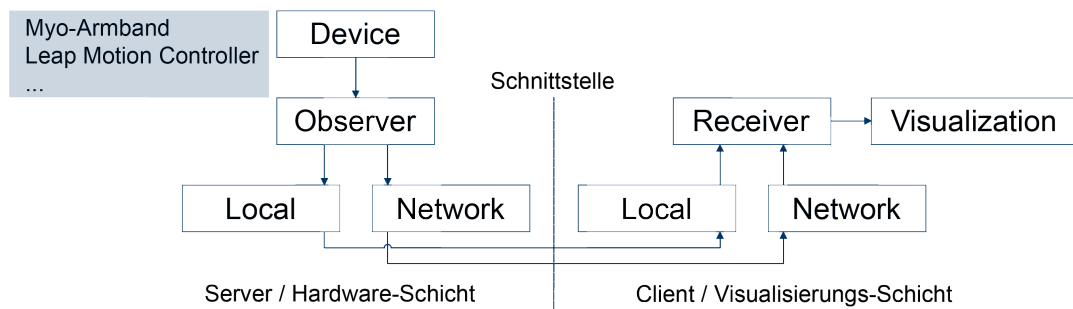


Abbildung 4.2: Schematische Darstellung der Hardwareschnittstelle. Auf der linken Seite (Server) befinden sich gerätespezifische Implementierungen, welche mittels Observer überwacht werden. Die rechte Seite (Client) dient als Empfänger, der aktualisierte Werte erhält und entsprechend die Visualisierung aktualisiert.

Die Hardware-Schicht ist ein Observer¹, welcher lokal (auf dem gleichen Computer) oder global (im Netzwerk) als Server dient. Die Visualisierungs-Schicht hat einen Receiver, der ebenfalls lokal oder global sein kann. Für die implementierte lokale Version von Observer und Receiver wurde die Qt-Bibliothek verwendet. Diese stellt mit einem **Signal-Slot-Konzept**² die notwendige Funktionalität zur Verfügung. Beide Seiten besitzen entsprechende Funktionen mit identischer Signatur und werden miteinander verbunden. Das bedeutet, dass ein Wert von der Sender-Funktion zur Empfänger-Funktion geleitet wird und entsprechend verarbeitet werden kann.

Ein Netzwerkadapter hingegen sendet den Wert einer Funktion von einem auf einen anderen Computer und reagiert entsprechend. Mit diesem Prinzip wäre auch eine räumliche Trennung möglich. Somit kann ein beliebiges Gerät die gewünschte Funktionalität implementieren, ohne die Visualisierung oder andere Bausteine des Programms kennen zu müssen. Lediglich der resultierende Wert muss an einen Empfänger gesendet werden, der diesen, wie beschrieben, verarbeitet.

¹Die Begriffe Observer und Receiver sind hier nicht im Sinne des Observer-Entwurfsmusters zu sehen, sondern als Beschreibung der Gerätebeobachtung und entsprechender Wertänderung auf der Empfängerseite.

²Typsichere und Ereignisgesteuertes Kommunikationskonzept zwischen Objekten in einem Programm.

4.2.2 Implementierung der Hardwareschnittstelle

Wie aus den Anforderungen aus Kapitel 3.2 und der Konzeption aus dem vorherigen Abschnitt abzuleiten ist, muss die Implementierung des Client-Server-Konzepts die beschriebene Funktionalität enthalten. Daraus ergeben sich die in Abbildung 4.3 zu sehenden UML-Diagramme der Klassen für einen lokalen Observer sowie Receiver.

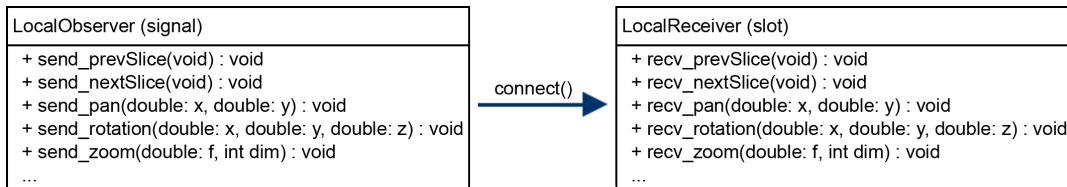


Abbildung 4.3: UML-Klassendiagramm des Client-Server-Konzept: Der Observer wird auf der Serverseite zur Anbindung unterschiedlicher Eingabegeräte eingebunden. Der Receiver befindet sich auf der Clientseite und aktualisiert die Visualisierung.

Ein weiterer Vorteil, unabhängig von der Trennung von Logik und Visualisierung, ist die Erweiterbarkeit der Funktionalität. Beide Seiten können Funktionen hinzufügen oder entfernen, um auf neue Anforderungen zu reagieren. Abhängig von der Trennung, jedoch auch als Vorteil zu betrachten, ist die Möglichkeit der Anbindung weiterer Geräte. In beiden Fällen sind dadurch die Anforderungen der Erweiter- und Anpassbarkeit aus der Analyse wie auch die Abstraktion der Funktionalität gegeben.

4.3 Datenanalyse und -logger

Das Mitschreiben und Analysieren von Anwendungs- und Anwenderdaten wird inzwischen in vielen Anwendungen eingesetzt, um Funktionen zu verbessern, Erweiterungen zu entwickeln oder Profile über das Verhalten von Nutzern zu generieren. Für diese Anwendung ist die Datenanalyse wichtig, da das Myo-Armband und die damit gesteuerten Funktionen evaluiert werden müssen. Speziell die Erkennungsrate und die damit in Zusammenhang stehende erkannten Gesten sind von großem Interesse. Zusätzlich können Hand- und Armbewegungen aufgenommen werden, was einen Vergleich des Bewegungsaufwands unterschiedlicher Eingabegeräte ermöglicht.

Zur Datenanalyse wurde dementsprechend ein **Logger** entworfen, der solche Daten aufnimmt und als .csv-Datei speichert, wodurch eine direkte Auswertung in einem Ta-

bellenkalkulationsprogramm möglich ist. Der Umfang der Datenerhebung ist je nach Anwendungszweck anpassbar, um weitere oder weniger Informationen zu erhalten. Für den Anwendungsfall dieser Thesis ist die **Genauigkeit der Gestenerkennung** von Interesse, da kein Vergleichssystem vorhanden ist (d. h. keine Arbeiten, die eine myoelektrischer Gestensteuerung zur Interaktion mit medizinischer Software verwenden). Dadurch kann gezeigt werden, welche Gesten gut, schlecht oder gar nicht erkannt und entsprechend herausgefiltert werden. Derartige Daten umfassen nur den Zeitpunkt und die erkannte Geste, keine Bewegungsdaten. Eine ausführliche Auswertung dieser Daten ist im nachfolgenden Kapitel bei den Analysen der Funktionsstudien zu finden.

4.4 Gesten und Funktionen

Wie zuvor in Kapitel 2.2 erläutert, gibt es verschiedene Arten von Gesten. Je nach Bedingungen des Arbeitsumfelds sind Gesten geeignet oder ungeeignet. Dieser Abschnitt befasst sich mit den Gesten des Myo-Armbands und den Funktionen, welche in der entwickelten Anwendung damit umgesetzt sind. Ausgehend von den Funktionen sind dabei verschiedene Ansätze beschrieben, welche mit den einzelnen Sensoren des Armbands genutzt werden können. In Abschnitt 3.1.1 der Anforderungsanalyse wurden die umzusetzenden Funktionen in Tabelle 3.1 zusammengefasst. Die Kommunikation ist wie oben beschrieben über das Signal-Slot-Konzept der Qt-Bibliothek umgesetzt. Die Server-Seite enthält dazu die entsprechende Logik, um mit den Eingabegeräten (im Fall dieser Thesis das Myo-Armband) zu interagieren. Die Funktionalität dafür wird vom SDK des Armbands bereitgestellt und ist für die Parametrisierung der Funktionen der Bildnavigation zuständig. Dabei wurden im Laufe der Entwicklung unterschiedliche Ansätze untersucht, welche die gesamte Sensorik des Myo-Armbands benutzen, wie beispielsweise das vorhandene Gyroskop zur Drehung oder den Beschleunigungssensor zur Verschiebung eines Objekts. Der Vorteil aus einer Vielfalt von verfügbaren Sensoren ist die daraus entstehende Menge an unterschiedlichen Gesten, die entsprechend auf eine spezielle Funktion angewandt werden können. Der Nachteil dabei ist wiederum ein erhöhter Test- und Lernaufwand bei der Entwicklung und Bedienung der Anwendung.

Im Vergleich zu Kamera-basierten Systemen, bei denen die Gesten frei definiert wer-

den können, hat das Myo-Armband einen festen Satz von fünf unterschiedlichen und gut unterscheidbaren Gesten (siehe Abbildung 4.4), welche die Basis eines minimalen Gestenalphabet darstellen. Um die Anwendung dementsprechend zu realisieren, wurden nur die Gestendaten genutzt.

4.4.1 Gesten des Myo-Armbands

Wie teilweise schon in Abschnitt 2.3 bei der Beschreibung der Unterarmmuskulatur erläutert wurde, sind gewisse Handbewegungen als Geste definiert. Die genutzte Technologie im Myo-Armband erkennt in diesen EMG-Signalen Muster und kann daraus wiederum eine Handgeste ableiten. Dabei werden die in Abbildung 4.4 (a) – (e) ikonisch skizzierten Handgesten zur Verfügung gestellt. Genutzt werden in der entwickelten Anwendung alle dieser Gesten, um die oben beschriebenen Funktionen der Anwendung vollständig zu steuern. Nachfolgend werden die einzelnen Gesten inklusive einer Beschreibung ihrer zugehörigen Funktion aufgelistet.

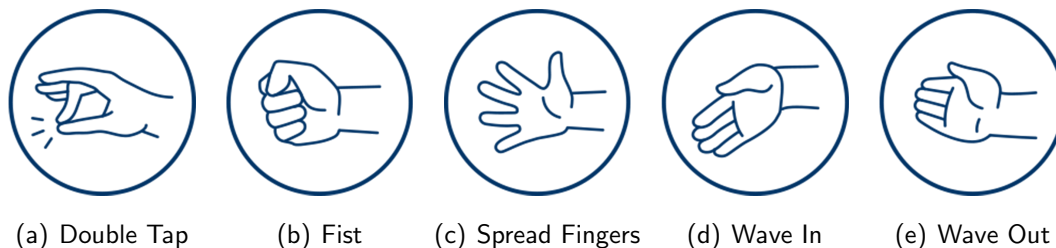


Abbildung 4.4: Verfügbares Gestenalphabet des Myo-Armbands (Bildquelle: Branding Leitfaden Thalmic Labs Inc. [15])

Ein Überblick zu verschiedenen Gesten und Definitionen wurde in Abschnitt 2.2 gegeben. Die fünf Gesten des Myo-Armbands können nach dieser Einteilung als manipulative und symbolische Gesten betrachtet werden (vgl. Abschnitt 2.2). Zudem kann nach [18] eine Einteilung in unterschiedliche Phasen erfolgen, da jede Geste zur Erkennung eine Ruhephase benötigt, anschließend in eine Gestenbewegung übergeht und abschließend für eine bestimmte Zeit gehalten werden kann.

- **Rest:** Ruheposition der Hand und des Arms. Dabei wird keine Geste erkannt. Zwischen jeder einzelnen Geste ist diese Position einzunehmen.

- **Double Tap:** Zusammentippen von Daumen und Mittelfinger. Diese Geste wird vom SDK zum Sperren und Entsperren des Armbands vorgegeben.
- **Fist:** Zur Faust geballte Hand.
- **Spread Fingers:** Offene Hand mit gespreizten Fingern.
- **Wave In:** Wink-Bewegung der Hand nach innen. Diese Bewegung kann medizinisch als Palmarflexion bezeichnet werden (vgl. Anhang B).
- **Wave Out:** Wink-Bewegung der Hand nach außen. Diese Bewegung kann medizinisch als Dorsalflexion bezeichnet werden (vgl. Anhang B).

4.4.2 Abbildung von Gesten auf deren Funktion

Zur Umsetzung eines minimalen Gestenalphabets, wurden die fünf oben erläuterten (**expliziten**) **Navigations-Funktionen** (Tabelle 3.1) zur Bildnavigation auf vier **Grundfunktionen** reduziert, welche die komplette Software, ohne zusätzliches Eingabegerät bedienen.

1. **Sperrfunktion:** Sperrung der Software, wodurch unabsichtliche und ungewollte Interaktion verhindert wird.
2. **Auswahlfunktion:** Aktivierung der Auswahl einer expliziten Navigations-Funktion.
3. **Parameterwahl:** Einstellung der Geschwindigkeit bzw. Schrittweite einer expliziten Funktion.
4. **Anwendung der Funktion:** Positive (vor) und negative (zurück) Benutzung der Funktionsauswahl und jeder expliziten Navigations-Funktion.

Der Vorteil eines solchen minimalen Gestenalphabets ist der minimale Aufwand sich für jede Funktion eine spezielle Geste merken zu müssen. Die Anwendung von Werkzeugen, Auswahl und Parametrisierung lässt sich dementsprechend auf zwei Gesten zum De- und Inkrementieren reduzieren. Realisiert ist diese Grundfunktion mit den zwei bereitgestellten Gesten **Wave In** und **Wave Out**. Das hat einen zusätzlichen Vorteil, da diese Gesten gegensätzlich und dafür gut zugeschnitten sind. Zur Auswahl der expliziten Funktionen wurde die **Fist**-Geste genutzt. Diese ist einfach auszuführen und wurde während der Operationen der klinischen Tests selten vom Chirurgen explizit

als Geste ausgeführt (vgl. Abschnitt 5.3.3). Ähnlich sieht es mit der Parametrisierung mittels **Spread Fingers**-Geste aus. Beide dienen jedoch nur dem Fokuswechsel, die eigentliche Auswahl findet mit den **Wave**-Geste statt. Als Beispiel würde ein Ablauf zur Auswahl eines bestimmten Schnittbildes wie folgt aussehen:

1. Entsperren der Anwendung (Double Tap)
2. Aktivierung der Funktionsauswahl (Fist)
3. Auswahl der Funktion (Wave In/Out)
4. Bestätigung der Funktionswahl (Fist)
5. Bestimmung der Geschwindigkeit der Interaktion (Spread Fingers)
6. Anwendung der gewählten Funktion auf den Datensatz (Wave In/Out)
7. Optional: Sperren der Anwendung nach Beendigung des Ablaufes (Double Tap)

4.5 Visual Interaction Application

Die im Verlauf dieser Masterarbeit entwickelte prototypische Anwendung dient primär als Testumgebung für unterschiedliche Eingabegeräte und zur Evaluation von Interaktionen mit diesen. Die genutzte Schnittstelle erlaubt die Einbindung unterschiedlicher Hardware, ohne dass das Programm entsprechend angepasst werden muss. Dadurch kann ein neues Gerät individuell implementiert und die Funktionalität der Anwendung weiterhin gewährleistet werden, was den direkten Vergleich zwischen unterschiedlichen Geräten und Gesten für eine einzelne Funktion ermöglicht.

Wie in den vorherigen Abschnitten beschrieben, ist die Schnittstelle die Kernkomponente der Anwendung (Abbildung 4.5). Diese verbindet (für den hier beschriebenen Anwendungsfall) das Myo-Armband als Eingabegerät mit den Funktionen zur Navigation durch die dargestellten Daten. Die genutzte Visualisierung wird vom VTK bereitgestellt. Dazu gehört einerseits eine Anzeige von 2D-Schichtbilddaten, die als DICOM-Datei eingelesen werden. Andererseits ist auch eine Anzeige für 3D-Planungsmodelle vorhanden, welche im OBJ-Dateiformat eingelesen werden. Zur Analyse der Anwenderdaten besitzt sie zudem den in Abschnitt 4.3 erläuterten Datenlogger zur Aufzeichnung von Gestendaten.

Diese Anzeigen sind in eine Benutzeroberfläche integriert, die ein visuelles Feedback-System bereitstellt. Damit werden dem Nutzer Informationen zu ausgewählten Funktionen und der eingestellten Geschwindigkeit einer Funktion (grün bei Auswahl, sonst grau) sowie der aktuelle Sperrstatus der Anwendung angezeigt (rot gesperrt, grün nicht gesperrt). Textuelles Feedback umfasst die Informationen zum ausgewählten Schichtbild, Zoomfaktor und der Rotation des Planungsmodells. Weiteres Feedback wird dem Nutzer des Myo-Armbands in Form von Vibration gegeben. Der Sperrstatus wird beispielsweise durch Vibration mitgeteilt. Es besteht auch die Möglichkeit diese Vibration gezielt auszulösen, um dem Nutzer weitere Informationen zu geben.

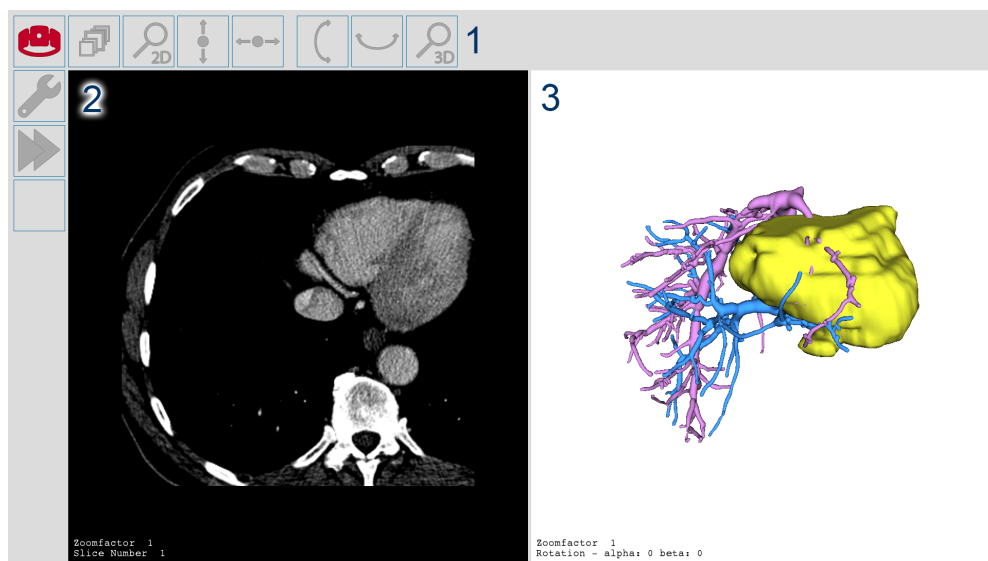


Abbildung 4.5: Benutzeroberfläche mit visuellem Feedbacksystem der aktuellen Funktionsauswahl, Parametrisierung und des Sperrstatus (1), 2D-Visualisierung für CT- oder MRT-Schnittbilder (2) und 3D-Visualisierung für Planungsmodelle (3).

5 Evaluation

Dieses Kapitel befasst sich mit der Evaluation des **Myo-Armbands** und der erstellten **Visual Interaction Application** bezüglich der definierten Anforderungen in Kapitel 3. In Abschnitt 5.1 sind Hypothesen aufgestellt, die im Verlauf der Arbeit mittels Benutzungstudie überprüft wurden. Abschnitt 5.2 beschreibt die Durchführungen, die eine Funktions- und Interaktionsstudie sowie einen klinischen Test im Institut für Neuroradiologie umfassen. Abschließend sind die Auswertungen und die daraus abgeleiteten Ergebnisse zu erläutern.

5.1 Hypothesen

Bis auf wenige Forschungsgruppen [31, 32] weltweit, ist die Kontrolle mittels myoelektrischer Eingabegeräte primär im Bereich der Armprothetik und Rollstuhlsteuerung [24] zu finden. Andere Anwendungszwecke sind wie oben erwähnt medizinisch-diagnostischer Natur oder auf die Signalanalyse [24, 30, 29, 28] bzw. auf die Erforschung von passenden Handgesten [27] beschränkt. Aufgrund eines dadurch vorhandenen Mangels an Vergleichssystemen ist die Evaluation als hypothesengenerierende Studie bzw. Machbarkeitsstudie anzusehen.

Die Ergebnisse sollen dazu beitragen, eine Aussage über die Eignung myoelektrischer Steuerung via Myo-Armband für die Interaktion mit medizinischen Bilddaten im OP zu treffen. Aus dem erstellten Kriterienkatalog des Kapitels 3.3 ergeben sich folgende Fragestellungen für die Auswertung des Myo-Armbands als Eingabegerät:

1. **Verwendbarkeit des Myo-Armbands im Operationssaal:** Sind klinische Voraussetzungen wie Sterilität und Gerätestandards für den Einsatz gegeben?

2. **Interaktion mit medizinischen Bilddaten:** Ist die volle Kontrolle einer Anwendung mittels minimalem Gestenalphabet umsetzbar?
3. **Tragekomfort des Myo-Armbands:** Entstehen durch das Armband Unannehmlichkeiten für den operierenden Arzt?
4. **Lernkurve für die Benutzung:** Wie lange ist die Trainingszeit mit Armband und Anwendung?
5. **Hardwareseitige Probleme:** Welche technischen Herausforderungen müssen bei der Entwicklung und Optimierung der Gesten-basierten Steuerung mit dem Myo-Armband beachtet werden?

Nachfolgend sind die zwei Benutzungsstudien beschrieben, die auf Basis dieser Fragestellungen und des Kriterienkatalogs entworfen wurden.

5.2 Beschreibung der Benutzungsstudien

Die entworfenen Benutzungsstudien lassen sich in zwei Teilstudien unterteilen. In der ersten Studie (nachfolgend als Funktionsstudie bezeichnet) liegt das Hauptaugenmerk auf der Funktionalität des Myo-Armbands als Eingabegerät. Dabei sind die zu evaluierenden Kategorien die Erkennungsrate, der Nutzerumgang und der Tragekomfort des Armbands. Die zweite Studie (nachfolgend als Interaktionsstudie bezeichnet) fokussiert die Interaktion eines Benutzers mittels Myo-Armband zur Steuerung einer Navigationsanwendung in medizinischen Bilddaten.

5.2.1 Funktionsstudie

Zur Evaluation des Myo-Armbands als Eingabegerät wurden zwei unabhängige Untersuchungen durchgeführt, die aufzeigen sollen, welche Vor- und Nachteile vom Gerät ausgehen, worauf der Benutzer nur eingeschränkten oder sogar gar keinen Einfluss hat. Die erste Untersuchung fand am Institut für Neuroradiologie an der Universitätsklinik Magdeburg statt. Hierzu wurde das Myo-Armband mehreren Ärzten vorgestellt und erklärt, welche Anwendung im Verlauf der Masterarbeit entsteht. Zudem wurde erläutert, welche Probleme bei fehlerhafter Gestenerkennung während eines Eingriffs

entstehen könnten und dass demzufolge eine praktische Anwendung des Armbands zur Überprüfung der Erkennungsrate notwendig sei.

Eine Oberärztin und ein Assistenzarzt waren bereit, das Armband während einer Intervention zu tragen, um währenddessen Gestendaten erheben zu können. Diese Daten, in Kombination mit den Protokollen der Eingriffe, liefern eine Aussage über mögliche Herausforderungen, welche bei der Benutzung des Myo-Armbands im OP auftreten können. Eine frühzeitige Erkennung solcher Hürden hat den Vorteil, diese in die Planung und Entwicklung der Anwendung mit einbeziehen zu können. Nach jedem Eingriff wurden zusätzlich Fragen zum Tragekomfort gestellt, was eine Aussage über die Bereitschaft ermöglicht, ein solches Eingabegerät in der Zukunft anzuwenden.

Die zweite Untersuchung fand im Forschungslabor der **Experimentellen Fabrik** statt und wurde als Funktionsstudie entworfen. Das heißt, die Funktionalität wurde im Hinblick auf ihre Anwendbarkeit untersucht. Dabei ging es um die Erkennungsrate der einzelnen Gesten bei expliziter Ausführung (siehe Abschnitt 4.4). An dieser Studie nahmen 20 Probanden aus verschiedenen Fachrichtungen und mit unterschiedlichen Vorkenntnissen in Bezug auf alternative Eingabegeräte teil (eine detaillierte Aufschlüsselung befindet sich in Abschnitt 5.3.1). Der Ablauf dieser Studie gestaltete sich für jeden Probanden gleich: In einer Einführung wurde kurz das Myo-Armband als Eingabegerät vorgestellt. Danach wurde das Armband am stärkeren Arm angelegt und in einer Trainingsphase die einzelnen Gesten und deren Ausführung erklärt. In dieser Phase hatte jeder Proband so viel Zeit wie nötig, um den Zusammenhang zwischen Handbewegung und Gestenerkennung zu verstehen und jede Geste auszuprobieren. Im Anschluss an das Training, wurde jeder Proband dazu aufgefordert, eine zufällig ausgewählte Geste zehnmal hintereinander auszuführen (siehe Abbildungen 5.1).

Danach gab es eine kurze Entspannungsphase. Dieser Vorgang wurde für jede der fünf Gesten wiederholt. Nach Abschluss dieser Phase wurde der Test am schwächeren Arm durchgeführt. Parallel dazu wurde der Proband dazu aufgefordert, laut zu denken (Think-Aloud-Methode [63]), um Unannehmlichkeiten oder andere Gedanken zur Funktionalität zu protokollieren. Nachdem der Funktionstest beendet war, wurde von jedem Probanden ein Fragebogen (siehe Anhang A) zum Tragekomfort ausgefüllt. Dieser entstand auf Basis der ersten persönlichen Tests mit dem Armband.

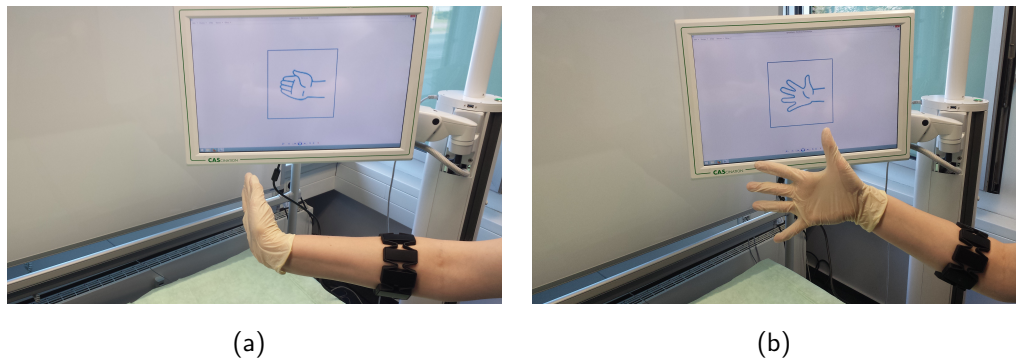


Abbildung 5.1: Aufbau der Funktionsstudie: Jeder Proband bekam eine Geste angezeigt, die er zehnmal wiederholen musste, um die Erkennungsrate zu evaluieren.

5.2.2 Interaktionsstudie

Ziel dieser Studie war es, eine Aussage über die Eignung eines minimalen Gestenalphabets zur vollen Kontrolle einer Anwendung zur Interaktion mit medizinischen Bilddaten zu erhalten. Ebenso sollte die Abbildung der einzelnen Gesten auf die oben beschriebenen Funktionen sowie die Gesten selbst evaluiert werden. Im Vergleich zur Funktionsstudie, bei der ein großes Spektrum von Vorkenntnissen, unterschiedlichen Armen und Nutzertypen gewünscht war, sind die Probanden für die Interaktionsstudie auf Experten beschränkt. In diesem Fall waren es Assistenzärzte und Medizinstudenten (eine detaillierte Aufschlüsselung befindet sich in Abschnitt 5.3.2), die entsprechende Erfahrungen im dem Umgang mit medizinischen Bilddaten aufweisen.

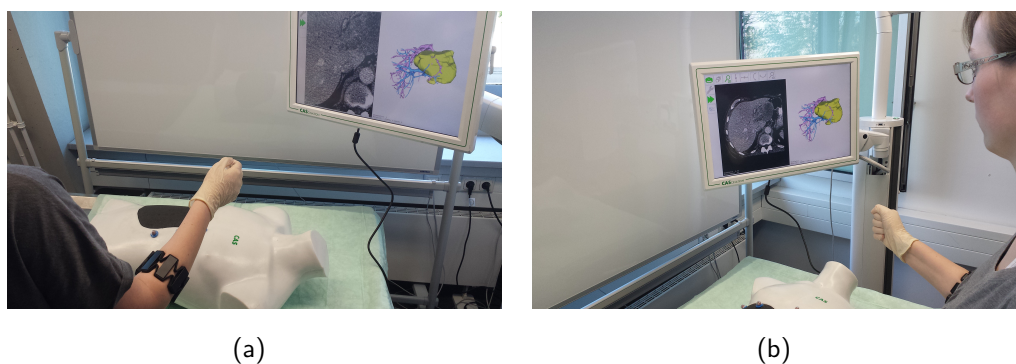


Abbildung 5.2: Konfiguration der Interaktionsstudie: Der Aufbau bestand aus einem Operationstisch mit Dummy und dem CAScination CAS-ONE IR System zur Anzeige der 2D- und 3D-Daten. Weiter ist eine Probandin bei der Ausführung der einzelnen Aufgaben der Interaktionsstudie zu sehen.

Der verwendete Studienaufbau im Labor entsprach einem klinischen Szenario mit entsprechenden Anzeigegeräten (CAS-ONE IR [64]) und Operationstisch, wie es in den Abbildungen 5.2 zu sehen ist. Der genutzte Studienentwurf ist mit dem der Funktionsstudie vergleichbar: Jeder Proband bekam eine kurze Einführung zur Funktionalität des Armbands. Darauf folgte eine erste Trainingsphase, um sich mit dem Armband vertraut zu machen. Die zweite Trainingsphase bestand aus einer kurzen Erläuterung zu den einzelnen Funktionen, welche von der Anwendung bereitgestellt werden sowie den Gesten, die für die jeweiligen Funktionen zuständig sind. Danach konnte jeder Proband frei mit der Anwendung interagieren, um die Bedienung zu verstehen. In beiden Phasen war kein Zeitlimit gesetzt. Die abschließende Evaluation bestand aus den folgenden vier Aufgaben, die in Anhang B genauer beschrieben sind:

1. 2D: Lokalisierung eines Lebertumors in MRT-Daten.
2. 2D: Auswahl eines bestimmten Schichtbilds, Vergrößerung auf einen vorgegebenen Faktor und Ausrichtung des Bilds zur Zentrierung des Tumors.
3. 3D: Rotation eines Modells zu einer vorgegebenen Orientierung.
4. 3D: Vergrößerung der Ansicht auf einen vorgegebenen Faktor.

Zum Abschluss wurde jedem Probanden ein Fragebogen (Anhang A) zur Bedienung der Anwendung und der Benutzung der einzelnen Gesten ausgehändigt. Dieser basiert auf einer angepassten Version des Benutzbarkeitsfragebogens nach ISONORM 9241/10 (Prümper 1993 [65]) bezogen auf Aspekte wie Natürlichkeit oder Ausführung der einzelnen Gesten.

5.3 Auswertungen und Ergebnisse

In diesem Abschnitt sind die Auswertungen der Funktionsstudie, Interaktionsstudie und der klinischen Tests beschrieben. Zuerst wird dabei auf die quantitative Auswertung der Fragebögen sowie der aufgenommenen Gestendaten eingegangen. Anschließend folgt eine qualitative Auswertung des Feedbacks, welches von den Probanden gegeben wurde. Auf Basis dieser Ergebnisse folgt in Abschnitt 5.5 eine Diskussion, welche das Fundament für zukünftige Forschungsarbeiten in diesem Bereich liefern soll.

5.3.1 Funktionsstudie

Wie oben kurz erwähnt, nahmen an der Funktionsstudie 20 Probanden aus verschiedenen Fachgruppen teil. Darunter fallen zum Beispiel wissenschaftliche Mitarbeiter, Chemiker, Diplom-Ingenieure und Studenten mit unterschiedlichen Studienrichtungen. Weitere demographischen Daten umfassen das Alter, Geschlecht, die Händigkeit der Probanden sowie deren Armumfänge. Es ergaben sich ein Durchschnittsalter von 27,2 Jahren und ein durchschnittlicher Armumfang von 24,45 cm, welcher bis auf wenige Ausnahmen jeweils für beide Arme gleich war. Unterschiede waren bei Probanden festzustellen, die eine einseitige Belastung durch Sportarten wie Badminton oder Tennis ausüben. Weitere Daten sind in den nachfolgenden Diagrammen in Abbildung 5.3 grafisch dargestellt.

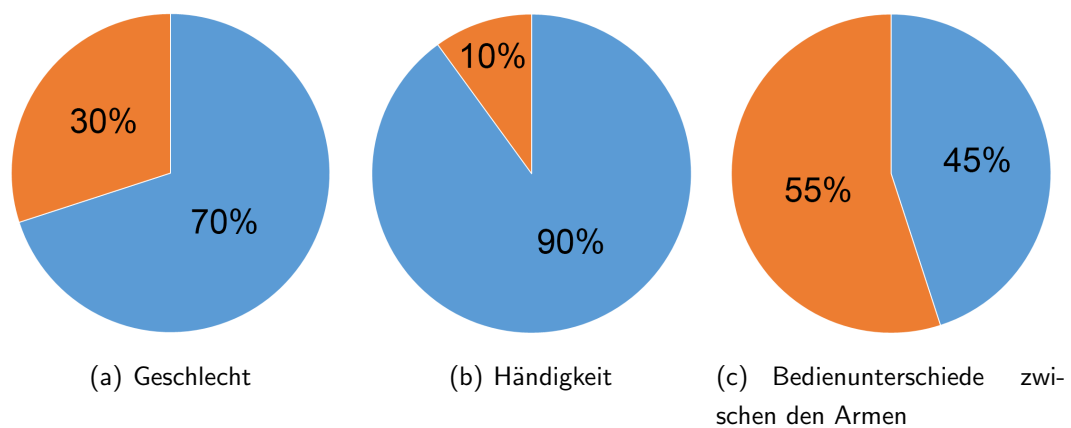


Abbildung 5.3: Die Diagramme zeigen die grafische Auswertung von Geschlecht (weiblich (blau) und männlich (orange)), Händigkeit (rechtshändig (blau) und linkshändig (orange)) und festgestellte Unterschiede bei der Bedienung zwischen den Armen beim Tragen/Benutzen des Armbands (keinen Unterschied festgestellt (orange) und Unterschied festgestellt (blau)).

Weitere durch den Fragebogen erhobene Daten sind die Erfahrungen mit unterschiedlichen Eingabegeräten zur alternativen bzw. berührungslosen Interaktion und vorhandenem Fachwissen im Bereich Mensch-Maschine-Interaktion. Überraschend ist hier, dass selbst trotz der weiten Verbreitung von Spielekonsolen wie der Microsoft Xbox mit Kinect oder der Nintendo Wii mit Wiimote weniger als 50% der Probanden Erfahrung mit alternativen Eingabegeräten hatten. Demgegenüber steht jedoch die Nutzung von Touchscreen- und Spracheingabe, welche durch Smartphones nahezu jedem

bekannt sind. Eine detaillierte Übersicht der Auswertung ist in Tabelle 5.1 und den Diagrammen 5.4(a) und 5.4(b) dargestellt.

Tabelle 5.1: Diese Tabelle zeigt die Auswertung des zweiten Teils des Fragebogens der Funktionsstudie zur Erfahrung des Probanden mit unterschiedlichen Eingabegeräten. Dabei wurde die Gestensteuerung mit speziellen Eingabegeräten sowie die alternative Eingabe im Alltag fokussiert.

	Erfahrungen mit Gestensteuerung				Eingabe	
	Kinect	Leap Motion	Wii	Andere	Sprache	Touch
Ja	10%	5%	40%	10%	45%	100%
Nein	90%	95%	60%	90%	55%	0%

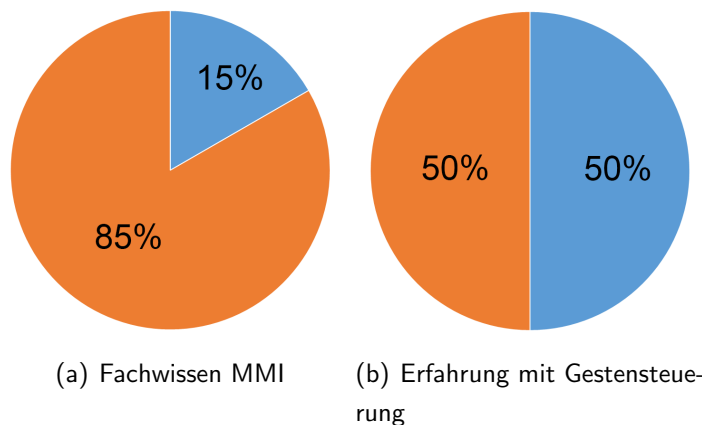


Abbildung 5.4: Die Diagramme zeigen die grafische Auswertung von Fachwissen im Bereich Mensch-Maschine-Interaktion (ohne Fachwissen (orange) und mit Fachwissen (blau)) und Erfahrung mit Gestensteuerung (ohne Erfahrung (blau) und mit Erfahrung (orange)).

Nach Abschluss der Funktionsstudie wurden weitere Daten zum Tragekomfort des Myo-Armbands erfasst. Die Probanden wurden gefragt, inwieweit sie Beeinträchtigungen bei der Bewegung feststellten, ein einschnürendes oder unangenehmes Kältegefühl im Arm entstand und welche der Gesten in ihrer Ausführung unangenehm waren. Eine Übersicht der Ergebnisse ist in Tabelle 5.2 gegeben. Insgesamt war das erhaltene Feedback sehr positiv, was die Bereitschaft zeigt, das Armband zu tragen.

Die quantitative Analyse der aufgenommenen Daten umfasst die Trainingszeiten sowie die einzelnen erkannten Gesten bei der expliziten Ausführung. Dazu wurden bei

Tabelle 5.2: Übersicht des Tragekomforts des Myo-Armbands in verschiedenen Kategorien.

	Ja	Nein
Bequem	100%	0%
Einschnürend	30%	70%
Kältegefühl	0%	100%
Bewegungseinschränkung	10%	90%
Gesten anstrengend	60%	40%

allen Trainingsphasen die Zeit gemessen, die ein Proband dazu benötigte sich mit den einzelnen Gesten auseinanderzusetzen. Dabei wurde kein Zeitlimit vorgegeben und es konnte frei entschieden werden, wann die Trainingsphase beendet ist. Die durchschnittliche Zeit für den stärkeren Arm lag bei 111 Sekunden mit einer Standardabweichung (SD) von 60 Sekunden. Beim schwächeren Arm lag die durchschnittliche Zeit mit 98 Sekunden und einer SD von 58 Sekunden etwas darunter. Dies kann durch das bereits gestiegene Verständnis der Funktion durch die erste Benutzung erklärt werden.

Während jeder Ausführung der Aufgaben der Funktionsstudie wurde mittels Datenlogger aufgezeichnet, welche Geste erkannt wurde. Die Auswertung dieser Ergebnisse zeigt, bei welchen Gesten eine gute Erkennungsrate vorhanden ist und welche sich somit für die Steuerung eignen. Dem gegenüber kann auch gezeigt werden, welche Gesten mit schlechter Erkennungsrate weniger gut geeignet sind. Auf Basis dieser Daten wurde die Anwendung angepasst, um einen reibungslosen Ablauf ohne Fehlerkennungen oder unabsichtliche ausgelöste Gesten zu gewährleisten. Die nachfolgenden Diagramme zeigen die grafische Auswertung der aufgezeichneten Daten.

Es ist zu sehen, dass die **Wave Out**-Geste (Abbildung 5.5(e)) mit 86% die beste Erkennungsrate aufweist. Im Vergleich zu den Anderen, ist auch die Fehlerkennung der **Double Tap**-Geste fast 0%. Darauf folgt die **Fist**-Geste (Abbildung 5.5(b)) die mit 79% einen sehr guten Erkennungswert aufweist. Anzumerken ist, dass wie auch bei der **Spread Fingers**-Geste die gegenseitige Fehlerkennung bei etwas über 10% liegt. Das heißt, die **Spread Fingers** wird als **Fist**-Gesten erkannt und umgekehrt. Dieser Wert ist jedoch akzeptabel, da die abgebildeten Funktionen in der Anwendung zusammenhängen und keine Konflikte bei der Interaktion entstehen. Zudem besitzen

die **Wave In**- und die **Spread Fingers**-Geste (Abbildungen 5.5(d) und 5.5(c)) mit einer Erkennungsrate von 72% gute Werte. Die schlechteste Erkennung wies die **Double Tap**-Geste (Abbildung 5.5(a)) mit 56% auf. Dieser Wert war ausschlaggebend, um eine zweistufige Sperrfunktion in der Anwendung einzubauen.

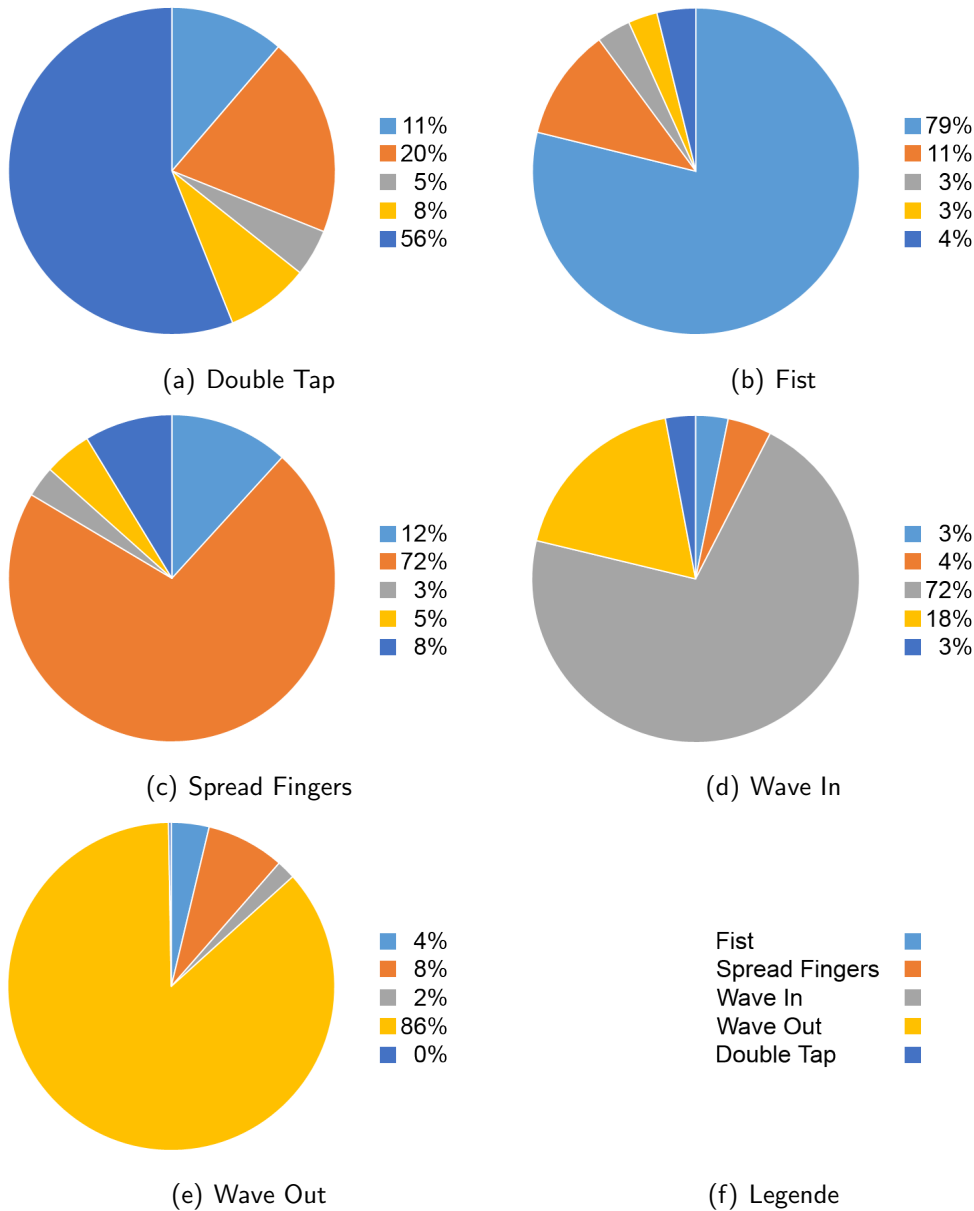


Abbildung 5.5: Auswertung der Funktionsstudie. Jedes Diagramm enthält die von 20 Probanden explizit ausgeführten und erkannten zehn Gesten und zeigt die Erkennungsrate in Prozent (Werte wurden auf ganze Zahlen gerundet) an.

Abschließend hatte jeder Proband die Möglichkeit, Kommentare zu den Gesten oder

allgemein zur Verwendung des Myo-Armbands zu geben. Nachfolgend sind einige interessante und beachtenswerte Anmerkungen aufgelistet, welche mit in die Entwicklung und Optimierung der Anwendung eingeflossen sind.

- **Bequemlichkeit in Abhängigkeit der Tragezeit.** Einige Probanden merkten an, dass ein einschnürendes oder Kältegefühl nach längerem Tragen des Armbands bei ihnen vorstellbar sei.
- **Die Rest-Geste muss explizit bekannt sein.** Das bedeutet, dass der Nutzer genau wissen muss, wie welche Geste funktioniert und wie zwischen den einzelnen Gesten eine Pause gestaltet werden muss, damit keine Geste erkannt wird (Phasen einer Geste Abschnitt 2.2).
- **Individuelle Kommentare zu einzelnen Gesten.** Je nach Arm des Probanden (dick, behaart, muskulös) wurden die Gesten vom Armband unterschiedlich gut erkannt, wodurch einige Gesten mit größerer Anstrengung oder unangenehmer Handhaltung verbunden waren.
- **Ermüdung bei längerer Benutzung.** Abhängig von den einzelnen Gesten und den individuellen Ausführungen kann es auf Dauer zu Ermüdung oder Schmerzen im Arm bzw. Handgelenk führen. (Aussage einer Probandin: Bei einer bereits vorhandenen Sehnenscheidenentzündung ist die Benutzung problematisch)
- **Hektische Bewegungen führen zu Fehldetektion.** Wenn die Geste nicht korrekt ausgeführt wird, kommt es zu Fehldetektionen. Das heißt, es wird eine andere bzw. mehrere Gesten erkannt, anstatt nur die intendierte.

5.3.2 Interaktionsstudie

Im Gegensatz zur Funktionsstudie, bestand der Probandenpool der Interaktionsstudie aus neun Medizinstudenten und einer Assistenzärztin mit unterschiedlichem Level an Erfahrung (1. Semester bis drei Jahre Assistenzarzt). Das Durchschnittsalter betrug 23,8 Jahre. Die Händigkeit der Probanden war bis auf eine Ausnahme auf den rechten Arm beschränkt. Weitere personenbezogene Daten zur Erfahrung in verschiedenen Bereichen wurden in einem Fragebogen mittels fünfstufiger Likert-Skala erfragt. Die Ergebnisse in Tabelle 5.3 zeigen, dass die Probanden einen geringen Erfahrungsschatz mit radiologischer bzw. chirurgischer Software hatten und in Bezug

auf Freihand-Gesten-Interaktion sowie die Nutzung alternativer Eingabegeräte wenig bis keine Erfahrung vorwiesen.

Tabelle 5.3: Die Tabelle zeigt die Auswertung des Fragebogens zur Nutzung radiologischer oder chirurgischer Software, Freihand-Gesten und alternativer Eingabegeräte. Für die Auswertung wurde eine Likert-Skala von niemals (1) bis sehr häufig (5) verwendet.

Nutzung	Mittelwert	SD
Radiologische / Chirurgische Software	2,4	1,35
Freihand-Gesten-Interaktion	1,5	0,53
Microsoft Kinect	1,2	0,42
Nintendo Wii-Mote	1,5	0,52

Wie auch bei der Funktionsstudie wurden die Zeiten der Trainingsphase gemessen. Die Einführungszeit zur Bekanntmachung mit den einzelnen Gesten ist mit 103 Sekunden vergleichbar zu den Zeiten der Funktionsstudie. Interessanter ist die Zeit, die ein Proband dazu benötigt, die Funktionen der Anwendung mit den entsprechenden Gesten zu kontrollieren. Der Mittelwert lag mit 4:51 Minuten und einer SD von 1:59 Minuten (Tabelle 5.4: Training) in einem vertretbaren Rahmen. Was in der Trainingsphase weiter auffiel ist, dass die Probanden spielerisch mit der Anwendung interagierten. Ziellos wurden die Funktionen und Interaktionsvarianten ausprobiert, um sich auf die bevorstehenden Aufgaben vorzubereiten. Dieser Fakt kann für spätere Forschungszwecke abstrahiert werden, um die Kontrolle mittels Myo-Armband durch einfache, unspezifische und spielerische Aufgaben zu erlernen. Während der Durchführung der vier Aufgaben (Abschnitt 5.2.2) wurde wie im Training die Dauer gemessen, die zum Lösen der einzelnen Aufgaben benötigt wurde. In Tabelle 5.4 ist eine Übersicht der einzelnen Durchschnittszeiten und den entsprechenden SD gegeben. Den größten zeitlichen Aufwand nahm dabei die Rotation des 3D-Modells in Anspruch. Die Probanden hatten hierbei Schwierigkeiten die Rotation auf drei festen Achsen auszuführen und nicht wie gewohnt mit einer Trackball-Metapher. Die Interaktion mit den 2D-Schichtbildern hingegen gelang in den meisten Fällen ohne Probleme.

Da alle Aufgaben von den Probanden auf unterschiedliche Arten gelöst wurden, ist kein quantitativer Vergleich zu einem perfekten Datensatz (d. h. schnellster Weg zum gewünschten Ziel) möglich. Es kann jedoch gesagt werden, dass die Probanden bei der

Tabelle 5.4: Durchschnittszeiten sowie Standardabweichungen bei der Interaktionsstudie. Angabe der Zeiten in Minuten.

Aufgabe	Training	1 (2D)	2 (2D)	3 (3D)	4 (3D)
Mittelwert	4:51	1:06	2:03	2:14	0:53
SD	1:59	0:29	1:20	1:10	0:36

Interaktion die Funktionalität der Anwendung korrekt genutzt haben. Die Geschwindigkeit zum Blättern und Rotieren wurde so eingestellt, dass größere Distanzen mit einer haltenden Handbewegung überbrückt und anschließend eine Umschaltung auf Einzelschritte zur Feinjustierung auf den genau vorgegebenen Zielwert durchgeführt wurden.

Für die Bewertung der einzelnen Gesten und deren abgebildete Funktionen diente ein weiterer Fragebogen (Anhang A). Die Probanden sollten jede der fünf Gesten in Bezug auf Einfachheit, Natürlichkeit, Einprägsamkeit, Verständnis und Ermüdung bewerten (siehe Tabelle 5.5). Weiter bestand zudem die Möglichkeit, Kommentare zu den einzelnen Gesten zu geben.

Tabelle 5.5: Die Befragung wurde mittels Likert-Skala von *trifft gar nicht zu* (1) bis *trifft völlig zu* (5) durchgeführt.

	Double Tap	Fist	Spread Fingers	Wave In	Wave Out
Einfachheit	3,9	4,9	4,1	4,4	4,5
Natürlichkeit	3,9	4,8	4,2	4,2	4,4
Einprägsamkeit	4,7	4,9	4,7	4,6	4,6
Verständnis	3,8	4,4	4,0	4,2	4,2
Keine Ermüdung	3,8	4,6	4,1	4,0	4,1
Mittelwert±SD	4,02±0,38	4,72±0,22	4,22±0,28	4,28±0,23	4,36±0,21

Die Ergebnisse zeigen, dass alle Gesten von den Probanden gut angenommen wurden. Die **Fist**-Geste hat mit einem Mittelwert von 4,72 die besten Ergebnisse in den fünf Kategorien erzielt. Gefolgt von den beiden **Wave**-Gesten. Diese Gesten stellen einen Großteil der Interaktion mit der Anwendung dar und die Ergebnisse belegen, dass diese Wahl dafür geeignet ist. Die schlechteste Bewertung erhielt die **Double Tap**-Geste. Wie aus den Ergebnissen der Funktionsstudie abzuleiten ist, wurde die

fehlerhafte und willkürliche Detektion zum Problem. Die Anwendung wurde zufällig oder unabsichtlich gesperrt und konnte teilweise nur schwer entsperrt werden. Dadurch wurde zwar keine ungewollte Interaktion mit den Bilddaten ausgelöst, jedoch findet eine Beeinträchtigung des Arbeitsablaufs statt. Im Zusammenhang mit unabsichtlicher Auslösung von Funktionen, wurde der Proband sofort mit haptischem sowie visuellem Feedback darauf hingewiesen und konnte entsprechend reagieren.

Das Feedback der Probanden zur Software und den Gesten während den Benutzungsstudien ist bis auf wenige Ausnahmen positiv ausgefallen. In der Trainingsphase wurde die Software von den Probanden weitestgehend ausprobiert, sodass nur gelegentlich über die Gesten und Funktionen nachgedacht werden musste. Auch die damit verbundene Steuerung der Software war unproblematisch und übersichtlich. Die Gesten wurden trotz der geringen Vielfalt (minimales Gestenalphabet) als vorteilhaft für die Nutzung bezeichnet. Problematisch hingegen war die unabsichtliche Auslösung einzelner Gesten wodurch der Arbeitsfluss gestört wurde. Die vorgeschlagenen Gesten zur Steuerung wurden von den Probanden als natürlich, einfach zu merken und unkompliziert in der Ausführung gelobt.

5.3.3 Klinischer Test

Ein weiterer essentieller Teil der Evaluation ist der klinische Faktor, was unter anderem die Bereitschaft ein solches Gerät zu nutzen umfasst. Dank der bereits erwähnten Hospitationen, wurde das Myo-Armband von zwei Ärzten während unterschiedlicher Eingriffe getragen und ihre Gestendaten aufgenommen.

Infiltration mit Testlauf des CAS-ONE IR

Bei der im ersten klinischen Test beobachteten periradikulären Infiltration handelt es sich um einen Routineeingriff. Der einzige Unterschied zu sonst war der Testlauf des neuen Navigationssystem CAS-ONE IR [64] der Firma CAScination aus Bern. Das Armband wurde vom interventionellen Radiologen am rechten Arm für die Dauer von ca. 45 Minuten bei diesem Eingriff getragen. In Abbildung 5.6 ist die grafische Auswertung der mitgeschnittenen Gestendaten illustriert.

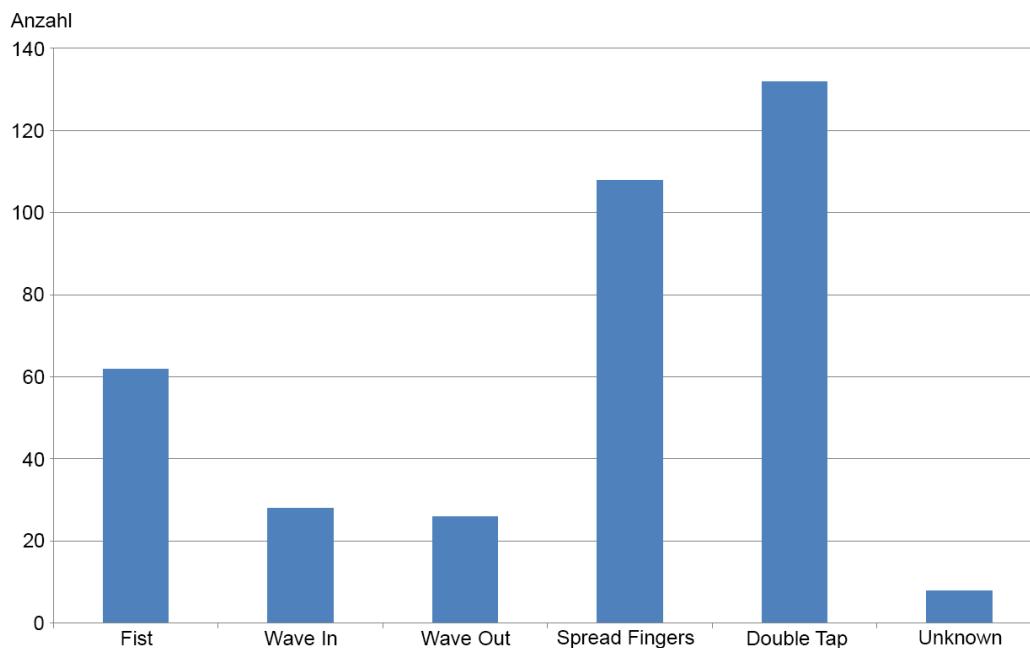


Abbildung 5.6: Anzahl der erkannten Gesten während einer Infiltration mit Testlauf des CAS-ONE IR Navigationssystems.

Es ist zu sehen, dass während des Eingriffs alle fünf Gesten mehrfach erkannt wurden. Die **Unknown**-Geste ist ein Verbindungsverlust zwischen Myo-Armband und Computer, dieser Fehler sollte bei einem produktiven Einsatz im Operationsaal nicht auftreten. Erklären lässt sich das zum einen durch den Abstand zwischen Radiologe und Computer im Kontrollraum und zum anderen durch mehrere Personen mit Schutzwesten aus Blei, die zwischen Radiologe und Computer das Signal blockieren. Eine Platzierung des Empfängers im Operationsaal kann dieses Problem beseitigen. Eine weitere Herausforderung ist die hohe Erkennungsrate von 132 **Double Tap**-Gesten während dieses Eingriffs. Aufgetreten ist dies meist bei der Benutzung des Touchscreens des CAS-ONE IR Systems, da das Tippen auf den Monitor das gleiche Muskelsignal wie die **Double Tap**-Geste erzeugt. Ausgelöst wurden die **Wave**-Gesten z. B. durch die Benutzung des Schaltpults zur Steuerung des C-Arms oder die **Fist**-Geste beim Benutzen einer Spritze. Laut Aussage des Radiologen war das Armband nicht störend, nur etwas eng am Arm.

Embolisation einer arteriovenöse Malformation im Gehirn

Bei diesem Eingriff hat die interventionelle Radiologin versucht, eine arteriovenöse Malformation im Gehirn des Patienten zu verkleben, um eine mögliche Ruptur zu verhindern. Das Myo-Armband wurde bei diesem Eingriff ebenfalls am rechten Arm und für eine Dauer von etwa zwei Stunden getragen. Die grafische Auswertung der mitgeschnittenen Daten ist in Abbildung 5.7 dargestellt.

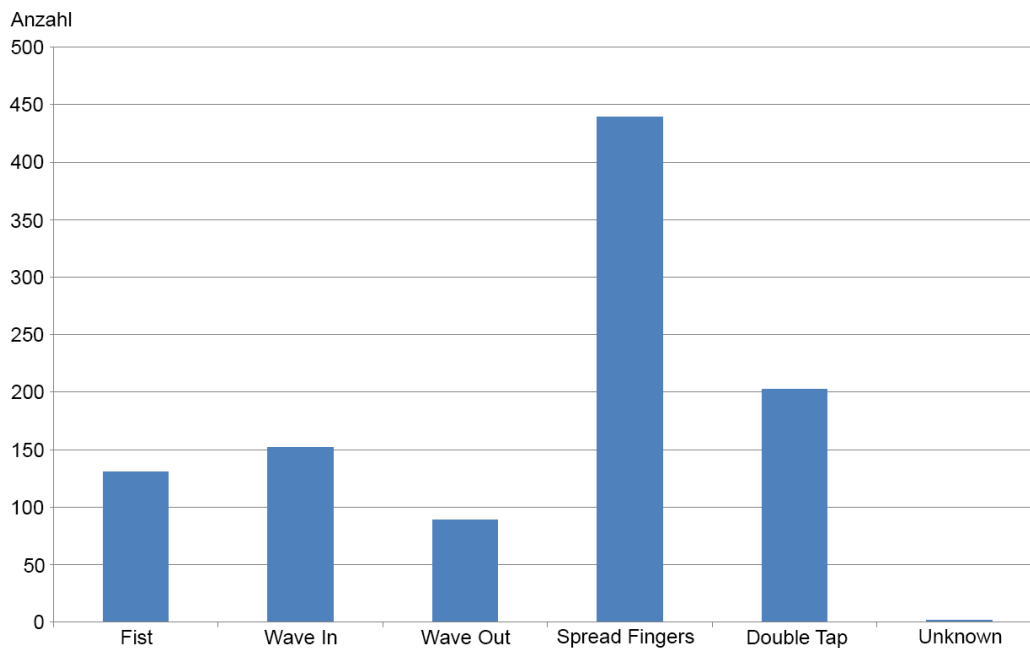


Abbildung 5.7: Anzahl der erkannten Gesten während einer Embolisation einer arteriovenösen Malformation im Gehirn.

Im Vergleich zur ersten klinischen Test traten nur zwei Verbindungsverluste auf. Die Radiologin bewegte sich nur selten von ihrem Platz am Operationstisch weg und es befanden sich weniger Personen mit Schutzwesten im OP. Während des Eingriffs wurden mehrere Spritzen injiziert, um den Weg des Katheters durch Kontrastmittelgabe zu identifizieren. Mehrfach wurden die Joysticks am Schaltpult zur Navigation in den Bilddaten und zum Einstellen des C-Arms verwendet. Diese drei Arbeitsschritte lösten bis auf wenige Ausnahmen eine Erkennung der **Spread-Fingers**-Geste aus. Bei diesen Handbewegungen werden ähnliche Muskelgruppen aktiviert, was diese Erkennung erklärt. Je nach Positionierung des Armbands ist auch hier eine gegenseitige Erkennung zwischen **Spread-Fingers**- und **Fist**-Geste vorhanden, was auch aus den Daten der Funktionsstudie hervorgeht. Phasenweise fand keine Erkennung während des Ein-

griffs statt, da die Ruheposition nicht erkannt bzw. nicht eingenommen wurde. Ist das Armband in einer solchen Situation gesperrt, findet auch keine Interaktion mit der Anwendung stattfinden. Wie auch beim ersten klinischen Test, war das Feedback der Radiologin positiv. Das Armband hat während des Eingriffs nicht gestört und würde auch bei zukünftigen Studien genutzt werden. Negativ zu bewerten ist jedoch, dass das haptische Vibrationsfeedback des Myo-Armbands nicht bemerkt wurde, wodurch ein unterstützendes System ausfallen würde.

Insgesamt kann gesagt werden, dass die Vorteile des Myo-Armbands in Bezug auf Sterilität und technische Beschaffenheit gegeben sind, was es für den Einsatz in einem Operationssaal geeignet macht. Einige kleinere Probleme in Bezug auf den Verbindungsverlust können durch entsprechende Positionierung des Empfängers behoben werden. Eine größere Herausforderung stellt jedoch die Gestenerkennung während eines normalen Arbeitsablaufes dar. Durch unterschiedliche Handbewegungen zur Steuerung des Operationstisches, des Navigationssystems und auch die Benutzung von Werkzeugen wie Spritzen und Kathetern würden unabsichtlich Gesten ausgelöst werden, wodurch die Interaktion mit der Anwendung ohne Nutzerwunsch stattfindet.

5.4 Beurteilung des Systems durch einen Arzt

Eine abschließende Evaluation des Systems am Institut für Neuroradiologie der Universitätsklinik Magdeburg, wurde mit Herrn Dr. med. Oleksandr Riabikin durchgeführt. In einer kurzen Einführung wurden die finale Software und die einzelnen Gesten mit den entsprechenden Funktionen präsentiert. Danach wurde das Myo-Armband von ihm benutzt, um mit der Anwendung zu interagieren. In einer persönlichen Stellungnahme, war der Vergleich zwischen dem entwickelten und dem momentan eingesetzten Angiographiesystem im Mittelpunkt.

Das aktuelle Problem ist die Position der Joysticks zur Bildnavigation am Schaltpult und die damit verbundene **große Entfernung zum Monitor**. Dadurch bestehen Probleme wichtige Details in den Aufnahmen auszumachen und der Operateur muss hin und her laufen. Ein System, welches eine Kontrolle der Bilddaten, **unmittelbar vor den Monitoren** erlaubt hat unter diesem Gesichtspunkt immense Vorteile.

Das System auf einen speziellen Anwendungsfall würde den **Arbeitsfluss und die Effektivität verbessern**. So wären beispielsweise eine Funktion zum Blättern in den Aufnahmen und die Auswahl eines passenden Referenzbilds, für die Anpassung der anderen Aufnahmen, ein umsetzbares Szenario. Dadurch wäre eine Unabhängigkeit zum Assistenten gegeben, welcher in dieser Zeit Vorbereitungen für kommende Schritte treffen könnte.

Als Nachteil wurden die **Wave**-Gesten angesprochen, da diese Handhaltung auf Dauer anstrengend werden könnten, da die Muskulatur etwas intensiver beansprucht wird. Hier wäre in zukünftigen Arbeiten zu untersuchen, inwieweit ähnliche und angenehmere Gesten, wie beispielsweise Wave-Gesten mit horizontaler anstatt vertikaler Handhaltung, eine umsetzbare Alternative darstellen. In Bezug auf die Rotation eines 3D-Modells ist das momentan genutzte System gut ausgelegt und auch die Platzierung der Darstellung auf den Monitoren ist für die Navigation gut geeignet.

5.5 Diskussion

Die Auswertung der durchgeführten Benutzungsstudien zur Funktion und Interaktion sowie der klinische Test des Myo-Armbands zeigen, welche Punkte bezüglich der aufgestellten Kriterien zu Verwendbarkeit (vgl. Tabelle 3.2) erfüllt wurden und an welchen Stellen nachgebessert werden muss.

Durch die Art und Weise, wie das Myo-Armband unter der Kleidung des Operators getragen wird, entsteht kein zusätzlicher potentieller Keimherd im OP. Dadurch ist das Kriterium der Sterilität (1) gegeben und eine wichtige klinische Anforderung an das System erfüllt. Aus den Ergebnissen der Zeitmessung (2), zur Bewältigung der Aufgaben der Interaktionsstudie, kann geschlossen werden, dass die Interaktion bei korrekter Benutzung keinen zusätzlichen Aufwand bedeutet. Hier fehlt jedoch der direkte Vergleich zu einem System, das in einem OP eingesetzt wird oder anderen Eingabegeräten. Dies kann in zukünftigen Arbeiten aufgegriffen und detailliert untersucht werden. Die Kosten (3) für die Anschaffung eines Myo-Armbands betragen 200 US-Dollar (Stand: Mai 2015), dazu kommen die Kosten für die Entwicklung und Programmierung der Schnittstelle sowie mögliches Training des Personals. Dies

müsste wiederum in einem direkten Vergleich in einer Kosten-Nutzen-Rechnung genauer untersucht werden. Das Armband ist jedoch für Forschungszwecke und die damit verbundene Entwicklung recht preiswert.

Das Unabhängigkeitskriterium (4) an die Hardwareschnittstelle kann nur eingeschränkt als erfüllt betrachtet werden. Das bereitgestellte SDK ist nur für die Plattformen Windows, Mac, iOS und Android verfügbar, was die Entwicklung auf einem Linux-basierten System nicht erlaubt. Jedoch ist der Programmcode frei verfügbar und wird ständig weiterentwickelt. Die genutzte Bluetooth-Technologie funktioniert ebenfalls ohne zusätzliche Hardwareanforderungen an jedem Computer mit USB-Anschluss. Die implementierte Schnittstelle nutzt die Qt-Bibliothek und ist für alle Plattformen kostenfrei verfügbar. Zudem sind andere genutzte Toolkits (VTK) in den Softwareentwicklungsprozessen standardisiert und quelloffen.

Durch die Nutzung des Client-Server-Konzepts, umgesetzt über Signale und Slots der Qt-Bibliothek, ist eine vollständige Trennung zwischen Logik und Visualisierung vorhanden. Die Funktionalität ist soweit abstrahiert (5), dass lediglich ein einzelner Baustein zur Kommunikation verwendet werden muss. Zudem sind durch dieses Konzept eine Erweiterbarkeit (6) der Schnittstelle in Hinsicht auf weitere Eingabegeräte und neue Funktionen gewährleistet. Zusätzlich ist das vorgestellte minimale Gestenalphabet in beiden Kriterien vorteilhaft. Durch die Art der Abbildung einzelner expliziter Funktionen auf vier Grundfunktionen besteht die Möglichkeit, weitere Funktionen mit denselben Gesten zu nutzen, was wiederum Kriterium (7) erfüllt, da keine neuen Gesten gelernt und trainiert werden müssen, um eine neue Funktionalität zu verwenden.

Die Qualitätsanforderungen (8) an eine klinische Software können bis auf eine Ausnahme als erfüllt betrachtet werden. Performanz, Benutzbarkeit, Erweiterbarkeit und Integrierbarkeit sind von der entwickelten Schnittstelle und dem minimalen Gestenalphabet (unter Verwendung des Myo-Armbands) gegeben. Dem gegenüber steht die Robustheit, welche durch eine Fehlerkennung einiger Gesten nicht vollständig gegeben ist. An dieser Stelle muss entsprechend nachgebessert werden, um das System reibungslos benutzen zu können.

Der klinische Test am Institut für Neuroradiologie an der Universitätsklinik Magdeburg zeigte, dass die Ärzte bereit sind neue Technologien zu testen (in der durchgeführten Studie ohne Anwendung während einer OP), um Forschungsprojekte zu unterstützen

und die Entwicklung neuer unterstützender Systeme voranzutreiben. Bei zwei Eingriffen wurde das Armband von unterschiedlichen Operateuren getragen und das positive Feedback bekräftigt die OP-Tauglichkeit (9). Außerdem wurde dabei gleichzeitig der Tragekomfort (10) untersucht, da das Armband für bis zu zwei Stunden während des Eingriffs am Arm getragen wurde. Wie auch in der Funktionsstudie, sind dabei keine negativen Aspekte aufgefallen, die die Nutzung des Armbands beeinflussen. Selbst Kommentare der Probanden, dass bei längerem Tragen durchaus eine Beeinträchtigung entstehen könnte, wurden durch den Einsatz im OP widerlegt.

Ausgehend von den Trainingszeiten (11) beider Benutzungsstudien ist zu sehen, dass selbst unerfahrene Personen in kürzester Zeit (unter drei Minuten: 111 ± 60 Sekunden) mit den einzelnen Gesten des Myo-Armbands vertraut sind und diese zur Bedienung einer Anwendung benutzen können. Weiterhin ist eine Trainingszeit von weniger als sieben Minuten ($4:51 \pm 1:59$ Minuten) für die Einführung des minimalen Gestenalphabets und der Interaktion mit der Visual Interaction Application durchaus vertretbar.

Mit Bezug auf die fünf eingangs gestellten Fragen zum Entwurf und der Auswertung der Studien kann folgendes gesagt werden:

- Ja, die klinische Voraussetzung an die Sterilität ist gegeben und das Gerät hat im klinischen Test eine mögliche zukünftige Verwendbarkeit bestätigt.
- Ja, die Interaktionsstudie hat gezeigt, dass ein minimales Gestenalphabet zur vollen Kontrolle einer Anwendung ausreichend ist. Zudem ist die Funktionalität durch den vorgestellten Ansatz frei erweiterbar.
- Nein, durch das Tragen des Myo-Armbands entstehen keine Unannehmlichkeiten für den Chirurgen. In Abhängigkeit davon ist jedoch die aktive Benutzung über einen längeren Zeitraum zu untersuchen.
- Die Trainingszeit für die Benutzung des Armbands wie auch die Steuerung der Anwendung liegen in einem vertretbaren Rahmen von insgesamt weniger als zehn Minuten.
- Ja, es bestehen kleinere Probleme auf Seiten der Hardware, wodurch eine Fehlerkennung von einzelnen Gesten zur ungewollten Interaktion führt. Diese sind durch erweiterte Konzepte anzupassen und zu verbessern.

Zusammenfassend haben das Myo-Armband und das entwickelte System, in Bezug auf die aufgestellten Kriterien, ihre Stärken bewiesen und bieten dadurch ein umfangreiches Fundament für zukünftige Arbeiten. Eine Verwendbarkeit von myoelektrischer Gestensteuerung im Operationssaal ist demnach eine interessante Alternative.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Problematik der Mensch-Maschine Interaktion im Operationssaal untersucht und eine Lösung in Form einer berührungslosen Alternative vorgestellt. Diese basiert auf einer myoelektrischen Gestensteuerung mittels Myo-Armband. Die Entwicklung wurde im Rahmen eines Benutzer-zentrierten Entwicklungsprozesses umgesetzt. Dafür wurden drei umfangreiche Analysen durchgeführt, um die Anforderungen an die Anwendung und eine berührungslose Navigation mit medizinischen Bilddaten zu definieren.

Eine klinische Anforderungsanalyse umfasste dabei Fachliteratur zur Arbeitsflussanalyse und zu verwandten Arbeiten aus dem Bereich der berührungslosen Mensch-Computer-Interaktion. Zur Analyse des klinischen Arbeitsflusses wurde umfangreiches Videomaterial von neuroradiologischen Interventionen untersucht. Zusammen mit drei persönlichen Hospitationen am Institut für Neuroradiologie der Universitätsklinik Magdeburg ergaben sich Problemsituationen, die in dieser Arbeit adressiert wurden. Eine technische Anforderungsanalyse hingegen befasste sich mit der Definition von Standards, die an klinische Software gestellt werden, sowie den Anforderungen an eine unabhängige, abstrakte und erweiterbare Schnittstelle zur Anbindung unterschiedlicher Eingabegeräte.

Die Konzeption und Implementierung basierte auf den festgelegten Anforderungen an das System. Diese umfassen einerseits die Entwicklung eines minimalen Gestenalphabets zur kompletten, berührungslosen Steuerung einer Anwendung und andererseits die Umsetzung einer Schnittstelle zur Anbindung unterschiedlicher Eingabegeräte. Das entwickelte Gestenalphabet bildet alle Funktionen zur Navigation in den Bilddaten auf vier Grundfunktionen ab, wodurch eine beliebige Erweiterung mit neuen Funktionen möglich ist. Die Schnittstelle basiert auf dem Client-Server-Konzept und wurde in einer lokalen Variante mittels Signal-Slot-Konzept umgesetzt. Dadurch besteht die Möglichkeit, neue Eingabegeräte einzubinden und die Funktion beliebig zu erweitern.

Beide Teile wurden in einer Anwendung (**Visual Interaction Application**) zusammengeführt, die als Testumgebung und durch die bereitgestellten Schnittstellen als Vergleichswerkzeug zwischen Eingabegeräten und einzelner Funktionen dient.

Grundlage für die zwei durchgeführten Benutzungsstudien lieferte ein Kriterienkatalog, der für den Studienentwurf, die Auswertung des minimalen Gestenalphabets sowie der Schnittstelle fungierte. In einer Funktionsstudie wurde das Myo-Armband mit 20 Probanden auf Funktionalität und Tragekomfort untersucht. Eine Interaktionsstudie diente dazu, das minimale Gestenalphabet bezüglich einer vollständigen Steuerung der Anwendung genauer zu untersuchen. An dieser Studie nahmen zehn Probanden mit Erfahrung im medizinischen Bereich teil. Der dritte klinische Test fand direkt im OP der Universitätsklinik Magdeburg statt. Hierzu wurde das Armband bereitwillig von zwei Ärzten während unterschiedlicher Interventionen getragen, um Gesten-Erkennungsdaten aufzunehmen. Die Auswertung der Ergebnisse zeigte, dass die gesetzten Kriterien an die entwickelte Anwendung erfüllt wurden und daher ein solides Fundament für zukünftige Forschungsprojekte gesetzt ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass sich eine myoelektrische Gestensteuerung für den Einsatz in sterilen Umgebungen eignet. Das Myo-Armband als Eingabegerät hat sich bis auf kleinere Probleme in der Hardware bzw. Software (Firmware und SDK) bewährt und ist in der Lage, eine komplette Anwendung mit einem minimalen Gestenalphabet zu steuern.

6.1 Ausblick

Für zukünftige Arbeiten an diesem Thema gibt es verschiedene Punkte, die für weiterführende Forschung von Interesse sind. Die Evaluation hat Probleme bei der Robustheit des Systems aufgezeigt, die durch einen multimodalen Ansatz beseitigt werden können. Das heißt, die Kombination von unterschiedlichen Eingabegeräten zur Steuerung (wobei auch zwei Myo-Armbänder denkbar wären), um die Stärken und Schwächen der einzelnen Systeme auszugleichen.

Ein weiterer interessanter Aspekt ist der direkte Vergleich einzelner Funktionen und anderer Eingabegeräte. Die implementierte Schnittstelle bietet diese Möglichkeit und sollte dementsprechend genutzt werden. Dadurch könnten Vergleiche in Bezug auf die

benötigte Zeit, Bewegungsaufwand oder mentale Anstrengung (Lernaufwand, Einprägbarkeit und Verständnis) unterschiedlicher Interaktionsmöglichkeiten gemacht werden.

Zusätzlich zur Anbindung verschiedener Hardware ist die Schnittstelle funktional erweiterbar. Hier wäre zu untersuchen, welche der nicht beachteten Interaktionsarten, (wie beispielsweise das Zeigen auf Strukturen in den Schichtbildern und die damit zusammenhängende Bemaßung) oder komplexere Aufgaben (wie die virtuelle Resektion) umgesetzt werden könnten.

Darüber hinaus können auch weitere Einsatzszenarien für das Myo-Armband gefunden werden. Hier wäre primär der konkrete Einsatz während einer Intervention genauer zu betrachten, um die Evaluation mit aussagekräftigen Daten zu erweitern. Bei einem solchen Einsatz könnten beispielsweise die Aufgaben aus der Interaktionsstudie vom Radiologen ausgeführt werden, wodurch ein direkter Vergleich zwischen den bisher vorhandenen und neuen Ergebnissen möglich wäre. Unabhängig von der Evaluation könnten durch neue Gesten, die direkte Analyse der EMG-Daten, die Verwendung der nicht genutzten Inertialsensoren oder durch kommende Aktualisierungen des SDKs und der Firmware weitere Möglichkeiten entstehen, welche die Robustheit der Gestensteuerung verbessern.

Die in dieser Arbeit erzielten Ergebnisse bieten eine fundierte Grundlage, für weitergehende Forschung an myoelektrischer Gestensteuerung in sterilen Umgebung. Diese sollte in zukünftigen Arbeiten in Kooperation mit Ärzten und Wissenschaftler genutzt werden, um weitere Fortschritte bei der berührungslosen Interaktion im Operationssaal zu erzielen.

A Anhang A: Fragebögen

A.1 Funktionsstudie

A.1.1 Demographische Fragen

Alter	Jahre	
Geschlecht	weiblich	männlich
Händigkeit	Linkshänder	Rechtshänder
Beruf		
Armumfang	links:	rechts

A.1.2 Erfahrung in folgenden Bereichen

Gestensteuerung		
Microsoft Kinect	ja	nein
Leap Motion Controller	ja	nein
Nintendo Wii-Mote	ja	nein
Andere Systeme	ja	nein
Fachwissen zur Mensch-Maschine Interaktion	ja	nein
Nutzung alternativer Eingabegeräte		
Sprachsteuerung	ja	nein
Touch-Steuerung	ja	nein

A.1.3 Tragekomfort des Myo-Armbands

War das Armband bequem zutragen?	ja	nein
Entstand ein einschnürendes Gefühl am Arm?	ja	nein
Entstand ein Kältegefühl im Arm oder in der Hand?	ja	nein
Stört das Armband bei Bewegung?	ja	nein
Waren eine oder mehrere Gesten anstrengend bei der Ausführung? Wenn ja, welche Geste/n und warum?		

A.2 Interaktionsstudie

A.2.1 Demographische Fragen

Alter	Jahre	
Geschlecht	weiblich	männlich
Händigkeit	Linkshänder	Rechtshänder
Sind Sie Medizinstudent/in?	ja	nein
Sind Sie Ärztin/Arzt	ja	nein
Falls Ärztin oder Arzt:		
Rang		
Fachrichtung		
Jahre an Berufserfahrung	Jahre	

A.2.2 Häufigkeit der Benutzung

Bewertung	niemals	selten	gelegentlich	häufig	sehr häufig
Radiologische / Chirurgische Software					
Freihand-Gesten-Interaktion					
Microsoft Kinect					
Nintendo Wii-Mote					

A.2.3 Bewertung der einzelnen Gesten

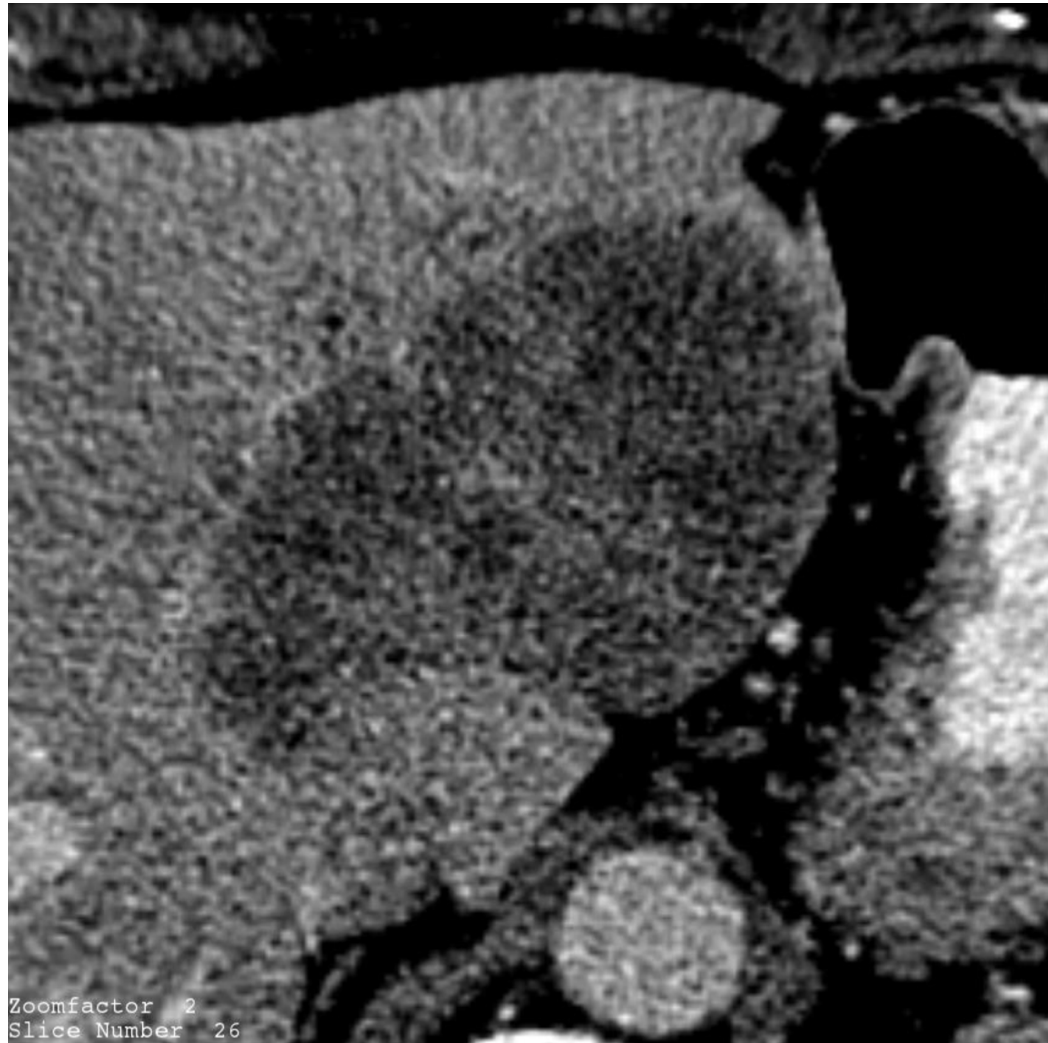
Bewertung	1	2	3	4	5
Geste					
Die Benutzung der Geste ist einfach					
Das Ausführen der Geste fühlt sich natürlich an					
Das Ausführen der Geste ist nicht ermüdend					
Die Geste ist einfach zu merken					
Die Handbewegung der Geste ist verständlich					
An der Geste hat mir gefallen:					
An der Geste hat mir nicht gefallen:					

B Anhang B: Aufgaben der Evaluation

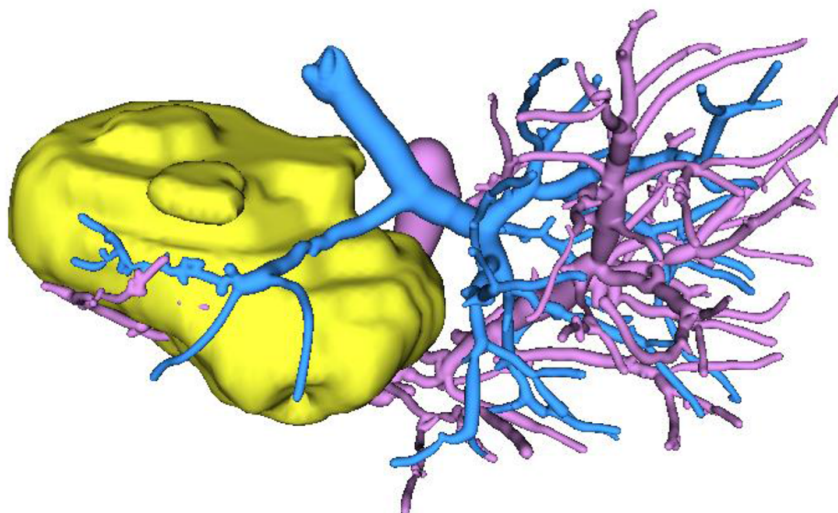
Aufgabe 1: Über welche Slices erstreckt sich der Tumor?



Aufgabe 2: Vergrößern sie Schicht 26 auf Zoomfaktor 2. Verschieben sie anschließend den Tumor in die Mitte des Bildschirms.

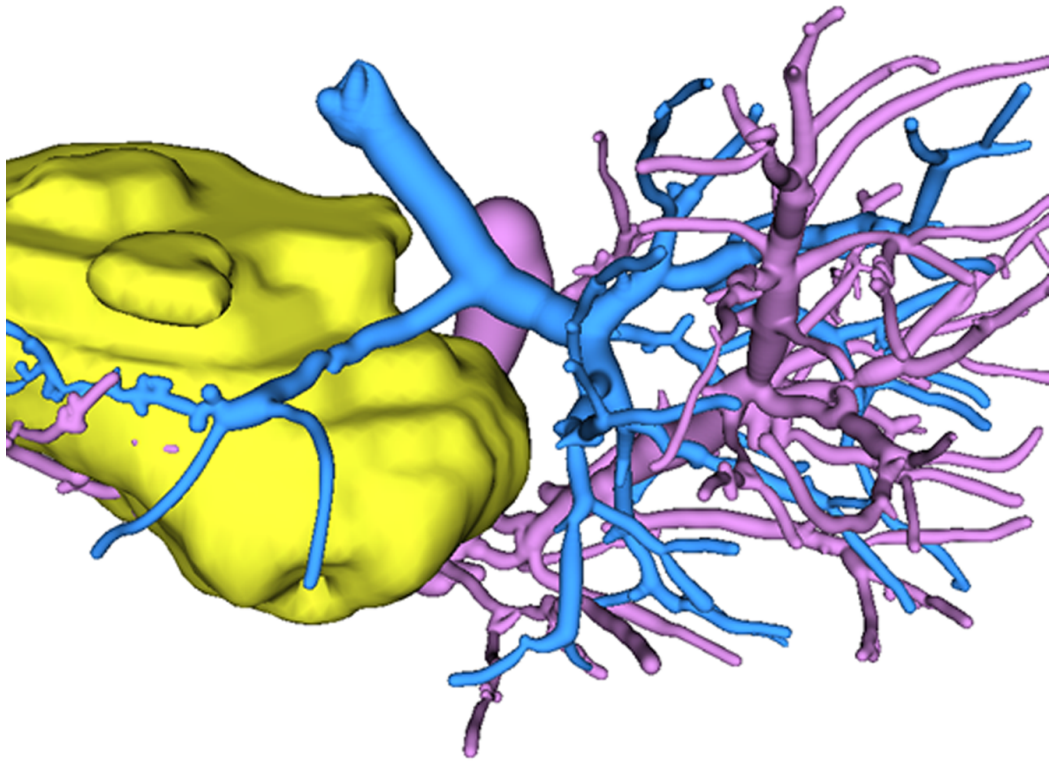


Aufgabe 3: Rotieren Sie die 3D-Ansicht, sodass sich das folgende Bild ergibt.



Zoomfactor 1
Rotation - alpha: 126 beta: 134

Aufgabe 4: Vergrößern Sie die 3D-Darstellung so, dass das Modell mit Zoomfaktor 1,5 dargestellt wird.



Zoomfactor 1.5
Rotation - alpha: 126 beta: 134

C Anhang C: Beschreibung der Unterarmmuskulatur

Nachfolgend sind die einzelnen Muskeln (Platzer 2009 [22]) benannt, die bei den Handbewegungen der Gesten (vgl. Kapitel 4.4) ihren Beitrag leisten (Beschrieben nach ihrer Lage zueinander). Die ventrale oberflächliche Unterarmmuskulatur zu sehen. Der Musculus flexor digitorum superficialis (Abb. C.1 M1) ist ein starker Beuger im Handgelenk und spielt bei den Gesten **Wave In**, **Fist** und **Double Tap** eine Rolle. Der Musculus flexor carpi radialis (Abb. C.1 M2), der Musculus palmaris longus (Abb. C.1 M3) und der Musculus flexor carpi ulnaris (Abb. C.1 M4) sind Beuger im Handgelenk und für die **Wave In**-Geste notwendig.

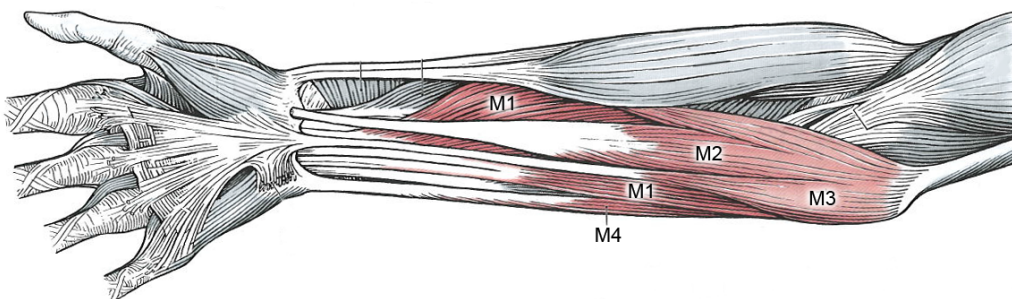


Abbildung C.1: Ventrale oberflächliche Unterarmmuskulatur (Quelle: [22])

Ein weiterer Teil der ventralen Unterarmmuskulatur liegt eine Schicht tiefer. Der Musculus flexor digitorum profundus (Abb. C.2 M5) ist ein weiterer Beuger und für die Bewegung im Handgelenk und den Fingergelenken zuständig, d. h. für die **Wave In**-, **Fist** und **Double Tap**-Geste. Der Musculus flexor pollicis longus (Abb. C.2 M6) ist der letzte Beuger im Handgelenk und spielt auch bei der **Wave In**-, sowie der **Double Tap**-Geste eine Rolle.

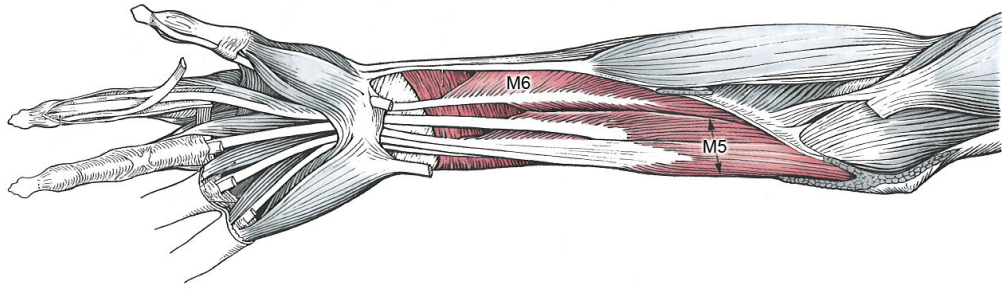


Abbildung C.2: Ventrale tiefe Unterarmmuskulatur (Quelle: [22])

Die radiale Unterarmmuskulatur besteht zu einem großen Teil aus Streckern des Handgelenks. Der Musculus extensor carpi radialis brevis (Abb. C.3 M7) und der Musculus extensor carpi radialis longus (Abb. C.3 M8) sind Strecker im Handgelenk und bei der **Wave Out**-Geste beteiligt. Zudem sind beide auch für den Faustschluss wichtig. Sie werden auch als Faustschluss Helfer bezeichnet, da die Hand dabei leicht nach hinten gebeugt (dorsal flektiert) sein muss, um eine Maximalwirkung der Beuger zu erhalten.

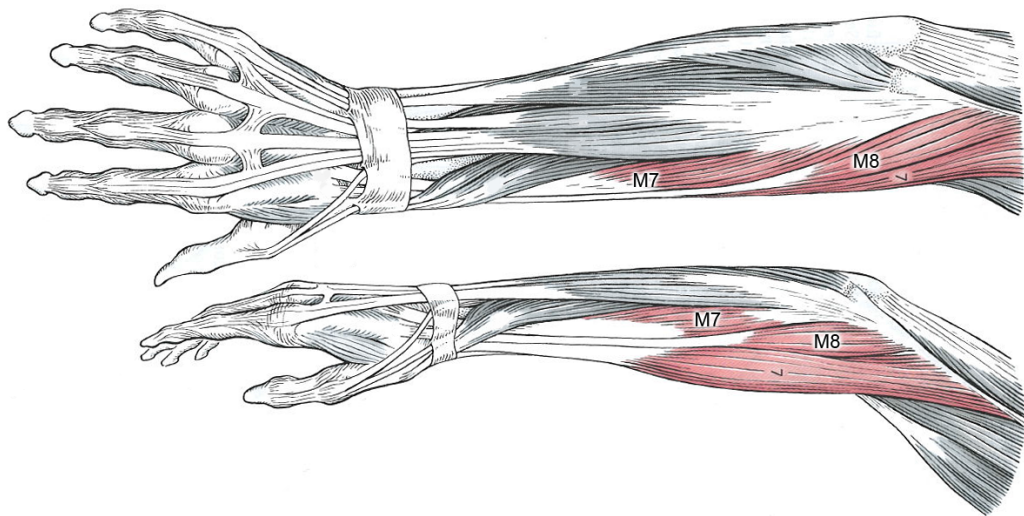


Abbildung C.3: Radiale Unterarmmuskulatur (Quelle: [22])

Neben der radialen Muskulatur, liegt die hintere oberflächliche Unterarmmuskulatur. Der Musculus extensor digitorum (Abb. C.4 M9) streckt und spreizt die Finger der gesamten Hand und der Musculus extensor digiti minimi (Abb. C.4 M10) streckt den kleinen Finger. Beide Muskeln sind bei der **Spread Fingers**- und **Wave Out**-Geste beteiligt. Darunter befinden sich die tiefen Schichten der Unterarmmuskulatur mit dem

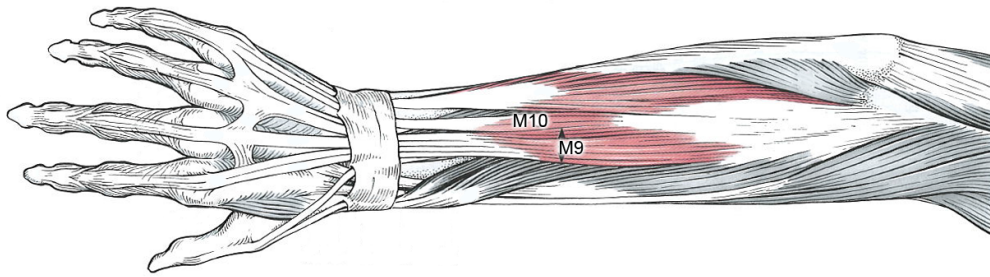


Abbildung C.4: Dorsale oberflächliche Unterarmmuskulatur (Quelle: [22])

Musculus abductor pollicis longus (Abb. C.5 M11), der als Beuger im Handgelenk bei der **Wave In**-Geste mithilft. Weiter sind der Musculus extensor pollicis longus (Abb. C.5 M12) für eine Streckung nach hinten (**Wave Out**-Geste) und der Musculus extensor indicis (Abb. C.5 M13) für die Streckung des Zeigefingers und damit marginal für die **Spread Fingers**- und **Wave Out**-Geste zuständig.

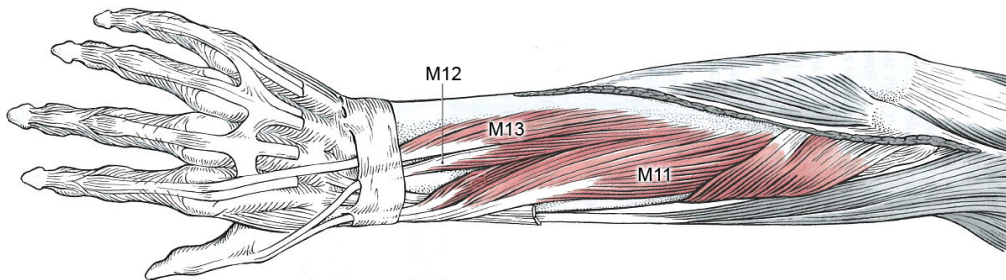


Abbildung C.5: Dorsale tiefe Unterarmmuskulatur (Quelle: [22])

Abkürzungsverzeichnis

API	Application Programming Interface
BSS	Blind Source Separation
CAS	Computer-assistierte Chirurgie
CT	Computertomographie
DICOM	Digital Imaging and Communications in Medicine
DSA	Digitale Subtraktionsangiographie
EMG	Elektromyographie
GUI	Graphical User Interface
HCI	Human-Computer Interaction
HMD	Head-Mounted Display
ICA	Independent Component Analysis
IDE	Integrierte Entwicklungsumgebung
IGSTK	Image-Guided Surgery Toolkit
IMU	Inertial Measurement Unit
ITK	Insight Segmentation and Registration Toolkit
MITK	Medical Imaging Interaction Toolkit
MMI	Mensch-Maschine-Interaktion
MRT	Magnetresonanztomographie

MVC	Maximum Voluntary Contraction
NUI	Natural User Interface
OP	Operationssaal
RBI	Realitäts-basierte Interaktion
SD	Standardabweichung
SDK	Software Development Kit
SPM	Surgical Process Model
TOF	Time Of Flight
VTK	Visualization Toolkit
WIMP	Windows-Icons-Menus-Pointer

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schaltpult eines Artis Q Angiographiesystems	13
2.2	Beschreibung Myo-Armband	15
2.3	Aufbau und Fingerbewegung der MVC-Studie	16
2.4	Konfigurationen für unterschiedliche myoelektrische Steuerung	17
2.5	Finger- und Handgesten	18
2.6	Kamera-basierte System	20
3.1	Operationssaal mit CAScination IR-ONE System	27
3.2	Storyboard: Vorbereitung	30
3.3	Storyboard: Kommunikation	30
3.4	Storyboard: Diskussion	31
4.1	User-Centered-Design Prozess	40
4.2	Hardwareschnittstelle	42
4.3	UML-Klassendiagramm des Client-Server-Konzept	43
4.4	Gestenalphabet des Myo-Armbands	45
4.5	Benutzeroberfläche	48
5.1	Aufbau der Funktionsstudie	52
5.2	Aufbau der Interaktionsstudie	52
5.3	Demographische Auswertung 1	54
5.4	Demographische Auswertung 2	55
5.5	Auswertung der Funktionsstudie	57
5.6	Diagramm: Infiltration	62
5.7	Diagramm: Embolisation	63
C.1	Ventrale oberflächliche Unterarmmuskulatur	81
C.2	Ventrale tiefe Unterarmmuskulatur	82
C.3	Radiale Unterarmmuskulatur	82

C.4	Dorsale oberflächliche Unterarmmuskulatur	83
C.5	Dorsale tiefe Unterarmmuskulatur	83

Literaturverzeichnis

- [1] HUEBLER, ANTJE, CHRISTIAN HANSEN, OLIVER BEUING, MARTIN SKALEJ und BERNHARD PREIM: *Workflow Analysis for Interventional Neuroradiology using Frequent Pattern Mining*. In: *13. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie (CURAC)*, Seiten 165–168, München, 11.-13. September 2014.

- [2] O'HARA, KENTON, GERARDO GONZALEZ, ABIGAIL SELLEN, GRAEME PENNEY, ANDREAS VARNAVAS, HELENA MENTIS, ANTONIO CRIMINISI, ROBERT CORISH, MARK ROUNCFIELD, NEVILLE DASTUR und TOM CARRELL: *Touchless Interaction in Surgery*. *Communications of the ACM*, 57(1):70–77, Januar 2014.

- [3] HARTMANN, BERND, MATTHIAS BENSON, AXEL JUNGER, LORENZO QUINZIO, RAINER RÖHRIG, BERNHARD FENGLER, UDO W. FÄRBER, BURKHARD WILLE und GUNTER HEMPELMANN: *Computer Keyboard and Mouse as a Reservoir of Pathogens in an Intensive Care Unit*. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 18(1):7–12, 2004.

- [4] RUTALA, WILLIAM A., MATTHEW S. WHITE, MARIA F. GERGEN und DAVID J. WEBER: *Bacterial Contamination of Keyboards: Efficacy and Functional Impact of Disinfectants*. *Infection Control and Hospital Epidemiology*, 27(4):372–377, 2006.

- [5] HORVITZ, ERIC: *Innovations at the Human—Computer Interface: A Medical-Informatics Perspective*. In: *Proceedings of Medicine Meets Virtual Reality*, Band 1. <http://research.microsoft.com/en-us/um/people/horvitz/vrmed1.pdf> (Stand: 08.05.2015).

- [6] WEARABLE INTELLIGENCE, INC.: *Products in Healthcare*. <http://wearableintelligence.com/industries/healthcare.html> (Zugriff: 14.04.2015).
- [7] WIGDOR, DANIEL und DENNIS WIXON: *Brave NUI World: Designing Natural User Interfaces for Touch and Gesture*. Morgan Kaufmann Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1. Auflage, 2011.
- [8] GALLO, L., A.P. PLACITELLI und M. CIAMPI: *Controller-free exploration of medical image data: Experiencing the Kinect*. In: *Computer-Based Medical Systems (CBMS), 2011 24th International Symposium on*, Seiten 1–6, Bristol, June 2011.
- [9] SOUTSCHEK, S., J. PENNE, J. HORNEGGER und J. KORNHUBER: *3-D gesture-based scene navigation in medical imaging applications using Time-of-Flight cameras*. In: *Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, 2008. CVPRW '08. IEEE Computer Society Conference on*, Seiten 1–6, Anchorage, AK, June 2008.
- [10] SEIXAS, MANUEL, JORGE CARDOSO und MARIA TERESA GALVÃO DIAS: *The Leap Motion movement for 2D pointing tasks: Characterisation and comparison to other devices*. 2014. <http://repositorio.ucp.pt/handle/10400.14/17160> (Stand: 08.05.2015).
- [11] TUNTAKURN, A., S.S. THONGVIGITMANEE, V. SA-ING, S.S. MAKHANOV und S. HASEGAWA: *Natural interaction on 3D medical image viewer software*. In: *Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), 2012*, Seiten 1–5, Dec 2012.
- [12] TUNTAKURN, A., S.S. THONGVIGITMANEE, V. SA-ING, S. HASEGAWA und S.S. MAKHANOV: *Natural interactive 3D medical image viewer based on finger and arm gestures*. In: *Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), 2013 6th*, Seiten 1–5, Oct 2013.
- [13] TAN, JUSTIN H., CHERNG CHAO, MAZEN ZAWAIDEH, ANNE C. ROBERTS und THOMAS B. KINNEY: *Informatics in Radiology: Developing a Touchless User Interface for Intraoperative Image Control during Interventional Radiology Procedures*. *RadioGraphics*, 33(2):E61–E70, 2013.

- [14] JACOB, MITHUN GEORGE, JUAN PABLO WACHS und REBECCA A PACKER: *Hand-gesture-based sterile interface for the operating room using contextual cues for the navigation of radiological images*. Journal of the American Medical Informatics Association, 20(e1):e183–e186, 2013.
- [15] THALMIC LABS INC.: *Myo-Armband*. <https://www.thalmic.com/en/myo/> (Zugriff am: 20.04.2015).
- [16] JACOB, ROBERT J.K., AUDREY GIROUARD, LEANNE M. HIRSHFIELD, MICHAEL S. HORN, ORIT SHAER, ERIN TREACY SOLOVEY und JAMIE ZIGELBAUM: *Reality-based Interaction: A Framework for post-WIMP Interfaces*. In: *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems*, CHI '08, Seiten 201–210, New York, NY, USA, 2008. ACM.
- [17] MARCEL, SÉBASTIEN: *Gestures for Multi-Modal Interfaces: A Review*. Idiap-RR Idiap-RR-34-2002, IDIAP, 2002.
- [18] WAGNER, PETRA, ZOFIA MALISZ und STEFAN KOPP: *Guest Editorial: Gesture and Speech in Interaction: An Overview*. Speech Commun., 57:209–232, Februar 2014.
- [19] PREIM, BERNHARD und RAIMUND DACHSELT: *Interaktive Systeme Band 2: User Interface Engineering, 3D-Interaktion, Natural User Interfaces*. Springer Vieweg, Berlin, 2015.
- [20] QUEK, FRANCIS, DAVID MCNEILL, ROBERT BRYLL, SUSAN DUNCAN, XIN-FENG MA, CEMIL KIRBAS, KARL E. MCCULLOUGH und RASHID ANSARI: *Multimodal Human Discourse: Gesture and Speech*. ACM Trans. Comput.-Hum. Interact., 9(3):171–193, September 2002.
- [21] KARAM, MARIA und M. C. SCHRAEFEL: *A Taxonomy of Gestures in Human Computer Interactions*. Technical Report, University of Southampton, 2005.
- [22] PLATZER, W.: *Taschenatlas Anatomie, Band 1: Bewegungsapparat*. Thieme, Stuttgart, 2009.
- [23] SIEMENS AG: *Artis Q*. <http://www.healthcare.siemens.de/angio/artis-interventional-angiography-systems/artis-q> (Zugriff: 03.05.2015).

- [24] OSKOEI, MOHAMMADREZA ASGHARI und HUOSHENG HU: *Myoelectric control systems—A survey*. Biomedical Signal Processing and Control, 2(4):275 – 294, 2007.
- [25] MÜHLAU, GERHARD: *Neuroelektrodiagnostik Eine Einführung*. Fischer Verlag, Jena, Germany, 1. Auflage, 1990.
- [26] NEUROLOGISCHE KLINIK UND POLIKLINIK LUDWIG-MAXIMILIANS-UNIVERSITÄT: *Krankheitsbilder, Untersuchungen, Therapien und Apparative Diagnostik und EMG (Elektromyographie)*. <http://www.klinikum.uni-muenchen.de/Klinik-und-Poliklinik-fuer-Neurologie/de/Patienteninformation/index.html> (Zugriff am: 21.01.2015).
- [27] CASTRO, MARIACLAUDIA F, SRIDHAR P ARJUNAN und DINESH K KUMAR: *Selection of suitable hand gestures for reliable myoelectric human computer interface*. BioMedical Engineering OnLine, 14(1), 2015.
- [28] SAMADANI, A.-A. und D. KULIC: *Hand gesture recognition based on surface electromyography*. In: *Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), 2014 36th Annual International Conference of the IEEE*, Seiten 4196–4199, Aug 2014.
- [29] CHEN, XIANG, XU ZHANG, ZHANG-YAN ZHAO, JI-HAI YANG, V. LANTZ und KONG-QIAO WANG: *Multiple Hand Gesture Recognition Based on Surface EMG Signal*. In: *Bioinformatics and Biomedical Engineering, 2007. ICBBE 2007. The 1st International Conference on*, Seiten 506–509, July 2007.
- [30] NAIK, GANESH, DINESH KUMAR und SRIDHAR ARJUNAN: *Pattern classification of Myo-Electrical signal during different Maximum Voluntary Contractions: A study using BSS techniques*. Seiten 1–6.
- [31] WHEELER, K.R.: *Device control using gestures sensed from EMG*. In: *Soft Computing in Industrial Applications, 2003. SMCia/03. Proceedings of the 2003 IEEE International Workshop on*, Seiten 21–26, June 2003.
- [32] OSKOEI, MOHAMMADREZA ASGHARI und HUOSHENG HU: *Adaptive myoelectric control applied to video game*. Biomedical Signal Processing and Control, 18(0):153 – 160, 2015.

- [33] THALMIC LABS INC.: *Technische Spezifikationen Myo-Armband*. <https://www.thalmic.com/en/myo/techspecs> (Zugriff am: 27.04.2015).
- [34] THALMIC LABS INC.: *Myo-Script Referenz*. https://developer.thalmic.com/docs/api_reference/platform/index.html (Zugriff am: 19.03.2015).
- [35] INSTITUT FÜR TECHNISCHE OPTIK: *Tiefenscannende Streifenprojektion (DSFP) mit 3D-Kalibrierung*. www.uni-stuttgart.de/ito/forschung/3do/projekte/abgeschlossen/dsfp.html (Zugriff: 01.04.2015).
- [36] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED: *Laufzeitverfahren*. www.ti.com/lit/wp/sloa190b/sloa190b.pdf (Zugriff: 01.04.2015).
- [37] WWW.3DERS.ORG: *Bildquelle: Leap Motion Controller*. <http://www.3ders.org/images/hot-pop-factory-leap-motion-1.png> (Zugriff: 27.04.2015).
- [38] WIKIMEDIA FOUNDATION, INC.: *Bildquelle: Microsoft Kinect V2 für Windows*. <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f6/Xbox-One-Kinect.jpg> (Zugriff: 27.04.2015).
- [39] CASCINATION AG: *CAS-ONE Liver*. <http://www.cascination.com/products/cas-one-liver/> (Zugriff: 22.04.2015).
- [40] BRAINLAB AG: *Brainlab Buzz – Digital O.R.* <https://www.brainlab.com/en/surgery-products/overview-platform-products/buzz-digital-or/> (Zugriff: 22.04.2015).
- [41] RUPPERT, GUILHERME CESAR SOARES, LEONARDO OLIVEIRA REIS, PAULO HENRIQUE JUNQUEIRA AMORIM, THIAGO FRANCO DE MORAES und JORGE VICENTE LOPES DA SILVA: *Touchless gesture user interface for interactive image visualization in urological surgery*. *World Journal of Urology*, 30(5):687–691, 2012.
- [42] SCHWARZ, LOREN ARTHUR, ALI BIGDELOU und NASSIR NAVAB: *Learning Gestures for Customizable Human-computer Interaction in the Operating Room*.

- In: *Proceedings of the 14th International Conference on Medical Image Computing and Computer-assisted Intervention - Volume Part I, MICCAI'11*, Seiten 129–136, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer-Verlag.
- [43] HERNICZEK, SIMON KOTWICZ, ANDRAS LASSO, TAMAS UNGI und GABOR FICHTINGER: *Feasibility of a touch-free user interface for ultrasound snapshot-guided nephrostomy*. In: *SPIE Medical Imaging 2014: Image-Guided Procedures, Robotic Interventions, and Modeling*, Band 9036, Seite 90362F, San Diego, California, USA, 03/2014 2014. SPIE, SPIE.
- [44] HÖTKER, ANDREAS M., MICHAEL B. PITTON, PETER MILDENBERGER und CHRISTOPH DÜBER: *Speech and motion control for interventional radiology: requirements and feasibility*. *Int. J. Computer Assisted Radiology and Surgery*, 8(6):997–1002, 2013.
- [45] HANSEN, C., A. KÖHN, S. SCHLICHTING, F. WEILER, O. KONRAD, S. ZIDOWITZ und H.-O. PEITGEN: *Intraoperative Modification of Resection Plans for Liver Surgery*. *Int. J. Computer Assisted Radiology and Surgery*, 2(3-4):291–297, 2008.
- [46] JACOB, ROBERT JK und KEITH S KARN: *Eye tracking in human-computer interaction and usability research: Ready to deliver the promises*. *Mind*, 2(3):4, 2003.
- [47] NEUMUTH, THOMAS, PIERRE JANNIN, GERO STRAUSS, JUERGEN MEIXENSBERGER und OLIVER BURGERT: *Validation of Knowledge Acquisition for Surgical Process Models*. *Journal of the American Medical Informatics Association : JAMIA*, 16(1):72–80, 2009.
- [48] NEUMUTH, THOMAS, PIERRE JANNIN, JULIANE SCHLOMBERG, JÜRGEN MEIXENSBERGER, PETER WIEDEMANN und OLIVER BURGERT: *Analysis of surgical intervention populations using generic surgical process models*. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 6(1):59–71, 2011.
- [49] LEMKE, HEINZ U. und MICHAEL W. VANNIER: *The operating room and the need for an IT infrastructure and standards*. *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, 1(3):117–121, 2006.

- [50] HUEBLER, ANTJE und ET AL.: *Projektdokumentation STIMULATE mit freundlicher Genehmigung von Antje Huebler.*
- [51] WACHS, JUAN, HELMAN STERN, YAEL EDAN, MICHAEL GILLAM, CRAIG FEIED, MARK SMITHD und JON HANDLER: *Real-time hand gesture interface for browsing medical images.* International Journal of Intelligent Computing in Medical Sciences & Image Processing, 2(1):15–25, 2008.
- [52] IANNESSI, A., P.-Y. MARCY, O. CLATZ, P. FILLARD und N. AYACHE: *Touchless intra-operative display for interventional radiologist.* Diagnostic and Interventional Imaging, 95(3):333 – 337, 2014.
- [53] NIEDERLAG, WOLFGANG, HEINZ U. LEMKE, GERO STRAUSS und HUBERTUS FEUSSNER: *Der digitale Operationssaal.* de Gruyter, Berlin/Boston, 2. Auflage.
- [54] KITWARE, INC.: *Visialization Toolkit.* <http://www.vtk.org/> (Zugriff am: 18.03.2015).
- [55] KITWARE, INC.: *Insight Segmentation and Registration Toolkit.* <http://www.itk.org/> (Zugriff am: 18.03.2015).
- [56] KITWARE, INC.: *Image-Guided Surgery Toolkit.* <http://www.igstk.org/> (Zugriff am: 18.03.2015).
- [57] GERMAN CANCER RESEARCH CENTER DIVISION OF MEDICAL AND BIOLOGICAL INFORMATICS: *Medical Imaging Interaction Toolkit.* <http://www.mitk.org/> (Zugriff am: 18.03.2015).
- [58] WALLIN, MATS KEB und SAMSON WAJNTRAUB: *Evaluation of Bluetooth as a replacement for cables in intensive care and surgery.* Anesthesia & Analgesia, 98(3):763–767, 2004.
- [59] MICROSOFT DEVELOPER NETWORK: *Microsoft Visual Studio 2013.* <https://msdn.microsoft.com/de-de/library/dd831853.aspx> (Zugriff am: 19.03.2015).
- [60] KITWARE, INC.: *CMake.* <http://www.cmake.org/> (Zugriff am: 19.03.2015).
- [61] THE QT COMPANY: *Qt-Klassenbibliothek.* <http://www.qt.io/download-open-source/> (Zugriff am: 19.03.2015).

- [62] ISO: *Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 210: Prozess zur Gestaltung gebrauchstauglicher interaktiver Systeme*. ISO 9241-210:2010, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland, 2011.
- [63] FONTEYN, MARSHA E, BENJAMIN KUIPERS und SUSAN J GROBE: *A description of think aloud method and protocol analysis*. *Qualitative Health Research*, 3(4):430–441, 1993.
- [64] CASCINATION AG: *CAS-ONE IR*. <http://www.cascination.com/products/cas-one-i-r> (Zugriff am: 30.03.2015).
- [65] PRÜMPER, JOCHEN: *Der Benutzungsfragebogen ISONORM 9241/10: Ergebnisse zur Reliabilität und Validität*. In: LISKOWSKY, RÜDIGER, BORIS M. VELICHKOVSKY und WOLFGANG WÜNSCHMANN (Herausgeber): *Software-Ergonomie '97*, Band 49 der Reihe *Berichte des German Chapter of the ACM*, Seiten 253–262. Vieweg+Teubner Verlag, 1997.