



OTTO VON GUERICKE  
UNIVERSITÄT  
MAGDEBURG

FAKULTÄT FÜR  
INFORMATIK

Institut für Simulation und Grafik

## Abschlussarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science (M.Sc.)

---

# **Interaktion mit medizinischen Bilddaten unter sterilen Bedingungen mit Hilfe von Fußgesten**

---

Vorgelegt von	Sebastian Wagner
Matrikelnummer	195289
am	30. März 2017
Erstgutachter	Jun-Prof. Dr. Christian Hansen
Zweitgutachter	Prof. Dr. Bernhard Preim
Betreuer	Benjamin Hatscher (M.A.)



# Kurzfassung

Die Navigation durch medizinische Bilddaten ist ein essentieller Bestandteil vieler medizinischer Eingriffe. Dabei besteht die Schwierigkeit, dass der Operateur nur über Umwege mit herkömmlichen Eingabegeräten interagieren kann, da diese mit steriler Plastikfolie bedeckt sind, um die Sterilität zu wahren. Eine Alternative bietet die Delegation an assistierendes Personal. Diese Arbeitsschritte können jedoch ineffizient und zeitaufwändig sein. Diese Arbeit beschäftigt sich mit dem Entwurf und der Realisierung von Konzepten zur handfreien Interaktion mit medizinischen Bilddaten. Hierzu wird ein Sensorfußboden verwendet. Dieser ermöglicht dem Nutzer die Navigation durch medizinische Bilddaten mittels seiner Füße. Im ersten Schritt wurden klinische und technische Anforderungen für ein solches System aufgestellt. Aufbauend wurden Interaktions- und Feedbackkonzepte entworfen und diskutiert, welche anschließend implementiert wurden. Diese Konzepte unterscheiden sich hauptsächlich in Bezug auf den benötigten freien Platz um den Nutzer, da dieser im Operationssaal sehr eingeschränkt ist. Mittels der Realisierung konnten anschließend zwei Studien, eine qualitative Vorstudie und eine quantitative Hauptstudie, zur Evaluierung der Konzepte durchgeführt werden. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass die Interaktion auf kleinem Raum funktioniert, allerdings wurden hierbei einige Aspekte aufgedeckt, welche bei der Realisierung beachtet und in zukünftigen Arbeiten weiter untersucht werden sollten. Hierzu zählt vor allem die präzise Navigation in den Bilddaten, bei der es innerhalb der Studien erhebliche Probleme gab. Dadurch ergaben sich signifikante Unterschiede in Bezug auf die Bearbeitungszeit von Navigationsaufgaben zwischen den entwickelten Konzepten.



## **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 kenntliche 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 30. März 2017

---

Sebastian Wagner



Diese Arbeit wurde teilweise über Mittel des BMBF im Rahmen des Forschungscampus STIMULATE finanziert (Förderkennzeichen: 13GW0095A)



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung.....</b>	<b>1</b>
1.1	Motivation und Zielsetzung .....	2
1.2	Aufbau der Arbeit.....	3
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Stand der Technik .....</b>	<b>5</b>
2.1	Mensch-Maschine-Interaktion .....	5
2.2	Gesten.....	7
2.3	Fußinteraktion .....	9
2.3.1	Fußgesten .....	10
2.3.2	Möglichkeiten der Fußgestenerkennung.....	14
2.4	Berührungslose Interaktion im Operationsaal .....	16
<b>3</b>	<b>Konzeption.....</b>	<b>19</b>
3.1	Sensorfußboden „SensFloor“ .....	19
3.2	Initialer Prototyp .....	20
3.2.1	Aufbau.....	20
3.2.2	Probleme .....	22
3.2.3	Diskussion.....	23
3.3	Anforderungsanalyse.....	24
3.3.1	Klinische Anforderungen.....	24
3.3.2	Technische Anforderungen.....	25
3.3.3	Zusammenfassung.....	26
3.4	Konzeptionierung der Gesten.....	27
3.4.1	Konzept 1: Steuerung über Buttons .....	27

---

3.4.2	Konzept 2: Steuerung durch Gesten auf kleinem Raum .....	30
3.4.3	Weitere Konzeptidee.....	33
3.4.4	Aktivierungsgeste .....	34
3.5	Konzeptionierung des Feedbacks.....	36
3.5.1	Visuelles Feedback .....	36
3.5.2	Taktiler Feedback .....	40
<b>4</b>	<b>Realisierung .....</b>	<b>43</b>
4.1	Umsetzung der Interaktionskonzepte .....	43
4.1.1	Erfassung der Fußbodendaten.....	44
4.1.2	Erkennung der Aktivierungsgeste.....	45
4.1.3	Konzept 1: Steuerung über „Buttons“.....	48
4.1.4	Konzept 2: Steuerung durch Gesten auf kleinem Raum.....	51
4.2	Umsetzung der Feedbackkonzepte.....	54
4.2.1	Aktivierungsgeste .....	54
4.2.2	Konzept 1: Steuerung über „Buttons“.....	55
4.2.3	Konzept 2: Steuerung durch Gesten auf kleinem Raum.....	57
<b>5</b>	<b>Evaluierung .....</b>	<b>59</b>
5.1	Qualitative Vorstudie .....	59
5.1.1	Versuchsaufbau.....	60
5.1.2	Ablauf .....	60
5.1.3	Ergebnisse.....	61
5.1.4	Diskussion.....	63
5.2	Quantitative Hauptstudie.....	65
5.2.1	Versuchsaufbau.....	65
5.2.2	Ablauf .....	66
5.2.3	Ergebnisse.....	68
5.2.4	Diskussion.....	72
5.3	Schlussfolgerungen .....	74
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>77</b>

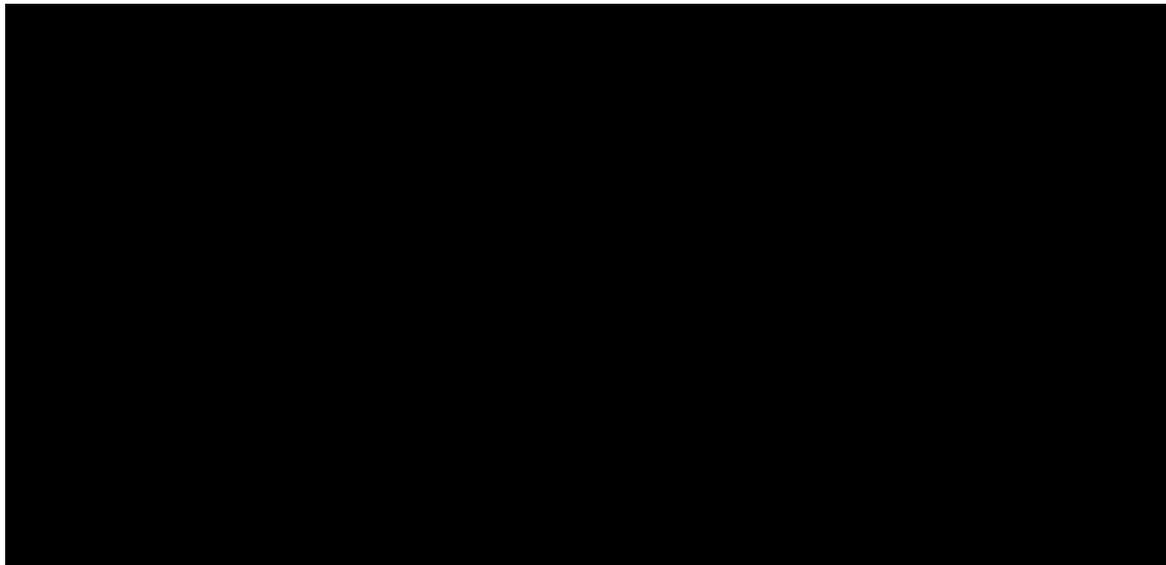
---

<b>Anhang</b> .....	<b>81</b>
A  Anhang A: Demografische Daten und Instruktionen.....	81
A.1  Demografische Daten .....	81
A.2  Instruktionen der Vorstudie .....	82
A.3  Instruktionen der Hauptstudie .....	83
B  Anhang B: Fragebögen .....	84
B.1  Fragen des abschließenden Feedbackgesprächs .....	84
B.2  NASA TLX.....	85
B.3  meCUE .....	86
C  Anhang C: Ergebnisse.....	87
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>89</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>91</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>93</b>



# 1 Einleitung

Während komplexer medizinischer Eingriffe ist der Zugriff auf Bild- und Planungsdaten des Patienten häufig notwendig [1]. Allerdings stellt diese Tatsache die operierenden Ärzte vor Schwierigkeiten bei der Interaktion mit den Daten, da Operationssäle stets steril gehalten werden müssen. Herkömmliche Eingabegeräte wie Maus und Tastatur stellen ein zu hohes Keimpotential dar, sodass diese häufig keine Anwendung im Operationsaal finden können [2, 3]. Eingabegeräte zur Navigation in den Bilddaten oder zur Steuerung des Operationstisches sind durch transparente Plastikfolie bedeckt, die die Nutzung erschwert. Eine andere häufig verwendete Möglichkeit zur Navigation in den Daten stellt die Delegation an die Assistenten während der Operation dar, allerdings kann dies ineffizient und zeitaufwändig sein [4]. Eine weitere Alternative besteht darin, dass der operierende Arzt den sterilen Operationssaal verlässt, um im benachbarten nicht-sterilen Kontrollraum direkt an einem Terminal mit den Daten zu interagieren. Dies führt allerdings zu unnötigen Wegen und daraus resultierenden Unterbrechungen und Verzögerungen im Arbeitsfluss [5, 6].



*Abbildung 1.1: Operierender Arzt navigiert im Operationssaal mit medizinischen Bilddaten (Quelle: [7])*

## 1.1 Motivation und Zielsetzung

Die Entwicklung von neuen Techniken zur handfreien Interaktion mit medizinischen Bilddaten im Operationssaal ist von großem Interesse in der Forschung. Die Abläufe für den operierenden Arzt sollen so angenehm und einfach wie möglich gestaltet werden, damit dieser sich voll auf die eigentliche Operation konzentrieren kann. Es gibt bereits viele Ansätze in diesem Bereich, die verschiedenste Sensorik zur Erkennung von Eingaben des Nutzers aufzeichnen. Wie der Literaturübersicht von Mewes et al. [8] entnommen werden kann, basieren die meisten dieser Ansätze auf der Nutzung von Freihandgesten. Zur Ausführung dieser Gesten benötigt der Nutzer mindestens eine freie Hand. Dies kann zu Unterbrechungen und Verzögerungen im Arbeitsablauf führen, da der operierende Arzt operationsrelevante Instrumente oder Materialien aus den Händen legen muss.

Die genannten Aspekte führen zu dem Schluss, dass ein solches System, welches ohne Verwendung der Hände die Navigation durch medizinische Bilddaten ermöglicht, einen Mehrwert darstellen würde. Aus diesem Grund soll ein System entwickelt werden, welches eine robuste, präzise und handunabhängige Navigation in medizinischen Bilddaten mittels Fußinteraktion ermöglicht. Hierdurch sollen umständliche Arbeitsschritte, wie das Delegieren von Navigationsarbeit, entfallen. Durch die Verwendung eines taktilen Sensorfußbodens, welcher sich in seiner Oberflächenbeschaffenheit nicht von herkömmlichen Fußböden unterscheidet, beschäftigt sich ein essentieller Bestandteil dieser Arbeit auch mit dem Entwurf von geeigneten Feedbackmethoden. Dem Nutzer muss für ein besseres Verständnis stets der aktuelle Status des Systems verdeutlicht werden. Außerdem ist die Verwendung von weiterer Hardware seitens des Nutzers nicht nötig. Hierbei stellt die von Hatscher et al. [9] durchgeführte Machbarkeitsstudie die Grundlage dar. Während der Fokus der Studie darauf lag, zunächst ein System zu entwickeln, dass die Interaktion mit Hilfe der Füße ermöglicht, sollen in dieser Arbeit weitere Schwerpunkte behandelt werden. Das System von Hatscher et al. setzte dabei auf Buttons, welche um den Nutzer herum projiziert werden. Dabei wird jedoch eine relativ große freie Fläche um den Nutzer herum vorausgesetzt. Zusätzlich liegt ein weiterer Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit auf der Möglichkeit der Aktivierung des Systems an verschiedenen Positionen auf dem Fußboden.

Ein nicht zu vernachlässigender Aspekt für die Fußinteraktion im Operationssaal ist der benötigte Platz. Dieser wurde in bisherigen Arbeiten nicht näher untersucht und soll daher einen Hauptaspekt dieser Arbeit darstellen. Dafür wird zunächst eine Literaturrecherche durchgeführt und der Ansatz von Hatscher et al. kritisch betrachtet. Auf dieser Grundlage wird eine Anforderungsanalyse erstellt, sowie Interaktionskonzepte und Feedbackvarianten vorgestellt. Diese werden im Anschluss daran prototypisch implementiert, um sie abschließend einer Evaluierung anhand der aufgestellten Anforderungen zu

unterziehen. Dabei soll überprüft werden, welches der entwickelten Konzepte sich besser für den beschriebenen Anwendungsfall eignet.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Nachfolgend soll zunächst ein Überblick über die verschiedenen Themen der einzelnen Kapitel gegeben werden.

- **Kapitel 2** behandelt die Grundlagen aus dem Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion. Des Weiteren werden verwandte Arbeiten aus dem Bereich der berührungslosen Interaktion im Operationsaal und der Fußinteraktion vorgestellt und diskutiert.
- **Kapitel 3** beschäftigt sich mit der Konzeptionierung geeigneter Interaktionsgesten. Hierzu wird zunächst verwandte Forschung vorgestellt, die in engem Zusammenhang zum Thema dieser Arbeit steht. Aufbauend darauf wird eine Anforderungsanalyse für die zu entwickelnden Konzepte durchgeführt. Anschließend werden verschiedene Interaktionskonzepte und Feedbackvarianten diskutiert.
- **Kapitel 4** stellt die Entwicklungswerkzeuge vor, die für die Realisierung der Interaktionskonzepte und deren Feedback verwendet werden. Diese Implementierung wird benötigt, um die Konzepte anschließend einer Evaluierung unterziehen zu können.
- **Kapitel 5** beschreibt die zwei im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Nutzerstudien zur Evaluierung der entwickelten Interaktionskonzepte und deren Ergebnisse.
- **Kapitel 6** fasst die Ergebnisse dieser Arbeit zusammen, zieht ein Fazit und gibt einen Ausblick auf offene Fragestellungen, welche in Folgearbeiten untersucht werden können.



## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel widmet sich den für diese Arbeit essentiellen Grundlagen der Mensch-Maschine-Interaktion (MMI) sowie dem Stand der Technik aus anderen verwandten Arbeiten. Hierbei wird zunächst auf den Begriff der Mensch-Maschine-Interaktion im Allgemeinen eingegangen. Als zweites wird der Begriff „Gesten“ definiert. Darauf aufbauend werden anschließend im Speziellen Fußgesten betrachtet. Es werden Besonderheiten genannt, die während der Konzeption von Fußgesten beachtet werden müssen. Der dritte Abschnitt gibt einen kurzen Einblick in die verschiedenen Möglichkeiten der Datenerfassung von Bein- bzw. Fußgesten. Abschließend werden Arbeiten aus dem Bereich der handfreien Interaktion zur Navigation in medizinischen Datensätzen im Operationssaal vorgestellt, um einen Überblick über die bisherigen Ansätze zu diesem Thema zu geben.

### 2.1 Mensch-Maschine-Interaktion

Der Begriff Mensch-Maschine-Interaktion beschreibt die Schnittstelle, mit der der Mensch mit maschinellen Systemen interagieren kann. Hierbei begann die Entwicklung Ende des 19. Jahrhunderts, als die ersten Computer entwickelt wurden. Die Interaktion mit diesen Systemen lief dabei über mechanische Schalter und Lochkarten. Der nächste Meilenstein war die Eingabe in eine Kommandozeile mittels Tastatur. Diese Ansätze wurden später durch die bis heute am weitesten verbreitete Methode, die Kombination von Maus und Tastatur, ersetzt. Mittlerweile haben Touchscreens in sehr vielen Bereichen Einzug gefunden. Durch diese Weiterentwicklungen im Bereich der Eingabegeräte wurde die Möglichkeit geschaffen, neuartige Schnittstellen zwischen Mensch und Computer zu entwerfen.

#### WIMP

Einer der bis heute am weitesten verbreiteten Ansätze ist das sogenannte *WIMP*. Dieses Akronym steht für die englischen Begriffe – *w*indow, *i*con, *m*enu und *p*ointer. Mit diesem Prinzip werden Benutzungsoberflächen von Programmen aus Fenstern (*window*) entworfen. Diese Fenster besitzen Symbole (*icon*), mit denen bestimmte Funktionen ausgeführt werden können. Es gibt des Weiteren Menüs (*menu*), die die Oberfläche durch

weitere Funktionen erweitert. Mit Hilfe eines Zeigers (*pointer*) kann dementsprechend mit den Elementen der Benutzungsoberfläche interagiert werden [10, 11].

### **Weiterentwicklungen durch industrielle Projekte**

Eine große treibende Branche im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion ist die Spielebranche. Diese setzt durch ihre enorme Popularität und dementsprechende Verbreitung immer wieder innovative Trends. Dadurch profitieren verschiedene andere Branchen ebenfalls von diesen Entwicklungen. Durch die immer wachsenden Anforderungen von Nutzern im Bereich der Spiele werden Hardwarehersteller zu Weiterentwicklungen ihrer System bekräftigt, wodurch auch Anwendungen in anderen Bereichen, wie z. B. Simulation oder medizinischer Visualisierung, immer mehr Leistung zur Verfügung steht, um dem Nutzer ein optimales und realistisches Nutzergefühl zu ermöglichen. Die Spielebranche ist zusätzlich auch Vorreiter im Etablieren neuer Ein- und Ausgabegeräte. Hierbei sind prägende Systeme wie die Nintendo Wii zu nennen. Der Nutzer navigiert hier mittels einer Fernbedienung (Wiimote) durch virtuelle Welten. Die Fernbedienung verfügt über eine Infrarot-, einen Beschleunigungssensor und ein Gyroskop, um räumliche Bewegungen aufzuzeichnen. Die entsprechende Infrarotkamera wird am verwendeten Bildschirm positioniert [11].

### **Natürliche Benutzerschnittstellen**

Durch diese Weiterentwicklungen im Bereich der Eingabegeräte wurde ein weiterer Ansatz zur Interaktion mit Computern eingeführt - die natürlichen Benutzerschnittstellen (NUI). Dieser Ansatz besteht darin, dem Nutzer zu ermöglichen, seine Erfahrungen aus der realen Welt zur Interaktion mit dem Computer zu nutzen. Dadurch sollen auch Laien schneller mit solchen Interaktionen vertraut gemacht werden, da sie ihr bereits vorhandenes Wissen lediglich auf ein Problem übertragen müssen. Dies führt dazu, dass die Lernphasen bei der Interaktion mit neuen Systemen wesentlich geringer ausfallen. Dabei wird versucht, die fünf Sinne des Menschen optimal einzubeziehen. Die Sinne Schmecken und Riechen finden hierbei jedoch keine Anwendung. Allerdings können die restlichen Sinne, Hören, Sehen und Fühlen, sehr gut genutzt werden [12].

### **Post-WIMP**

Der Begriff der Post-WIMP User-Interfaces beschreibt die meisten neuen Ansätze, die über die bisherigen Konzepte hinausgehen. Zu nennen wären hier beispielsweise die 3D User Interfaces (Virtual, Augmented und Mixed Reality), multimodale Interaktion (Einsatz mehrerer Eingabemodalitäten) und Gesture User Interfaces [11]. Letzteres beschreibt die Steuerung eines Computers mittels verschiedener Gesten. Auf diese Gesten wird im folgenden Abschnitt näher eingegangen.

## 2.2 Gesten

Gesten stellen einen nonverbalen Bestandteil der menschlichen Kommunikation dar. Sie können sowohl unterstützend zur Sprache gebraucht werden, aber auch als eigenständiger Kommunikationskanal (wie z. B. Beifall). Im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion dienen sie dazu, dem Computer zu vermitteln, welche Funktionen der Nutzer ausführen möchte. Hierbei ist es wichtig, dass die entwickelten Gesten eindeutig für den Computer zu verstehen sind, um Fehleingaben zu vermeiden.

Preim und Dachzelt [11] definieren zunächst zum Thema der Gesten in der Mensch-Maschine-Interaktion den Begriff der Gesten selbst, die Gesten-Schnittstellen und das Gestenalphabet, da diese als essentielle Bestandteile angesehen werden.

1. „Eine **Geste** ist die Bewegung von Fingern, Händen und Armen – oder 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 sollen.“<sup>1</sup>
2. „**Gesten-Interfaces** sind Benutzungsschnittstellen, die Menschen das Interagieren mit Computern durch Gesten, d. h. die Bewegung ihres Körpers oder von Körperteilen, erlauben.“<sup>1</sup>
3. „Ein **Gestenalphabet** (auch Gestenvokabular, engl. *Gesture Set*) ist eine Menge von konfliktfreien, unterscheidbaren und erlernbaren Gesten, mit denen eine Menge an Funktionen für eine bestimmte Applikation, Anwendungsdomäne oder anwendungsübergreifend auf Betriebssystemebene aktiviert werden kann.“<sup>1</sup>

Wagner et al. [13] stellten in ihrer Arbeit eine Einteilung von Hand- bzw. Armgesten in verschiedene Phasen bei der Ausführung vor. Dabei ist anzumerken, dass jede dieser Phasen optional ist und es so vorkommen kann, dass eine oder mehrere Phasen bei der Ausführung von Gesten übersprungen bzw. ausgelassen werden.

- Der Ausführende befindet sich zunächst in **Ruheposition**, d. h. einer stabilen Ausgangsposition, aus der mit Gesten begonnen werden kann.
- Anschließend daran beginnt die **Vorbereitungsphase**, in der die Bewegung aus der Ruheposition durchgeführt wird.
- Nach dieser vorbereitenden Bewegung kann die **Gestenbewegung** (engl. *stroke*) an sich ausgeübt werden. Dies stellt die für den Nutzer anstrengendste Phase dar, da diese die Informationen enthält und so eindeutig zu verstehen sein muss.

---

<sup>1</sup> Preim und Dachzelt S. 497-498 [11]

- Um das Verstehen der Gesten zu unterstützen, wird die Geste anschließend (engl. stroke hold) in einer bewegungslosen Phase gehalten (**Haltephase**). Diese Phase kann auch vor der Ausübung der Gestenbewegung durchgeführt werden (engl. prestroke hold).
- Abschließend bewegen sich die Hände zurück in den Ausgangszustand. Diese Phase wird daher **Erholungsphase** genannt. Werden mehrere Gesten hintereinander durchgeführt, kann diese Phase entfallen.

Durch die Klassifikation von Quek et al. [14] und der von Karam und Schraefel [15] entworfenen Taxonomie in Bezug auf Gesten in der Mensch-Maschine-Interaktion lassen sich Gesten in folgende fünf Kategorien einteilen:

- **Deiktische Gesten:** zeigende und verweisende Gesten, die zur Selektion oder Positionierung eines Objektes verwendet werden.
- **Manipulative Gesten:** Steuerung oder Veränderung von Objekten mit eindeutigem Zusammenhang zwischen Bewegung und Manipulation.
- **Symbolische Gesten:** Deutung anhand eines Gestenwörterbuchs zur eindeutigen Übermittlung an den Computer, um einen Befehl auszulösen oder einen Modus zu wechseln.
- **Zeichen- und Gebärdensprache:** Sequenz symbolischer Gesten, die durch ihre Komplexität allerdings keine direkten Anweisungen an den Computer übergeben werden, sondern erst im Zusammenspiel mehrerer symbolischer Gesten eine Bedeutung erhalten.
- **Sprachbegleitende Gesten:** Verwendung des gesprochenen Wortes zur Interaktion mit Systemen

Dieser Ablauf unterstützt durch eine klare Struktur die korrekte Erkennung der Gesten durch Mensch und Computer. Preim und Dachsel [11] haben zudem Herausforderungen beim Gestendesign vorgestellt. Im Folgenden werden die wichtigsten Aspekte in Bezug auf diese Arbeit vorgestellt.

- **Schnelle, inkrementelle und umkehrbare Handlungen:** Gesten sollten stets schnell ausführbar und geringen Aufwands sein, um Ermüdungserscheinungen so gering wie möglich zu halten. Außerdem sollten Gesten stets simpel widerrufbar sein.
- **Adäquates Feedback:** Feedback sollte unterstützend eingesetzt werden, um dem Nutzer mitzuteilen, dass Gesten erfolgreich vom System registriert wurden. Es ist jedoch wünschenswert, wenn Feedback sogar schon während

der Ausführung der Geste vermittelt wird, da Nutzer während der Gestenbewegung oft verunsichert sind, ob sie diese richtig ausführen.

- **Leichte Erlernbarkeit, gutes Erinnern:** Einfache Gesten, die wenig Aufwand in der Ausführung und dem Erlernen erfordern, werden häufig von Nutzern bevorzugt. Aufgrund des Umfangs eines Systems kann es allerdings durch das Benötigen von zusätzlichen Funktionen notwendig sein, komplexere Gesten zu verwenden. Die Gesten sind meist schwerer zu erlernen, geben dem Nutzer jedoch mehr Kontrolle über das System.
- **Konsistenz und Symmetrie:** Bestandteile von Gesten unterscheiden sich oft nur in kleineren Details, daher muss auf die Konsistenz von Funktionen geachtet werden, die zu einer gemeinsamen Gruppe gehören.
- **Begrenzen der Anzahl von Gesten:** Die Anzahl verschiedener Gesten für ein System sollte so gering wie möglich gehalten werden, da es sonst zu Schwierigkeiten beim Erlernen und der technischen Erkennung der Gesten kommt.

Gesten existieren in verschiedensten Formen. Es wird in Finger-, Freihand-, Kopf-, Gesichts-, Augen-, Fuß- und Körpergesten unterteilt. Dadurch entsteht eine große Vielfalt an möglichen Gesten. Diese können je nach Anforderungen variiert oder kombiniert werden. In dieser Arbeit liegt der Fokus auf den Fußgesten. Aus diesem Grund wird im folgenden Abschnitt detaillierter auf die speziellen Eigenschaften von Fußgesten eingegangen.

## 2.3 Fußinteraktion

Nachdem zunächst der Begriff der Gesten im Allgemeinen betrachtet wurde, soll in diesem Abschnitt auf die Fußinteraktion, im Speziellen auf Fußgesten, eingegangen werden. Einer der geläufigsten Anwendungsfälle für Fußinteraktion ist die Bedienung von Gas, Bremse und Kupplung im Auto mittels Pedalen. Pedale bieten den Vorteil, dass sie durch ihre physische Form dem Nutzer direkt haptisches Feedback bei Betätigung vermitteln. Bei Gesten, die mittels Kamerasystemen oder Inertialsensoren am Körper erfasst werden, gibt es diese Möglichkeit nicht. Aus diesem Grund ist es besonders wichtig, bei diesen Systemen geeignete Feedbackmöglichkeiten zu entwickeln. Näheres zum Thema Feedback wird in *Kapitel 3* thematisiert.

### 2.3.1 Fußgesten

Fußinteraktion ist heutzutage unterrepräsentiert in der Mensch-Maschine-Interaktion. Der Hauptvorteil dieser Interaktionsart liegt nahe: Der Nutzer benötigt dabei seine Hände nicht und hat diese insofern frei verfügbar für andere Aufgaben [11]. Aus diesem Grund widmet sich diese Arbeit der Fußinteraktion und den Möglichkeiten, die sich daraus ergeben. Präzise Aufgaben, wie z. B. Zeige-/Auswahlaufgaben, sind jedoch sehr schwer mit den Füßen auszuführen. Hierbei sind höhere Bearbeitungszeiten und schlechtere Genauigkeiten als mit den Händen zu beobachten [16, 17]. Bereits 1986 befassten sich Pearson und Weiser [18] mit der Fußsteuerung am Schreibtisch. Hierzu werden konzeptionell verschiedene Eingabemöglichkeiten vorgestellt. Diese Ansätze basieren auf Eingabegeräten, die fest unter dem Arbeitsplatz verbaut sind. Einige dieser Ansätze basieren auf beweglichen Elementen, die sich mit Hilfe der Füße verschieben lassen, um Interaktionen auszuführen. Zudem wird die Bewegung des Fußes auf fest installierten Flächen vorgestellt. Die letzte Variante kommt dem taktilen Sensorfußboden am nächsten. Durch die Betrachtung von Fußinteraktion am Schreibtisch wird jedoch davon ausgegangen, dass der Nutzer sitzt. Im Sitzen ergeben sich andere Interaktionsmöglichkeiten als im Stehen, da die Füße nicht zur Stabilität benötigt werden. Im Stehen muss stets beachtet werden, dass in der Regel nur ein Fuß zu einem Zeitpunkt zur Interaktion verwendet werden kann, weil ein Fuß als Standbein fungieren muss. Hierbei zeigt sich auch der große Unterschied zu Handgesten. Da der Mensch seine Füße zum Stehen benötigt, können keine komplexen Gesten, die beispielsweise beide Hände benötigen, mit Fußgesten umgesetzt werden, da sonst die Standstabilität gefährdet wird.

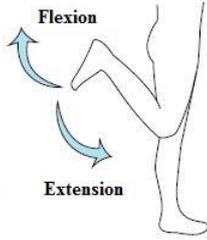
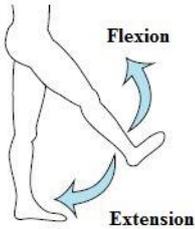
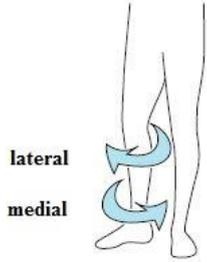
Velosso et al. [19] beschäftigen sich in ihrer Arbeit ausführlich mit dem Thema der Fußinteraktion in der Mensch-Maschine-Interaktion. Dabei gliedert sich die Arbeit im Wesentlichen in drei Bereiche. Zunächst wird auf die verschiedenen Freiheitsgrade in der Bewegung von Bein und Fuß des Menschen eingegangen (siehe *Tabelle 2.1*). Hierbei wird zwischen den drei Beingelenken Knöchel, Knie und Hüfte unterschieden.

*Tabelle 2.1: Freiheitsgrade an Bein und Fuß des Menschen (aus [19])*

Gelenk	Bewegung
Knöchel	Dorsalflexion
	Plantarflexion
	Inversion
	Eversion

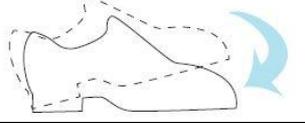
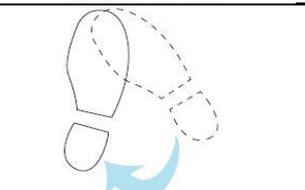
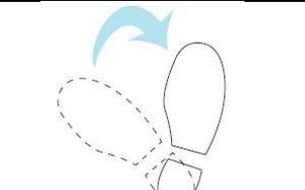
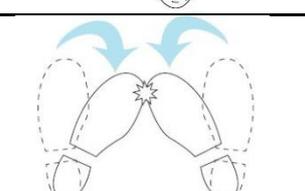
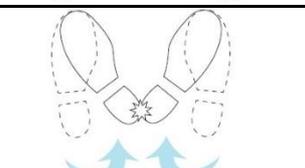
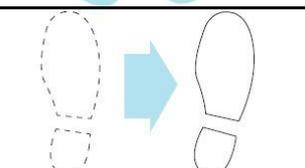
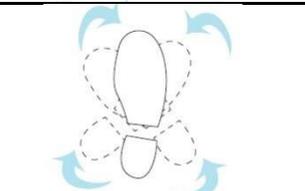
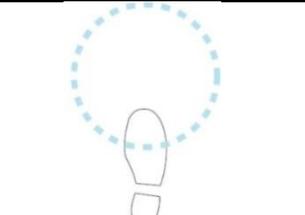
Dorsalflexion  
Plantarflexion

Rechter Fuß  
Inversion Eversion

Gelenk	Bewegung	
<b>Knie</b>	Flexion (Beugung)	
	Extension (Streckung)	
<b>Hüfte</b>	Flexion (Beugung)	
	Extension (Streckung)	
	Laterale Drehung (außen)	
	Mediale Drehung (innen)	
	Abduktion (abspreizen)	
	Adduktion (heranziehen)	
		

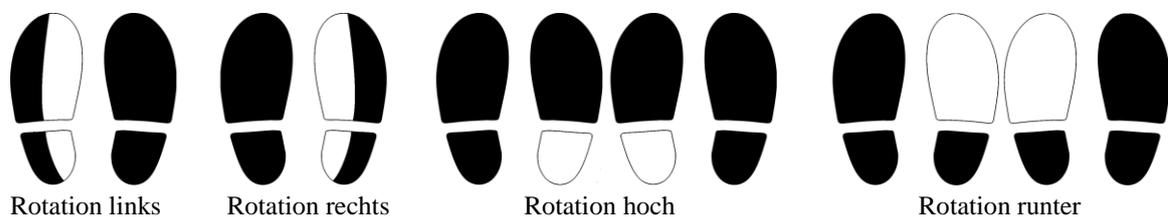
Im Zuge des zweiten Bereichs wird sich mit Systemen zur Fußgestenerkennung beschäftigt. Auf diesen Teil wird in *Kapitel 2.3.2* näher eingegangen. Der dritte Bereich behandelt speziell das Thema der möglichen Fußgesten. Einen Überblick über mögliche Fußgesten bietet die *Tabelle 2.2*. Hierbei werden verschiedenste Gesten vorgestellt, welche allerdings nicht mit jeder Art von Sensorik erfasst werden können. So können beispielsweise „Tritt-Gesten“, die in der Luft ausgeführt werden, in der Regel nicht von Sensorfußböden erkannt werden.

**Tabelle 2.2:** Überblick über mögliche Fußgesten (Quelle: [19])

Geste	Beschreibung	
<b>Fußballen-Tap</b>	Anheben und darauffolgendes Senken des Fußballens	
<b>Fersen-Tap</b>	Anheben und darauffolgendes Senken der Ferse	
<b>Fußballen-Drehung</b>	Drehung des Fußes mit fester Fußballenposition	
<b>Fersen-Drehung</b>	Drehung des Fußes mit fester Fersenposition	
<b>Fußballen-Berührung</b>	Berührung der beiden Fußballen	
<b>Fersen-Berührung</b>	Berührung der beiden Fersen	
<b>Swipe-Geste</b>	Ziehen des Fußes in bestimmte Richtung	
<b>Schüttel-Geste</b>	Kurze unregelmäßige Schüttelbewegungen des Fußes	
<b>Formverfolgung</b>	Umrandung von speziellen Formen	

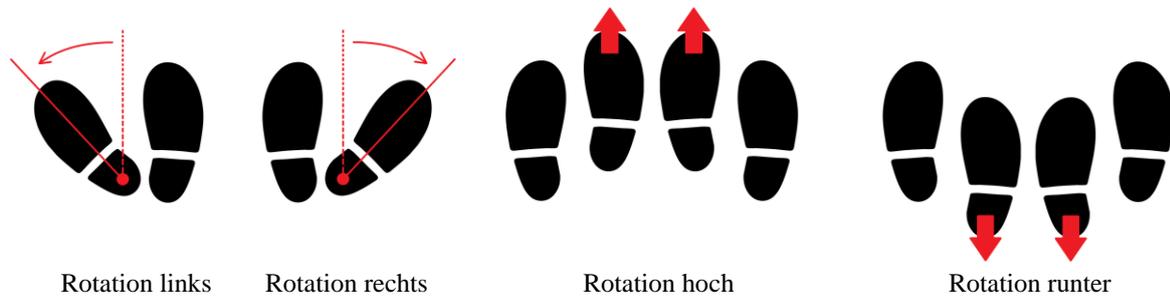
Geste	Beschreibung	
<b>Tritt-Geste</b>	Kräftige Bewegung des Fußes in eine Richtung	
<b>Schritt-Geste</b>	Schritt in eine bestimmte Richtung	

Neben den bereits vorgestellten Gesten haben sich Sangsuriyachot und Sugimoto [20] in ihrer Arbeit mit Fußgesten zur Rotation von Objekten beschäftigt. Sie haben sich hierfür einen eigenen Prototyp eines multi-touch Fußbodens gebaut. Mit Hilfe dieses Fußbodens können sie bereits leichte Belastungsänderungen am Fuß feststellen. Innerhalb einer Studie wurden zunächst zwei Gestensets entwickelt, die im Anschluss verglichen wurden. In *Abbildung 2.1* ist das erste Gestenset abgebildet, welches auf Druckunterschiede am Fuß ausgelegt ist. Diese basieren auf den verschiedenen Knöchelbewegungen aus *Tabelle 2.1*. Die Plantar- und Dorsalflexion wird für die Rotation nach oben und unten verwendet, während die Inversion und Extension für die seitlichen Rotationen, also nach links und rechts, genutzt werden.



*Abbildung 2.1: Druckbasiertes Gestenset (Quelle: nach [20])*

*Abbildung 2.2* zeigt das zweite Gestenset, welches auf Fersenrotationen und kleineren Schrittbewegungen (siehe *Tabelle 2.1*) basiert. Hierbei werden also keine Belastungsveränderungen am Fuß erfasst, sondern kleinere Standpositionsänderungen. Beide Konzepte haben jedoch die Gemeinsamkeit, dass sie sehr wenig Platz benötigen. Die von Sangsuriyachot und Sugimoto durchgeführte Evaluierung dieser beiden Konzepte ergab, dass die Bearbeitungszeit von Aufgaben mit dem druckbasierten Gestenset schneller erfolgte und die Nutzerzufriedenheit höher war.



**Abbildung 2.2:** Rotations- und bewegungsbasiertes Gestenset (Quelle: nach [20])

### 2.3.2 Möglichkeiten der Fußgestenerkennung

In der Literatur werden verschiedene Ansätze zur Erfassung von Fußbewegungen bzw. -gesten verwendet. Diese Methoden sollen in diesem Kapitel vorgestellt und eine Wahl für ein Eingabemedium diskutiert werden. Die Ansätze lassen sich grob in drei Bereiche einteilen – Kamerasysteme, Inertialsensorik am Körper des Nutzers und Sensorfußböden bzw. speziell präparierte drucksensitive Socken/Schuhe.

Crossan et al. [21] stellen in ihrer Arbeit ein System vor, mit dem es ihnen möglich war, ausgeführte Taps mit den Füßen zu erkennen. Hierfür verwendeten sie das JAKE-Sensorkpaket, welches der Nutzer am Körper trägt. Dabei handelt es sich um einen Bluetooth-Sensor, der über einen Beschleunigungssensor und ein Magnetometer verfügt. Ein weiterer Ansatz in diesem Bereich funktioniert durch das bloße Tragen eines Smartphones an verschiedenen Positionen der Hüfte, da durch dessen Sensoren alle Knöchelfreiheitsgrade sowie die mediale und laterale Drehung des Hüftgelenks (siehe *Tabelle 2.1*) erkannt werden können [22].

Die Erkennung via Kamerasystem stellt eine weitere Variante dar. Diese ist auch im Bereich der Handgestenerkennung am weitesten verbreitet. Die Arbeiten von Simeone et al. [23] und Saunders und Vogel [24] beschäftigen sich mit der Fußinteraktion am Schreibtisch. Die Erkennung funktioniert bei beiden Ansätzen über Kamerasysteme. Die erste Arbeit betrachtet dabei Gesten, die im Sitzen ausgeführt werden. Hierfür werden die Fußbewegungen in bestimmte Richtungen erfasst, um bestimmte Objekte auszuwählen oder zu rotieren. Die Forschung von Saunders und Vogel betrachtet wiederum die Erkennung von Fußgesten im Stehen. Dabei werden mit den Füßen Schrittgesten in bestimmte Richtungen ausgeführt, um Funktionen auszuführen. Es wird untersucht, wie groß solche Schaltflächen mindestens sein müssen, damit ein solches System robust funktionieren kann. Das Hauptproblem an kamerabasierten Systemen ist jedoch die Verdeckung von Informationen. Aufgrund von variablen Nutzerpositionen kann es schnell dazu kommen, dass das Sichtfeld der Kamera verlassen oder blockiert wird und Informationen verloren gehen [11].

Visell et al. [25] haben in ihrer Arbeit einen eigenen taktilen Sensorfußboden entwickelt, um die Immersion in einem Cave-ähnlichen Simulator zu erhöhen [11]. Dieser besteht aus 30x30cm großen Platten (siehe *Abbildung 2.3*). Unter jeder der vier Ecken dieser

Platten befinden sich drucksensitive Sensoren. Mit Hilfe dieser vier Sensoren kann der Druckmittelpunkt des erfassten Fußes bestimmt werden. Über die Ausrichtung und Form des Fußes kann jedoch keine Aussage getroffen werden. Eine Aussage zur ungefähren Ausrichtung kann nur getroffen werden, wenn sich der Fuß auf zwei oder mehr dieser Platten gleichzeitig befindet. Zusätzlich zur Erkennung von Standpositionen kann mit Hilfe von unter den Platten angebrachten Vibrationselementen dem Nutzer taktiles Feedback, in Form von Vibrationen, vermittelt werden.



*Abbildung 2.3: Aufbau einer 30x30 cm großen Sensorplatte aus der Arbeit von Visell et al. (Quelle: [25])*

Neben taktilen Sensorfußböden werden auch speziell präparierte drucksensitive Socken oder Schuhe verwendet. Mit Hilfe von solchen drucksensitiven Socken [26] können ähnliche Gesten erkannt werden wie mit einem taktilen Sensorfußboden. Allerdings können hier wesentlich feinere Gesten, wie das Ausführen eines Taps mit dem Zeh, erkannt werden. Dies wäre bei einem taktilen Sensorfußboden nur bei einer sehr hohen Auflösung möglich. Ein weiterer Vorteil, aber auch zugleich Nachteil dieses Systems ist es, dass hier immer nur der Nutzer die Gesten ausführen kann, der die Socken trägt. Bei einem taktilen Sensorfußboden kann jeder Nutzer die Interaktionen durchführen, ohne spezielle Hardware zu tragen.

Die Forschung von Hatscher et al. [9] stellt dabei eine wichtige Grundlage für die vorliegende Arbeit dar, da hier bereits die Navigation durch medizinische Bilddaten per Fuß betrachtet und umgesetzt wurde. Innerhalb einer Studie wurde die Umsetzbarkeit gezeigt. Hierzu wird ein drucksensitiver Fußboden verwendet. Auf den Aufbau, die Ergebnisse und Schwierigkeiten wird in *Kapitel 3.2* näher eingegangen.

Der Vorteil bei der Verwendung eines Sensorfußbodens ist, dass die Nutzer keine spezielle Hardware am Körper tragen muss. Dabei entstehen lediglich positionsbedingte Einschränkungen, die sich aus der jeweiligen Größe und Position des verwendeten Fußbodens ergeben. Hierbei können auch die Probleme durch Verdeckung und somit Informationsverlust durch Kamerasysteme umgegangen werden. Aus diesen Gründen wird in dieser Arbeit ein Sensorfußboden verwendet.

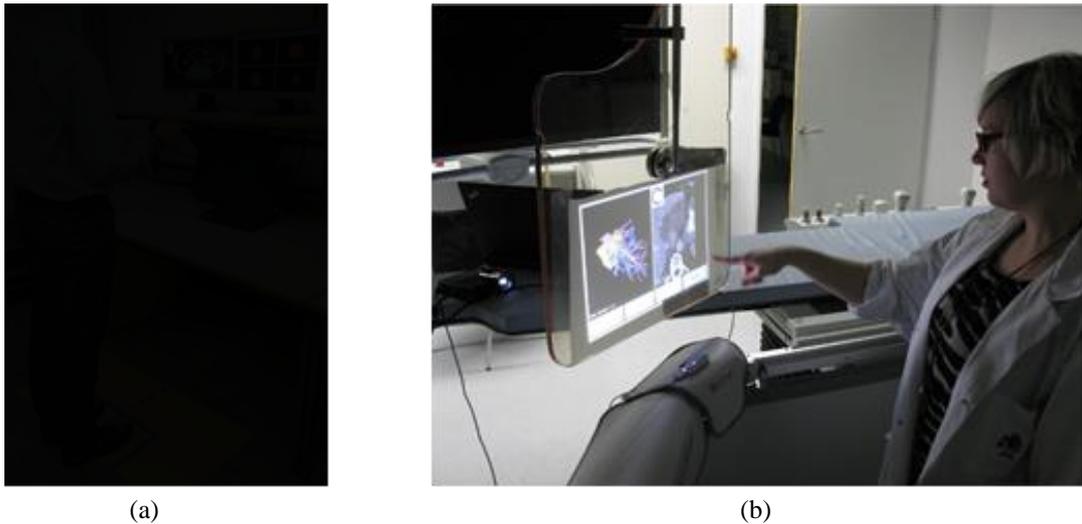
## 2.4 Berührungslose Interaktion im Operationssaal

In diesem Abschnitt soll der Stand der Technik im Bereich der berührungslosen Interaktion im Operationssaal vorgestellt werden. Hierzu dient die Arbeit von Mewes et al. [8], die eine Literaturübersicht darstellt, als Grundlage. Es wurden 36 relevante Arbeiten aus dem Bereich der berührungslosen Interaktion mit medizinischen Bilddaten im Operationssaal erfasst und ein sehr guter Überblick über die verschiedenen Ansätze zu diesem Thema gegeben. Die erfassten Arbeiten wurden dabei zunächst grob in drei Bereiche untergliedert.

31 der 36 Arbeiten benutzten zur Erfassung von Nutzereingaben verschiedenste Arten von Kamerasystemen. Die Kamerasysteme wurden wiederum von Mewes et al. in vier verschiedene Kategorien untergliedert: RGB-Kameras, Time-of-Flight-Kameras, Stereo-Kameras und der Microsoft Kinect. Diese Arbeiten verfolgen jedoch alle den gleichen Ansatz, die Steuerung der Bilddaten über Handgesten, wie z. B. bei Achacon et al. [27], Ebert et al. [28] und Mewes et al. [29].

Lediglich eine Arbeit befasst sich mit dem Ansatz der Spracherkennung des Nutzers [30]. Die Spracherkennung wird hierbei als Zusatz zur Interaktion via Handgesten angewendet und dient zum Wechsel zwischen verschiedenen Modi oder der Ausführung einiger Funktionen, wie dem Durchscrollen von Schichtbildern. Ein befragter Chirurg empfand das System als sehr nützlich. Allerdings wurden keinerlei Daten im Rahmen einer Evaluierung gewonnen.

Die restlichen vier Arbeiten befassen sich mit der Verwendung von verschiedener Inertialsensorik. Schwarz et al. [31] verwendete mehrere am Körper getragene Inertialsensoren, um einfache Körpergesten erfassen zu können. In der Evaluierung empfanden die Probanden das Tragegefühl der Sensoren als sehr angenehm und es wurde eine Erkennungsrate der Gesten von 90% erreicht. Dieses System wurde anschließend von Bigdelou et al. [32] um eine Spracherkennung und eine Aktivierung/Deaktivierung per Handheld erweitert. Hettig et al. [33] verwendete ein myoelektrisches Armband zur Erfassung von verschiedenen Handgesten. Die durchgeführten Studien ergaben jedoch, dass das entwickelte System eine zu geringe Erkennungsrate der Gesten aufweist. Die vierte Arbeit in dieser Kategorie von Jalaliniya et al. [34] befasste sich ebenfalls mit einem Armband. Verglichen mit Hettig et al. wurde zusätzlich ein kapazitiver Fußboden verwendet. Dabei handelt es sich um das gleiche Modell, welches auch in dieser Arbeit zum Einsatz kommt (siehe *Kapitel 3.1*). Die Navigation durch die Daten an sich funktionierte dennoch nur über Handgesten. Fußgesten wurden lediglich zur Aktivierung bzw. Deaktivierung der Möglichkeit zur Interaktion per Handgesten verwendet.



**Abbildung 2.4:** Versuchsaufbauten von (a) Jalaliniya et al. [34] und (b) Mewes et al. [29]

Zusammenfassend lässt sich erkennen, dass die meisten der vorgestellten Ansätze auf der Interaktion per Handgesten beruhen. Hierbei stellt sich wiederum die Problematik, dass der Arzt während einer Operation z. B. medizinische Instrumente in seinen Händen hält und diese also zunächst weglegen muss, um das System verwenden zu können. An dieser Stelle platziert sich die Arbeit von Hatscher et al. [9]. In dieser Arbeit wurde erstmals die Navigation durch medizinische Bilddaten ausschließlich mittels Fußinteraktion getestet. Dies stellt die Grundlage für die vorliegende Arbeit dar und wird in *Kapitel 3.1* näher beschrieben. Dort setzt die vorliegende Arbeit an. Die reine Fußinteraktion bringt den großen Vorteil, dass der operierende Arzt seine Hände zur Navigation durch die medizinischen Bilddaten nicht benötigt und so die Hände komplett frei für seine Arbeit hat. Auf der Grundlage der vorgestellten Themen werden nun im Anschluss die entwickelten Konzepte vorgestellt und diskutiert.



## 3 Konzeption

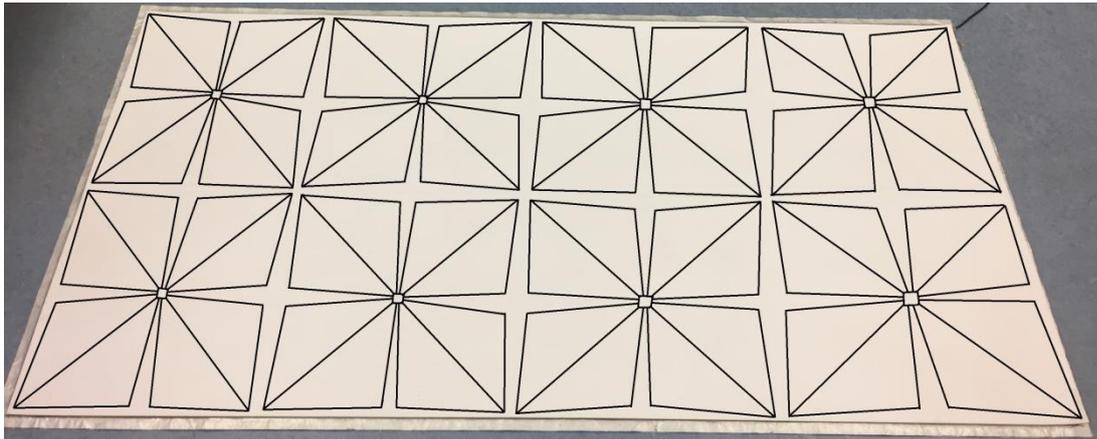
In diesem Kapitel wird auf die entwickelten Konzepte eingegangen werden. Hierzu wird zunächst die verwendete Hardware, ein kapazitive Sensorfußboden, vorgestellt. Anschließend wird eine Arbeit vom Autor präsentiert, die im Vorfeld dieser Abschlussarbeit im Rahmen eines studentischen Teamprojekts erstellt und von Hatscher et al. [9] veröffentlicht wurde. Dabei wird auf den Aufbau und die Ergebnisse dieser Arbeit eingegangen, welche als Grundlagen für die vorliegende Arbeit angesehen werden können, und anschließend die wichtigsten Aspekte diskutiert. Aufbauend auf diese Arbeit wird eine Anforderungsanalyse für das zu entwickelnde System durchgeführt. Auf dieser Grundlage werden Konzepte entwickelt, welche die Navigation in medizinischen Bilddaten ermöglichen. Dabei werden zunächst Interaktionskonzepte vorgestellt und die Notwendigkeit einer Aktivierungsgeste diskutiert. Abschließend werden geeignete Feedbackmöglichkeiten aufgezeigt.

### 3.1 Sensorfußboden „SensFloor“

Der in dieser Arbeit verwendete Sensorfußboden wird von der Firma Future-Shape kommerziell vertrieben und trägt den Namen „SensFloor“ [35]. Dieser basiert auf einer Technik, die Kapazitätsschwankungen auf der Fußbodenoberfläche erfasst und so Nutzer, die sich darauf befinden, erkennen kann. Der Fußboden besteht aus einzelnen Modulen, die eigenständig für sich arbeiten und in Kombination einen Boden mit variabler Größe ergeben. Die Sensormodule der vorliegenden Fußbodenkonfiguration sind 48x48 cm groß und bestehen aus acht Sensorzellen. Diese Sensorzellen weisen eine Dreiecksform auf. Dies ergibt auf einem Quadratmeter insgesamt 4 Sensormodule á 8 Zellen, also 32 Sensoren. Der verwendete Fußboden ist zwei Quadratmeter groß und besteht so aus 8 Sensormodulen mit insgesamt 64 Sensorzellen (siehe *Abbildung 3.1*).

Die Daten der Sensormodule werden per Funk (868 MHz) übertragen, wobei jedes Sensormodul eigenständig funktioniert. Zur Unterscheidung besitzen die einzelnen Module eine Identifikationsnummer mit der sie eindeutig erkannt werden können. Diese senden sie innerhalb der Datenpakete mit. Um die Daten am PC erhalten zu können, gibt es einen speziellen Empfänger, der via USB an den Computer angeschlossen wird. Die einzelnen Datenpakete schicken hierbei die Kapazitätswerte der einzelnen Dreieckszellen.

Durch die Umsetzung mittels Kapazität ist es bereits auf einer gewissen Distanz zum Boden möglich, Wertänderungen zu erfassen. Wie groß diese Distanz ist, hängt von Art und Dicke des Bodenbelags und der Schuhe des Nutzers ab [36]. Mit dieser Art des taktilen Sensorfußbodens können also nur Gesten erkannt werden, bei denen der Nutzer den Boden während der Ausführung der Gesten berührt oder sich minimal darüber befindet. Gesten, wie ein Tritt nach vorn oder z. B. die Beugung des Knies, können so nicht ohne weiteres erkannt werden. Hierzu müssen andere Systeme zur Erfassung verwendet werden.



*Abbildung 3.1: Taktile Sensorfußboden mit eingezeichneten Positionen der Sensorzellen*

## 3.2 Initialer Prototyp

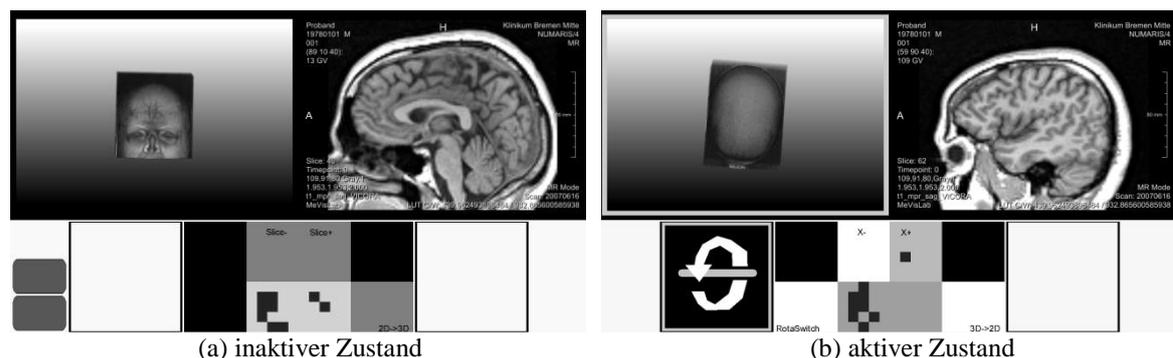
In dem System von Hatscher et al. [9] wurde erstmalig der Ansatz der reinen Fußinteraktion zur Navigation durch medizinische Bilddaten im klinisch orientierten Anwendungsfall verfolgt. In der Arbeit wurde das System im Rahmen einer Machbarkeitsstudie evaluiert. Im Folgenden werden zunächst der Aufbau des Systems näher erläutert und anschließend die Ergebnisse der von Hatscher et al. durchgeführten Evaluierung kurz zusammengefasst.

### 3.2.1 Aufbau

Der verwendete taktile Sensorfußboden unterscheidet sich in der Technik und der Funktionsweise von dem in dieser Arbeit verwendeten Fußboden (siehe *Kapitel 3.1*). Im Gegensatz zum aktuell verwendeten Fußboden, der Kapazitätsänderungen registriert, verwendet dieser Fußboden Sensoren, die auf ausgeübten Druck reagieren. Des Weiteren ist dieser Fußboden nicht in Dreieckszellen unterteilt, sondern besteht aus 5x5 cm großen Taxeln. Die Taxeln sind als Gitternetz angeordnet, welches in einer 19x32 Matrix resultiert.

Die betrachteten Funktionen bestehen darin, durch die Schichtbilder eines tomografischen Datensatzes zu navigieren und den gleichen Datensatz als 3D-Darstellung um zwei Achsen rotieren zu können. Die Bedienelemente zur Navigation wurden hierbei dynamisch um den Nutzer positioniert, je nachdem an welcher Position der Nutzer auf dem Fußboden die Aktivierungsgeste (hier „Triple-Tap“) durchgeführt hat. Mehr zum Thema Aktivierungsgesten folgt in *Kapitel 3.4.4*. Es ist dem Nutzer also möglich, an jeder Position auf dem taktilen Sensorfußboden das System zu aktivieren und mit den Bilddaten zu interagieren.

Das System wurde an eine reale OP-Situation ausgerichtet, in der sich vor dem Arzt der OP-Tisch befindet. Dieser hat nicht die Möglichkeit, stets auf seine Fußposition zu achten. Daher sollte mit Hilfe von visuell-auditivem Feedback erreicht werden, das System auch ohne Blick auf die Füße sicher bedienen zu können. Dies wurde durch die Anzeige der momentanen Position der Füße, abhängig von den aktivierten Taxeln, bewerkstelligt. Nachdem das System aktiviert wird, befinden sich um den Nutzer herum Buttons, die zur Navigation verwendet werden können. Hierzu müssen Schrittgesten vom Nutzer ausgeführt werden. In *Abbildung 3.2* ist das entwickelte Interface dargestellt. Im oberen Bereich befinden sich die Bildbetrachter mit den medizinischen Daten (links 3D-Darstellung / rechts MRT-Datensatz).



**Abbildung 3.2:** Entwickelte Benutzungsoberfläche in zwei verschiedenen Zuständen. In (a) ist das System in inaktivem Zustand dargestellt. Im unteren Bereich ist die momentane Position der Füße zu erkennen. (b) zeigt die Benutzungsoberfläche nach der Aktivierung im Rotationsmodus (Quelle: [9])

Dem Nutzer wird zusätzlich zum visuellen auch auditives Feedback vermittelt. Dies geschieht bei jeder vom Fußboden registrierten Aktion, d. h. nach jedem erkannten Tap zur Aktivierung des Systems, bei der erfolgreichen Aktivierung des Systems und bei jeder Interaktion mit dem Datensatz. Die Interaktionen mit den Datensätzen bestehen darin, die Schichtnummer im tomografischen Datensatz durch Erhöhung (vorne rechts) oder Verringerung (vorne links) zu ändern. Um den Kopf im 3D-Bildbetrachter zu verändern, kann um zwei verschiedene Achsen rotiert werden. Dabei sind die Schaltflächen hierfür die gleichen wie beim Schichtwechsel, allerdings muss zunächst die Schaltfläche zum Wechsel des Modus (rechts von der Standposition) betätigt werden. Um die Rotationsachse während der Interaktion mit dem 3D-Datensatz zu wechseln, muss die

Schaltfläche links von der Standposition des Nutzers betätigt werden. Anschließend kann wieder mit den gleichen Schaltflächen wie zuvor um die andere Achse rotiert werden.

### 3.2.2 Probleme

Das vorgestellte System wurde im Anschluss im Rahmen einer Studie evaluiert. Hierzu wurden zehn Probanden eingeladen, die jeweils fünf verschiedene Interaktionsaufgaben mit dem System absolviert haben. Dabei wurde den Probanden das System vorher nicht erklärt (bis auf die Aktivierungsgeste). Sie sollten selber einen Weg finden, das System zu verwenden. So konnten Erkenntnisse über Gedankengänge der Probanden gewonnen werden. Dies führte zu Beginn zu einigen Problemen. Nachdem die Aufgaben 2 und 3 mit einigen Schwierigkeiten absolviert wurden, war eine starke Verbesserung im Umgang mit dem System im Hinblick auf Aufgabe 4 zu beobachten. Dies spricht für eine steile Lernkurve bei der Nutzung des Systems.

*Tabelle 3.1: Auswertung der Nutzerstudie von Hatscher et al. (Quelle: nach [9])*

Aufgabe	Beobachtung	Verteilung
1	Gestenerkennung bei Erstversuch	60%
	Eingabe unterschritt Systemreaktionszeit	30%
	Gestenausführung überschritt Zeitfenster	10%
2	Verwendung der vorgesehenen Buttons	90%
	Slide-Gesten	10%
3	Verwendung der vorgesehenen Buttons	50%
	Slide-Gesten	30%
	Hilfestellung benötigt	20%
4	Verwendung der vorgesehenen Buttons	100%
5	Geste analog zu Aufgabe 1	60%
	Verlassen des taktilen Sensorfußbodens	20%
	Verlassen des Zentrumsrechtecks	10%
	Hilfestellung benötigt	10%

Das Hauptproblem während der Aufgaben bestand darin, das System zunächst zu aktivieren. 40% der Probanden konnte das System erst nach mehrmaliger Gestenausführung erfolgreich aktivieren. Das Wechseln der Schichtbilder funktionierte sehr gut, lediglich ein Proband versuchte hier eine durch Smartphones bekannte Swipe- bzw. Scroll-Geste auszuführen. Dies wurde zusätzlich auch bei der Rotation beobachtet, da es hier für einige Probanden (30%) eine intuitive natürliche Bewegung war. 20% der Probanden konnten die Rotationsaufgabe zunächst gar nicht ohne Hilfestellung durchführen. Wie bereits zuvor genannt, war eine starke Lernkurve zu beobachten. So mussten die Probanden in Aufgabe 4 das Gelernte aus Aufgabe 2 und 3 anwenden. Hierbei gab es dann keinerlei Probleme mehr in der Interaktion. Bei der Deaktivierung des Systems waren wieder Probleme bei der Erkennung von Taps zu beobachten. Zusätzlich haben 30% der Probanden eine alternative Möglichkeit zur Deaktivierung des Systems verwendet. 10% konnten das System nicht ohne Hilfe deaktivieren.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Interaktion mit medizinischen Bilddaten per Fußinteraktion im Allgemeinen sehr gut umsetzbar ist. Allerdings müssen einige Aspekte, wie die Aktivierungsgeste, detaillierter betrachtet werden. Aufgrund der kurzen Anwendungsdauer während der Studie konnte auch kein Urteil über Ermüdungserscheinungen bei längerer Interaktion gefällt werden [9].

### 3.2.3 Diskussion

Die Ergebnisse der Studie von Hatscher et al. zeigen, dass das System noch Schwachstellen aufweist. Lediglich 60% der Probanden war es auf Anhieb möglich das System zu aktivieren. Allerdings lässt sich aufgrund der geringen Stichprobe kein eindeutiges Ergebnis in Bezug auf die Praktikabilität formulieren. Im Zuge der Konzeptionierung muss das Thema der Aktivierungsgeste also erneut aufgegriffen und im Anschluss evaluiert werden. Ein weiterer Aspekt, der bei der Betrachtung der Buttonposition auffällt, ist, dass der Nutzer zur Benutzung aller Funktionen stets beide Füße benötigt. Des Weiteren sollte versucht werden die Buttons kontextnäher zu positionieren, d. h. dass die Richtung, in der der Button liegt, bereits die Information über die Rotations- bzw. Scroll-Richtung trägt. Die Studie zeigte ebenfalls, dass die Beschriftung der Buttons überarbeitet werden sollte, da diese für die Probanden nicht eindeutig war. Die Art des visuellen und akustischen Feedbacks wurde aber insgesamt von 90% der Probanden als intuitiv bewertet und sollte lediglich in den eben genannten Aspekten überarbeitet werden. Akustisches Feedback im Operationssaal sollte allerdings kritisch betrachtet werden, da in den Arbeiten von Edworthy und Hellier [37, 38] gezeigt wurde, dass Töne (Warntöne) im Operationssaal bereits sehr häufig verwendet werden. Aus diesem Grund sollte untersucht werden, ob eine alternative Feedbackmöglichkeit gefunden werden kann. Hierbei kann Vibrationsfeedback in Betracht gezogen werden, da dies den Vorteil aufweist, dass das Feedback lediglich der interagierende Arzt erhält.

Der Fokus dieser Arbeit lag also in der positionsungebundenen Interaktion mit medizinischen Daten. Dazu wurde die Aktivierung überall auf dem Interaktionsraums des taktilen Sensorfußbodens ermöglicht. Die Umsetzbarkeit wurde innerhalb einer Machbarkeitsstudie gezeigt. Dabei standen wichtige Aspekte, die im Gestendesign beachtet werden müssen, nicht im Vordergrund. Ebenso wurde der benötigte Platz im Operationssaal nicht betrachtet. An dieser Stelle setzt die vorliegende Arbeit an. Dazu wird zunächst eine Anforderungsanalyse durchgeführt. Aufbauend darauf werden Konzepte entwickelt, welche anschließend prototypisch implementiert und anhand der Anforderungen evaluiert werden. Dabei sollen bewährte Aspekte, wie das Fußbodenabbild als Feedbackvariante, aus der Arbeit von Hatscher et al. erneut aufgegriffen und weiterentwickelt werden.

## 3.3 Anforderungsanalyse

Bevor mit der eigentlichen Konzeptionierungsphase begonnen werden kann, muss eine Anforderungsanalyse für ein System zur Interaktion mit medizinischen Bilddaten durchgeführt werden. Die Anforderungen werden dabei in technische und klinische Anforderungen unterteilt. Die Erkenntnisse für diese Anforderungsanalyse basieren auf Arbeiten zu den Themen der berührungslosen Interaktion und Analysen von Arbeitsabläufen im Operationssaal, Videomaterial von verschiedenen Eingriffen am Institut für Neuroradiologie der Universitätsklinik Magdeburg, eigenen Beobachtungen, den Ergebnissen der Machbarkeitsstudie von Hatscher et al. [9] und Informationen von Mensch-Maschine-Interaktions-Experten am Lehrstuhl für computerassistierte Chirurgie an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg.

### 3.3.1 Klinische Anforderungen

Das Hauptkriterium, welches die Interaktion mit herkömmlichen Eingabegeräten erschwert bzw. unmöglich macht, ist die **Sterilität** die im Operationssaal stets gewährleistet sein muss. Der Bereich um den Operationstisch ist mit steriler Folie bedeckt, was die Benutzung von z. B. Maus und Tastatur erschwert. Aus diesem Grund werden Alternativen dafür gesucht. Momentan werden die Interaktionsaufgaben auf verschiedenste Weisen gelöst. Als direkte Eingabegeräte werden z. B. Joysticks oder Touchscreens unterhalb der sterilen Abdeckung genutzt. Ein Nachteil dieser Methoden ist, dass diese meist örtlich gebunden sind und sich so der Arzt zunächst an eine bestimmte Position begeben muss. Eine weitere Möglichkeit ist die Delegation an assistierendes Personal innerhalb oder außerhalb des Operationssaals. Die nötige Kommunikation stellt jedoch ein hohes Fehlinterpretationsrisiko dar, welches den Arbeitsschritt zeitlich verlängert. Wenn all diese Möglichkeiten erschöpft sind, hat der operierende Arzt noch die Möglichkeit, den sterilen Bereich zu verlassen, um außerhalb des sterilen Bereichs mit herkömmlichen Eingabegeräten die Navigation in den Daten durchzuführen [5].

Dies führt zu dem Rückschluss, dass ein System, welches diese Aufgaben übernehmen soll, mindestens genauso schnell wie die herkömmlichen Methoden sein muss. In dieser Arbeit werden jedoch zunächst die entwickelten Konzepte bezüglich ihres zeitlichen Aufwands für spezifische Aufgabentypen verglichen und analysiert (**Zeit**). Ein nicht zu vernachlässigender Fakt ist, dass neben dem operierenden Arzt oft weiteres Personal am OP-Tisch steht und so der Platz für Fußinteraktionen eingeschränkt ist (**Platz**). Ein weiterer Vorteil, der sich durch die Nutzung von Fußinteraktion ergibt ist, dass der operierende Arzt seine Hände nicht zuerst leeren muss, wie es sonst für die Interaktion mit Eingabegeräten oder Handgesten [29, 33] unter Umständen notwendig ist (**Handunabhängigkeit**).

Zusätzlich muss die **Standstabilität** des Arztes gewährleistet sein. Der Nutzer darf zu keinem Zeitpunkt Gleichgewichtsprobleme durch Ausführung der Fußgesten bekommen. Außerdem darf die Interaktion nicht zu ermüdend sein (**Anstrengung**).

Der abzudeckende Funktionsumfang resultiert aus den Arbeiten von Iannessi et al. [39] und Jacob et al. [40]. Hier wurden folgende Funktionen betrachtet:

- Schichtwechsel in tomografischen Datensätzen
- Rotation eines 3D-Planungsmodells

Wie Hatscher et al. [9] bereits zeigte, sind der Schichtwechsel und die Rotation von 3D-Planungsdaten per Fußinteraktion möglich. Problematisch wird es bei Funktionen wie Zoom, Abstandsmessungen, virtuellen Resektionen etc., bei denen es auf eine sehr genaue Zeigegeste ankommt. Es wurden bereits Untersuchungen durchgeführt, die zeigten, dass sich Fußinteraktion nicht gut für Zeigegesten eignet [17]. Aus diesem Grund müsste sich gesondert mit diesem Thema beschäftigt werden, ob eine Realisierung trotz der Schwierigkeiten mit Zeigegesten realisierbar ist. Dies stellt jedoch nicht Gegenstand dieser Arbeit dar. Der Fokus liegt zunächst auf der Betrachtung und Umsetzung von grundlegenden Funktionen auf engem Raum. Nachdem nun einige klinische Anforderungen definiert wurden, werden im Anschluss die technischen Anforderungen analysiert.

### 3.3.2 Technische Anforderungen

Die technischen Anforderungen beziehen sich eher auf Kriterien, welche die zu entwickelnden Konzepte erfüllen müssen. Die entwickelten Gesten sollten vom System robust erkannt werden können (**Robustheit**) und eine präzise Navigation (**Genauigkeit**) ermöglichen (siehe *Kapitel 2.2*). So wurde im Rahmen der in *Kapitel 3.2* vorgestellten Arbeit die Erkennung der Aktivierungsgeste bemängelt. Deshalb muss diese Geste erneut betrachtet und überprüft werden, ob eine bessere technische Umsetzung möglich ist. Die entwickelten Konzepte sollen dahingehend auf Unterschiede in ihrer Robustheit und Navigationsgenauigkeit untersucht werden. Die entwickelten Gesten sollten einfach zu erlernen sein (**Einfachheit**) und eine hohe **Nutzerzufriedenheit** erreichen. Nach einer kurzen Eingewöhnungsphase sollten die Nutzer schnell in der Lage sein, das System komplett eigenständig bedienen zu können. Gesten sollten einfach auszuführen und zu merken sein (siehe *Kapitel 2.2*). Dies sollte durch geeignetes **Feedback** in Bezug auf die Interaktion ermöglicht werden. Der Nutzer soll zu jedem Zeitpunkt verstehen, in welchem Zustand sich das System momentan befindet und welche Möglichkeiten zur Interaktion er zu diesem Zeitpunkt besitzt. Es müssen Icons entworfen werden, die den Nutzer beim Verständnis unterstützen [41].

### 3.3.3 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden Anforderungen für die zu entwickelnden Konzepte definiert und vorgestellt. Hierbei lag das Augenmerk zunächst auf dem klinischen Bereich. Darauf aufbauend wurden technische Anforderungen präsentiert. Diese werden im Folgenden noch einmal übersichtlich zusammengefasst.

*Tabelle 3.2: Klinische Anforderungen*

Anforderung	Beschreibung
<b>Sterilität</b>	Kein Kontakt zu nicht sterilen Objekten während des Eingriffs.
<b>Zeit</b>	Vergleich des zeitlichen Aufwands für definierte Aufgaben der einzelnen Konzepte.
<b>Platz</b>	Der benötigte Platz für die Fußinteraktion sollte so gering wie möglich sein.
<b>Handunabhängigkeit</b>	Der Arzt muss komplett ohne das Weglegen von operationsrelevanten Materialien mit den Daten interagieren können.
<b>Standstabilität</b>	Der Arzt muss während der gesamten Interaktion einen festen Stand besitzen und keine Gleichgewichtsschwierigkeiten bekommen.
<b>Anstrengung</b>	Die Interaktion muss auch über einen längeren Zeitraum ohne große Ermüdungserscheinungen durchführbar sein.
<b>Funktionsumfang</b>	Es müssen die Funktionen des Schichtwechsels innerhalb von tomografischen Datensätzen und der Rotation der 3D-Planungsmodelle ermöglicht werden.

*Tabelle 3.3: Technische Anforderungen*

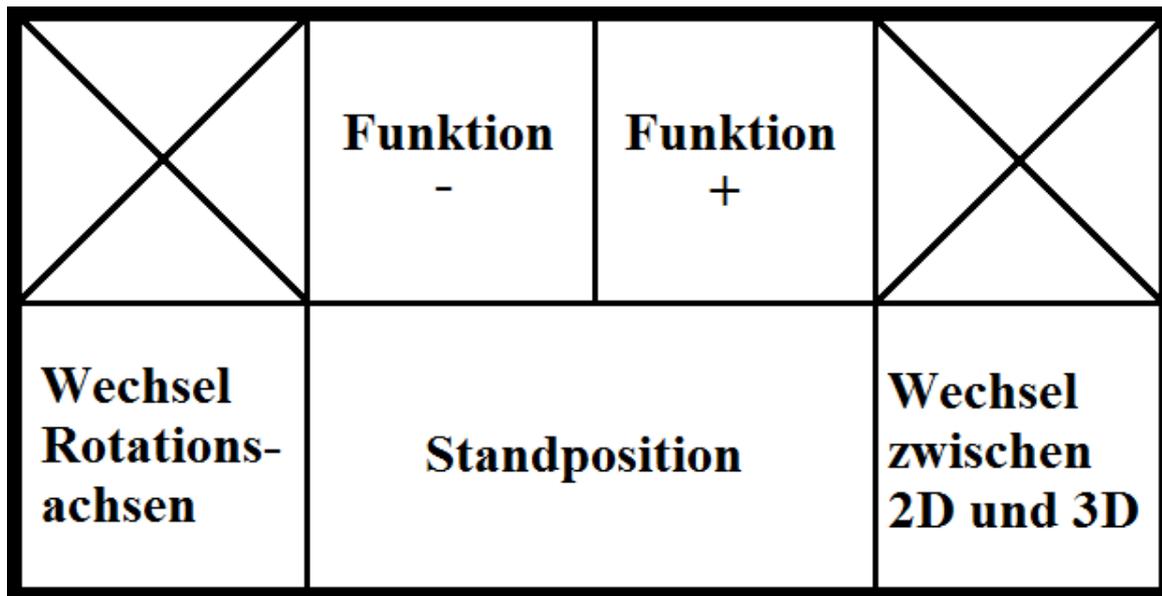
Anforderung	Beschreibung
<b>Robustheit</b>	Die Erkennung der Gesten muss robust sein.
<b>Genauigkeit</b>	Es muss eine präzise Navigation durch die Bilddaten gewährleistet werden.
<b>Einfachheit</b>	Die entwickelten Gesten müssen einfach auszuführen und zu merken sein.
<b>Nutzerzufriedenheit</b>	Die Nutzung des Systems muss angenehm für den Nutzer sein.
<b>Feedback</b>	Der aktuelle Systemstatus muss dem Nutzer stets durch geeignetes Feedback vermittelt werden.

## 3.4 Konzeptionierung der Gesten

Mit Hilfe der Vorarbeit von Hatscher et al. [9] und den definierten Anforderungen aus *Kapitel 3.3* sollen nun geeignete Konzepte zur Interaktion entworfen werden. In diesem Abschnitt liegt der Fokus zunächst darauf, geeignete Gesten zur Navigation zu entwickeln. Diese werden im späteren Verlauf der Arbeit evaluiert, um sie miteinander zu vergleichen. Die Navigationsaufgaben beschränken sich dabei auf die Rotation von 3D-Planungsdaten um zwei Achsen (nach oben, unten, rechts, links) und den Schichtwechsel (Erhöhung, Verringerung der aktuellen Schicht) in tomografischen Datensätzen. Hierbei werden auch Konzeptansätze beschrieben, die im Laufe der Konzeptionierungsphase wieder verworfen wurden. Aufbauend auf diese Interaktionskonzepte wird auf den Begriff der Aktivierungsgeste eingegangen und auch hier werden verschiedene Ansätze diskutiert. Jedoch muss angemerkt werden, dass sich noch nicht viele Arbeiten aus dem Bereich der Fußinteraktion mit dem Entwurf von speziellen Gestensets für spezifische Aufgaben beschäftigen.

### 3.4.1 Konzept 1: Steuerung über Buttons

An dieser Stelle soll das erste Konzept vorgestellt werden. Dieses kann als eine Weiterentwicklung des in *Kapitel 3.2* vorgestellten Konzepts angesehen werden, da in der Arbeit von Hatscher et al. [9] die erfolgreiche Anwendung von Buttons gezeigt wurde. Es wird im weiteren Verlauf der Arbeit als Konzept 1 bezeichnet. Dabei bleibt die Grundidee identisch. Durch die Ausführung von Schrittgesten (siehe *Tabelle 2.1*) werden Buttons betätigt, welche die entsprechende Funktion auslösen. Bei näherer Betrachtung der Buttonpositionen fällt auf, dass es dem Nutzer nur schwer möglich ist, alle Funktionen des Systems mit einem Fuß zu benutzen. Das liegt daran, dass sich zwei der verwendeten Buttons (Fokuswechsel zwischen tomografischen Datensatz und 3D-Planungsdaten / Wechsel zwischen den Rotationsachsen) auf gegenüberliegenden Seiten der Standposition des Nutzers befinden. Dem Nutzer ist es zwar möglich, auch den Button links der Standposition mit dem rechten Fuß zu aktivieren, allerdings nur durch Ausführen einer unnatürlichen Fußstellung (Beine über Kreuz). So sollte das Bestreben bei diesem Konzept darauf liegen, die Bedienung aller Funktionen mit Hilfe eines Fußes und natürlichen Bewegungen zu ermöglichen und so einen häufigen Standfußwechsel zu vermeiden. Dazu muss die Buttonposition überdacht werden. Des Weiteren existieren im Konzept von Hatscher et al. lediglich zwei Buttons, die zur Navigation in den Bilddaten verwendet werden können. Hierzu ist es nötig, zwischen 3 verschiedenen Modi zu wechseln, wodurch sich die Funktionen der Buttons ändern. Einen Überblick über den Aufbau des alten Konzepts bietet *Abbildung 3.3*.



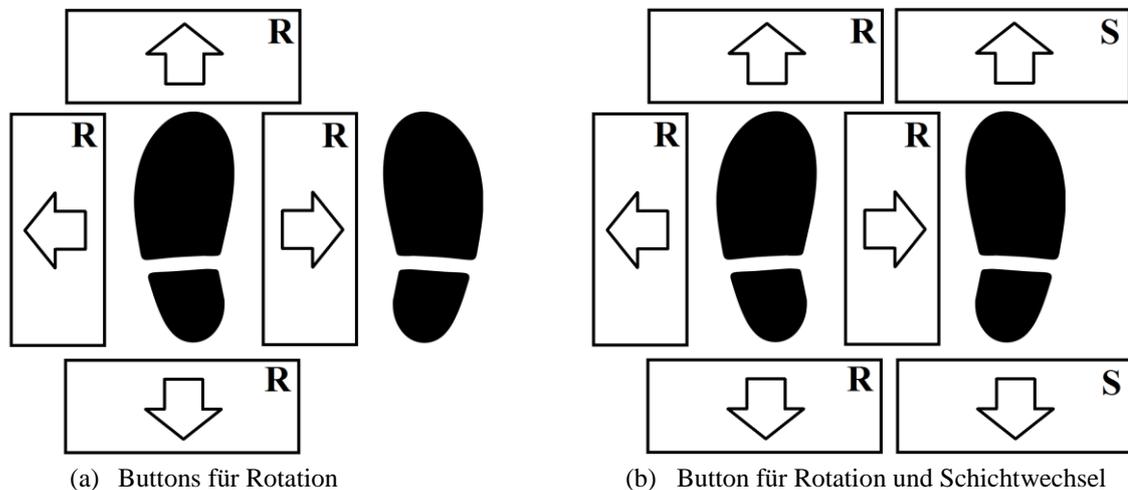
*Abbildung 3.3: Aufbau des Interaktionskonzepts von Hatscher et al. (Quelle: nach [9])*

Bei näherer Betrachtung der Positionen dieser Buttons lässt sich schnell erkennen, dass sie in keinem Zusammenhang mit der Navigationsrichtung stehen. Die Positionen sollten so gewählt sein, dass sie der Navigationsrichtung entspricht und so die Erwartungen des Nutzers unterstützt. An dieser Stelle spielen die Begriffe des Mappings [42] und der mentalen Modelle eine entscheidende Rolle. Mentale Modelle spiegeln die Erwartungen des Nutzers, basierend auf Vorerfahrungen, an ein System wider. Das Design des Konzepts soll daher so gut wie möglich den Erwartungen des Nutzers in Bezug auf die Interaktion entsprechen. Hierdurch soll es dem Nutzer einfacher gemacht werden, Abläufe zu verstehen und die Benutzung intuitiver zu gestalten [43, 44]. So liegt der Gedanke nahe, die Buttons so anzuordnen, dass sie die Navigationsrichtung durch ihre Position widerspiegeln.

Außerdem ist zu erkennen, dass die Bereiche hinter dem Nutzer komplett vernachlässigt wurden. Hier ergibt sich weitere Interaktionsfläche für die Positionierung von Buttons. Durch diese zusätzliche Interaktionsfläche kann betrachtet werden, ob es möglich ist, die in diesem Konzept nötigen Modus-Wechsel einzusparen. Durch die Rotation um zwei verschiedene Achsen liegt hierbei die Positionierung der Buttons, unter der Prämisse zur Steuerung mit nur einem Fuß, in entsprechender Rotationsrichtung nahe (siehe *Abbildung 3.4 (a)*). Bei der Rotation nach rechts bzw. links werden die Buttons jeweils rechts und links vom linken Fuß des Nutzers abgebildet. Die Buttons vor und hinter dem Nutzer repräsentieren äquivalent dazu die Rotation nach oben bzw. unten (siehe *Kapitel 2.2 - Konsistenz und Symmetrie*).

Nun muss zusätzlich die Schichtbildnavigation ermöglicht werden. Hierzu gibt es die Möglichkeit wieder einen Button zu verwenden, der den Modus wechselt, oder das Einführen einer speziellen Fußgeste, wie z. B. das Ausführen von Taps. Eine weitere Möglichkeit zur logischen Abbildung der Funktionen zur Unterstützung des mentalen

Modells des Nutzers ist es, die beiden Aufgabentypen, Rotation und Schichtwechsel, auf verschiedene Bereiche des Fußbodens auszulagern (siehe *Abbildung 3.4 (b)*). Die Buttons für die Rotationsschritte sind hierbei mit einem „R“ und die Buttons für die Schichtwechsel mit einem „S“ gekennzeichnet. Hierbei ist keinerlei Wechselbutton oder -geste nötig.

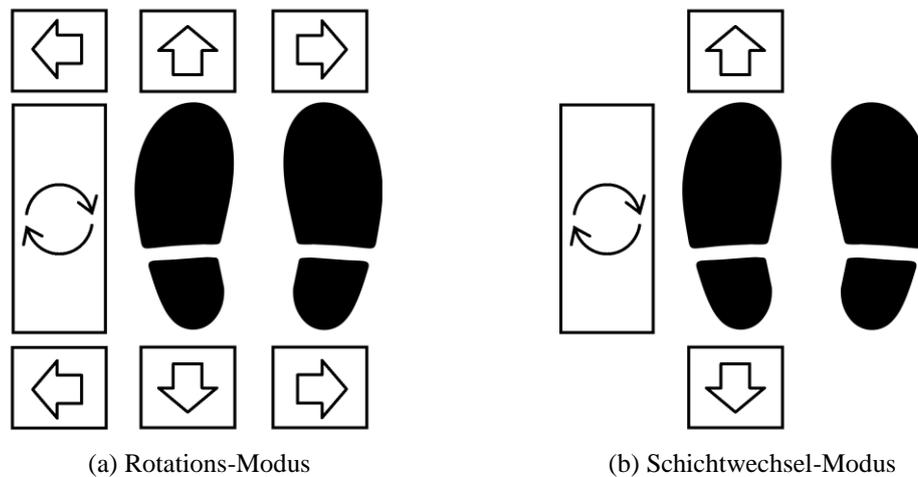


**Abbildung 3.4:** Buttonpositionsvarianten – (a) zur Steuerung mit einem Fuß – (b) zur Steuerung mit zwei Füßen – R = Buttons für Rotation – S = Buttons für Schichtwechsel

Bei der Trennung der Aufgabentypen auf verschiedene Fußbodenbereiche kann das mentale Modell des Nutzers zusätzlich unterstützt werden, indem die Bildbetrachter in der Benutzungsoberfläche äquivalent zur Position der zu betätigenden Buttons auf dem Fußboden platziert sind. Wie in *Abbildung 3.4 (b)* dargestellt, ist also die Rotation auf die linke Seite des Fußbodens beschränkt, während der Schichtwechsel auf der rechten Seite folgt. Hier wäre dann auch die Positionierung des 3D-Planungsdatensatzes auf der linken und dementsprechend des tomografischen Datensatzes auf der rechten Seite des Bildschirms sinnvoll. So entsteht ein Bezug zwischen der notwendigen Bewegungsrichtung mit dem Fuß zur Navigation und der Position des entsprechenden Bildbetrachters auf dem Bildschirm.

Nach ausführlicher Betrachtung der Umsetzbarkeit dieser Konzeptvarianten mit Hilfe des verwendeten taktilen Sensorfußbodens musste allerdings festgestellt werden, dass die Implementierung mit dieser Art des Konzepts nicht realisierbar ist. Das Problem besteht bei der Position des Buttons zwischen den beiden Füßen. Durch die derzeitige Größe und Form der Sensoren (siehe *Kapitel 3.1*) ist es technisch nicht möglich, diese Interaktion zu erkennen. Aus diesem Grund mussten Anpassungen am Konzept durchgeführt werden. Auf den exakten technischen Hintergrund wird in *Kapitel 4* eingegangen.

Um das mentale Modell des Nutzers dennoch weitestgehend zu unterstützen, wurde folgende Positionierung der Buttons gewählt:



**Abbildung 3.5:** Angepasstes Konzept mit Darstellung der Buttonpositionen

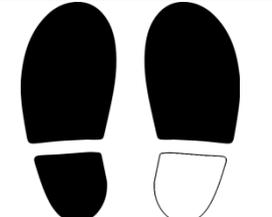
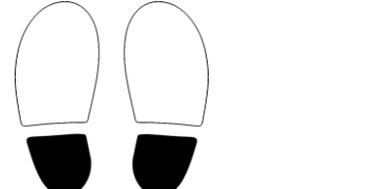
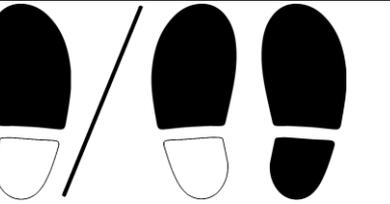
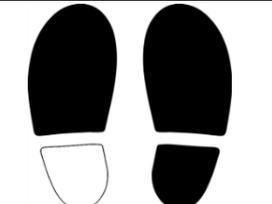
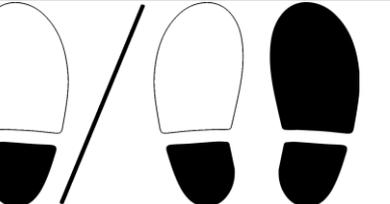
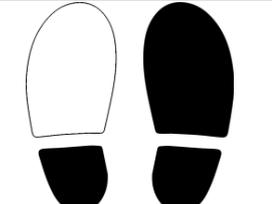
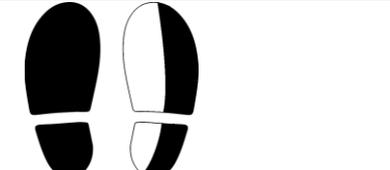
Dadurch bleibt die Analogie der Bewegung des Fußes in die entsprechende Richtung der Rotation bestehen. Die Buttons sind durch ihre Positionierung auch weiterhin symmetrisch angeordnet. Hierdurch muss jedoch erneut der Modus-Wechsel betrachtet werden, da der Platz für weitere Funktionen, unter der Prämisse der Interaktion mit nur einem Fuß, nicht ausreicht. Die Position liegt dabei links neben dem linken Fuß. So wird der Wechsel zwischen den zwei Bildbetrachtern ermöglicht. Nach dem Wechsel in den Schichtwechsel-Modus gibt es anschließend nur noch drei Buttons, zwei zum Wechsel der Schichten und einen zum Wechsel zurück in den Rotations-Modus (siehe *Abbildung 3.5 (b)*). Ein großer Nachteil dieses Konzepts ist, dass aufgrund der Positionierung der Buttons freie Fläche um den Nutzer herum notwendig ist. Dieser Umstand kann am Operationstisch nicht immer gewährleistet sein, da sich neben dem Arzt noch weiteres Personal befindet. Aus diesem Grund soll der Fokus in Konzept 2 darauf liegen, eine Methode zur Interaktion mit den medizinischen Daten auf geringerem Raum zu entwickeln.

### 3.4.2 Konzept 2: Steuerung durch Gesten auf kleinem Raum

Wie bereits in *Kapitel 2.3* vorgestellt, haben sich Sangsuriyachot und Sugimoto [20] mit der Entwicklung von Rotationsgesten beschäftigt. Dabei fällt auf, dass ihre entwickelten Gesten nur minimale Fußbewegungen benötigen. Die entwickelten Gestensets basieren zum einen auf Rotations- und bewegungsbasierten Gesten und zum anderen auf druckbasierten Gesten. Der rotations- und bewegungsbasierte Ansatz ist zum Teil mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Konzept 1 vergleichbar, da für die Rotation nach oben bzw. unten kleinere Schrittgesten mit dem Fuß nach vorn und hinten notwendig sind. Die Rotation nach links und rechts wird mit kleinen lateralen Drehungen des Fußes gelöst (siehe *Tabelle 2.1*). Die zwei entwickelten Gestensets von Sangsuriyachot und Sugimoto

wurden bereits innerhalb ihrer Studie evaluiert. Die druckbasierten Gesten schnitten in Bezug auf die Nutzerzufriedenheit wesentlich besser ab. Außerdem empfanden die Probanden diese Gesten als einfacher in der Ausführung, da sie sich weniger konzentrieren mussten. Auch die Ausführungsdauer für spezielle Rotationsaufgaben lag ca. 20% unter der Zeit der rotations- und bewegungsbasierten Gesten. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen, dass das druckbasierte Gestenset in allen Belangen besser abschnitt. Aus diesem Grund wurde diese Konzeptidee zunächst übernommen und erweitert. So hatten die Nutzer in der Arbeit die Auswahl, mit welchem Fuß sie die Dorsal- bzw. Plantarflexion des Knöchels zur Rotation ausführen. Hierbei ergaben sich nach ersten Überlegungen zwei Konzeptvarianten, die zusätzlich zur Rotation auch den Schichtwechsel ermöglichen (siehe *Tabelle 3.4*).

*Tabelle 3.4: Konzeptvarianten für druckbasierte Gesten*

Funktion	Konzeptvariante 1	Konzeptvariante 2
Schichtwechsel nach oben		
Schichtwechsel nach unten		
Rotation nach oben		
Rotation nach unten		
Rotation nach links		
Rotation nach rechts		

In der ersten Variante bleibt die freie Fußwahl für die Rotation nach oben und unten bestehen. Für den Wechsel der Schichten wird die Dorsal- bzw. Plantarflexion, bis auf den Fußballen bzw. der Ferse, mit beiden Füßen zeitgleich ausgeführt.

Anlehnend an die Idee zur Unterstützung des mentalen Modells aus Konzept 1, soll dieser Ansatz auch in der zweiten Konzeptvariante verfolgt werden. Dabei wurden die Trennung der Aufgabentypen auf verschiedene Fußbodenregionen (links und rechts) und der Zusammenhang zu den Bildbetrachtern diskutiert. Hier soll die Aufgabentrennung durch die Aufteilung auf zwei Füße des Nutzers stattfinden.

Bei näherer Betrachtung der zwei Konzeptvarianten fällt jedoch auf, dass die Dorsal- und Plantarflexion, bis auf den Fußballen bzw. der Ferse, mit beiden Füßen zeitgleich ein hohes Risiko in Bezug auf die Standstabilität darstellt [45]. Des Weiteren können diese Gesten auf längere Zeit gesehen sehr anstrengend werden. Aus diesen Gründen wurde sich für Konzeptvariante 2 entschieden.

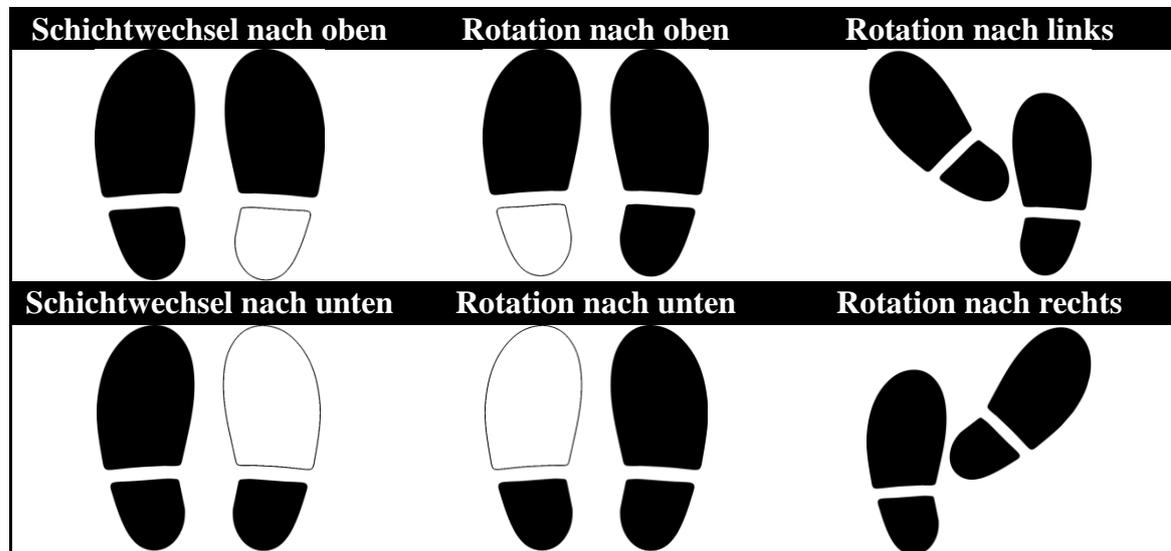
Allerdings mussten auch hier nachträglich Anpassungen durchgeführt werden, da nicht alle Gesten auf dem verwendeten Sensorfußboden technisch umsetzbar waren. Die Erkennung der Dorsal- und Plantarflexion des Knöchels stellt dabei kein Problem dar, jedoch ist die Gewichtsverlagerung bei der Inversion des Fußes zu gering (Rotation nach links/rechts), um sie mit dem Fußboden zu erkennen. Aus diesem Grund mussten für die seitlichen Rotationsgesten Alternativen gefunden werden. Da das Ziel des Konzepts weiterhin die Durchführung von Gesten auf kleinem Raum war, wurde überprüft, ob die seitlichen Rotationsgesten des rotations- und bewegungsbasierten Ansatzes aus der Arbeit von Sangsuriyachot und Sugimoto umsetzbar sind. Die Implementierung der Geste stellte zunächst kein Problem dar, allerdings konnte die Geste erst bei einer Rotation von mehr als ca.  $70^\circ$  robust erkannt werden. Aus der Arbeit von Roaas und Andersson [46] geht jedoch hervor, dass lediglich eine Rotation um ca.  $33,6^\circ$  für den Menschen natürlich ist. So musste auch an dieser Stelle ein Kompromiss gefunden werden. Dieser besteht darin, dass zusätzlich zur lateralen Rotation des Beins auch eine leichte Schrittbewegung nach vorne nötig ist, um eine robuste Erkennung in einem niedrigeren, natürlichen Gradbereich für die Rotation des Beins zu erreichen (siehe *Abbildung 3.6*). Wie auch bereits bei Konzept 1 sind alle Gesten symmetrisch ausgelegt. Da mit diesen Gesten bereits alle Funktionen des Systems ermöglicht werden, ist es hier nicht nötig, einen Wechsel zwischen den Bildbetrachtern durchzuführen. Dies könnte zu einer geringen Zeitersparnis in der Interaktion führen.



*Abbildung 3.6: Seitliche Rotationsgesten (nach links/rechts)*

Nach diesen Anpassungen ergibt sich nun folgendes Gestenset und wird im weiteren Verlauf als Konzept 2 bezeichnet:

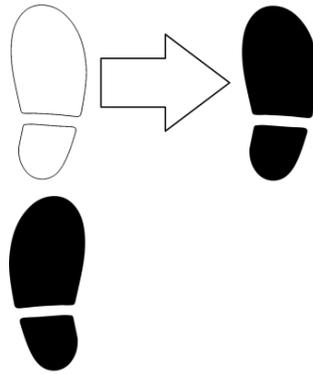
**Tabelle 3.5:** Gestenset zur Navigation auf kleinem Raum – schwarze Bereiche zeigen die den Boden berührende Fußfläche



### 3.4.3 Weitere Konzeptidee

Eine weitere Konzeptidee bestand darin, die Rotation über vom Smartphone bekannte Swipe-Gesten auszuführen. Die Idee entstammt der Arbeit von Hatscher et al. [9], in der einige Probanden während der Studie die Rotation zunächst über Swipe-Gesten auslösen wollten. In der Arbeit von Jalaliniya et al. [34] wurden diese Swipe-Gesten bereits auf dem auch in der vorliegenden Arbeit verwendeten kapazitiven Fußboden implementiert. Allerdings wurde in dieser Arbeit darauf aufmerksam gemacht, dass Probanden während der Studie von Gleichgewichtsschwierigkeiten beim Ausführen dieser Swipe-Gesten berichteten. Dies wurde dabei lediglich zur Aktivierung eines Systems untersucht und nicht zur Navigation in Datensätzen.

Bei näherer Betrachtung der Idee der Rotation von 3D-Objekten per Swipe-Gesten erscheint diese zunächst als sehr naheliegende Alternative. Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass die erreichbare Fläche mit den Füßen sehr beschränkt ist, wodurch keine großen Swipe-Bewegungen möglich sind. Nach der Umsetzung auf dem kapazitiven Fußboden und einigen Tests ergab sich schnell das Fazit, dass eine präzise Navigation per Swipe nicht ohne weiteres möglich ist. Die Geste zu erkennen ist simpel implementiert, allerdings können durch die relativ grobe Auflösung des Fußbodens keine kleinen Swipe-Bewegungen erkannt werden. Es wäre lediglich möglich, die Swipe-Geste zur Aktivierung der Funktion durchzuführen und die abschließende Position der Geste solange zu halten, wie die Funktion ausgeführt werden soll (siehe *Abbildung 3.7*).



*Abbildung 3.7: Swipe-Geste nach rechts für Rotation nach rechts*

Hierbei lässt sich schnell erkennen, dass dieses Prinzip genauso wie mit den Buttons aus Konzept 1 (siehe *Kapitel 3.4.1*) funktioniert. Der Schritt auf den Button entspricht also der Swipe-Geste und das anschließende Halten auf dem Button bzw. der Geste bestimmt die Dauer der Navigation. Durch diese Tatsache fehlt der Mehrwert dieses Konzepts, zumal dieser Ansatz ebenso wie das Buttonkonzept freie Fläche um den Nutzer herum voraussetzt. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz wieder verworfen. Eine Betrachtung mit einer anderen Hardware, mit der eine präzise Interaktion durch eine hochauflösende Erkennung der Geste möglich ist, kann jedoch lohnenswert und interessant für zukünftige Projekte sein.

Nachdem nun drei verschiedene Konzepte zur Interaktion mit den Datensätzen diskutiert wurden, wird im Folgenden der Begriff der Aktivierungsgeste näher erläutert.

#### **3.4.4 Aktivierungsgeste**

Im Bereich der Fußinteraktion ist die Betrachtung von Möglichkeiten zur Verhinderung von Fehleingaben sehr wichtig. Anders als bei der Interaktion mit den Händen via Eingabegerät wie z. B. Maus oder Joystick, befindet sich der Nutzer mit seinen Füßen stets im Interaktionsraum des Eingabegeräts. Aus diesem Grund wurde bereits im vorherigen System (siehe *Kapitel 3.2.1*) eine Aktivierungsgeste verwendet. Diese Aktivierungsgeste muss vom Nutzer zunächst ausgeführt werden, damit das System für die Navigation in den medizinischen Bilddaten freigeschaltet wird. Nachdem der Nutzer die gewünschte Navigation in den Bilddaten vorgenommen hat, kann er die Geste wiederholen und deaktiviert das System so wieder. Hierdurch können unbeabsichtigte Fehleingaben vermieden werden. Die Aktivierungsgeste soll einfach und schnell ausführbar sein. Wie bereits in *Kapitel 2.4* kurz erwähnt, wird das Prinzip einer Aktivierungsgeste auch in der Arbeit von Jalaliniya et al. [34] verwendet. Auch hier wird die Aktivierungsgeste per Fuß durchgeführt, allerdings erfolgt die Navigation mit den medizinischen Bilddaten per Handgesten.

Die in der Arbeit von Hatscher et al. verwendete Aktivierungsgeste ist ein „Triple-Tap“, d. h. eine Abfolge von drei hintereinander ausgeführten Tap-Gesten. Dies beschreibt eine

Geste, bei der der gesamte Fuß zunächst angehoben und anschließend wieder komplett auf den Boden abgesenkt wird. Allerdings war diese Geste einer der größten Kritikpunkte des Systems, da es Probleme bei der Erkennung von zu schnell hintereinander ausgeführten Taps gab. Da in dieser Arbeit jedoch ein kapazitiver Sensorfußboden verwendet wird, soll diese Geste erneut betrachtet werden.

Aus diesem Grund wird zunächst der Versuch unternommen, die Aktivierungsgeste von einem „Triple-Tap“ auf einen „Double-Tap“ zu reduzieren, da diese Geste bei Vorversuchen schon sehr robust erkannt werden konnte. Dies bringt durch das Wegfallen eines Taps zusätzlich eine geringe Zeitersparnis mit sich. Diese Geste kann wahlweise mit dem linken oder rechten Fuß ausgeführt werden. Da das Konzept 1 auf die Nutzung mit nur einem Fuß ausgelegt ist, bietet dies die Möglichkeit, dem Nutzer die Wahl zu lassen, mit welchem Fuß dieser interagieren möchte. Aktiviert der Nutzer das System also mit dem rechten Fuß, so werden die Buttons für diesen erreichbar positioniert. Selbiges gilt für den linken Fuß.

Im Zuge dieser Arbeit wurde auch über andere Varianten der Aktivierungsgeste nachgedacht. Bereits in *Kapitel 3.4.3* wurde das Thema der Swipe-Gesten diskutiert. Jalaliniya et al. [34] verwendet diese Geste als Aktivierungsgeste. Allerdings wurde von Gleichgewichtsproblemen bei den Probanden berichtet. Außerdem würde diese Geste wegen des erhöhten notwendigen Platzes gegen die Intention des Konzepts 2, der Navigation auf kleinem Raum, sprechen.

Eine weitere Variante besteht darin, sich mit einem oder beiden Füßen für eine gewisse Zeitspanne auf die Zehenspitzen zu stellen. Diese Geste wurde im Konzept 2 betrachtet. Hier würde es durch eine doppelte Belegung der Geste zu einem Konflikt mit dem Gestenset kommen und deshalb wird diese Geste nicht weiter betrachtet. Wie bereits in *Kapitel 3.4.2* beschrieben stellt die Plantarflexion auf die Zehenspitzen beider Füße zeitgleich ein Gleichgewichtsrisiko dar. Deshalb wurde auch dieser Ansatz verworfen. Gleiches gilt für das Anheben eines Fußes für eine gewisse Zeit.

Da das Ziel der Arbeit ist, die Navigation komplett mit den Füßen zu ermöglichen, wurden keine multimodalen Ansätze, wie z. B. die Verwendung von Spracherkennung, betrachtet.

Die verwendete Geste ist der „Double-Tap“. Es soll untersucht werden, ob dieser mit Hilfe der verwendeten Hardware robust erkannt werden kann. Hierzu ist es wichtig, dem Nutzer Feedback über den aktuellen Status zu vermitteln. Dies ist nicht nur in Bezug auf die Aktivierungsgeste notwendig. Aus diesem Grund widmet sich der nächste Abschnitt der Entwicklung von geeigneten Feedbackkonzepten für die in diesem Kapitel entwickelten Interaktionskonzepte.

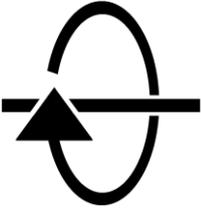
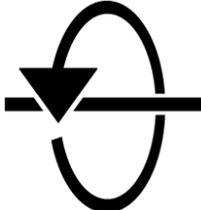
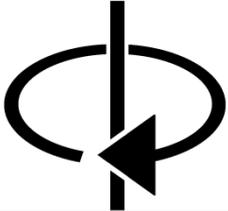
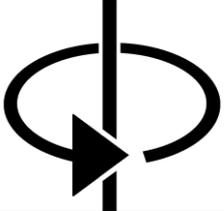
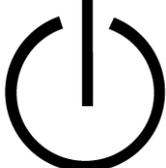
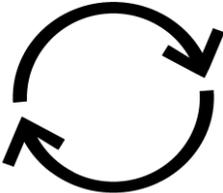
## 3.5 Konzeptionierung des Feedbacks

Der Nutzer muss das System zu jedem Zeitpunkt verstehen und wissen, welche Aktionen momentan ausführbar sind und welche Funktionen diese auslösen. Aus diesem Grund ist es wichtig, dem Nutzer stets den aktuellen Status des Systems zu vermitteln (siehe *Kapitel 2.1* – adäquates Feedback). Hierfür wird sowohl visuelles als auch taktiles Feedback verwendet. In der Arbeit von Hatscher et al. [9] wurde statt taktilem, akustisches Feedback genutzt. Wie bereits in *Kapitel 3.2.3* erwähnt, ist die Verwendung von akustischem Feedback kritisch anzusehen, da im Operationssaal bereits viele Systeme mit Tönen (Warntönen) arbeiten [37, 38]. Deshalb soll in dieser Arbeit der Versuch unternommen werden, statt akustischem, taktiles Feedback in Form von Vibrationen zu vermitteln.

### 3.5.1 Visuelles Feedback

Visuelles Feedback muss mehrere Aufgaben erfüllen. Es muss dem Nutzer zum einen vermitteln, welche Funktionen er durch welche Fußgesten ausführen kann. Ein Ziel des Systems besteht zum anderen darin, die Steuerung des gesamten Systems zu ermöglichen, ohne während der Arbeitsschritte auf den Boden schauen zu müssen. Dies bedeutet, dem Nutzer muss auf dem Bildschirm dargestellt werden, an welche Position er für eine bestimmte Geste treten muss oder welche Fußgeste auszuführen ist. Dieser Ansatz wurde bereits im vorherigen System (siehe *Kapitel 3.2.1*) verfolgt. Die Position der Buttons wird dem Nutzer hier relativ zu seiner Standposition, also als ein Abbild des Fußbodens, präsentiert. Dieses visuelle Feedback wurde von den Probanden als sehr intuitiv und leicht verständlich bewertet. Deshalb wird dieser Ansatz weiter verfolgt und weiterentwickelt. Die Probanden bemängelten in der Studie von Hatscher et al. [9] lediglich die Beschriftung der Buttons. Es ergeben sich nun zwei Möglichkeiten. Es könnte versucht werden, die Beschriftung intuitiver zu gestalten. Bei näherer Betrachtung des WIMP-Ansatzes (siehe *Kapitel 2.1*), liegt die Verwendung von Icons, sofern diese die Funktionen eindeutig widerspiegeln, nahe. Hierzu wurden Icons entworfen, die die verschiedenen Funktionen visualisieren. Diese sind in *Tabelle 3.6* dargestellt. Sie sollen den Nutzer dabei unterstützen, Funktionen und deren Bedienung schnell zu verstehen. Dabei müssen diese Icons unmissverständlich vom Nutzer gedeutet werden können [47]. Hierbei wurde zunächst bewusst auf die Verwendung von Farben verzichtet. Um ein schnelles Verstehen seitens der Nutzer zu erreichen, ist das Design der Icons möglichst einfach und kontrastreich gehalten.

Tabelle 3.6: Entworfenene Icons zur Darstellung der Funktionen

Funktion	Icon	Funktion	Icon
Schichtwechsel nach oben		Schichtwechsel nach unten	
Rotation nach oben		Rotation nach unten	
Rotation nach links		Rotation nach rechts	
„Double-Tap“-Geste		Ein-/Ausschalten	
Modus-Wechsel			

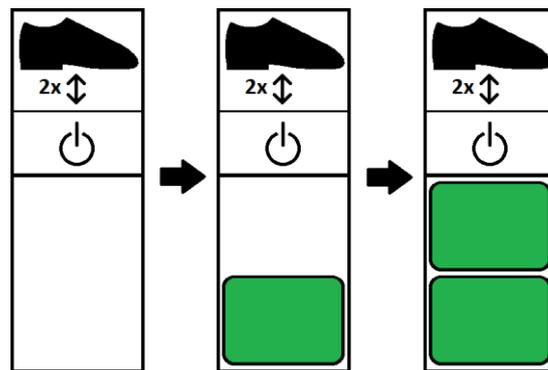
Im Folgenden sollen nun zunächst grobe Positionierungsansätze der einzelnen Komponenten der Benutzungsoberfläche diskutiert werden. Ausgangspunkt stellt hierbei wieder die Arbeit von Hatscher et al. dar. Da das in *Kapitel 3.4.1* entwickelte Interaktionskonzept aus dieser Vorarbeit resultierte, wird nachfolgend zunächst die Benutzungsoberfläche für Konzept 1 und anschließend für das Konzept 2 betrachtet.

### Konzept 1: Steuerung über Buttons

Die von Hatscher et al. [9] verwendete Benutzungsoberfläche lässt sich grob in zwei Abschnitte gliedern. In der oberen Hälfte befinden sich die zwei Bildbetrachter mit den relevanten medizinischen Bilddaten. Die restliche Bildschirmhälfte wird zur Präsentation von visuellem Feedback verwendet. Dabei ist als zentrales, bewährtes Element das Abbild des Fußbodens zu erwähnen, mit dessen Hilfe dem Nutzer die Position der Buttons vermittelt wird. Benachbart dazu, jeweils auf der linken und rechten Seite, sind

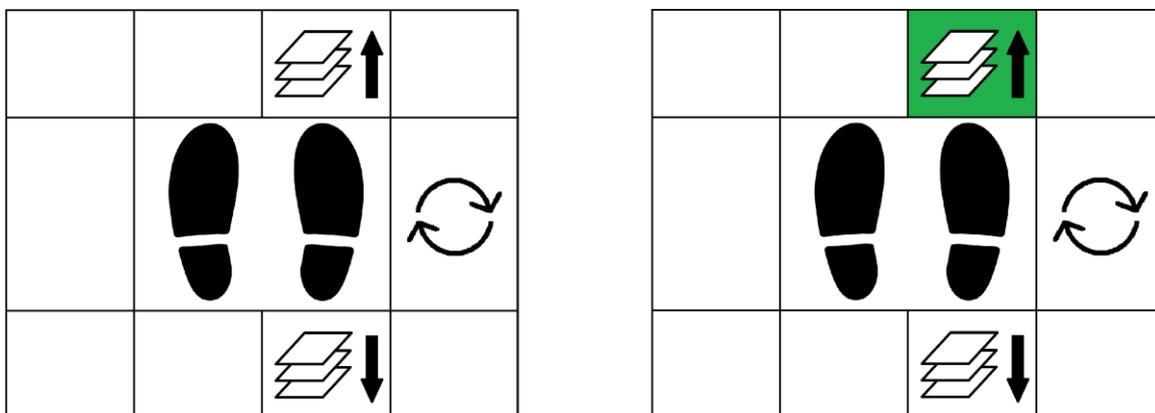
zwei Fenster positioniert, die die aktuell ausgeführte Funktion in Bezug auf den jeweilig darüber liegenden Bildbetrachter anzeigt. Zusätzlich wird in der Ecke eine Art Fortschrittsbalken zur Anzeige der aktuell erkannten Taps der Aktivierungsgeste darstellt.

Da sich dieser Grundaufbau bereits bewährt hat, wird dieser weiterhin verwendet und weiterentwickelt. Die Idee des Fortschrittsbalkens für die Aktivierungsgeste soll weiterhin verfolgt werden. Allerdings fehlte den Probanden eine Darstellung der benötigten Geste in der Benutzungsoberfläche. Hier kommt das entworfene Icon aus *Tabelle 3.6* zum Einsatz. Hierzu wird der Fortschrittsbalken mit dem Icon und der Funktion vereint. So ist die benötigte Geste und deren Fortschritt für den Benutzer stets sichtbar (siehe *Abbildung 3.8*).



*Abbildung 3.8: Widget für visuelles Feedback zur Aktivierung bzw. Deaktivierung des Systems*

Durch die entworfenen Icons, die dem Nutzer direkt die ausführbaren Funktionen vermitteln, werden die zwei großen Fenster links und rechts vom Abbild des Fußbodens eingespart. Ausgelöste Buttons sollen direkt über Einfärbung des Buttons dargestellt werden. Hierdurch ergibt sich zusätzlicher Platz in der Benutzungsoberfläche, was zu mehr Übersichtlichkeit führt. Das Abbild des Fußbodens mit Darstellung der Standposition des Nutzers und der Buttons und die eben erwähnte Einfärbung der Buttons bei Auslösung sind in *Abbildung 3.9* dargestellt. Den konzeptionellen Aufbau der gesamten Benutzungsoberfläche des Konzepts 1 zeigt *Abbildung 3.10*.



*Abbildung 3.9: Abbild des Fußbodens und Darstellung der Aktivierung des Buttons zum Wechsel der Schicht nach oben*

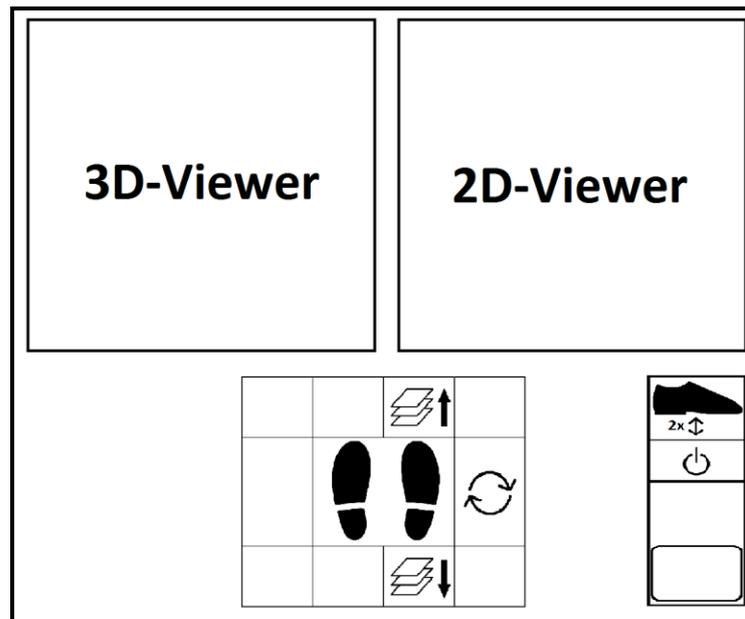


Abbildung 3.10: Konzeptioneller Aufbau der Benutzungsoberfläche von Konzept 1

### Konzept 2: Steuerung durch Gesten auf kleinem Raum

Nachdem nun die Benutzeroberfläche für Konzept 1 betrachtet wurde, folgt die Betrachtung des Konzepts 2. Der Unterschied dieser Konzepte liegt darin, dass die Interaktionen des Konzepts 2 nicht auf Buttons und somit lokalen Bereichen basieren, die vom Nutzer aktiviert werden müssen, sondern durch spezielle Fußstellungen erfolgen. Hier ergeben sich also andere Anforderungen an das Feedback. Dem Nutzer muss die Fußgeste und die entsprechende Funktion dargestellt werden. Da bereits Icons für die Funktion (siehe *Tabelle 3.6*) und die Gesten (siehe *Tabelle 3.5*) präsentiert wurden, liegt der Gedanke nahe, diese paarweise darzustellen. Da die räumliche Abbildung des Fußbodens dabei nicht notwendig ist, kann über eine Art Legende nachgedacht werden. Diese könnte im oberen Bildschirmbereich platzsparend positioniert werden (siehe *Abbildung 3.11*).

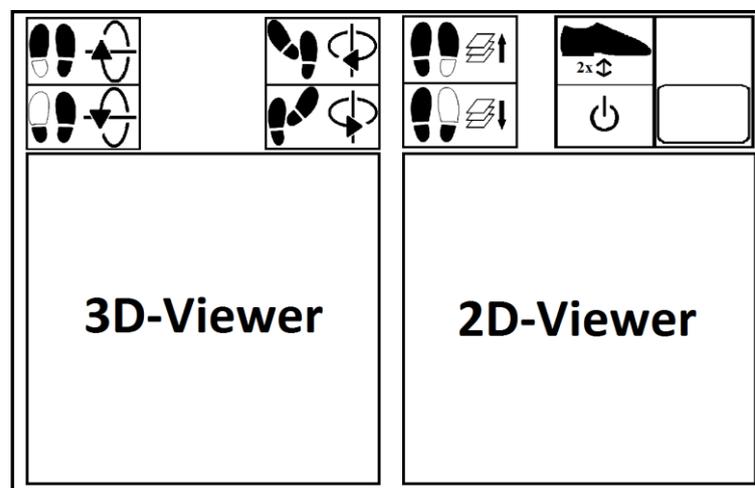
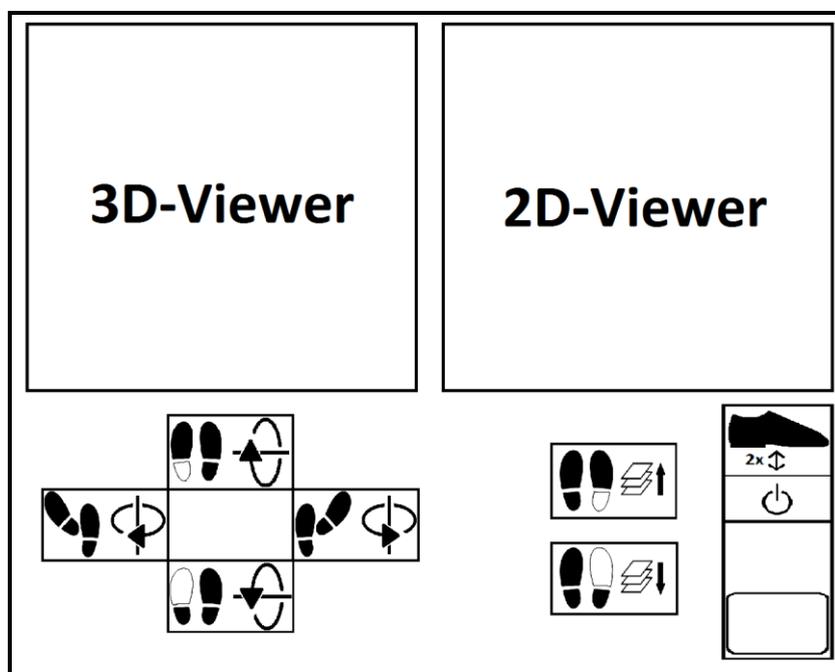


Abbildung 3.11: Benutzungsoberfläche für Konzept 2 mit Legende am oberen Bildschirmrand

Da in dieser Arbeit aber hauptsächlich die entwickelten Interaktionskonzepte verglichen werden sollen, wurden Überlegungen getätigt, wie die Benutzungsoberflächen der beiden Konzepte so vergleichbar wie möglich gestaltet werden können. Dabei sollte der grundlegende Aufbau identisch bleiben, das heißt die Bildbetrachter im oberen Bereich und das entwickelte visuelle Feedback in der unteren Hälfte. Zusätzlich sollte das Aktivierungsgesten-Widget die gleiche Position und Form annehmen. Da die Buttons in Konzept 1 entsprechend der Navigationsrichtung angeordnet sind, soll dies auch in Konzept 2 der Fall sein. Hierbei liegt die Metapher des Steuerkreuzes eines Gamepads nahe. Metaphern sollen dem Nutzer durch bereits Bekanntes die Nutzung von neuen Abläufen erleichtern [44]. So können die gebildeten Paare aus Geste und Funktion trotzdem noch als Legende gelten, aber durch ihre spezifische Position die Rotations- bzw. Schichtwechselrichtung dem Nutzer die intuitive Benutzung erleichtern. Zusätzlich werden, wie bereits in *Abbildung 3.11* dargestellt, die Funktion auf der entsprechend relevanten Seite positioniert, um direkt einen räumlichen Bezug zu schaffen.



*Abbildung 3.12:* konzeptuelle Benutzungsoberfläche für Konzept 2 mit Legende in der unteren Bildschirmhälfte

### 3.5.2 Taktiler Feedback

Wie bereits zu Beginn dieses Kapitels erwähnt, soll statt akustischem, taktiler Feedback, in Form von Vibration, verwendet werden. Dieses birgt den Vorteil, dass es im Gegensatz zu akustischem Feedback lediglich dem Nutzer selbst vermittelt wird. Vibrationsfeedback ist den meisten Menschen durch die Verwendung von Handy bzw. Smartphone vertraut. Dort werden Vibrationen verwendet, um zum Beispiel eintreffende Nachrichten geräuscharm zu vermitteln, Fehlermeldungen zu verdeutlichen oder erkannte Eingaben zu untermauern. Allerdings sollte die Verwendung von Vibrationsfeedback sparsam verwendet

werden, da es sonst schnell zu einer Reizüberflutung kommen kann und das Feedback den Nutzer stört oder sogar in der Benutzung des Systems verwirrt [48].

Die Schwierigkeit, die beim verwendeten taktilen Sensorfußboden besteht, ist die Tatsache, dass er sich wie ein herkömmlicher Fußboden anfühlt und so dem Nutzer keinen Rückschluss über die erfolgreiche Betätigung einer Aktion liefern kann. Anders ist dies bei Pedalen. Hier erhält der Nutzer direkt haptische Rückmeldung. Aus diesem Grund liegt der Gedanke nahe, dem Nutzer erfolgreich erkannte Interaktionen über Vibrationen zu vermitteln. Dies hat einen doppelten Effekt, da sowohl die erfolgreiche Erkennung durch Vibration verdeutlicht wird, als auch die nicht erfolgreiche Erkennung durch ausbleibendes Vibrationsfeedback. Allerdings muss hierbei beachtet werden, dass bei längerer, andauernder Ausführung einer Geste nicht dauerhaft Vibrationsfeedback ausgesendet wird. Dies könnte leicht als störend empfunden werden. Aus diesem Grund soll es lediglich bei Ersterkennung aktiviert werden.

Diese Art von Vibrationsfeedback bringt als Ergänzung zum visuellen Feedback noch den Vorteil mit sich, dass aus Versehen getätigte Eingaben dem Nutzer signalisiert werden und er darauf reagieren kann, um diese zu korrigieren.

Hennig und Sterzing [49] untersuchten in ihrer Arbeit 30 verschiedene Fußregionen auf ihre Vibrationssensitivität. Dabei zeigte sich, dass Vibrationen am besten an der Fußsohle wahrgenommen werden. Vibrationsfeedback sollte also im Optimalfall auch dort vermittelt werden. In der Arbeit von Rovers und van Essen [50] werden Vibrationsmuster an der Fußsohle untersucht. Es werden verschiedene Varianten von Mustern vermittelt und die Erkennung von Probanden betrachtet. Die Ergebnisse dieser Studie besagen, dass einfache Muster gut erkannt werden können, wohingegen die Unterscheidung von komplexeren Mustern den Probanden schwer fiel. Diese Arbeit betrachtet jedoch lediglich die Vibrationsvermittlung ohne Bewegungen der Füße. Im medizinischen Anwendungsfall tragen die Ärzte im Operationssaal meist Plastikschuhe, die nicht komplett fest am Fuß sitzen, sodass bei angehobenem Fuß die Sohle nicht immer direkten Kontakt zum Schuh besitzt und es so zu Schwierigkeiten in der Erkennung kommen könnte. Da diese Aspekte jedoch noch nicht untersucht wurden, wird dies in dieser Arbeit zunächst nicht näher betrachtet. Dies sollte im Rahmen weiterer Forschung näher untersucht werden. Dem Nutzer wird durch einen am Knöchel befestigten Vibrationsmotor das nötige taktile Feedback vermittelt. Dies soll durch eine prototypische Umsetzung einen ersten Eindruck für den Nutzen und die Praktikabilität von taktilem Feedback am Fuß bieten. Im folgenden *Kapitel 4* wird auf die Realisierung der in diesem Kapitel beschriebenen Konzepte eingegangen, damit diese im Anschluss evaluiert werden können.



## 4 Realisierung

Um die entwickelten Interaktions- und Feedbackkonzepte evaluieren zu können, müssen diese prototypisch implementiert werden. Hierzu wird die medizinische Prototyping-Plattform MeVisLab [51] verwendet. MeVisLab verfolgt einen modularen Entwicklungsansatz, d. h. es werden einzelne Module für bestimmte Aufgaben entwickelt und diese ergeben in einer Kombination anschließend eine Anwendung. Die Implementierung der Module erfolgte mit Hilfe der Entwicklungsumgebung Microsoft Visual Studio 2013 [52] in der Programmiersprache C++. Wie bereits in *Kapitel 3.5.2* beschrieben, soll dem Nutzer Vibrationsfeedback vermittelt werden. Dies geschieht per Smartphone am Knöchel des Nutzers. Hierzu wurde eine Android-Applikation mit Hilfe von Android Studio 2.2.1 [53] entwickelt. Durch diese Applikation ist es möglich, per Bluetooth eine Verbindung zwischen PC und Smartphone zu schaffen und über diese den Vibrationsmotor des Smartphones anzusteuern.

### 4.1 Umsetzung der Interaktionskonzepte

Im Folgenden wird der grobe Aufbau der Implementierung der Interaktionskonzepte vorgestellt. Diese gliedert sich in vier Bestandteile. Das Programm ist zyklisch aufgebaut und alle Schritte werden in einer festen Reihenfolge durchgeführt. Nachdem alle Schritte durchlaufen sind, beginnt ein neuer Zyklus, der die aktuellen Fußbodendaten verwendet. Der Aufbau ist in *Abbildung 4.1* dargestellt. Dabei werden in jedem Durchlauf zunächst die Daten des Fußbodens empfangen, verarbeitet und gespeichert. Mit Hilfe dieser Daten wird danach die Erkennung der Aktivierungsgeste überprüft und das System entsprechend aktiviert, deaktiviert oder im momentanen Zustand belassen. Anschließend werden die Gestenerkennung des eingestellten Konzepts vorgenommen und entsprechende Funktionen ausgeführt. Mittels der erkannten Gesten und den damit verbundenen Funktionen wird das entsprechende Feedback vermittelt und die Bilddaten angepasst. Die Standposition des Nutzers ist im implementierten Prototyp statisch. Durch die relativ grobe Auflösung des Fußbodens (siehe *Kapitel 3.1*) ist die genaue Position des Nutzers für die Bedienung des Konzepts 2 essentiell. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde sich dazu entschieden die Position für die Bedienung des Konzepts 1 ebenfalls statisch zu halten. Die genaue Standposition wird in *Kapitel 4.1.2* näher vorgestellt.

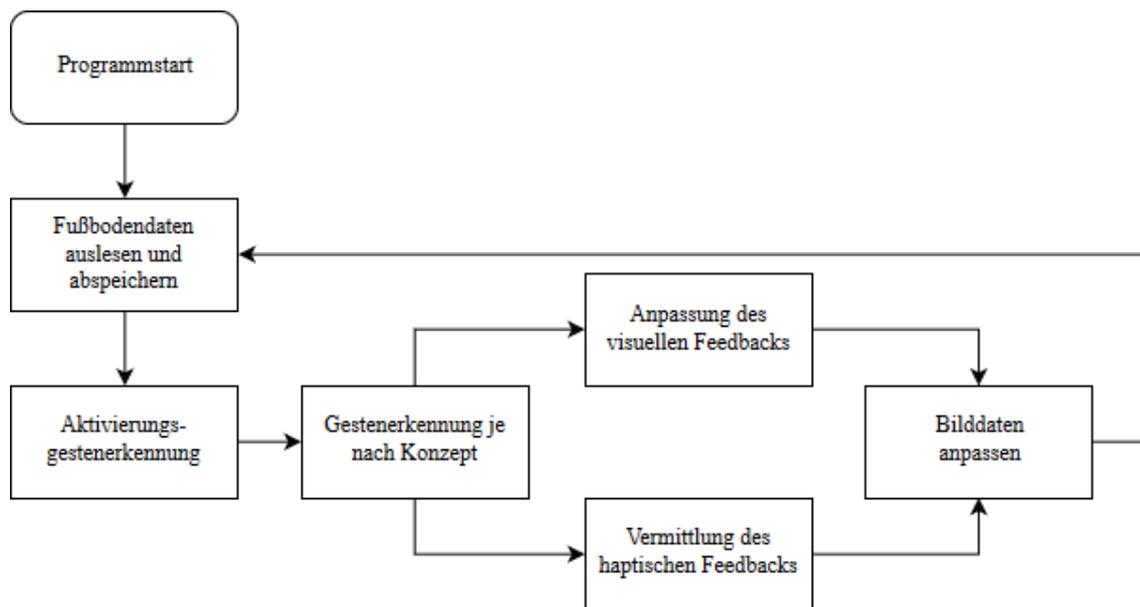


Abbildung 4.1: Ablaufdiagramm der Implementierung

#### 4.1.1 Erfassung der Fußbodendaten

Wie bereits in *Kapitel 3.1* beschrieben, senden die einzelnen Sensormodule des taktilen Sensorfußbodens eigenständig Datenpakete per Funk. Dabei handelt es sich jedoch nicht um einen konstanten Datenstrom. Die Module senden die Datenpakete lediglich, wenn sich der erfasste Kapazitätswert mindestens einer der zugehörigen Sensoren ändert. Diese Tatsache muss bei einer Implementierung zwingend beachtet werden, da beim Auslesen des COM-Ports (USB-Funkempfänger) „Timeouts“ benötigt werden. Werden diese nicht verwendet, gibt es, wenn der Nutzer still auf dem Fußboden steht und sich so die gemessenen Kapazitäten nicht ändern, Probleme bei der Datenerfassung. Dies führt dazu, dass die ausgeführte Anwendung pausiert (engl. „blocking“) und auf das nächste Datenpaket wartet. Eine weitere Möglichkeit stellt die Verwendung eines extra Threads für die Datenerfassung dar, allerdings ist die Implementierung dieser zusätzlichen Threads in MeVisLab sehr komplex. Aus diesem Grund wurde sich für die Verwendung von „Timeouts“ entschieden. Die Datenpakete bestehen aus 16 Bytes:

B1 B2 B3 B4	B5 B6 B7 B8	B9 B10 B11 B12 B13 B14 B15 B16
<i>Adresse</i>	<i>Bedeutung</i>	<i>Kapazitätswerte</i>

Die ersten vier Bytes enthalten die Adressinformationen. Dabei stellen die ersten zwei Bytes die Identifikationsnummer des gesamten Fußbodens und die Bytes drei und vier die Indizes des sendenden Sensormoduls dar. Die Bytes fünf bis acht des Datenpakets beinhalten Informationen zur Art des Datenpakets. Die letzten acht Bytes enthalten anschließend die Kapazitätswerte der acht Sensoren des entsprechenden Moduls. Die Reihenfolge der Werte der einzelnen Sensoren verläuft im Uhrzeigersinn innerhalb eines Moduls.

Die empfangenen Kapazitätswerte werden anschließend verarbeitet und gespeichert. Hierzu war es nötig, die gesendeten Kapazitätswerte des Fußbodens näher zu betrachten. Die Kapazitätsänderungen resultieren aus dem Ladungsaustausch mit einem leitfähigen Objekt. Dieses stellt im hiesigen Fall der menschliche Fuß dar. Die Höhe der Kapazitätsänderung hängt von mehreren Faktoren ab. Hier wären die Dicke des Fußbodenbelags, der die Sensormodule bedeckt, und zum anderen die Dicke und das Material der Sohle, der vom Nutzer getragenen Schuhe, zu nennen. Diese Einflüsse führen zu einer Reduzierung des Ladungsaustausches und dahin gehend zu einer geringeren messbaren Kapazitätsänderung. Um die Bedingungen für alle Probanden innerhalb der Nutzerstudien gleich zu halten, trugen alle Nutzer die gleiche Art Schuhe. Dazu befinden sich in *Kapitel 5* weitere Informationen. Ein zusätzlicher Aspekt, der die Kapazitätsänderung beeinflusst, ist die Größe des durch den Fuß des Nutzers bedeckten Sensorbereichs. Je mehr Fläche einer Sensorzelle Kontakt zum Fuß des Nutzers aufweist, desto mehr Ladungsaustausch kann stattfinden.

Hierbei gab es zunächst einige Schwierigkeiten, da die genutzten Schuhe eine zu dicke Sohle und ein wenig leitfähiges Material aufwiesen. Dies resultierte in einer sehr geringen Kapazitätsänderung, welche nur schwer auswertbar war. Daher wurde zunächst der Versuch unternommen, die Unterseite des Schuhs mit Hilfe von leitfähigem Material (Aluminiumfolie) zu präparieren, sodass ein höherer Ladungsaustausch ermöglicht werden konnte. Allerdings war die sichere Befestigung der Folie sehr schwierig, da diese bei Nutzung der Schuhe schnell einriss. Nach Rücksprache mit dem Fußbodenhersteller und Absprache der gewünschten Funktion konnte die Sensitivität der Sensoren erhöht werden, sodass die Nutzung der Aluminiumfolie nicht länger notwendig war.

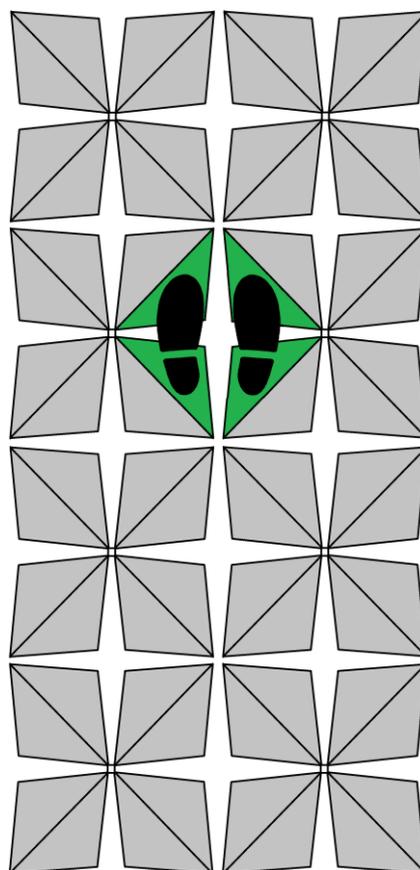
Zur Auswertung der Kapazitätswerte wird ein Schwellwertverfahren verwendet, d. h. ab einem bestimmten Kapazitätswert wird eine Sensorfläche als aktiv gekennzeichnet. Im Folgenden wird nun die Implementierung der Erkennung der Aktivierungsgeste näher betrachtet.

### **4.1.2 Erkennung der Aktivierungsgeste**

Nachdem die Fußbodendaten des jetzigen Zyklus erfasst und gespeichert wurden, kann mit der Interpretation der Daten fortgefahren werden. Der Ablauf hierfür kann *Abbildung 4.3* entnommen werden. Zunächst wird überprüft ob, ein Tap erkannt wurde. Dabei ist es notwendig, dass der Nutzer einen Fuß in die Luft hebt und anschließend wieder zur Ausgangsposition zurück auf den Boden absenkt. Die Erkennung eines Taps verläuft über mehrere Programmzyklen, in denen zunächst das Anheben und das anschließende Absenken erkannt werden müssen. Dies geschieht durch die Über- bzw. Unterschreitung des Kapazitäts-Schwellwerts. Wurde in diesem Zyklus kein Tap erkannt, so wird direkt mit der Auswertung der Interaktionsgesten fortgefahren (siehe *Kapitel 4.1.3* und *4.1.4*). Andernfalls wird überprüft, ob es sich beim erkannten Tap um den ersten Tap innerhalb einer definierten Zeitspanne handelt. Diese Zeitspanne beträgt eine Sekunde. Das heißt, ein Nutzer hat nach der Ausführung seines ersten Taps eine Sekunde Zeit, einen zweiten

Tap auszuführen, andernfalls wird der Tapzähler zurückgesetzt. Hierzu werden die Zeitstempel der Registrierung des ersten Taps mit der aktuellen Zeit verglichen. Dabei wird unterschieden, ob die Taps mit verschiedenen Füßen ausgeführt wurden. Für jeden Fuß gibt es einen separaten Tapzähler, welcher zurückgesetzt wird, sobald mit dem anderen Fuß ein Tap registriert wurde. Dies hat den Hintergrund, dass eine Aktivierung oder Deaktivierung verhindert wird, wenn der Nutzer seine Standposition leicht neu ausrichtet oder zur Entspannung der Füße beide Füße innerhalb eines kurzen Zeitraums vom Boden hebt und wieder absenkt. Diese Unterscheidung der Zählvariablen wurde aus Übersichtsgründen im Ablaufdiagramm nicht dargestellt.

Wie bereits erwähnt, wurde sich aus Vergleichbarkeitsgründen für eine statische Position des Nutzers entschieden. Diese Standposition wurde anhand der Anforderungen der Konzepte aus *Kapitel 3* gewählt. In Konzept 2 ist eine Unterscheidung von Dorsal- und Plantarflexion des Fußes notwendig. Daher wurde die Standposition so angepasst, dass diese Gesten erkennbar sind. Hierbei wurde eine Position auf dem Fußboden gewählt, bei der sich jeweils unter dem vorderen und hinteren Teil der Füße eine separate Sensorzelle befindet. Auf die genaue Umsetzung dieser Erkennung wird in *Kapitel 4.1.4* eingegangen. Die verwendete Standposition und die damit verbundenen Sensorzellen sind in *Abbildung 4.2* dargestellt. Nachdem die Sensordaten des aktuellen Zyklus gespeichert und die Erkennung der Aktivierungsgeste durchlaufen wurden, kann mit der Erkennung der Gesten der Interaktionskonzepte fortgefahren werden.



**Abbildung 4.2:** Darstellung der gewählten statischen Standposition des Nutzers

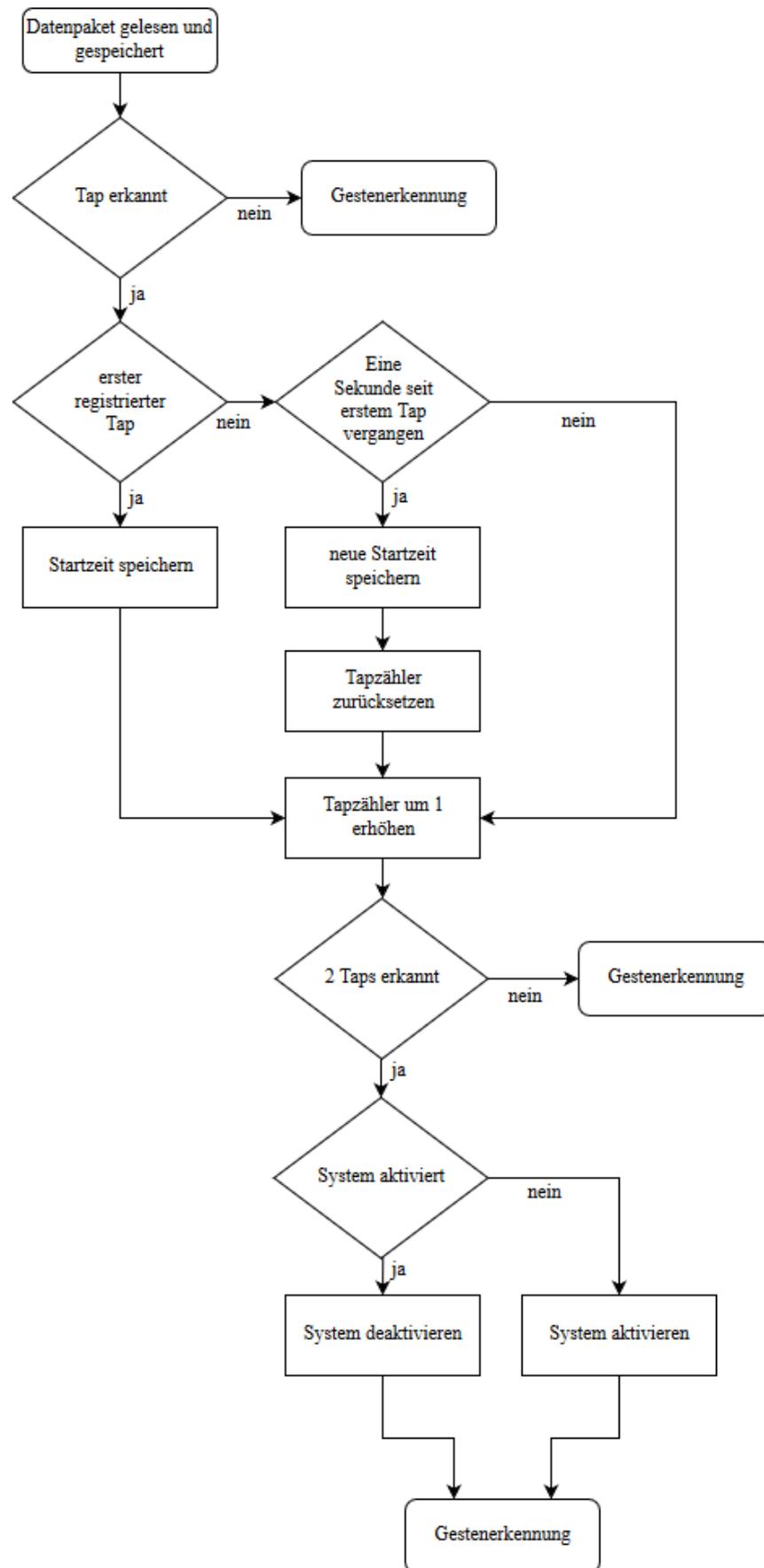
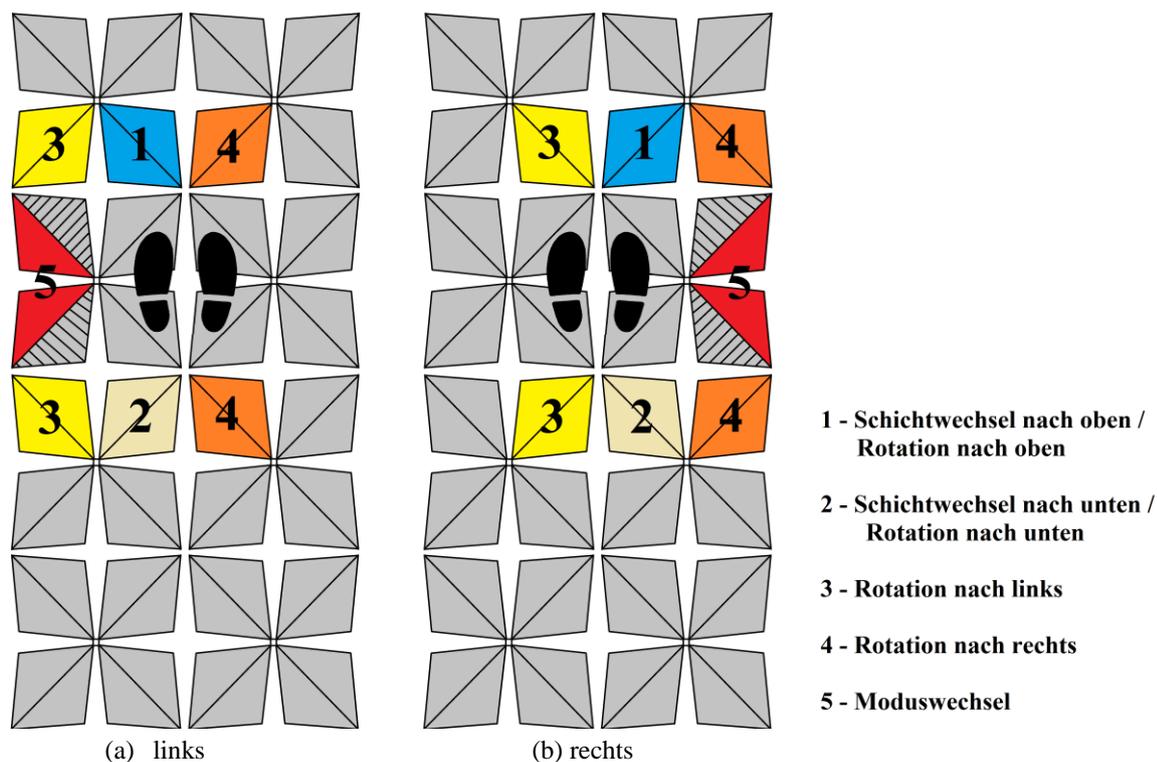


Abbildung 4.3: Ablaufdiagramm zur Erkennung der Aktivierungsgeste

### 4.1.3 Konzept 1: Steuerung über „Buttons“

Je nach zuvor definiertem Konzept kann das System mit den entsprechenden Interaktionsgesten gesteuert werden. Wie in *Kapitel 3.4.1* beschrieben, basiert das Konzept 1 auf der Navigation über Buttons. Hierzu werden Regionen auf dem Fußboden definiert, auf die der Nutzer treten muss, um entsprechende Funktionen auszulösen. Die Regionen für die Aktivierung mit dem linken oder rechten Fuß sind in *Abbildung 4.4* dargestellt.



**Abbildung 4.4:** Darstellung der zugeordneten Sensorzellen für die Systemfunktionen des Konzepts 1 – System mit linkem (a) und rechtem (b) Fuß aktiviert

Die Buttons bestehen jeweils aus zwei Sensorzellen. Bei den Funktionen 1 bis 4 entspricht die Größe der Buttons ca. 24x24cm. Auffällig ist die Auswahl der Sensorzellen für Funktion 5, den Moduswechsel. Da sich dieser Button links bzw. rechts der Standposition des Nutzers befindet, stehen eigentlich bis zu vier Sensorzellen für den Button zur Verfügung. Diese wurden zunächst auch komplett verwendet. Während der qualitativen Vorstudie (siehe *Kapitel 5.1*) gab es bei den Probanden häufig Fehlauflösungen des Moduswechsels bei der Benutzung der diagonal liegenden Funktionen (Funktion 3 bei Bedienung mit links und Funktion 4 bei Bedienung mit rechts). Zur Auslösung dieser Buttons sind durch ihre große Entfernung von der Standposition des Nutzers recht große Schrittgesten notwendig. Gerade bei kleineren Probanden erwies sich dies als Fehlerquelle, da diese kleinere Schritte ausführten und so die Zellen des Moduswechsels und der diagonal liegenden Funktionen gleichzeitig auslösten. Aus diesem Grund wurden die zwei weiter innen liegenden Sensorzellen

ausgespart und ohne Funktion belassen. Diese Zellen sind in *Abbildung 4.4* schraffiert dargestellt.

Befindet sich das System nicht im aktiven Zustand, so kann direkt mit der Auswertung des nächsten Datenpakets fortgefahren werden. Ist das System jedoch aktiviert, so muss überprüft werden, ob Buttons in diesem Zyklus ausgelöst wurden. Dazu wird zunächst kontrolliert, in welchem Modus sich das System momentan befindet und ob aktuell mit den 2D- oder 3D-Bilddaten interagiert werden kann. Bevor überprüft wird, ob in diesem Zyklus eine Interaktion stattgefunden hat, wird zunächst verifiziert, wie viel Zeit seit der letzten Interaktion vergangen ist. Dies hat den Hintergrund, dass die Navigationsschritte durch die Daten in gewissen Abständen geschehen müssen, da sonst eine präzise Navigation nicht gewährleistet werden kann. Der Standardwert der Interaktion liegt hierbei bei 0,5 Sekunden. Das heißt, dass jede halbe Sekunde ein Navigationsschritt ausgeführt werden kann. Sei es durch schnelle Tapgesten auf den Buttons oder durch Halten einer Schrittgeste. Das bedeutet, dass wenn ein Nutzer mit seinem Fuß für 1,5 Sekunden auf einem Button verweilt, die Funktion vier Mal ausgeführt wird (bei 0,0/0,5/1,0/1,5 Sekunden). Sollte diese Geste jedoch länger als fünf Zeitschritte, also 2 Sekunden, gehalten werden, so beschleunigt sich die Navigation und alle 0,2 Sekunden kann ein Navigationsschritt ausgeführt werden. Dies soll eine schnellere Navigation durch die Daten ermöglichen, wenn z. B. eine große Distanz im Schichtdatensatz zurückgelegt werden muss. Bei diesen Zeitwerten handelt es sich um Werte, die sich während der Implementierungsphase bewährt haben, jedoch in Folgearbeiten näher untersucht werden müssten. Der Fokus dieser Arbeit liegt zunächst auf der Evaluierung der Interaktionskonzepte und dem verwendeten Feedback.

Wurde das Zeitintervall überschritten, kann überprüft werden, ob Buttons ausgelöst wurden und gegebenenfalls die entsprechende Funktion ausgeführt werden. Zum Ausführen der Funktion gehört zusätzlich die Präsentation des visuellen Feedbacks und der Vibration des angebundenen Smartphones am Knöchel des Nutzers. Nähere Informationen zur Umsetzung des Feedbacks sind in *Kapitel 4.2.1* zu finden. Sollte in diesem Zyklus keine Interaktionsgeste erkannt worden sein, muss der Zähler für aufeinanderfolgende Gesten zurückgesetzt werden und es kann mit dem nächsten Zyklus begonnen werden. Der grobe Ablauf dieser Gestenerkennung ist in *Abbildung 4.5* dargestellt.

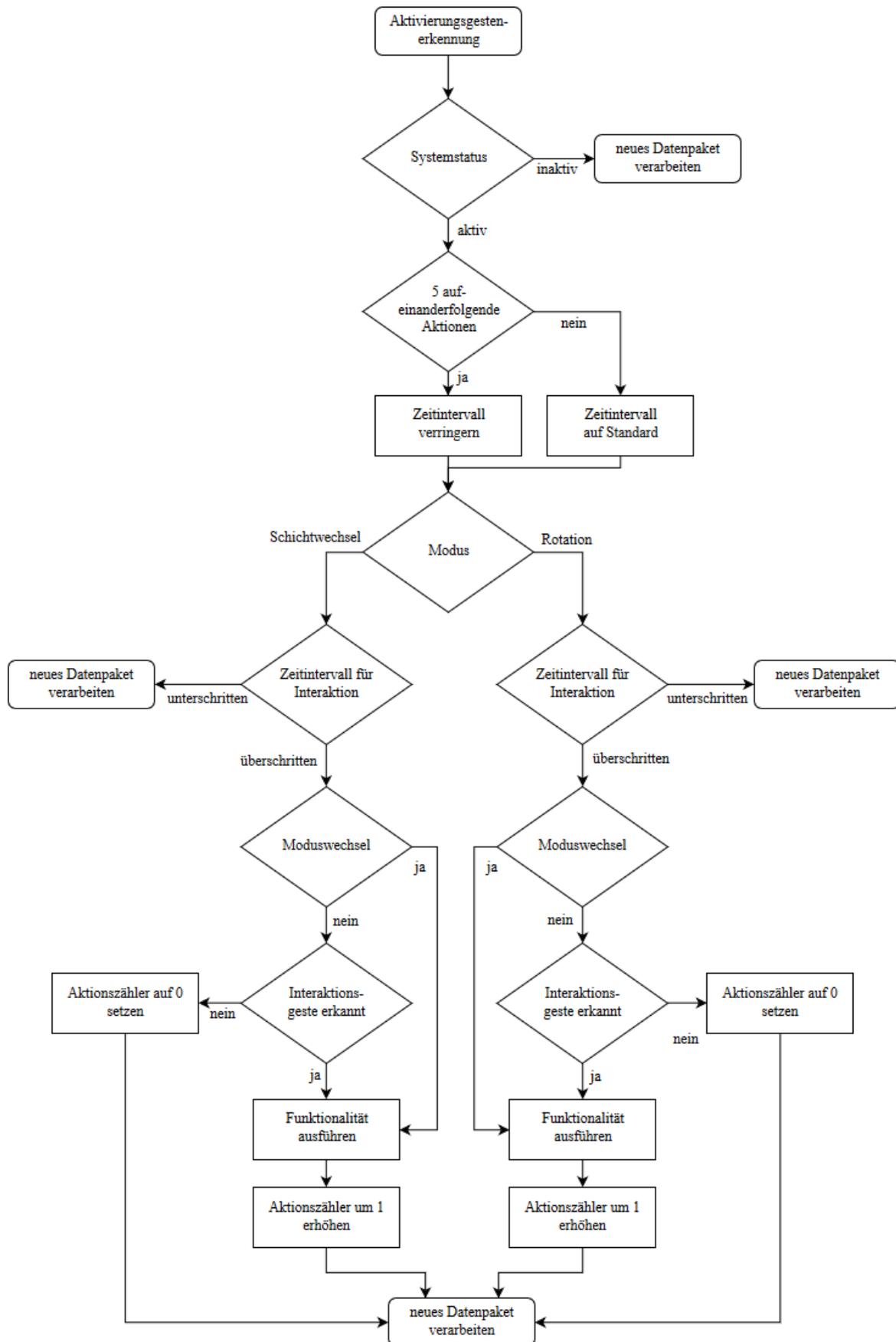
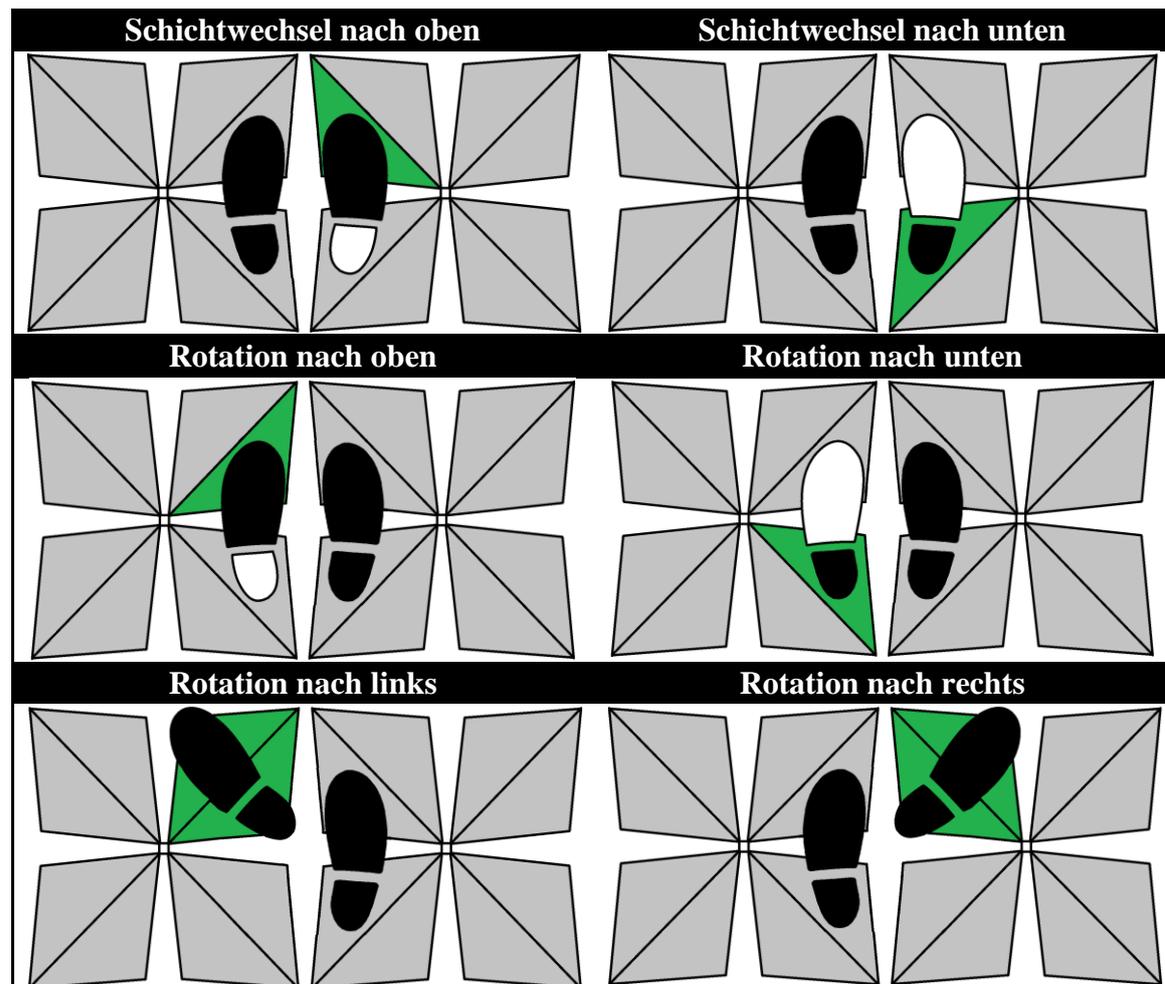


Abbildung 4.5: Ablaufdiagramm zur Erkennung der Gesten des Interaktionskonzepts 1

#### 4.1.4 Konzept 2: Steuerung durch Gesten auf kleinem Raum

Im Gegensatz zum Konzept 1, das auf Buttons basiert, ist es bei Konzept 2 nötig, kleine Fußbewegungen, wie das Heben der Ferse, zu erkennen. Durch die Auflösung des Fußbodens ist hierfür eine feste Position erforderlich (siehe Standposition in *Kapitel 4.1.2*). Die Sensorzellen, die zur Erfassung der einzelnen Gesten verwendet werden, sind in *Tabelle 4.1* dargestellt.

*Tabelle 4.1: Darstellung der zugeordneten Sensorzellen für die Systemfunktionen des Konzepts 2*



Der grundlegende Ablauf bei der Erkennung der Gesten ist identisch mit dem des Konzepts 1. Es wird zunächst der Systemstatus überprüft, ob momentan überhaupt Gesten erkannt werden sollen. Einer der Vorteile des Konzepts 2 ist, dass kein Moduswechsel zwischen den beiden Bildbetrachtern notwendig ist. Zu jedem Zeitpunkt kann mit beiden Bildern interagiert werden. Es werden die identischen Zeitintervalle verwendet, welche auch zwischen aufeinanderfolgenden Navigationsschritten in Konzept 1 genutzt werden.

Der Hauptunterschied zwischen den Implementierungen der beiden Konzepte entstand im Anschluss an die Vorstudie. Dabei wurde von den Probanden festgestellt, dass es bei der Benutzung von Konzept 2 häufig zu unbeabsichtigten Eingaben kommt. Zu diesem Zeitpunkt war es wie in Konzept 1 möglich, ohne zwischendurch den Fuß zurück in die

Ausgangsposition zu bewegen, aufeinanderfolgende verschiedene Gesten auszuführen. Durch die minimalen Bewegungen ist es bei der Erholungsphase der Dorsal- und Plantarflexion normal, den gesamten Fuß wieder auf den Boden abzusenken und so die Ausgangsposition einzunehmen. Bei der lateralen Drehung, zur Rotation nach links oder rechts, besteht jedoch die Gefahr, dass beim Zurücksetzen des Fußes versehentlich zunächst nur eine der zwei Sensorzellen der Basis für den entsprechenden Fuß aktiviert wird, da der Fuß in der Regel abgerollt wird und nicht alle Bereiche des Fußes zum identischen Zeitpunkt den Fußboden berühren. Hierzu wurde eine Sicherheitsvorkehrung getroffen. Nach der Ausführung der lateralen Drehung ist es zunächst nötig, den Fuß wieder auf die Basis zurückzusetzen, bevor eine andere Funktion ausgelöst werden kann.

Die Sensorzellen in der Basis, die für die Erkennung der Dorsal- und Plantarflexion zuständig sind, reagieren sehr sensibel auf Gewichtsverlagerungen. Es kann passieren, dass Teile des Fußes für einen kurzen Moment angehoben und anschließend wieder abgesenkt werden und das System diese Bewegungen als Geste interpretiert und die entsprechende Funktion ausführt. Um das unbeabsichtigte Auslösen von Funktion zu minimieren wurde eine Zeit von 0,5 Sekunden definiert, die eine Geste zunächst gehalten werden muss, bevor das System auf diese reagiert. Ähnlich zur definierten Zeit zwischen Navigationsschritten handelt es sich hierbei um einen Erfahrungswert aus der Implementierungsphase. Dabei ist es wichtig ein Gleichgewicht zwischen der Verminderung von Fehlauflösungen und einem nicht zu hohem Zeitraum zur Erkennung von Gesten zu schaffen, da dem Nutzer sonst das Gefühl der direkten Interaktion genommen wird. Dieser Sachverhalt sollte in späteren Arbeiten näher untersucht werden.

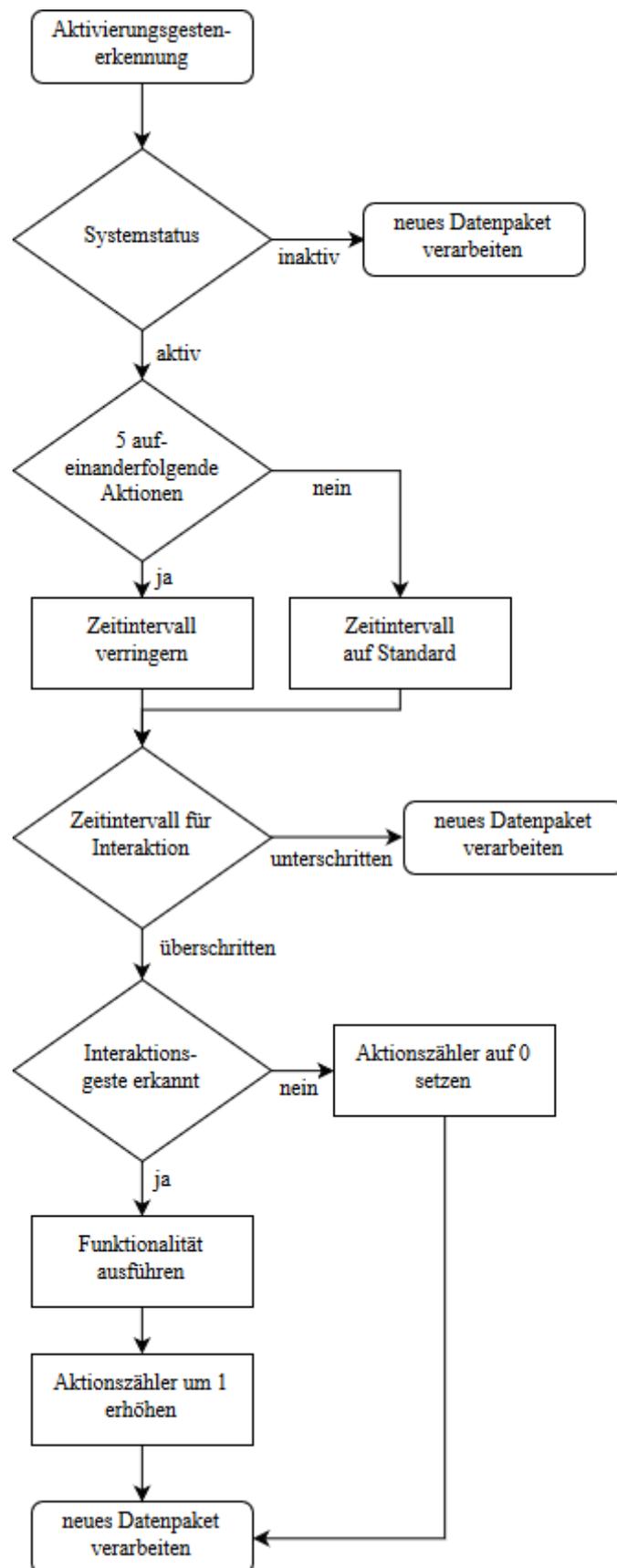


Abbildung 4.6: Ablaufdiagramm zur Erkennung der Gesten des Interaktionskonzepts 2

## 4.2 Umsetzung der Feedbackkonzepte

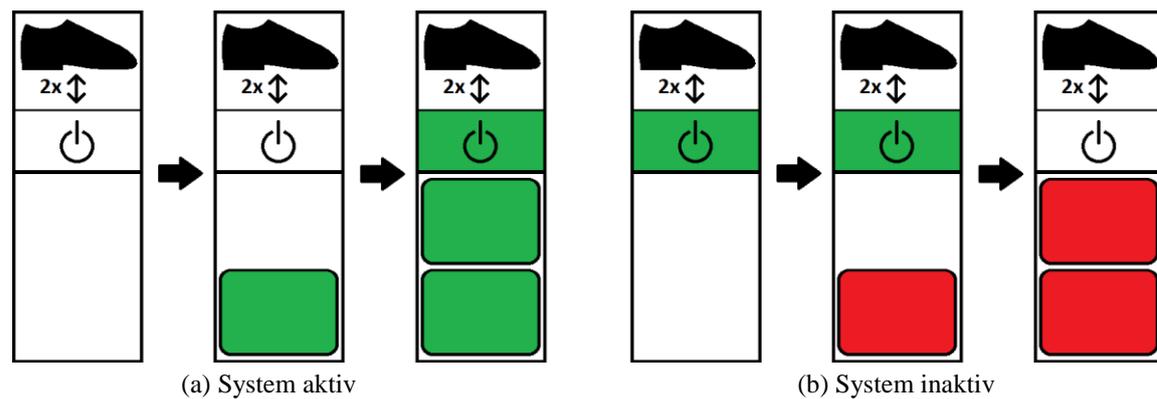
Nachdem die Realisierung der Interaktionskonzepte vorgestellt wurde, soll im Folgenden auf die Umsetzung der Feedbackkonzepte eingegangen werden. Es werden die finalen Widgets der Aktivierungsgeste und der zwei Interaktionskonzepte sowie die daraus resultierenden Benutzungsoberflächen präsentiert. Hierbei werden die Änderungen, welche aus den Ergebnissen der durchgeführten qualitativen Vorstudie (siehe *Kapitel 5.1*) resultieren, vorgestellt. Dadurch werden die finalen Benutzungsoberflächen, welche in der quantitativen Hauptstudie (siehe *Kapitel 5.2*) Verwendung fanden, aufgezeigt.

### 4.2.1 Aktivierungsgeste

In *Kapitel 3.5.1* wurde bereits auf das Layout des Widgets zur Vermittlung des Feedbacks bezüglich des aktuellen Status der Aktivierungsgeste eingegangen. Dabei findet eine Art Fortschrittsbalken, welcher die erkannten Taps zählt, Verwendung. Zusätzlich wird die Darstellung des Widgets durch die Darstellung zweier Icons unterstützt. Diese Icons symbolisieren zum einen die auszuführende Geste und zum anderen den Verwendungszweck dieses Widgets, das Ein- bzw. Ausschalten des Systems. Das in der Vorstudie verwendete Widget ist bereits in *Abbildung 3.8* dargestellt.

Dieses Widget wurde von den Probanden der Vorstudie bereits sehr gut verstanden. Hierbei wurden jedoch zwei Optimierungsvorschläge angebracht. Im Widget sollte ersichtlich sein, ob sich das System im aktiven oder inaktiven Zustand befindet. Dies wurde durch die Einfärbung des Hintergrunds mit grüner Farbe, wenn aktiv, realisiert. In der ersten Variante des Widgets wurden lediglich grün eingefärbte abgerundete Rechtecke zur Zählung der erkannten Taps verwendet. Hierbei kam die Anmerkung eines Experten im Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion der an der Vorstudie teilnahm, dass das Verständnis des Nutzers durch die Verwendung von z. B. roter Farbe bei der Zählung der Taps die zur Deaktivierung des Systems führen, verbessert werden kann. Das finale Widget ist in *Abbildung 4.7* dargestellt.

Zusätzlich zum visuellen Feedback soll bei der Aktivierung bzw. Deaktivierung des Systems haptisches Feedback in Form von Vibration vermittelt werden. Hierzu wird das Smartphone am Knöchel des Nutzers per Bluetooth angesteuert und es werden zwei kurze Vibrationsimpulse ausgesendet.



**Abbildung 4.7:** Finales Widget für visuelles Feedback zur Aktivierung bzw. Deaktivierung des Systems

### 4.2.2 Konzept 1: Steuerung über „Buttons“

Im Konzept 1 liegt der Fokus des visuellen Feedbacks auf der Abbildung der relevanten Fußbodenareale, mit deren Hilfe der Nutzer mit dem System interagieren kann. Hierzu wurde bei der Erarbeitung der Feedbackkonzepte bereits ein Entwurf präsentiert und implementiert. Der Hintergrund betätigter Buttons wird grün eingefärbt. So erhält der Nutzer die Information wann und welche Funktion erkannt wird. Während der Vorstudie kam es hier bei einigen Probanden zu Verständnisproblemen, weil diese die Darstellung der Buttons nicht als solche erkannt haben. Aus diesem Grund wurde erneut an der Gestaltung der Buttons gearbeitet. Hierzu wurde das Aussehen der Buttons an das der Tasten einer Tastatur angepasst. Dies soll den Nutzer beim Verstehen der Oberfläche unterstützen. Zusätzlich wird die Navigationsrichtung mit Hilfe von Pfeilen am Rand der Bildbetrachter vermittelt. So kann der Nutzer die ausgelöste Navigationsrichtung ebenfalls erkennen, wenn sein Blickfokus auf den Bildbetrachtern liegt.

Außerdem übten Probanden innerhalb der Studie häufig zu kleine Schrittgesten aus. Aus diesem Grund wurden die Fußabdrücke in der Mitte des Widgets verkleinert, sodass die Distanz zu den Buttons größer erscheint und so dem Nutzer ein Gefühl für die größere Entfernung vermittelt wird. Des Weiteren wurde das Icon für den Moduswechsel zwischen 2D- und 3D-Daten nicht von allen Probanden verstanden. Es wurde z. B. eher mit dem Icon für die Synchronisation innerhalb eines E-Mail-Programms verbunden. Aus diesem Grund wurde das Icon durch einen eindeutigen Text ersetzt. So erscheint nun, je nachdem in welchem Modus sich das System momentan befindet, die Bezeichnung des Modus, in den der Nutzer wechseln kann, auf dem Button. Zusätzlich ist das aktive Fenster mit einem grünen Rahmen versehen. In *Abbildung 4.8* sind die Unterschiede der beiden Widgets sichtbar. Anschließend ist in *Abbildung 4.9* die gesamte Benutzungsoberfläche des Konzepts 1 dargestellt.

Auch die Navigation durch die Bilddaten soll mit Hilfe von haptischem Feedback unterstützt werden. Hierzu wird bei jeder erstmaligen Betätigung eines Buttons ein kurzes Vibrationssignal vermittelt.

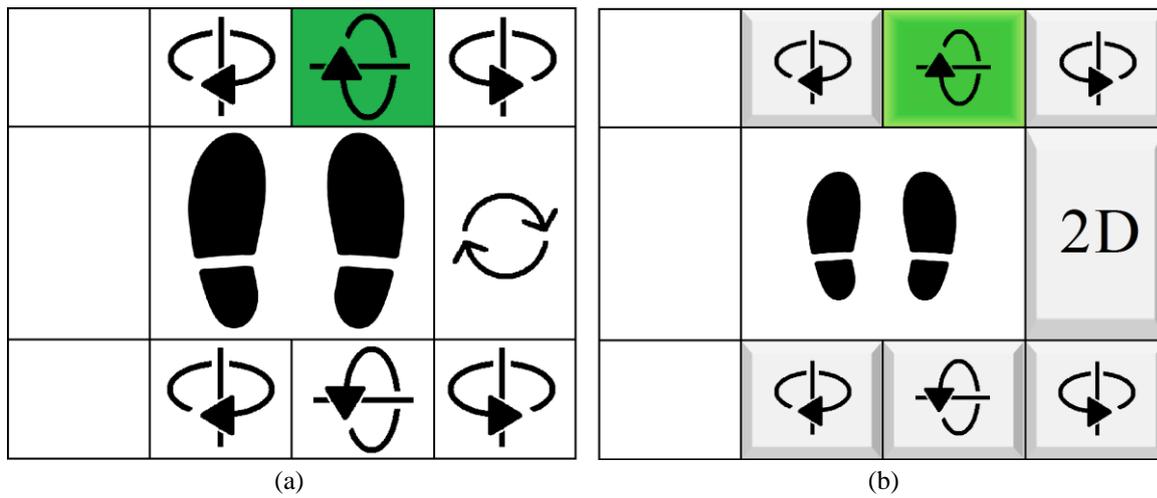


Abbildung 4.8: Widget des Konzepts 1 während der Vorstudie (a) und der Hauptstudie (b)

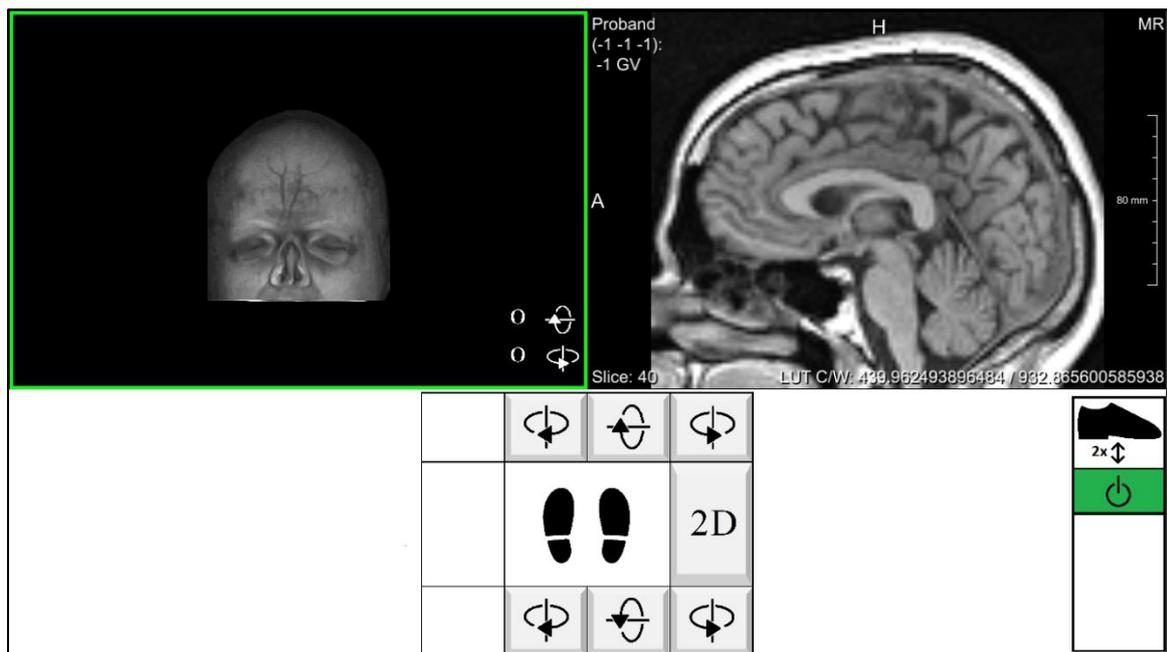
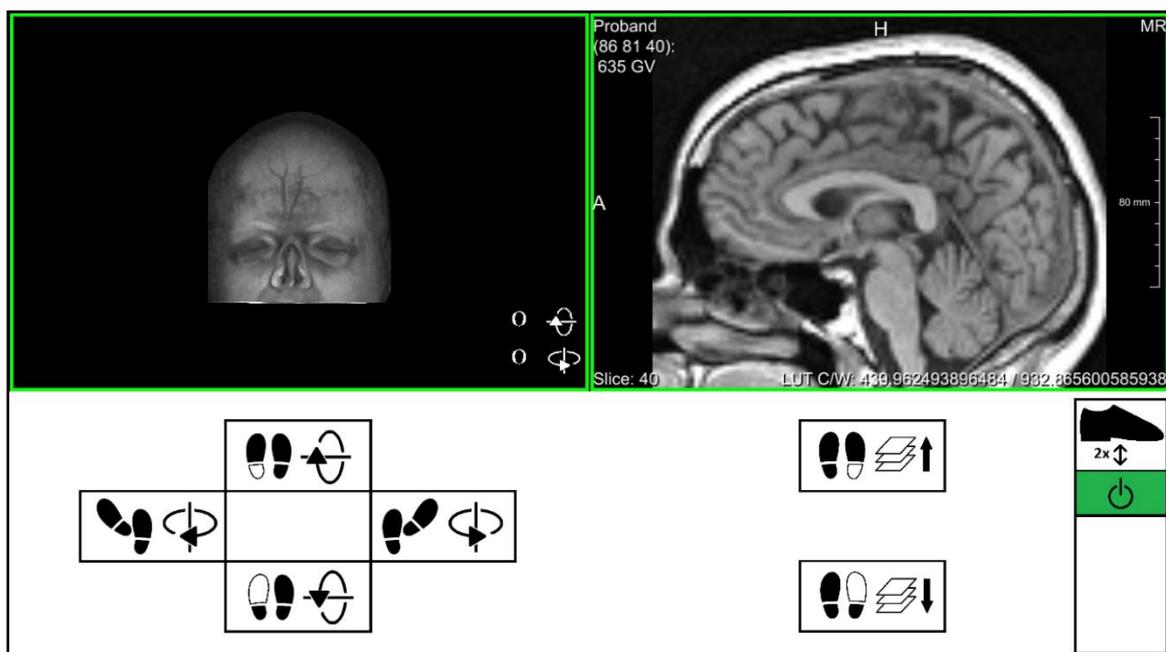


Abbildung 4.9: Benutzungsoberfläche des Konzepts 1

### 4.2.3 Konzept 2: Steuerung durch Gesten auf kleinem Raum

Gemäß dem Konzept 2 aus *Kapitel 3.4.2* erfolgt die Bedienung in diesem Konzept mittels der entwickelten Fußgesten. Dafür ist es notwendig, dem Nutzer diese Gesten verständlich zu vermitteln. Hierzu werden Icons verwendet, die die Bewegung der Füße abbilden. Der Grundaufbau der Benutzungsoberfläche wurde dabei bewusst ähnlich zu dem des Konzepts 1 gehalten, damit diese während der Studie vergleichbar sind. Die finale Benutzungsoberfläche ist in *Abbildung 4.10* dargestellt. Vibrationsfeedback wird hierbei identisch zum Konzept 1 verwendet. Es sorgt dafür, dass der Nutzer, auch ohne seinen Blick auf den Bildschirm gerichtet zu haben, eine Rückmeldung über das Auslösen einer Funktion erhält. Die Pfeile aus Konzept 1 zur Darstellung der Navigationsrichtung innerhalb der Bildbetrachter darzustellen finden auch in Konzept 2 in dieser Art und Weise Verwendung. Da in diesem Konzept kein Moduswechsel notwendig ist, werden stets beide Bildbetrachter mit einem grünen Rahmen als verwendbar dargestellt.

Auf der Grundlage dieser implementierten Gesten und des Feedbacks konnte eine Evaluierung der beiden Konzepte durchgeführt werden. Damit beschäftigt sich das folgende *Kapitel 5*.

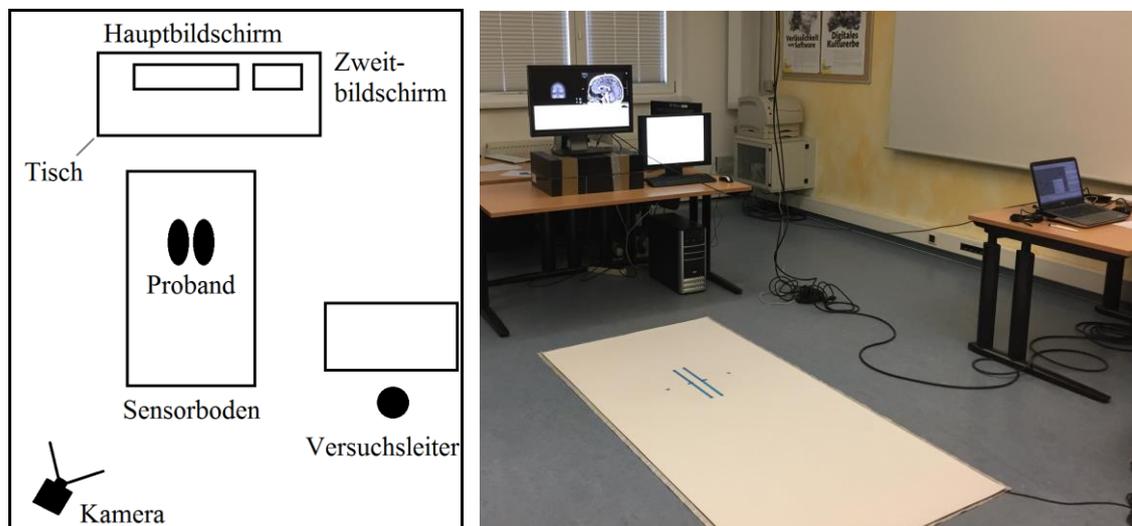


*Abbildung 4.10: Benutzungsoberfläche des Konzepts 2*



# 5 Evaluierung

Damit die entwickelten Konzepte anhand der in *Kapitel 3.3* beschriebenen Anforderungen verglichen werden können, werden im Folgenden die zwei durchgeführten Nutzerstudien erläutert, deren Ergebnisse vorgestellt und anschließend Lösungsvorschläge diskutiert. Der Versuchsaufbau während der durchgeführten Studien ist in *Abbildung 5.1* dargestellt.



*Abbildung 5.1: Versuchsaufbau der Räumlichkeit während der Studien. Der Zweitbildschirm fand jedoch nur in der Hauptstudie Verwendung*

## 5.1 Qualitative Vorstudie

In der ersten Studie handelte es sich um eine Vorstudie für die nachfolgende quantitative Datenerhebung. Ziel dieser ersten Studie war es, Schwachstellen im entwickelten Prototyp aufzudecken und für die anschließende quantitative Datenerhebung auszubessern. So sollten vor allem Fehler im Design und Ablauf des Systems gefunden werden. Hierzu wurden Probanden ins Labor eingeladen, um verschiedene Aufgaben mittels der zwei entwickelten Konzepte durchzuführen. Fehler und Unklarheiten sollten dabei protokolliert werden, um sie anschließend zu gruppieren und Schlussfolgerungen zu ziehen und Lösungsansätze zu finden.

### 5.1.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau der ersten Studie befand sich im Interaktionslabor in der Fakultät für Informatik der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. In der Mitte des Raumes liegt der in *Kapitel 3.1* beschriebene kapazitive Sensorboden. Des Weiteren war in ca. 1,5 m Entfernung ein 27 Zoll Monitor auf Kopfhöhe montiert, auf dem die Benutzungsoberfläche dargestellt wurde. Um die Bedingungen realitätsnah und für alle Probanden identisch zu halten, trugen alle Probanden während der gesamten Studie Plastikschuhe, welche in dieser Form auch im Operationssaal verwendet werden. Zusätzlich befestigten die Probanden ein Smartphone an ihrem Knöchel, durch das sie während der Studie Vibrationsfeedback vermittelt bekamen. Die Anordnung der einzelnen studienrelevanten Komponenten ist in *Abbildung 5.1* dargestellt. Auf dem Boden wurden Markierungen befestigt, um dem Probanden die Ausgangsposition des Systems darzustellen. Zur Datenerhebung wurde während des gesamten Interaktionszeitraums gefilmt. Dies ermöglichte eine spätere genauere Auswertung der Fehlerquellen. Zusätzlich wurden automatisch zwei Log-Dateien erstellt. Damit wurden sämtliche erkannte Eingaben vom Nutzer aufgezeichnet. Außerdem speicherte das zweite Log in jedem Zeitschritt die Kapazitätswerte des gesamten Fußbodens ab, um auch hier die Möglichkeit zu schaffen, im Anschluss gegebenenfalls eine detaillierte Analyse durchführen zu können.

### 5.1.2 Ablauf

Die Probanden erhielten zunächst eine thematische Einführung. Sie erfuhren, aus welchen Gründen das System entwickelt wurde und welche Ziele mit dieser Studie verfolgt (siehe *Anhang A.2*) werden. Anschließend wurden zunächst einige demografische Daten (siehe *Anhang A.1*) erfragt. Dazu gehörten Alter, Geschlecht, beruflicher Hintergrund, Schuhgröße, Erfahrung mit Fußinteraktion und die Erfahrung mit medizinischen Bilddaten. Die erhobenen Daten dieser Studie sind in *Kapitel 5.1.3* dargestellt. Die Probanden wurden anschließend über das Konzept des *lauten Denkens* instruiert. Zur Erläuterung erhielten sie zunächst folgende Umschreibung des *lauten Denkens*:

*„Sprich bitte alles aus, was dir in den Sinn kommt und durch den Kopf geht, während du die Aufgabe löst. Dabei ist es wichtig, dass du nicht versuchst, zu erklären oder zu strukturieren, was du tust. Stell dir einfach vor, du bist allein im Raum und sprichst mit dir selbst.“*<sup>2</sup>

Anschließend wurde den Probanden ein 1-minütiges Video gezeigt, in dem das *laute Denken* am Beispiel einer Webseite demonstriert wird [55]. Nach diesem Video sollten zwei Multiplikationsaufgaben gelöst werden um daran das *laute Denken* zu üben.

Das *laute Denken* verfolgt das Ziel, Informationen über das System zu erhalten, während die Probanden es benutzen. Dadurch werden ihre ausgeführten Aktionen und Reaktionen verständlicher und es wird ein Einblick in die Gedanken der Nutzer, während sie das System aktiv nutzen, geliefert. Bei einer nachträglichen Befragung können sonst

---

<sup>2</sup> Heine und Schramm (2007) S. 178 [54]

Informationen verloren gehen. Werden die Gedanken jedoch direkt verbalisiert können Probleme erkannt werden, die bei einer nachträglichen Befragung nicht mehr genannt werden, weil sie im Laufe des Lernprozesses als nicht mehr wichtig erachtet wurden [56, 57].

Nach dieser Einführung konnte mit dem eigentlichen Prototypentest begonnen werden. Die Probanden durchliefen nacheinander sieben Teilaufgaben pro Konzept, die einen Arbeitsablauf simulierten. Dies bedeutet, dass jeder Proband stets beide Konzepte (within-subject Design) verwendet, um im Anschluss daran die Konzepte miteinander vergleichen zu können [58]. Hierbei wird die Konzeptreihenfolge per Zufall ausgewählt, um etwaige einseitige Lerneffekte zu minimieren. Die sieben Teilaufgaben lauteten wie folgt:

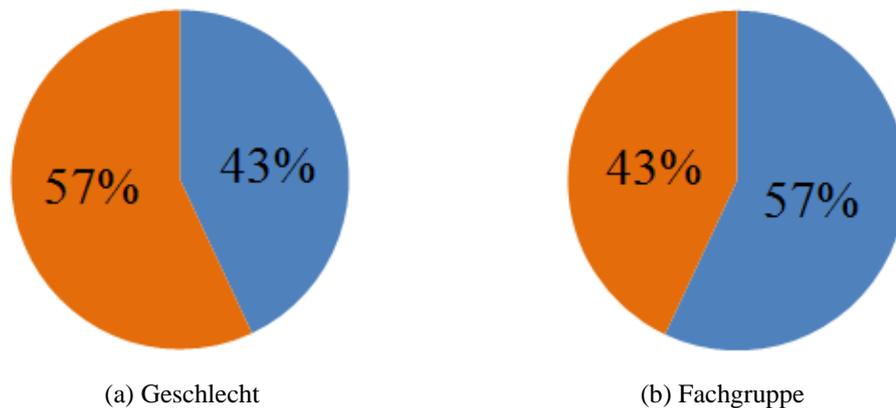
1. Aktivierung des Systems
2. Auf Schicht 48 wechseln (Beginn bei 40)
3. Rotation um 10 Schritte nach rechts
4. Auf Schicht 25 wechseln
5. Rotation um 7 Schritte nach oben
6. Rotation um 13 Schritte nach links
7. Deaktivierung des Systems

Damit die Probanden während der Aufgabenausführung nicht die ausgeführten Navigationsschritte zählen mussten, wurden neben einer Anzeige der aktuellen Schicht auch zwei Zähler für die Rotation implementiert. Diese zwei Zähler zeigen den aktuellen Rotationsstatus in horizontaler und vertikaler Richtung an.

Abschließend wurden den Probanden einige Fragen gestellt zu den Konzepten gestellt. Die Fragenliste befindet sich in *Anhang B.I*. Im nächsten Abschnitt wird auf die festgestellten Schwachstellen des Systems und die Auswertung der Fragen eingegangen.

### 5.1.3 Ergebnisse

Die Vorstudie wurde mit sieben Probanden durchgeführt. Darunter befanden sich Medizinstudenten und Experten aus dem Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion. Durch diese Mischung aus zukünftigen Anwendern und Interaktionsexperten wurden die Erwartungen an ein solches System aus zwei Perspektiven betrachtet. Das Durchschnittsalter der Probanden betrug 28,0 Jahre und die durchschnittliche Schuhgröße betrug 42,1. Bis auf einen Probanden bestätigten alle, bereits Erfahrungen mit medizinischen Bilddaten (z. B. MRT/CT) zu besitzen. Lediglich zwei der sieben Probanden gaben an, bereits Erfahrungen im Bereich der Fußinteraktion gemacht zu haben.



**Abbildung 5.2:** Grafische Auswertung des Probandengeschlechts (weiblich (orange) und männlich (blau)) und Fachgruppe (orange (Experte) und blau (Medizinstudent))

Einige der Ergebnisse der Vorstudie wurden bereits in *Kapitel 4* vorweg genommen, da an dieser Stelle das finale System vorgestellt werden sollte, auf dessen Basis die Datenerhebung der quantitativen Hauptstudie durchgeführt wurde. Dabei handelte sich hauptsächlich um Anpassungen an der Benutzungsoberfläche, um das Systemverständnis zu verbessern. Im Folgenden sind die wichtigsten Anmerkungen und gravierendsten Verständnisprobleme der Probanden aufgelistet, welche Anhand der Protokolle und erfassten Daten herausgestellt werden konnten:

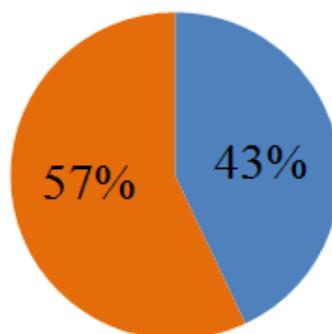
**Tabelle 5.1:** Aufgetretene Probleme und genannte Anmerkungen bezüglich des visuellen und haptischen Feedbacks

Zugehöriges Konzept	Anmerkung/Problem	Probandenanteil
Konzept 1	Probanden haben anhand der Darstellung der Buttons nicht den Zusammenhang erkennen können, auf die dargestellten Regionen treten zu müssen.	86%
	Das Symbol zum Moduswechsel wurde nicht mit dem Wechsel zwischen den zwei Bildbetrachtern in Verbindung gebracht.	43%
Konzept 1 und Konzept 2	Die weiteren Symbole wurden als sehr intuitiv und einfach verständlich bewertet.	86%
	Die Darstellung des aktuellen Systemstatus (aktiv/inaktiv) im Aktivierungsgesten-Widget ist wünschenswert.	43%
	Das Vibrationsfeedback wurde nicht wahrgenommen.	29%
	Das Vibrationsfeedback hat das Systemverständnis nicht verbessert oder unterstützt.	71%

**Tabelle 5.2:** Aufgetretene Probleme und genannte Anmerkungen bei der Interaktion

Zugehöriges Konzept	Anmerkung/Problem	Probandenanteil
Konzept 1	Es sind sehr große Schrittgesten notwendig um Buttons zu betätigen.	57%
Konzept 2	Eine präzise Navigation stellt sich als schwierig dar.	86%
	Unbeabsichtigtes Auslösen der Dorsal- und Plantarflexion durch Gewichtsverlagerung.	86%
	Unbeabsichtigtes Auslösen der Funktionen per Plantarflexion im Anschluss an die seitlichen Rotationsgesten bei Bewegung in Ausgangsposition.	100%
	Das Stehen auf der Ferse wird als anstrengend empfunden.	29%

Am Ende der Studie wurden die Probanden nach ihrem persönlich favorisierten Konzept befragt. Hierbei schnitt das Konzept 1 besser ab. Die Differenz ist jedoch nur gering (siehe *Abbildung 5.3*). Die Gründe für das Abschneiden und die ergriffenen Maßnahmen für die aufgetretenen Probleme werden im nachfolgenden Kapitel diskutiert.

**Abbildung 5.3:** Grafische Auswertung der Verteilung des favorisierten Konzepts der Probanden in der Vorstudie (Konzept 1 (orange) und Konzept 2 (blau))

#### 5.1.4 Diskussion

Anhand der Daten aus *Abbildung 5.3* lässt sich schnell erkennen, dass keines der beiden Systeme als klarer Favorit der Probanden herausgestellt werden kann. Die Gründe dafür sind vielfältig und sollen im Folgenden diskutiert werden. Dabei liegt der Fokus zunächst auf der Betrachtung von Anmerkungen und Problemen bei der Feedbackvermittlung. Eine der auffälligsten Beobachtungen bestand darin, dass 86% der Probanden die Visualisierung der Buttons des Konzepts 1 nicht als solche erkannt haben und erst nach längerem Ausprobieren die Funktionsweise verstanden haben. Um das Verständnis zu verbessern und den Einstieg zu erleichtern wurde die Visualisierung dieser Buttons überarbeitet. Auf diese Anpassung wurde bereits in *Kapitel 4.2.2* eingegangen und ist in *Abbildung 4.8* dargestellt. Ebenfalls wurde im genannten Kapitel bereits die Problematik des missverstandenen Icons zum Wechsel des Modus beschrieben. Dieses Icon wurde durch die Bezeichnung „2D“ bzw. „3D“ ersetzt. 86% der Probanden empfanden die

restlichen Icons als sehr intuitiv und passend. Lediglich 14% hatten zunächst Verständnisprobleme bei den Icons der Fußabdrücke des Konzepts 2. Die Probanden haben zunächst nicht den Zusammenhang zwischen weißen und schwarzen Bereichen der Abdrücke erkannt. Nach kurzer Probephase wurde jedoch auch für diese Probanden der Zusammenhang deutlich.

Bei der nächsten Anmerkung handelt es sich um kein Verständnisproblem, sondern um eine Äußerung, die das Verständnis zusätzlich unterstützen kann. 43% der Probanden wünschten sich eine zusätzliche Anzeige, ob das System momentan aktiviert ist. Diese Anzeige wurde, bei aktivem System, in Form einer grünen Einfärbung des Hintergrunds des Aktivierungssymbols implementiert. Zusätzlich wurden die Bestandteile des Fortschrittsbalkens farblich überarbeitet. Diese Anpassungen sind in *Abbildung 4.7* dargestellt.

Die nächsten zwei Anmerkungen beziehen sich auf das vermittelte Vibrationsfeedback. 29% der Probanden gaben an, dass sie das Vibrationsfeedback während der Studie nicht wahrgenommen haben. Weitere 42% der Probanden gaben zwar an, das Vibrationsfeedback gespürt zu haben, allerdings ergab sich für sie keinerlei Mehrwert in der Interaktion. Am vermittelten Vibrationsfeedback wurde nichts verändert. Anhand der kleinen Stichprobe an Probanden innerhalb der Vorstudie soll die Hypothese, dass das Vibrationsfeedback am Fuß für den Großteil der Probanden keinen Mehrwert darstellt, in der Hauptstudie durch zusätzliche Probanden untersucht werden.

Bei den bisherigen Anmerkungen handelte es sich lediglich um Anpassungen zum vermittelten Feedback. Im Folgenden werden nun die ermittelten Probleme bei der Ausführung der Gesten und der Interaktion im Allgemeinen betrachtet. Beim Konzept 1, mit der Interaktion über Buttons merkten 57% der Probanden an, dass die Buttonpositionen recht weit von der Ausgangsposition entfernt seien. Dies hat vor allem den kleineren Probanden Probleme bereitet, da diese in der Regel eine geringere Schrittreichweite besitzen als größere Menschen. Allerdings ist die Entfernung der Buttons der verwendeten Hardware geschuldet. Durch die relativ grobe Auflösung und die Bereiche zwischen den Sensorzellen gibt es technisch keine Möglichkeit, diese näher an die Probandenposition zu versetzen. Um dem Nutzer die Entfernung der Buttons besser zu vermitteln, wurde die Visualisierung der Fußabdrücke im Widget des Konzepts 1 verkleinert. Dies soll dem Probanden einen besseren räumlichen Eindruck über die Entfernung der Buttons liefern. Diese Veränderung ist in *Abbildung 4.8* dargestellt.

Bei der Nutzung des Konzepts 2 traten vermehrt Probleme auf. 86% der Probanden hatten Schwierigkeiten bei der präzisen Navigation. Bei ebenfalls 86% der Probanden kam es häufig zu Fehlauflösungen von Funktionen. Dies ist der Grund für die Schwierigkeiten bei der präzisen Navigation. Durch Gewichtsverlagerungen, welche jedoch nicht aus Interaktionsgründen, sondern unbewusst aus natürlichen Bewegungen heraus passieren, wurden oft die Sensorzellen zur Erfassung der Dorsal- bzw. Plantarflexion ausgelöst. Hierbei handelt es sich um ein größeres Problem des Konzepts, welches nicht ohne weiteres gelöst werden kann. Dazu müssen weitere Untersuchungen durchgeführt werden, um gegebenenfalls Lösungsansätze für dieses Problem zu finden. In der Hauptstudie wird

den Probanden daher zunächst erklärt, dass es bei diesem Konzept momentan sehr wichtig sei, ruhig zu stehen. Zusätzlich haben die Probanden in der Hauptstudie die Möglichkeit, sich vor der Bearbeitung der Aufgaben zunächst mit den Gegebenheiten der Konzepte vertraut zu machen.

Ein Spezialfall dieser Fehlauflösungen konnte anhand der aufgezeichneten Daten reproduziert werden. Bei allen Probanden der Studie kam es bei der Erholungsphase (siehe *Kapitel 2.2*) nach der Ausführung der seitlichen Rotationen zu Fehlauflösungen der Zellen zur Erfassung der Dorsal- bzw. Plantarflexion. Dies kam daher, dass die Probanden ihren Fuß in den seltenen Fällen mit der gesamten Fußfläche gleichzeitig auf den Boden setzen. Dies führt zu kurzen Momenten, in denen sich lediglich die Ferse oder der Fußballen/die Fußspitze auf dem Boden befindet und nur eine Zelle aktiviert und die entsprechende Funktion ausgeführt wird. Hierfür wurde eine Anpassung in der Implementierung vorgenommen. Nach der Ausführung einer seitlichen Rotationsgeste muss zunächst die Ausgangsposition vom Nutzer eingenommen werden, d. h. alle vier Zellen der Ausgangsposition des Nutzers müssen aktiv sein, bevor die anderen Gesten erneut vom System erkannt werden können. Eine Geste des Konzepts 2 wurde als besonders anstrengend wahrgenommen. 29% der Probanden empfanden die Dorsalflexion als unangenehm. Dies ist jedoch fester Bestandteil des Konzepts und durch den recht geringen Prozentsatz der Probanden, die diese Geste als anstrengend empfanden, wurde diese zunächst unverändert belassen und soll innerhalb der Hauptstudie weiter untersucht werden.

## 5.2 Quantitative Hauptstudie

Nachdem der Fokus der ersten Studie darauf lag, das bestehende System qualitativ zu evaluieren und Schwachstellen aufzudecken, ist das Ziel der zweiten Studie, quantitative Daten der beiden Konzepte zu erheben. Anhand dieser Daten sollen Aussagen zu den definierten Anforderungen (siehe *Kapitel 3.3*), bezüglich deren Erfüllung, getroffen werden.

### 5.2.1 Versuchsaufbau

Im Vergleich zur ersten Studie wurden im Versuchsaufbau keine größeren Veränderungen vorgenommen. Die Anordnung der Komponenten wurde identisch zur ersten Studie gehalten. Es wurde lediglich ein zweiter Bildschirm neben dem Hauptbildschirm positioniert. Dieser wurde zur Präsentation der Aufgaben verwendet. So konnten die entsprechenden Aufgaben den Probanden zu gegebener Zeit dargestellt werden. Die Position dieses Zweitbildschirms sowie aller anderen studienrelevanten Komponenten ist in *Abbildung 5.1* dargestellt. Wie auch in der Vorstudie wurden die Probanden während der gesamten Studie gefilmt und mit Hilfe zweier Logs alle Systemeingaben zur späteren

Auswertung gespeichert. Die Probanden der Vorstudie wurden von der Teilnahme an der Hauptstudie ausgeschlossen.

### 5.2.2 Ablauf

Der Beginn der Studie erfolgte identisch zur Vorstudie. Den Probanden wurde zunächst eine thematische Einführung und Instruktionen zum Ablauf der Studie (siehe *Anhang A.3*) gegeben. Anschließend wurden demografische Daten (siehe *Anhang A.1*) zu den Probanden erhoben. Wie bereits in der Vorstudie wurde die Konzeptreihenfolge zwischen den Probanden gewechselt (within-subject Design) [58]. Da der Fokus dieser Studie darauf lag, die beiden Konzepte anhand der definierten Anforderungen zu evaluieren, sollten sich die Probanden in dieser Studie zunächst mit den entwickelten Konzepten vertraut machen. Hierzu erhielten sie zunächst eine Einweisung zur Handhabung und bekamen anschließend die Möglichkeit, das System auszuprobieren. Dafür standen maximal fünf Minuten zur Verfügung. An dieser Stelle konnten jederzeit Verständnisfragen gestellt werden. Wenn der Proband der Meinung war, dass er die Handhabung des Systems verstanden hat, mussten zunächst vier Übungsaufgaben absolviert werden. Hierbei sollte zudem der Aufgabenablauf geübt werden. Da die Konzepte auch in Bezug auf die Bearbeitungszeit von Aufgabentypen verglichen werden sollten, war es wichtig den Aufgabenablauf einheitlich zu gestalten. Dieser sieht vor, dass dem Probanden vorab die zu absolvierende Aufgabe gezeigt wurde und er anschließend bestätigte, dass er die Aufgaben verstanden hatte. Danach startete der Versuchsleiter die Aufgabe. Hierzu wurde dem Probanden ein akustisches Signal vermittelt, welches den Aufgabenbeginn signalisierte. An dieser Stelle startete die Zeitmessung der Aufgabe. Sobald der Proband der Meinung war, dass er die Aufgabe erfolgreich absolviert habe, sollte dies verbal, durch z. B. einen „Stop“-Ausruf zu erkennen gegeben werden. Der eigentliche Endpunkt der Zeitmessung richtete sich jedoch nicht nach dem Signal des Probanden, sondern wurde intern innerhalb des Logs aufgezeichnet, sobald das Aufgabenziel endgültig erreicht wurde. Da dieser strukturierte Ablauf sehr wichtig war, sollte er in Form der bereits angesprochenen Übungsaufgaben trainiert werden. Die Übungsaufgaben lauteten wie folgt:

1. Aktivierung des Systems
2. Auf Schicht 55 wechseln
3. Rotation um 12 Schritte nach links
4. Deaktivierung des Systems

So wurden alle Aufgabentypen mindestens einmal geübt. Wenn der Proband anschließend keine weiteren Fragen hatte, konnte mit den Aufgaben zur Datenerhebung begonnen werden. Im Gegensatz zur Vorstudie wurde die Aufgabenanzahl auf zwölf erhöht, um mehr Daten zu erheben. Dabei wurde darauf geachtet, dass alle drei Aufgabentypen, also Aktivierung bzw. Deaktivierung des Systems, Schichtwechsel und Rotation ausgeglichen oft angewendet werden mussten, also jeweils vier Mal. Des Weiteren wurde berücksichtigt, dass die Summe an Navigationsschritten bei den Schichtwechsel- und

Rotationaufgaben identisch war. Es mussten in Summe jeweils 38 Schichtwechsel und Rotationsschritte ausgeführt werden. So konnten auch die Aufgabentypen zeitlich verglichen werden. Außerdem wurde die Anzahl an erforderlichen Moduswechseln bei den Aufgabentypen ausbalanciert. Insgesamt waren vier Wechsel des Modus nötig. Die zwölf Aufgaben lauteten:

1. Aktivierung des Systems
2. Deaktivierung des Systems
3. Aktivierung des Systems
4. Auf Schicht 48 wechseln (Beginn bei 40)
5. Auf Schicht 45 wechseln
6. Rotation um 10 Schritte nach rechts
7. Rotation um 15 Schritte nach oben
8. Auf Schicht 25 wechseln
9. Rotation um 20 Schritte nach unten
10. Rotation um 3 Schritte nach links
11. Auf Schicht 32 wechseln
12. Deaktivierung des Systems

Durch die Probandenzahl von 13 wurden also in Summe 52 Aufgaben pro Aufgabentyp durchgeführt (Probandenanzahl · Aufgaben pro Typ). Nachdem diese Aufgaben durchlaufen wurden, erfolgt die Bewertung des verwendeten Konzepts. Hierzu wurden zwei Fragebögen verwendet. Zum einen der NASA TLX Fragebogen, welcher die subjektive Beanspruchung bei der Aufgabenerfüllung misst. Dieser betrachtet sechs verschiedene Dimensionen [59]. Zur Evaluierung des Nutzererlebnisses wurde die Dimension der Benutzbarkeit des Fragebogens meCUE verwendet [60]. Die Fragebögen sind in *Anhängen B.2* und *B.3* zu finden.

Abschließend, nachdem der Proband beide Konzepte durchlaufen hatte, wurde wie bereits in der Vorstudie ein abschließendes Feedbackgespräch geführt. Dazu wurde die gleiche Frageliste verwendet (siehe *Anhang B.3*). Einen Überblick über den zeitlichen Ablauf der Hauptstudie bietet *Abbildung 5.4*.

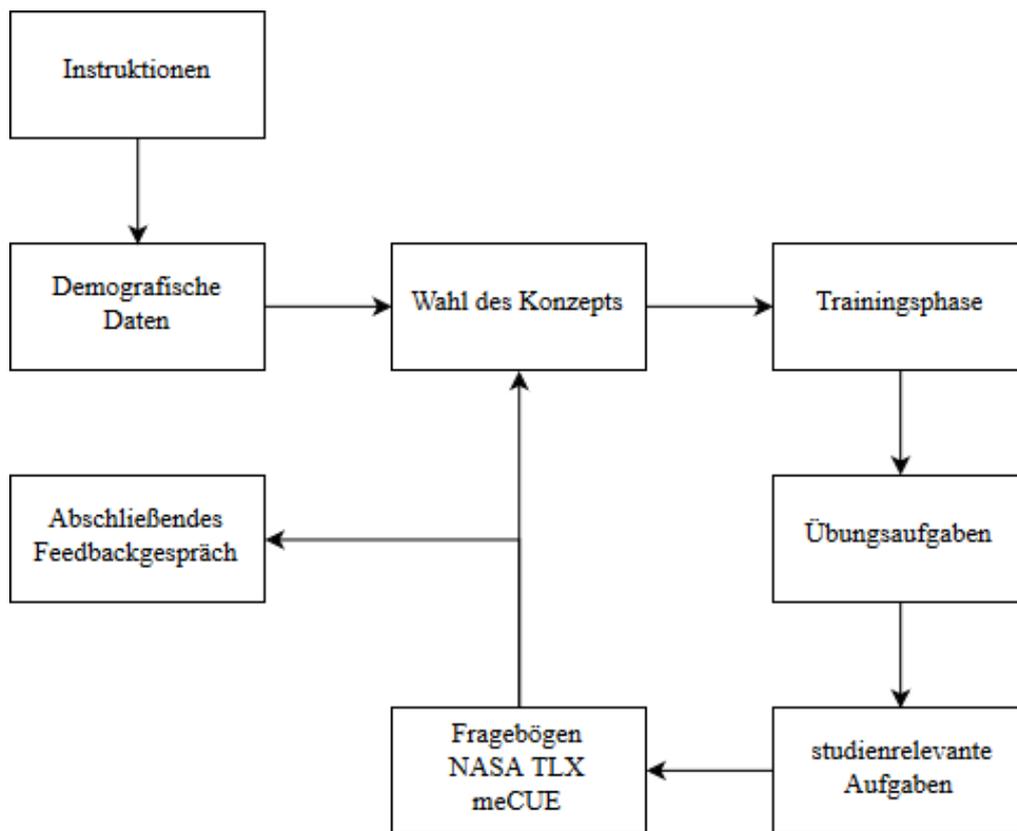
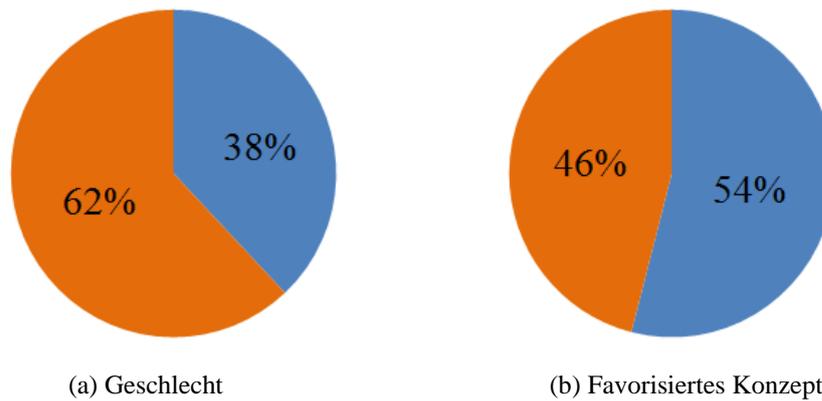


Abbildung 5.4: Ablauf der Hauptstudie

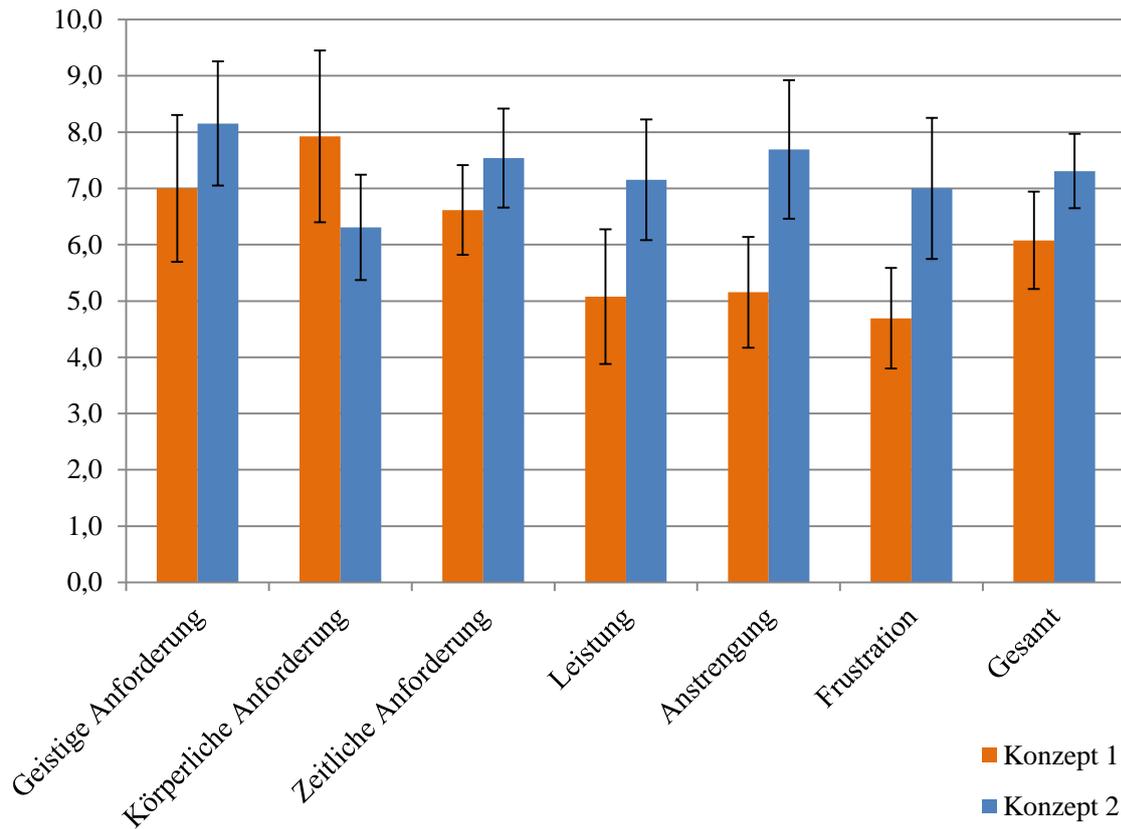
### 5.2.3 Ergebnisse

An der qualitativen Hauptstudie haben 13 Probanden teilgenommen. Im Gegensatz zur Vorstudie, an der auch Experten aus dem Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion teilnahmen, handelte es sich bei den Probanden der Hauptstudie ausschließlich um Medizinstudenten. Die Geschlechterverteilung ist in *Abbildung 5.5(a)* dargestellt. Das durchschnittliche Probandenalter betrug 23,9 Jahre und die durchschnittliche Schuhgröße 40,6. Alle 13 Probanden gaben an, Erfahrung mit medizinischen Bilddaten zu besitzen. 12 der 13 Probanden hatten bisher keinerlei Erfahrung mit Fußinteraktion gemacht. Lediglich ein Proband gab an, bereits an einer früheren Studie zum Thema Fußinteraktion teilgenommen zu haben und verfügte daher über ein Grundwissen zu diesem Thema.

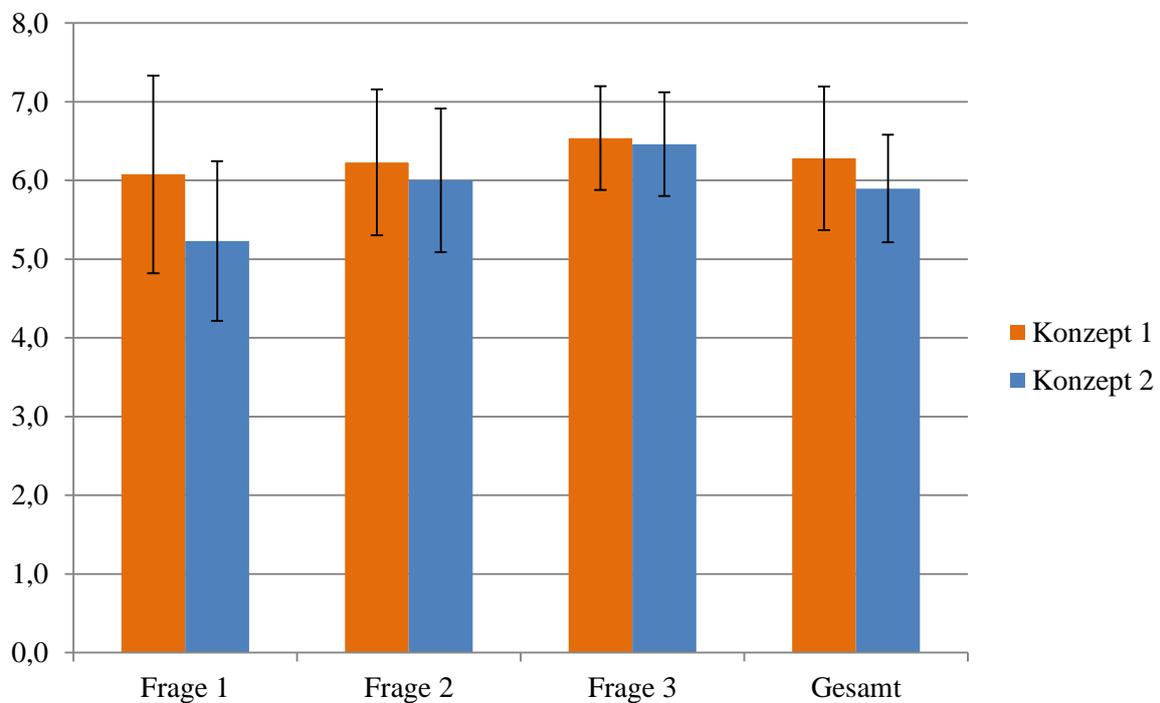


**Abbildung 5.5:** Grafische Auswertung des Probandengeschlechts (weiblich (orange) und männlich (blau)) und der Verteilung des favorisierten Konzepts der Probanden in der Vorstudie (Konzept 1 (orange) und Konzept 2 (blau))

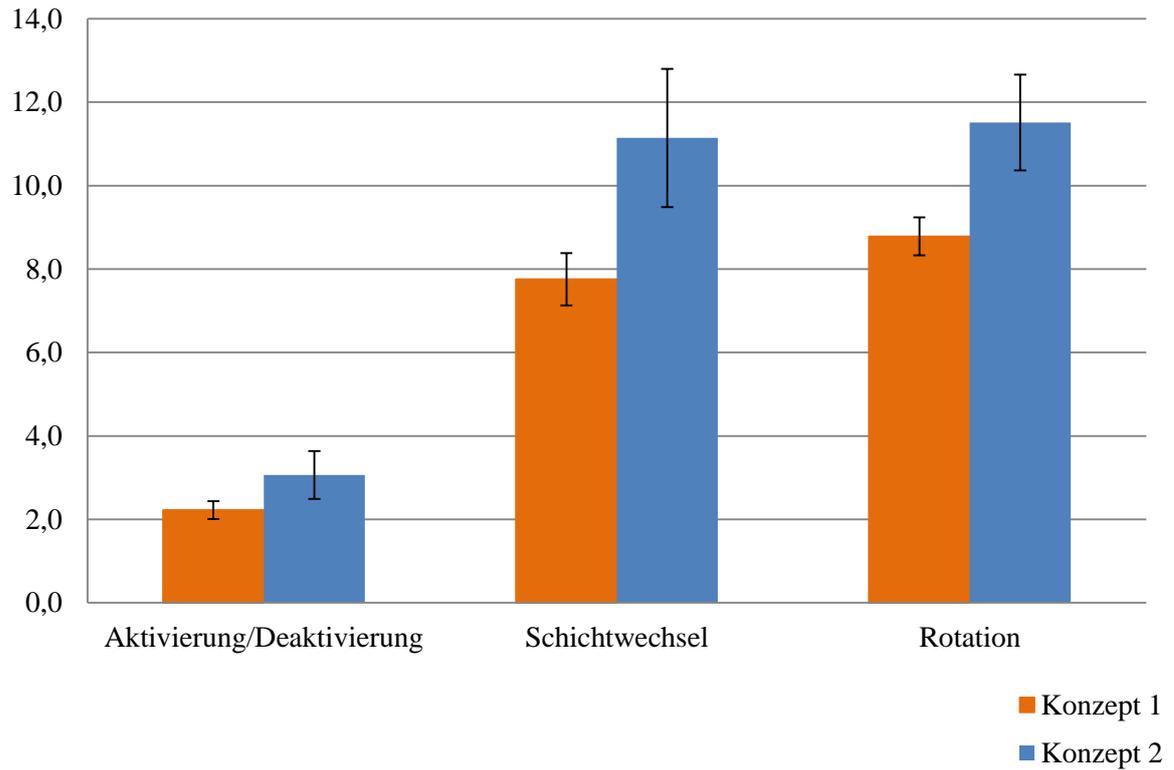
In den *Abbildungen 5.6 bis 5.8* sind die grafischen Auswertungen der zwei verwendeten Fragebögen und der vorgenommenen Zeitmessungen während der Aufgaben dargestellt. Die dazugehörigen statistischen Ergebnisse zeigt die *Tabelle C.1*. Über die erfassten Daten und deren Deutung wird im folgenden Kapitel diskutiert. Neben der benötigten Zeit zur Absolvierung der verschiedenen Aufgaben wurde auch die Anzahl der aufgetretenen Fehler bzw. Probleme protokolliert und ausgewertet. So zeigt die *Tabelle 5.3* die Anzahl der Fehler, welche bei den Aktivierungs- bzw. Deaktivierungsaufgaben aufgetreten sind. Eine detaillierte Übersicht über die protokollierten Fehler bei der Ausführung der Schichtwechsel- und Rotationsaufgaben bietet die *Tabelle 5.4*. Hierbei wurden die Rotationsaufgaben in zwei Kategorien unterteilt, die Rotation um die vertikale und die horizontale Achse. Der Grund dafür liegt in der Geste, welche zur Navigation benötigt wird. Die Rotation um die horizontale Achse benutzt im Konzept 2 die gleiche Geste wie für den Schichtwechsel. Lediglich der benötigte Fuß unterscheidet sich. Bei der Rotation um die vertikale Achse werden die Gesten, welche eine laterale Drehung des Fußes voraussetzen, verwendet. Um die zwei Gestentypen miteinander vergleichen zu können, wurden die Daten hierfür getrennt. Zusätzlich werden drei Fehlerarten unterschieden. Der erste Fehler beschreibt ein minimales Navigationsproblem. Dabei musste die Eingabe vom Nutzer lediglich einmalig korrigiert werden, um das für die Aufgaben nötige Ziel exakt zu erreichen (Beispiel: Die Zielschicht wurde um zwei Schichten verfehlt, weil zunächst zu weit gewechselt wurde. Anschließend wurde einmalig die Eingabe rückgängig gemacht, um die gewünschte Schicht zu erreichen.). Der zweite Fehler beschreibt das gleiche Szenario, allerdings gelang es dem Nutzer nicht, seine Eingabe direkt zu korrigieren und es wurden mehrere Interaktionen benötigt, um die exakte Position zu erreichen. Der dritte Fehlertyp stellt die kritischen Fehler dar, bei denen während der Ausführung der Aufgaben unbeabsichtigte Interaktionen ausgeführt wurden (z. B. Schichtwechsel statt Rotation oder Rotation nach links statt nach oben).



**Abbildung 5.6:** Mittelwerte und Standardfehler der einzelnen Dimensionen und dem Gesamtwert des NASA TLX Fragebogens



**Abbildung 5.7:** Mittelwerte und Standardfehler der einzelnen Dimensionen und dem Gesamtwert des meCUE Fragebogens



**Abbildung 5.8:** Mittelwerte und Standardfehler der benötigten Zeit pro Aufgabentyp für die beiden Konzepte

**Tabelle 5.3:** Anzahl der aufgetretenen Fehler während der Durchführung der Aktivierungs-/Deaktivierungsaufgaben kategorisiert nach dem verwendeten Konzept

	Konzept 1	Konzept 2
<b>Absolute Anzahl (prozentualer Anteil)</b>	12 (23%)	10 (19%)
<b>Gesamtaufgaben</b>	52	52

**Tabelle 5.4:** Absolute Anzahl und prozentualer Anteil der aufgetretenen Fehler während der Durchführung der Schichtwechsel- und Rotationsaufgaben – Kategorisiert in die die Aufgabetypen (Aufteilung der Rotationsaufgaben in Typ 1 (Rotation um horizontale Achse) und Typ 2 (Rotation um vertikale Achse)) und Fehlerquellen (Fehler 1 – einmalige Korrektur der Eingabe / Fehler 2 – mehrmalige Korrektur der Eingabe / Fehler 3 – Betätigung falscher Funktionen)

	Konzept 1				Konzept 2			
	Schichtwechsel	Rotation			Schichtwechsel	Rotation		
		Gesamt	Typ 1	Typ 2		Gesamt	Typ 1	Typ 2
<b>Fehler 1</b>	12 (23%)	4 (8%)	2 (8%)	2 (8%)	11 (21%)	12 (23%)	9 (35%)	3 (12%)
<b>Fehler 2</b>	6 (12%)	5 (10%)	4 (15%)	1 (4%)	15 (29%)	8 (15%)	6 (23%)	2 (8%)
<b>Fehler 3</b>	0 (0%)	4 (8%)	1 (4%)	3 (12%)	4 (8%)	4 (8%)	2 (8%)	2 (8%)
<b>Fehleranzahl gesamt</b>	18 (35%)	13 (25%)	7 (27%)	6 (23%)	30 (58%)	24 (46%)	17 (65%)	7 (27%)
<b>Gesamtaufgaben</b>	52	52	26	26	52	52	26	26

## 5.2.4 Diskussion

Im Gegensatz zum favorisierten System der Vorstudie, in der das Konzept 1 zu 57% bevorzugt wurde, zeigt die *Abbildung 5.5(b)* eine leichte Präferenz des Konzepts 2. Der Unterschied beträgt allerdings lediglich 8%, d. h. 54% bevorzugten das Konzept 2. Diese geringe Differenz lässt kein eindeutiges Urteil über das präferierte Konzept zu. Es bleibt also bei keinem eindeutig favorisierten System unter den Probanden. Diese Verschiebung der Präferenz in Richtung des Konzepts 2 könnte jedoch auch mit den nach der Vorstudie getätigten Anpassungen an Konzept 2 zusammenhängen. Diese Vermutung lässt sich allerdings nicht belegen.

Die Auswertung der subjektiven Arbeitsbelastung mittels NASA TLX Fragebogen ergab kein signifikantes Gesamtergebnis. Alle sechs Dimensionen des Fragebogens wurden bei Konzept 1 durchschnittlich um einen Punkt auf der Bewertungsskala besser bewertet. Die Dimensionen Anstrengung und Frustration weisen dabei einen großen Unterschied (Differenz von ca. 2 - 2,5 Skala-Punkten) auf. Lediglich die körperliche Anforderung des Konzepts 2 wurde durchschnittlich um zwei Punkte besser bewertet. Diese Einschätzungen spiegeln sich auch in den Aussagen und Problemen der Probanden wieder. Wie bereits in der Vorstudie wurde von den Probanden der große Abstand zu den Buttons des Konzepts 1 bemängelt. Der nötige Bewegungsaufwand und die damit verbundene körperliche Anforderung wurden daher als höher eingeschätzt.

Bei der Nutzung des Konzepts 2 konnte zwar mit der in *Kapitel 4.1.4* beschriebenen Maßnahme zur Unterbindung von ungewollten Eingaben nach Ausführung einer seitlichen Rotation die Häufigkeit an Fehleingaben reduziert werden, allerdings kam es durch natürliche Gewichtsverlagerungen während der Studie weiterhin oftmals zu

Fehleingaben. Dieser Aspekt muss in zukünftigen Arbeiten zwingend weiter untersucht werden, um geeignete Maßnahmen zur Vermeidung dieser Fehleingaben zu entwickeln. Die häufigen Fehleingaben führten zu einer steigenden Frustration und einem höheren Anstrengungsgrad unter den Probanden, da diese während der Interaktion genau auf ihre Standposition und eine gleichmäßige Fußbelastung achten mussten. Dieser Sachverhalt ist so auch in den Daten der Auswertung des NASA TLX Fragebogens ersichtlich.

An dieser Stelle ist es sinnvoll, die gemessenen Zeiten zur Erfüllung der Aufgaben zu betrachten. In *Abbildung 5.8* ist ersichtlich, dass die Durchschnittszeiten für die Schichtwechsel- und Rotationsaufgaben im Konzept 2 wesentlich höher sind als bei Konzept 1, obwohl im Konzept 2 kein Wechsel zwischen den Bildbetrachtern notwendig ist. Hier wurde zuvor vermutet, dass diese Einsparung des Wechsels zu einer Reduzierung des zeitlichen Aufwands führt. Die höheren Zeiten im Konzept 2 sind jedoch mit der großen Häufigkeit an Fehleingaben zu begründen. So kann kein Urteil über die Zeitersparnis durch das Wegfallen des Wechselmodus getroffen werden. Diese Zeitdifferenz lässt sich mit der Anzahl an aufgetretenen Fehlern während der Navigation begründen. Bei näherer Betrachtung der Werte aus der *Tabelle 5.4* fällt auf, dass bei den Schichtwechsel- und Rotationsaufgaben des Konzepts 1 eine Fehlerquote von 35% bzw. 25% erreicht wurden. Im Konzept 2 lag die Fehlerquote wesentlich höher. Bei den Schichtwechseln betrug sie 58%, d. h. 23% mehr als im Konzept 1. Dabei sind die Hauptursachen in den Navigationsungenauigkeiten zu finden. Eine ähnliche Differenz von 21% ist zwischen den Rotationsaufgaben der Konzepte 1 und 2 zu erkennen. Aus diesen Gründen fiel die Bearbeitungszeit wesentlich höher aus.

Während die Anteile der aufgetretenen Fehler zwischen den Rotationsaufgabentypen des Konzepts 1 ähnlich sind (27% und 23%), ist beim Konzept 2 eine große Differenz von 38% zu erkennen. Der Rotationsaufgabentyp 2 führte hierbei zu wesentlich weniger Fehlern in der Navigation. Die Differenz zwischen den Schichtwechselfaufgaben und den Rotationsaufgaben des Typs 1 des Konzepts 2 fällt mit nur 8% relativ gering aus. Dies führt zu dem Schluss, dass die Gesten, welche auf einer Dorsal- bzw. Plantarflexion basieren, eine wesentlich höhere Fehlerquote aufweisen, als die seitlichen Rotationsgesten. Als Grund hierfür kann die Erkennung der Gesten genannt werden. Während die seitlichen Rotationsgesten eine Sensorzelle außerhalb der Standposition des Nutzer zur Aktivierung benötigen, funktioniert die Aktivierung der Dorsal- und Plantarflexion über die Zellen, auf denen der Nutzer die ganze Zeit steht. So kann bei diesen Gesten nicht so leicht gestoppt werden. Hierzu müssen in zukünftigen Arbeiten weitere Untersuchungen angestellt werden, um die Erkennung robuster zu gestalten. Ein Faktor, der dabei unbedingt betrachtet werden sollte, ist der implementierte Beschleunigungsmechanismus, der eine schnellere Interaktion ermöglichen soll. Dieser könnte die Hauptursache für die ungenaue Navigation sein.

Der meCUE Fragebogen zielt auf ein Gesamtergebnis zur Benutzbarkeit der Konzepte ab. Bei Betrachtung der Ergebnisse (siehe *Abbildung 5.7*) ergeben sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den Konzepten. Die Durchschnittsbewertungen liegen alle im oberen Bereich. Lediglich bei der ersten Frage, ob sich das Konzept einfach benutzen

lässt, schneidet das Konzept 1 durchschnittlich um einen Bewertungspunkt besser als das Konzept 2 ab. Dies untermauert die bereits erläuterten Probleme bei der Benutzung des Konzepts 2 und den erhöhten Frustrationsgrad durch die Navigationsprobleme.

Neben den konzeptabhängigen Gesten sollte auch die Aktivierungsgeste, welche für beide Konzepte identisch ist, evaluiert werden. Hierbei ergab sich eine durchschnittliche Erkennungsrate bei der ersten Ausführung der Geste von ca. 79%. In etwa einem Fünftel der Fälle musste die Aktivierungsgeste mindestens ein zweites Mal ausgeführt werden, bevor das System diese erkannt hat. Hierbei sind im Wesentlichen zwei Fehlerquellen zu nennen. Zum einen wurden Taps zu langsam ausgeführt, sodass das in *Kapitel 4.1.2* beschriebene Zeitintervall überschritten wurde. Zum anderen ist das nicht exakte Absenken des Fußes auf den Sensorzellen problematisch. Bei der zweiten Fehlerquelle könnte eine andere Hardwareart oder Auflösung des Fußbodens, welche mehr Möglichkeiten zur Implementierung liefert, Abhilfe schaffen. Des Weiteren ist in *Abbildung 5.8* eine höhere Durchschnittszeit zur Durchführung der Aktivierungs- und Deaktivierungsaufgaben im Konzept 2 zu erkennen. Auch der Standardfehler ist im Vergleich zu Konzept 1 wesentlich größer. Hierfür lässt sich zunächst keinerlei Begründung finden, da auch die Fehlerquote in beiden Konzepten in etwa gleich groß ist. Eine mögliche Erklärung könnte eine größere Varianz in der Standposition bei der Benutzung des Konzepts 2 sein. Durch die stetige Benutzung beider Füße bei der Ausführung der verschiedenen Gesten kann es häufiger zu Standpositionsveränderungen beim Nutzer kommen, wodurch die Erkennung der Aktivierungsgeste beeinträchtigt werden kann. Hierfür lassen sich jedoch in den Daten keine Belege finden, sodass dies lediglich eine Vermutung darstellt.

In allen Aufgabentypen schnitt das Konzept 1 in der Bearbeitungszeit der Aufgaben besser ab, was zu einem signifikanten Ergebnis führt. Dies ergibt jedoch kein signifikantes Ergebnis in Bezug auf die Interaktion (siehe *Anhang C*).

Die Hypothese aus der Vorstudie bezüglich der besonders anstrengenden Dorsalflexion konnte hierbei nicht bestätigt werden. Keiner der Probanden der Hauptstudie empfand diese Geste als unangenehm.

## 5.3 Schlussfolgerungen

Nachdem die zwei durchgeführten Studien in ihrem Ablauf und ihren Ergebnissen vorgestellt wurden, sollen diese Ergebnisse nun in Zusammenhang mit den gestellten Anforderungen (siehe *Kapitel 3.3*) gebracht werden. Hierzu werden die Anforderungen nachfolgend für die beiden Konzepte verglichen. Dafür werden zunächst die klinischen und im Anschluss die technischen Anforderungen herangezogen.

Durch die Tatsache, dass beide Konzepte auf einer Interaktion mit den Füßen basieren und zur Eingabe lediglich ein Fußboden benötigt wird, ist die Anforderung der **Sterilität**

in beiden Konzepten gegeben, da sich der taktile Sensorfußboden in seiner Beschaffenheit nicht von herkömmlichen Fußböden unterscheidet. In Bezug auf die benötigte **Zeit** schnitt das Konzept 1 signifikant besser ab als das Konzept 2. Als Grund ist die hohe Fehlerquote in der genauen Navigation bei der Benutzung des Konzepts 2 zu nennen. Das Konzept 2 benötigt hingegen weniger **Platz**. Während für die Nutzung des Konzepts 1 mit der momentan verwendeten Implementierung ca. 1 m<sup>2</sup> freien Platzes benötigt wird, genügt für die Verwendung des Konzepts 2 eine Fläche von ca. 0,25 m<sup>2</sup>. Mit einer optimierten Hardware könnte der benötigte Platz des Konzepts 1 jedoch verringert werden, da die Buttons mit z.B. einem Fußboden höherer Auflösung näher an der Standposition des Nutzers versetzt werden können. Durch die zusätzlich um den Nutzer benötigte Fläche wird das Konzept 1 jedoch stets einen etwas höheren Platzverbrauch aufweisen. In Bezug auf die **Standstabilität** können lediglich die Aussagen der Probanden herangezogen werden. Hierbei wurden vor allem die großen Schrittgesten zur Aktivierung der Buttons bei Konzept 1 benannt. Vor allem kleineren Probanden fiel dies oft schwer und es kam zu Gleichgewichtsproblemen. Bei der Benutzung des Konzepts 2 ist dies kein ausschlaggebender Aspekt, weshalb dieses hier positiv hervorzuheben ist. Bei der **Anstrengung** sind mehrere Aspekte zu betrachten. Hierbei muss der körperliche und geistige Aufwand für den Nutzer analysiert werden. Bei der körperlichen Anstrengung schnitt das Konzept 2 besser ab, da die Schrittgesten im Konzept 1 zu groß ausfielen. Der geistige Aufwand wurde jedoch beim Konzept 1 als geringer eingeschätzt, da sich keine verschiedenen Gesten gemerkt werden müssen, sondern lediglich Schrittgesten an entsprechende Positionen ausgeführt werden müssen. Allerdings wurde im NASA TLX Fragebogen die Anstrengung und der Frustrationsgrad des Konzepts 2 als wesentlich höher eingeschätzt, weswegen das Konzept 1 hierbei insgesamt besser abschneidet. Die beiden durchgeführten Studien zeigten, dass auch mit dem Konzept 2 der komplette **Funktionsumfang** abgedeckt werden können. Für das Konzept 1 legte dies bereits Hatscher et al. [9] dar.

Die aufgestellten technischen Anforderungen enthielten die **Robustheit**. Hierbei wies das Konzept 2 eine wesentlich höhere Fehlerquote auf. Vor allem die genaue Navigation stellte sich als schwierig dar (**Genauigkeit**). Zum einen konnten Gesten nicht rechtzeitig als beendet kommuniziert werden und zum anderen wurden häufig Gesten durch Gewichtsverlagerung unbeabsichtigt ausgelöst. Die nächste zu betrachtende Anforderung ist die **Einfachheit**. Hierbei wurde wie bereits oben beschrieben das Konzept 1 zwar als einfacher zu merken bewertet, aber die Benutzung an sich als körperlich anstrengender. Die **Nutzerzufriedenheit** war in beiden Konzepten sehr hoch. Die Probanden kommunizierten, dass die Benutzung der Konzepte ihnen Spaß bereitet habe und viele von ihnen ein solches System gerne in ihrer späteren Arztlaufbahn verwenden würden. Das vermittelte **Feedback** wurde als sehr passend und hilfreich empfunden. Dies bezog sich jedoch hauptsächlich auf das visuelle Feedback. Das haptische Feedback wurde in der Vorstudie von 71% und in der Hauptstudie von 92% als überflüssig bezeichnet. Da es lediglich Informationen vermittelt, welche ebenso auf dem Bildschirm dargestellt werden, nahmen die Probanden keinen Mehrwert wahr.

Zusammenfassend lässt sich also sagen, dass das Konzept 1 die Anforderungen insgesamt besser erfüllte. Lediglich in den Aspekten **Platz** und **Standstabilität** erzielte das Konzept 2 bessere Ergebnisse. Beide Konzepte weisen jedoch ein hohes Verbesserungspotential auf. Auf diese Verbesserungsmöglichkeiten wird im abschließenden *Kapitel 6* eingegangen.

*Tabelle 5.5: Übersicht über Erfüllung der gestellten Anforderungen*

<b>Anforderung</b>	<b>Konzept 1</b>	<b>Konzept 2</b>
<b>Sterilität</b>	+	+
<b>Zeit</b>	+	-
<b>Platz</b>	-	+
<b>Handunabhängigkeit</b>	+	+
<b>Standstabilität</b>	-	+
<b>Anstrengung</b>	+	-
<b>Funktionsumfang</b>	+	+
<b>Robustheit</b>	+	-
<b>Genauigkeit</b>	+	-
<b>Einfachheit</b>	+	+
<b>Nutzerzufriedenheit</b>	+	+
<b>Feedback</b>	+	+
<b>Gesamtergebnis</b>	10/12	8/12

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden zwei Interaktionskonzepte zur Navigation durch medizinische Bilddaten mittels der Füße entwickelt. Hierzu wurde ein kapazitiver Fußboden als Eingabemedium verwendet. Zunächst wurden essentielle Grundlagen aus dem Bereich der Mensch-Maschine-Interaktion zusammengetragen. Die entwickelten Konzepte stützen sich dabei auf verschiedene Arbeiten aus dem Bereich der berührungslosen Interaktion im Operationssaal und der Fußinteraktion im Allgemeinen.

Anfangs wurde eine Anforderungsanalyse für ein System zur Navigation durch medizinische Bilddaten per Fußgesten durchgeführt. Auf dieser Grundlage wurden anschließend zwei Interaktionskonzepte entwickelt und diskutiert. Da der Entwurf von geeignetem Feedback einen essentiellen Bestandteil dieser Konzepte darstellt, wurden entsprechende Feedbackvarianten vorgestellt. Diese Feedbackvarianten enthalten sowohl visuelles, als auch haptisches Feedback.

Die entwickelten Interaktionskonzepte, mit dem dazugehörigen Feedback, wurden mit Hilfe der Entwicklungsumgebung MeVisLab realisiert. Eine eigens entwickelte Android Applikation ermöglichte die Vermittlung des haptischen Feedbacks mittels Bluetooth-Verbindung zwischen einem Smartphone und dem Computer. Die Applikation wurde mit Hilfe der Entwicklungsumgebung Android Studio erstellt.

Auf der Grundlage dieser Implementierung konnte anschließend eine Evaluierung der Konzepte durchgeführt werden. Hierbei wurde zunächst eine qualitative Vorstudie durchgeführt. Das Ziel dieser Vorstudie war das Aufdecken von Schwachstellen im System und Problemen bei der Benutzung, sodass diese vor der quantitativen Hauptstudie ausgebessert werden konnten. Ziel der Hauptstudie war es anschließend vergleichbare Daten zu erfassen, damit die entwickelten Konzepte anhand der gestellten Anforderungen evaluiert werden konnten.

Die Evaluierung ergab, dass das Konzept 1 in einigen Bereichen besser abschneidet, als das Konzept 2. Die Hauptkritikpunkte am Konzept 1 sind der Hardware geschuldet. Durch die Auflösung des Fußbodens sind zur Aktivierung der Buttons große Schrittgesten nötig, welche von den Nutzern als anstrengend eingeschätzt wurden. Des Weiteren setzt die Positionierung der Buttons eine große freie Fläche um den Nutzer herum voraus. Die Evaluierung des Konzepts 2 zeigte zwar, dass die Navigation durch die Bilddaten auch auf kleinerer Fläche funktioniert, allerdings wurden einige Schwierigkeiten festgestellt.

Das größte Problem bei der Nutzung des Konzepts 2 bestand in der präzisen Navigation durch die Bilddaten. Hierbei fiel es den Nutzern schwer, Funktionen rechtzeitig zu stoppen. Es wurden aber auch häufig Funktionen durch leichte Gewichtsverlagerung unbeabsichtigt ausgelöst. Dies resultierte in einem höheren Frustrationsgrad und einer signifikant höheren Durchschnittsbearbeitungszeit der gestellten Aufgaben. Ein Grund für die Navigationsprobleme könnte der implementierte Beschleunigungsmechanismus sein, welcher eine schnellere Navigation ermöglichen sollte. Ein alternativer Ansatz hierfür entstammt der Aussage eines Probanden, welcher die Verwendung von erhöhtem auszuübenden Druck zur schnelleren Navigation vorschlug. Hierbei könnte der Nutzer mehr Kontrolle über die Navigationsgeschwindigkeit erhalten und so präziser navigieren können.

Das vermittelte Vibrationsfeedback wurde von einem sehr hohen Anteil der Probanden innerhalb der Studien als unnötig empfunden. Nach den Probandenaussagen ergab sich in der Benutzung keinerlei Mehrwert, da lediglich redundante Informationen, welche ebenfalls auf dem Bildschirm mittels visuellen Feedbacks dargestellt werden, vermittelt wurden. Bei der zukünftigen Nutzung von haptischen Feedbacks in Form von Vibration sollte also genauer auf den Verwendungszweck geachtet werden. Hierbei sind Vibrationen zur Vermittlung der Buttonposition denkbar. Sobald sich der Fuß des Nutzers über einem Button befindet könnte ein Vibrationssignal auslöst werden. Eine zunehmende Vibrationsstärke bei Annäherung an einen Button wäre ebenfalls eine Möglichkeit. Des Weiteren könnte die Position des Vibrationsfeedbacks ausschlaggebend sein. In dieser Arbeit wurde dem Nutzer lediglich an einem Knöchel Vibrationsfeedback vermittelt. Es wäre also denkbar, Vibrationsfeedback an beiden Füßen zu verwenden, um unterschiedliche Signale aussenden zu können. Hierbei muss untersucht werden, ob dies zu einem Mehrwert führt. Des Weiteren könnte die Vibration, anstatt am Knöchel, direkt an der Fußsohle vermittelt werden. Eine Studie zeigte, dass der Fuß unterhalb der Sohle am sensitivsten auf Vibrationen reagiert. Die Vibrationssignale wurden dabei direkt an die entsprechenden Fußregionen vermittelt [49]. Eine Vermittlung von Vibrationen innerhalb eines Schuhs wäre über eine spezielle Einlegesohle denkbar. Bei einer Einlegesohle kann es jedoch zu Schwierigkeiten in der Erkennung solcher Signale kommen. Bei Anheben eines Fußes besteht, vor allem bei den in der Studie verwendeten Schuhen, die Problematik, dass der Fuß keinen Druck auf die Sohle ausübt und so Vibrationen eventuell schlechter wahrnehmbar sind. Auch spezielle Vibrationsmuster sind möglich [50]. All diese Aspekte müssen hierbei untersucht werden. Der Fokus sollte jedoch zunächst auf dem Verwendungszweck liegen.

Die Beurteilung des vermittelten visuellen Feedbacks war weitestgehend positiv. Auf der Grundlage der Erkenntnisse aus der Vorstudie konnten Verbesserungen an den Benutzungsoberflächen realisiert werden. In der Hauptstudie hatten die Probanden zunächst innerhalb einer Trainingsphase Zeit das System kennenzulernen. Dabei empfanden die Probanden das System als durchweg logisch und intuitiv aufgebaut.

In zukünftigen Arbeiten könnte es lohnenswert sein, die entwickelten Konzepte erneut aufzugreifen und mit einer anderen Hardware zu testen. Des Weiteren sind

Optimierungen in Form von speziellen Algorithmen zur genaueren Erfassung der Fußposition des Nutzers denkbar. Bereits in der Konzeptionierungsphase mussten aufgrund der momentanen Auflösung des Fußbodens Kompromisse eingegangen werden. Auf eine geeignete Fußbodenauflösung sollte in zukünftigen Arbeiten zwingend geachtet werden. Diese Auflösung sollte so hoch sein, dass auch eine freie Positionswahl des Nutzers zur Navigation ermöglicht werden kann. Dabei sollten auch die in der Arbeit beschriebenen Parameter für z. B. den Beschleunigungsmechanismus der Gesten näher untersucht werden.

Des Weiteren muss die Unterscheidung mehrerer Nutzer ermöglicht werden, da sich im Operationssaal stets mehr als eine Person aufhält. Einen Ansatz zur Unterscheidung von Nutzern bietet die Arbeit von Sousa et al. [61]. Eine individualisierte Gestenerkennung wäre ebenfalls denkbar. Hierzu würde der Nutzer zunächst im Rahmen einer Konfigurationsphase die Erkennung der Gesten auf seine Bewegungen personalisieren und bestimmte Parameter könnten dementsprechend angepasst werden. Dies könnte zu einer robusteren Erkennung der Gesten führen [62, 63].

Abschließend lässt sich sagen, dass die Navigation in medizinischen Bilddaten per Fuß auf kleinem Raum möglich ist. Jedoch muss hier weitere Arbeit in die robuste Erkennung der Gesten investiert werden, damit eine präzise und fehlerarme Navigation gewährleistet werden kann. Hierzu sollten auch andere Hardwareansätze, wie die Erkennung per Inertialsensorik, in Betracht gezogen werden. Dort würde auch die notwendige Unterscheidung verschiedener Nutzer entfallen, da jeder Nutzer eigene Hardware benötigen würde, was wiederum als Nachteil aufgefasst werden kann, da nicht jeder Nutzer mit dem System direkt interagieren könnte. Durch eine andere Hardware können jedoch auch die Distanzen für die Schrittgesten des Konzepts 1 verringert oder sogar vom Nutzer individualisiert werden. Ebenfalls ist eine Kombination aus verschiedener Hardware möglich, bei der eine zum Erfassen der Standposition im Raum und eine weitere zur Erfassung der Gesten dienen könnte.



# Anhang

## A Anhang A: Demografische Daten und Instruktionen

### A.1 Demografische Daten

Probandennummer: \_\_\_\_\_

Alter: \_\_\_\_\_

Geschlecht: \_\_\_\_\_

Studium: \_\_\_\_\_

Semester: \_\_\_\_\_

Schuhgröße: \_\_\_\_\_

Erfahrung mit Fußinteraktion (keine Erfahrung 1 – 5 sehr erfahren): \_\_\_\_\_

Erfahrung mit medizinischen Bilddaten? ja / nein

## A.2 Instruktionen der Vorstudie

# Instruktionen

Vielen Dank für deine Teilnahme an dieser Studie. Die Daten die während dieser Studie aufgenommen werden, werden vertraulich behandelt und anonymisiert veröffentlicht und/oder an Dritte weitergegeben.

## Hintergrund

Etablierte Systeme zur Interaktion mit medizinischen Bilddaten im OP sind Joysticks oder die mündliche Weitergabe der Aufgabe an einen Assistenten innerhalb/außerhalb des Raumes. Das führt zu Verzögerungen im Ablauf. Im Rahmen meiner Masterarbeit und dieser Studie testen wir ein System zur Interaktion ohne Verwendung der Hände, so dass Interaktionen mit den Bilddaten direkt vom Arzt erledigt werden können ohne seine aktuelle Aufgabe zu unterbrechen.

## Ablauf

Das heute getestete System verwendet hierfür einen kapazitiven Fußboden. Mit zwei Varianten dieses Systems müssen jeweils sieben Aufgaben gelöst werden (siehe unten). Es müssen also insgesamt 14 Aufgaben absolviert werden. Während der Studie wirst du Schuhe tragen, die so in dieser Weise auch von Ärzten in Operationssälen getragen werden. Du wirst während der Durchführung dieser Aufgaben die gesamte Zeit per Kamera aufgezeichnet, um eine spätere genaue Analyse der Handhabung mit dem System zu ermöglichen. Des Weiteren wirst du gebeten, während der Lösung der Aufgaben laut zu denken. Sprich bitte alles aus, was dir in den Sinn kommt und durch den Kopf geht, während du die Aufgaben löst. Dabei ist es wichtig, dass du nicht versuchst, zu erklären oder zu strukturieren, was du tust. Stell dir sich einfach vor, du bist allein im Raum und sprichst mit dir selbst. Dies hilft bei der Auswertung für ein besseres Verständnis zur sorgen, ob unser System intuitiv ist. Während der gesamten Studie wird lediglich das zu testende System evaluiert und in keiner Weise deine Fähigkeiten gemessen oder mit anderen verglichen.

### A.3 Instruktionen der Hauptstudie

## Instruktionen

Vielen Dank für deine Teilnahme an dieser Studie. Die Daten die während dieser Studie aufgenommen werden, werden vertraulich behandelt und anonymisiert veröffentlicht und/oder an Dritte weitergegeben.

## Hintergrund

Etablierte Systeme zur Interaktion mit medizinischen Bilddaten im OP sind Joysticks oder die mündliche Weitergabe der Aufgabe an einen Assistenten innerhalb/außerhalb des Raumes. Das führt zu Verzögerungen im Ablauf. Im Rahmen meiner Masterarbeit und dieser Studie testen wir ein System zur Interaktion ohne Verwendung der Hände, so dass Interaktionen mit den Bilddaten direkt vom Arzt erledigt werden können ohne seine aktuelle Aufgabe zu unterbrechen.

## Ablauf

Das heute getestete System verwendet hierfür einen kapazitiven Fußboden. Mit zwei verschiedenen Konzepten dieses Systems müssen jeweils zwölf Aufgaben gelöst werden (siehe unten). Es müssen also insgesamt 24 Aufgaben absolviert werden. Die Aufgaben bestehen darin, das System zu aktivieren bzw. zu deaktivieren, Schichtwechsel und Rotationen durchzuführen. Da während der Studie Zeitmessungen von der benötigten Zeit für die einzelnen Teilaufgaben genommen werden, würde ich dich bitten diese so schnell und präzise wie möglich auszuführen. Der jeweilige Aufgabenbeginn wird per Warnton vermittelt. Vor den studienrelevanten Aufgaben, hast du zu jedem Konzept zunächst eine Trainingsphase von ca. 5 Minuten in der du das System ausprobieren und Fragen stellen kannst. Während der Studie wirst du Schuhe tragen, die so in dieser Weise auch von Ärzten in Operationssälen getragen werden. Du wirst während der Durchführung dieser Aufgaben die gesamte Zeit per Kamera aufgezeichnet, um eine spätere genaue Analyse der Handhabung mit dem System zu ermöglichen. Während der gesamten Studie wird lediglich das zu testende System evaluiert und in keiner Weise deine Fähigkeiten gemessen oder mit anderen verglichen.

## **B Anhang B: Fragebögen**

### **B.1 Fragen des abschließenden Feedbackgesprächs**

Welches der beiden Konzepte empfandst du als besser?

Aus welchem Grund? Warum war es besser?

Findest du die Benutzeroberfläche intuitiv? War etwas nicht verständlich? Wie könnte es intuitiver sein?

Hast du Ideen für Verbesserungen an den beiden Konzepten?

Empfandst du eins der Konzepte als anstrengender als das Andere?

Gab es Gesten die besonders anstrengend waren?

Wie empfindest du die Vibration am Fuß? Half sie beim Verständnis des Systems?

Möchtest du sonst noch Anmerkungen zur Studie machen?

## B.2 NASA TLX

Klicken Sie in jeder Skale auf den Punkt, der Ihre Erfahrung im Hinblick auf die Aufgabe am besten verdeutlicht.

<table border="1" style="width: 100%; height: 50px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><b>Geistige Anforderung</b></p>											<p>Wie viel geistige Anforderung war bei der Informationsaufnahme und bei der Informationsverarbeitung erforderlich (z.B. Denken, Entscheiden, Rechnen, Erinnern, Hinsehen, Suchen ...)? War die Aufgabe leicht oder anspruchsvoll, einfach oder komplex, erfordert sie hohe Genauigkeit oder ist sie fehler tolerant?</p>
<table border="1" style="width: 100%; height: 50px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><b>Körperliche Anforderung</b></p>											<p>Wie viel körperliche Aktivität war erforderlich (z.B. ziehen, drücken, drehen, steuern, aktivieren ...)? War die Aufgabe leicht oder schwer, einfach oder anstrengend, erholsam oder mühselig?</p>
<table border="1" style="width: 100%; height: 50px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><b>Zeitliche Anforderung</b></p>											<p>Wie viel Zeitdruck empfanden Sie hinsichtlich der Häufigkeit oder dem Takt mit dem die Aufgaben oder Aufgabenelemente auftraten? War die Aufgabe langsam und geruhsam oder schnell und hektisch?</p>
<table border="1" style="width: 100%; height: 50px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><b>Leistung</b></p>											<p>Wie erfolgreich haben Sie Ihrer Meinung nach die vom Versuchsleiter (oder Ihnen selbst) gesetzten Ziele erreicht? Wie zufrieden waren Sie mit Ihrer Leistung bei der Verfolgung dieser Ziele?</p>
<table border="1" style="width: 100%; height: 50px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><b>Anstrengung</b></p>											<p>Wie hart mussten Sie arbeiten, um Ihren Grad an Aufgabenerfüllung zu erreichen?</p>
<table border="1" style="width: 100%; height: 50px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><b>Frustration</b></p>											<p>Wie unsicher, entmutigt, irritiert, gestresst und verärgert (versus sicher, bestätigt, zufrieden, entspannt und zufrieden mit sich selbst) fühlten Sie sich während der Aufgabe?</p>
<table border="1" style="width: 100%; height: 50px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><b>Gering</b> <span style="float: right;"><b>Hoch</b></span></p>											
<table border="1" style="width: 100%; height: 50px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><b>Gering</b> <span style="float: right;"><b>Hoch</b></span></p>											
<table border="1" style="width: 100%; height: 50px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><b>Gering</b> <span style="float: right;"><b>Hoch</b></span></p>											
<table border="1" style="width: 100%; height: 50px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><b>Gut</b> <span style="float: right;"><b>Schlecht</b></span></p>											
<table border="1" style="width: 100%; height: 50px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><b>Gering</b> <span style="float: right;"><b>Hoch</b></span></p>											
<table border="1" style="width: 100%; height: 50px; border-collapse: collapse;"> <tr> <td style="width: 12.5%;"></td> </tr> </table> <p style="text-align: center;"><b>Gering</b> <span style="float: right;"><b>Hoch</b></span></p>											



## C Anhang C: Ergebnisse

*Tabelle C.1: Zusammenfassung der statistischen Ergebnisse (ANOVA) für die Fragebögen NASA TLX, meCUE und der Zeitmessung der durchgeführten Aufgaben*

Statistische Parameter	df	F	T	p	sig	$\eta^2$	d	Effekt
<b>Wahrgenommene Aufgabenschwierigkeit (NASA TLX)</b>								
<b>Geistige Anf.</b>	12		-1,219	0,246				
<b>Körperliche Anf.</b>	12		1,106	0,291				
<b>Zeitliche Anf.</b>	12		-0,898	0,387				
<b>Leistung</b>	12		-1,737	0,108				
<b>Anstrengung</b>	12		-1,595	0,137				
<b>Frustration</b>	12		-2,379	0,035				
<b>Gesamt</b>	12		-1,669	0,121			0,46	klein
<b>Benutzbarkeit der Konzepte (meCUE)</b>								
<b>Frage 1</b>	12		2,171	0,051				
<b>Frage 2</b>	12		0,714	0,489				
<b>Frage 3</b>	12		0,365	0,721				
<b>Gesamt</b>	12		1,399	0,187			0,39	klein
<b>Bearbeitungszeit der Aufgaben</b>								
<b>Konzept</b>	1, 12	6,31		0,03	*	0,35		groß
<b>Aufgabe</b>	1,59, 19,02	64,12		< 0,001	*	0,84		groß
<b>Interaktion</b>	1,50, 18,04	1,19		0,31		0,09		mittel



# Abbildungsverzeichnis

<i>Abbildung 1.1: Operierender Arzt navigiert im Operationssaal mit medizinischen Bilddaten</i> .....	1
<i>Abbildung 2.1: Druckbasiertes Gestenset</i> .....	13
<i>Abbildung 2.2: Rotations- und bewegungsbasiertes Gestenset</i> .....	14
<i>Abbildung 2.3: Aufbau einer 30x30 cm großen Sensorplatte aus der Arbeit von Visell et al.</i> .....	15
<i>Abbildung 2.4: Versuchsaufbauten von Jalaliniya et al. und Mewes et al.</i> .....	17
<i>Abbildung 3.1: Taktile Sensorfußboden mit eingezeichneten Positionen der Sensorzellen</i> .....	20
<i>Abbildung 3.2: Entwickelte Benutzungsoberfläche in zwei verschiedenen Zuständen</i> .....	21
<i>Abbildung 3.3: Aufbau des Interaktionskonzepts von Hatscher et al.</i> .....	28
<i>Abbildung 3.4: Buttonpositionsvarianten</i> .....	29
<i>Abbildung 3.5: Angepasstes Konzept mit Darstellung der Buttonpositionen</i> .....	30
<i>Abbildung 3.6: Seitliche Rotationsgesten</i> .....	32
<i>Abbildung 3.7: Swipe-Geste nach rechts für Rotation nach rechts</i> .....	34
<i>Abbildung 3.8: Widget für visuelles Feedback zur Aktivierung bzw. Deaktivierung des Systems</i> .....	38
<i>Abbildung 3.9: Abbild des Fußbodens und Darstellung der Aktivierung des Buttons zum Wechsel der Schicht nach oben</i> .....	38
<i>Abbildung 3.10: Konzeptioneller Aufbau der Benutzungsoberfläche von Konzept 1</i> .....	39
<i>Abbildung 3.11: Benutzungsoberfläche für Konzept 2 mit Legende am oberen Bildschirmrand</i> .....	39
<i>Abbildung 3.12: konzeptuelle Benutzungsoberfläche für Konzept 2 mit Legende in der unteren Bildschirmhälfte</i> .....	40
<i>Abbildung 4.1: Ablaufdiagramm der Implementierung</i> .....	44
<i>Abbildung 4.2: Darstellung der gewählten statischen Standposition des Nutzers</i> .....	46
<i>Abbildung 4.3: Ablaufdiagramm zur Erkennung der Aktivierungsgeste</i> .....	47
<i>Abbildung 4.4: Darstellung der zugeordneten Sensorzellen für die Systemfunktionen des Konzepts 1</i> .....	48
<i>Abbildung 4.5: Ablaufdiagramm zur Erkennung der Gesten des Interaktionskonzepts 1</i> .	50
<i>Abbildung 4.6: Ablaufdiagramm zur Erkennung der Gesten des Interaktionskonzepts 2</i> .	53
<i>Abbildung 4.7: Finales Widget für visuelles Feedback zur Aktivierung bzw. Deaktivierung des Systems</i> .....	55

---

<i>Abbildung 4.8: Widget des Konzepts 1 während der Vorstudie (a) und der Hauptstudie (b)</i>	56
<i>Abbildung 4.9: Benutzungsoberfläche des Konzepts 1</i>	56
<i>Abbildung 4.10: Benutzungsoberfläche des Konzepts 2</i>	57
<i>Abbildung 5.1: Versuchsaufbau der Räumlichkeit während der Studien</i>	59
<i>Abbildung 5.2: Grafische Auswertung des Probandengeschlechts</i>	62
<i>Abbildung 5.3: Grafische Auswertung der Verteilung des favorisierten Konzepts der Probanden in der Vorstudie</i>	63
<i>Abbildung 5.4: Ablauf der Hauptstudie</i>	68
<i>Abbildung 5.5: Grafische Auswertung des Probandengeschlechts</i>	69
<i>Abbildung 5.6: Mittelwerte und Standardfehler der einzelnen Dimensionen und dem Gesamtwert des NASA TLX Fragebogens</i>	70
<i>Abbildung 5.7: Mittelwerte und Standardfehler der einzelnen Dimensionen und dem Gesamtwert des meCUE Fragebogens</i>	70
<i>Abbildung 5.8: Mittelwerte und Standardfehler der benötigten Zeit pro Aufgabentyp für die beiden Konzepte</i>	71

# Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 2.1: Freiheitsgrade an Bein und Fuß des Menschen</i> .....	10
<i>Tabelle 2.2: Überblick über mögliche Fußgesten</i> .....	12
<i>Tabelle 3.1: Auswertung der Nutzerstudie von Hatscher et al.</i> .....	22
<i>Tabelle 3.2: Klinische Anforderungen</i> .....	26
<i>Tabelle 3.3: Technische Anforderungen</i> .....	26
<i>Tabelle 3.4: Konzeptvarianten für druckbasierte Gesten</i> .....	31
<i>Tabelle 3.5: Gestenset zur Navigation auf kleinem Raum – schwarze Bereiche zeigen die den Boden berührende Fußfläche</i> .....	33
<i>Tabelle 3.6: Entworfenene Icons zur Darstellung der Funktionen</i> .....	37
<i>Tabelle 4.1: Darstellung der zugeordneten Sensorzellen für die Systemfunktionen des Konzepts 2</i> .....	51
<i>Tabelle 5.1: Aufgetretene Probleme und genannte Anmerkungen bezüglich des visuellen und haptischen Feedbacks</i> .....	62
<i>Tabelle 5.2: Aufgetretene Probleme und genannte Anmerkungen bei der Interaktion</i> .....	63
<i>Tabelle 5.3: Anzahl der aufgetretenen Fehler während der Durchführung der Aktivierung-/Deaktivierungsaufgaben nach kategorisiert nach Konzept</i> .....	71
<i>Tabelle 5.4: Absolute Anzahl und prozentualer Anteil der aufgetretenen Fehler während der Durchführung der Schichtwechsel- und Rotationsaufgaben</i> .....	72
<i>Tabelle 5.5: Übersicht über Erfüllung der gestellten Anforderungen</i> .....	76
<i>Tabelle C.1: Zusammenfassung der statistischen Ergebnisse (ANOVA) für die Fragebögen NASA TLX, meCUE und der Zeitmessung der durchgeführten Aufgaben</i> ....	87



# Literaturverzeichnis

- [1] B. Preim und C. P. Botha, Visual Computing for Medicine: Theory, Algorithms, and Applications, Newnes, S. 61-65, 2013.
- [2] B. Hartmann, B. Matthias, A. Junger, L. Quinzio, R. Röhrig, B. Fengler, U. W. Färber, B. Wille und G. Hempelmann, „Computer Keyboard and Mouse as a Reservoir of Pathogens in an Intensive Care Unit“, *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, Bd. 18, Nr. 1, S. 7-12, 2004.
- [3] W. A. Rutala, M. S. White, M. F. Gergen und D. J. Weber, „Bacterial contamination of keyboards: efficacy and functional impact of disinfectants“, *Infection Control*, Bd. 27, Nr. 4, S. 372-377, 2006.
- [4] R. Wipfli, V. Dubois-Ferrière, S. Budry, P. Hoffmeyer und C. Lovis, „Gesture-Controlled Image Management for Operating Room: A Randomized Crossover Study to Compare Interaction Using Gestures, Mouse, and Third Person Relaying“, *PloS one*, Bd. 11, Nr. 4, 2016.
- [5] A. Huebler, C. Hansen, O. Beuing, M. Skalej und B. Preim, „Workflow analysis for interventional neuroradiology using frequent pattern mining“, *13. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie*, München, S. 165-168, 2014.
- [6] K. O'Hara, G. Gonzalez, A. Sellen, G. Penney, A. Varnavas, H. Mentis, A. Criminisi, R. Corish, M. Rouncefield, N. Dastur und T. Carrell, „Touchless interaction in surgery“, *Communications of the ACM*, ACM, Bd. 57, Nr. 1, S. 70-77, 2014.
- [7] „Trumpf Medical,“ [Online]. Available: [https://www.trumpfmedical.com/globalassets/images/solutions/partners\\_03\\_freiberg\\_kdb0306\\_1024x500px.jpg?preset=article-](https://www.trumpfmedical.com/globalassets/images/solutions/partners_03_freiberg_kdb0306_1024x500px.jpg?preset=article-). [Zugriff am 22.03.2017].
- [8] A. Mewes, B. Hensen, F. Wacker und C. Hansen, „Touchless Interaction with Software in the Operating Room: A Systematic Literature Review“, *International Journal of Computer Assisted Radiology and Surgery*, Bd. 11, Nr. 1, S. 1-15, 2016.

- [9] B. Hatscher, S. Wagner, L. Grimaldi, M. Fritzsche, N. Elkmann und C. Hansen, „Navigation in medizinischen Bilddaten mittels eines taktilem Fußbodens“, *15. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Computer- und Roboterassistierte Chirurgie*, Bern, S. 33-38, 2016.
- [10] A. Dix, J. Finlay, G. B. Abowd und R. Beale, „Human-computer interaction - Third Edition“, S. 145-152, 2004.
- [11] B. Preim und R. Dachzelt, *Interaktive Systeme: Band 2: User Interface Engineering, 3D-Interaktion, Natural User Interfaces*, Springer, S. 326-331, 461-466, 497-503, 522-533, 2015.
- [12] D. Wigdor und D. Wixon, „Brave NUI world: designing natural user interfaces for touch and gesture“, S. 220-221, 2011.
- [13] P. Wagner, Z. Malisz und S. Kopp, „Guest Editorial: Gesture and Speech in Interaction: An Overview“, *Speech Communication*, Bd. 57, S. 209-232, 2014.
- [14] F. Quek, D. McNeill, R. Bryll, S. Duncan, X.-F. Ma, C. Kirbas, K. E. McCullough und R. Ansari, „Multimodal human discourse: gesture and speech“, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, ACM, Bd. 9, Nr. 3, S. 171-193, 2002.
- [15] M. Karam und M. Schraefel, „A taxonomy of gestures in human computer interaction“, *ACM Transactions on Computer-Human Interaction*, ACM, 2005.
- [16] E. R. Hoffmann, „A comparison of hand and foot movement times“, *Ergonomics*, Bd. 34, Nr. 4, S. 397-406, 1991.
- [17] T. Pakkanen und R. Raisamo, „Appropriateness of foot interaction for non-accurate spatial tasks“, *CHI'04 extended abstracts on Human factors in computing systems*, S. 1123-1126, 2004.
- [18] G. Pearson und M. Weiser, „Of moles and men: the design of foot controls for workstations“, *ACM SIGCHI Bulletin*, ACM, Bd. 17, S. 333-339, 1986.
- [19] E. Velloso, D. Schmidt, J. Alexander, H. Gellersen und A. Bulling, „The feet in human-computer interaction: a survey of foot-based interaction“, *ACM Computing Surveys*, ACM, Bd. 48, Nr. 2, S. 21, 2015.
- [20] N. Sangsuriyachot und M. Sugimoto, „Novel interaction techniques based on a combination of hand and foot gestures in tabletop environments“, *Proceedings of the 10th asia pacific conference on Computer human interaction*, S. 21-28, 2012.

- [21] A. Crossan, S. Brewster und A. Ng, „Foot tapping for mobile interaction“, *Proceedings of the 24th BCS Interaction Specialist Group Conference*, British Computer Society, S. 418-422, 2010.
- [22] J. Scott, D. Dearman, K. Yatani und K. N. Truong, „Sensing foot gestures from the pocket“, *Proceedings of the 23rd annual ACM symposium on User interface software and technology*, ACM, S. 199-208, 2010.
- [23] A. L. Simeone, E. Velloso, J. Alexander und H. Gellersen, „Feet movement in desktop 3D interaction“, *Symposium on 3D User Interfaces (3DUI)*, IEEE, S. 71-74, 2014.
- [24] W. Saunders und D. Vogel, „The performance of indirect foot pointing using discrete taps and kicks while standing“, *Proceedings of the 41st Graphics Interface Conference*, Canadian Information Processing Society, S. 265-272, 2015.
- [25] Y. Visell, A. Law, J. Ip, S. Smith und J. R. Cooperstock, „Interaction capture in immersive virtual environments via an intelligent floor surface“, *Virtual Reality Conference (VR)*, IEEE, S. 313-314, 2010.
- [26] K. Fukahori, D. Sakamoto und T. Igarashi, „Exploring Subtle Foot Plantar-based Gestures with Sock-placed Pressure Sensors“, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference on Human Factors in Computing Systems*, ACM, S. 3019-3028, 2015.
- [27] D. L. M. Achacon, D. Carlos, D. M. Puyaoan, C. Clarin und P. C. Naval Jr, „REALISM: Real-Time Hand Gesture Interface for Surgeons and Medical Experts“, *9th Philippine computing science congress*, Citeseer, 2009.
- [28] L. C. Ebert, G. Hatch, G. Ampanozi, M. J. Thali und S. Ross, „You can't touch this touch-free navigation through radiological images“, *Surgical innovation*, Bd. 19, Nr. 3, S. 301-307, 2012.
- [29] A. Mewes, P. Saalfeld, O. Riabikin, M. Skalej und C. Hansen, „A gesture-controlled projection display for CT-guided interventions“, *International journal of computer assisted radiology and surgery*, Bd. 11, Nr. 1, S. 157-164, 2016.
- [30] H. M. Mentis, K. O'Hara, G. Gonzalez, A. Sellen, R. Corish, A. Criminisi, R. Trivedi und P. Theodore, „Voice or Gesture in the Operating Room“, *Proceedings of the 33rd Annual ACM Conference Extended Abstracts on Human Factors in Computing Systems*, ACM, S. 773-780, 2015.

- [31] L. A. Schwarz, A. Bigdelou und N. Navab, „Learning gestures for customizable human-computer interaction in the operating room“, *International Conference on Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention*, Springer, S. 129-136, 2011.
- [32] A. Bigdelou, L. Schwarz und N. Navab, „An adaptive solution for intra-operative gesture-based human-machine interaction“, *Proceedings of the ACM international conference on Intelligent User Interfaces*, ACM, S. 75-84, 2012.
- [33] J. Hettig, A. Mewes, O. Riabikin, M. Skalej, B. Preim und C. Hansen, „Exploration of 3D medical image data for interventional radiology using myoelectric gesture control“, *Proceedings of the Eurographics Workshop on Visual Computing for Biology and Medicine*, Eurographics Association, S. 177-185, 2015.
- [34] S. Jalaliniya, J. Smith, M. Sousa, L. Bütthe und T. Pederson, „Touch-less interaction with medical images using hand & foot gestures“, *Proceedings of the ACM conference on Pervasive and ubiquitous computing adjunct publication*, ACM, S. 1265-1274, 2013.
- [35] „Future-Shape,“ Future-Shape GmbH, URL: <http://www.future-shape.com/de/> [Zugriff am 6.1.2017].
- [36] A. Steinhage und C. Lauterbach, „Monitoring Movement Behavior by Means of a Large Area Proximity Sensor Array in the Floor“, *BMI*, S. 15-27, 2008.
- [37] J. Edworthy und E. Hellier, „Alarms and human behaviour: implications for medical alarms“, *British journal of anaesthesia*, Bd. 97, Nr. 1, S. 12-17, 2006.
- [38] J. Edworthy und E. Hellier, „Fewer but better auditory alarms will improve patient safety“, *Quality and Safety in Health Care*, Bd. 14, Nr. 3, S. 212-215, 2005.
- [39] A. Iannessi, P. Y. Marcy, O. Clatz, N. Ayache und P. Fillard, „Touchless user interface for intraoperative image control: almost there“, *Radiographics*, Bd. 34, Nr. 4, S. 1142-1144, 2014.
- [40] M. G. Jacob, J. P. Wachs und R. A. Packer, „Hand-gesture-based sterile interface for the operating room using contextual cues for the navigation of radiological image“, *Journal of the American Medical Informatics Association*, Bd. 20, Nr. 1, S. 183-186, 2013.
- [41] C. Manresa-Yee, E. Amengual und P. Ponsa Asensio, „Usability of vision-based interfaces“, *Actas del XIV Congreso Internacional Interaccion Persona Ordenador*, S. 113-118, 2013.

- [42] D. A. Norman, "The psychopathology of everyday things", *Foundations of cognitive psychology: core readings*. MIT Press, Cambridge, S. 434-437, 2002.
- [43] T. Stapelkamp, *Interaction-und Interfacedesign: Web-, Game-, Produkt-und Servicedesign Usability und Interface als Corporate Identity*, Springer, S. 59-62, 2010.
- [44] B. Preim und R. Dachsel, *Interaktive Systeme: Band 1: Grundlagen, Graphical User Interfaces, Informationsvisualisierung*, Springer, S. 90-104, 2010.
- [45] A. Gefen, M. Megido-Ravid, Y. Itzhak und M. Arcan, „Analysis of muscular fatigue and foot stability during high-heeled gait“, *Gait posture*, Bd. 15, Nr. 1, S. 56-63, 2002.
- [46] A. Roaas und G. B. Andersson, „Normal range of motion of the hip, knee and ankle joints in male subjects, 30-40 years of age“, *Acta Orthopaedica Scandinavica*, Bd. 53, Nr. 2, S. 205-208, 1982.
- [47] T. Stapelkamp, *Screen-und Interfacedesign: Gestaltung und usability für Hard-und Software*, Springer, S. 158-183, 2007.
- [48] A. Cockburn und S. Brewster, "Multimodal feedback for the acquisition of small targets", *Ergonomics*, Bd. 48, Nr.9, S. 1129-1150, 2005.
- [49] E. M. Hennig und T. Sterzing, „Sensitivity mapping of the human foot: thresholds at 30 skin locations“, *Foot & ankle international*, Bd. 30, Nr. 10, S. 986-991, 2009.
- [50] A. Rovers und H. Van Essen, „Guidelines for haptic interpersonal communication applications: an exploration of foot interaction styles“, *Virtual Reality*, Bd. 9, Nr. 2, S. 177-191, 2006.
- [51] „MeVisLab,“ MeVis Medical Solutions AG, URL: <http://www.mevislab.de/> [Zugriff am 21.2.2017].
- [52] „Microsoft Visual Studio 2013,“ Network, Microsoft Developer, URL: [https://msdn.microsoft.com/de-de/library/dd831853\(v=vs.120\).aspx](https://msdn.microsoft.com/de-de/library/dd831853(v=vs.120).aspx) [Zugriff am 21.02.2017].
- [53] „Android Studio,“ Google, URL: <https://developer.android.com/studio/index.html> [Zugriff am 21.02.2017].
- [54] L. Heine und K. Schramm, „Lautes Denken in der Fremdsprachenforschung: Eine Handreichung für die empirische Praxis“, *Synergieeffekte in der Fremdsprachenforschung: Empirische Zugänge, Probleme, Ergebnisse*, S. 167-206, 2007.

- [55] J. Nielson, „nngroup,“ 1. 9. 2014. URL: <https://www.nngroup.com/articles/thinking-aloud-demo-video/> [Zugriff am 23.1.2017].
- [56] G. Mey und K. Mruck, Handbuch qualitative Forschung in der Psychologie, Springer, S. 476-490, 2010.
- [57] T. Boren und J. Ramey, „Thinking aloud: Reconciling theory and practice“, *IEEE transactions on professional communication*, Bd. 43, Nr. 3, S. 261-278, 2000.
- [58] J. Rubin und D. Chisnell, Handbook of usability testing: how to plan, design and conduct effective tests, John Wiley & Son, S. 75-76, 2008.
- [59] S. G. Hart und L. E. Staveland, „Development of NASA-TLX (Task Load Index): Results of empirical and theoretical research“, *Advances in psychology*, Bd. 52, S. 139-183, 1988.
- [60] M. Minge und L. Riedel, „meCUE-Ein modularer Fragebogen zur Erfassung des Nutzungserlebens“, *Mensch & Computer*, S. 89-98, 2013.
- [61] M. Sousa, A. Techmer, A. Steinhage, C. Lauterbach und P. Lukowicz, „Human tracking and identification using a sensitive floor and wearable accelerometers“, *IEEE International Conference of Pervasive Computing and Communications*, S. 166-171, 2013.
- [62] Y. Lou und W. Wu, „A Real-time Personalized Gesture Interaction System Using Wii Remote and Kinect for Tiled-Display Environment.“, *SEKE*, S. 131-136, 2013.
- [63] J. Liu, L. Zhong, J. Wickramasuriya und V. Vasudevan, "uWave: Accelerometer-based personalized gesture recognition and its applications.", *Pervasive and Mobile Computing*, Elsevier, Bd. 5, Nr. 6, S. 657-675, 2009.