

Aus der Universitätsklinik für Allgemeine, Viszeral- und
Transplantationschirurgie Tübingen

**Entwicklung eines telemedizinischen Eingabebereiches
zur Steuerung eines parallelkinematischen
Operationsroboters und Evaluation
verschiedener Eingabehaltungen**

**Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Medizin**

**der Medizinischen Fakultät
der Eberhard Karls Universität
zu Tübingen**

vorgelegt von

Dörflinger, Andreas

2018

Dekan: Professor Dr. I. B. Autenrieth

1. Berichterstatter: Privatdozent Dr. A. Kirschniak
2. Berichterstatter: Privatdozent Dr. S. Kruck

Tag der Disputation: 30.01.2018

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG.....	5
1.1. Entwicklung der Medizintechnik	5
1.2. Abgrenzung herkömmlicher Laparoskopie von SILS und NOTES	6
1.3. Robotik-Systeme in der heutigen Medizin	8
1.4. FLEXMIN als NOTES nutzendes Master-Slave-System	9
1.5. Die Eingabeseite der Telemedizin.....	11
1.5.1. Nicht immersive vs. immersive Eingabekonsole	12
1.6. Steuerung der Endeffektoren	13
1.6.1. Grundlagen der Ergonomie und Intuitivität.....	14
1.7. Wissenschaftliche Zielsetzung	16
2. MATERIAL / METHODEN	17
2.1. Übersicht über die Vorgehensweise.....	17
2.2. Erster Versuch: Vergleich möglicher Ausrichtungen der Eingabeeinheit. 18	
2.2.1. Ziel und Struktur des ersten Versuches	18
2.2.2. Material	19
2.2.3. Versuchsaufbau	20
2.2.4. Versuchsablauf	21
2.2.5. Auswertung der erhobenen Daten	23
2.3. Zweiter Versuch: Vergleich verschiedener Eingabehaltungen am telemedizinischen Eingabebereich.....	24
2.3.1. Ziel und Struktur des zweiten Versuches	24
2.3.2. Material	25
2.3.3. Erklärung der Aufgaben	26
2.3.4. Versuchsaufbau	29
2.3.5. Versuchsablauf	31
2.3.6. Auswertung der erhobenen Daten	32
3. ERGEBNISSE.....	33
3.1. Erster Versuch: Vergleich möglicher Ausrichtungen der Eingabeeinheit. 33	
3.1.1. Zusammensetzung des Probandenkollektivs	33
3.1.2. Auswertung der Gesamtzeit- und Fehlerwerte.....	34
3.1.3. Vergleich der zwei Reihenfolgegruppen.....	40

3.1.4. Ergebnis der Probandenbefragung	40
3.2. Der telemedizinische Eingabebereich	42
3.2.1. Entwicklung des telemedizinischen Eingabebereiches	42
3.2.2. Individuelle Anpassbarkeit	43
3.2.3. Anpassung an weitere Eingabesystemen	45
3.2.4. Hygieneaspekte des telemedizinischen Eingabebereiches	46
3.2.5. Kosten des telemedizinischen Eingabebereiches	47
3.2.6. Transportfähigkeit des telemedizinischen Eingabebereiches.....	47
3.3. Zweiter Versuch: Vergleich verschiedener Eingabehaltungen am telemedizinischen Eingabebereich.....	50
3.3.1. Zusammensetzung des Probandenkollektivs	50
3.3.2. Zeitwerte der Eingabehaltungen	50
3.3.3. Ergebnisse der Probandenbefragung	52
3.3.4. Einflussfaktoren auf die erzielte Gesamtzeit der Probanden.....	54
3.4. Zusammenfassung der Ergebnisse	59
4. DISKUSSION	62
4.1. Erster Versuch: Interpretation der Ergebnisse	62
4.1.1. Interpretation der Gesamtzeit- und Fehlerwerte.....	62
4.1.2. Unterschiede in den zwei Reihenfolgegruppen.....	63
4.1.3. Ergebnis der Probandenbefragung	63
4.1.4. Einschränkungen des ersten Versuches.....	64
4.1.5. Festlegung der Vergleichshaltung für den zweiten Versuch	65
4.2. Der telemedizinische Eingabebereich	66
4.2.1. Vergleich mit aktuellen Eingabekonsolen.....	66
4.2.2. Bewertung der individuellen Anpassbarkeit	70
4.2.3. Verbesserungspotential des Prototypen	72
4.2.4. Einrichten eines telemedizinischen Eingabebereiches	73
4.3. Zweiter Versuch: Interpretation der Ergebnisse	74
4.3.1. Interpretation der Zeitwerte der Eingabehaltungen	74
4.3.2. Ergebnisse der Probandenbefragung	75
4.3.3. Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Gesamtzeit	76
4.3.4. Einschränkungen des zweiten Versuches.....	77

4.3.5. Direkter Vergleich der Eingabehaltungen.....	77
4.4. Ökonomische Aspekte der Telemedizin und Robotik.....	78
4.5. Einordnung der Ergebnisse in den wissenschaftlichen Kenntnisstand....	79
4.6. Zusammenfassende Betrachtung und Schlussfolgerung	81
5. ZUSAMMENFASSUNG	84
6. ABBILDUNGSVERZEICHNIS	85
7. TABELLENVERZEICHNIS	86
8. LITERATURVERZEICHNIS	87
9. ANHANG.....	93
9.1. Tabellen	93
9.2. Fragebogen.....	95
10. ERKLÄRUNG ZUM EIGENANTEIL.....	97
11. DANKSAGUNG	98

Abkürzungsverzeichnis

8P *schwierigster Schwierigkeitsgrad*

16P *mittlerer Schwierigkeitsgrad*

24P *einfachster Schwierigkeitsgrad*

BML *Bildschirmmittellinie*

DFG *Deutsche Forschungsgemeinschaft*

Gr. Kr. *Großer Kreis*

l. o. *Kleiner Kreis links oben*

l. u. *Kleiner Kreis links unten*

LESS *Laparo-Endoscopic-Single-Site-Surgery*

mi. *Kleiner mittlerer Kreis*

NOTES *Natural orifice transluminal endoscopic surgery*

r. o. *Kleiner Kreis rechts oben*

r. u. *Kleiner Kreis rechts unten*

R-LESS *robotergestützte Laparo-Endoscopic-Single-Site-Surgery*

SILS *Single incision laparoscopic surgery*

TCP *Tool center point*

TEM *Transanale endoskopische Mikrochirurgie*

THZ *Tablet-Halterungs-Zentrum*

1. EINLEITUNG

1.1. Entwicklung der Medizintechnik

Die Medizintechnik ist einer der Grundpfeiler der modernen Medizin und mit der Medizin von der Antike bis in die heutige Zeit eng verbunden [1, 2]. Operationen erfolgen heute immer häufiger durch multiple kleine Zugänge statt durch einzelne große Schnitte [3]. Dieses Verfahren, das als Laparoskopie bezeichnet wird, zeigte in den letzten Jahrzehnten klare Vorteile gegenüber der sogenannten offenen Chirurgie [3-5]. Zu diesen Vorteilen zählen geringere postoperative Schmerzen, niedrigere Infektionsraten, geringerer Blutverlust, bessere kosmetische Ergebnisse und eine kürzere postoperative Liegedauer der Patienten [4-17]. Im Bereich der Laparoskopie bringt die Robotik durch immer kleiner und schneller werdende Elektronik neue Möglichkeiten mit sich [18, 19]. Dabei handelt es sich nicht um selbstständig operierende Roboter, sondern um komplexe ferngesteuerte Effektoren. Diese Systeme sollen nach wie vor von Menschen gesteuert werden und dennoch physikalische und physische Limitationen verringern.

Robotergestützte Systeme fanden in den 1980-er-Jahren vor allem aus militärischen Überlegungen ihren Weg in die Medizinbranche [20]. Ursprünglich sollten verwundete Soldaten direkt im Gefechtsgebiet ohne Gefahr für den Operateur telemedizinisch versorgt werden [20]. Der Begriff Telemedizin beschreibt dabei die medizinische Diagnostik und Therapie über eine räumliche Distanz mit technischer Überleitung. Als Meilenstein der telemedizinischen Entwicklung gilt die am 7. September 2001 durchgeführte erste transatlantische telemedizinische Operation [21]. Die Operateure befanden sich dabei in New York und die Patientin in Straßburg [22]. Als Roboter kam der sogenannte „ZEUS®“ der Firma „Computer Motion Inc., USA“ zum Einsatz. Bekannte Vorteile für die Weiterentwicklung von Robotersystemen sind die hohe Präzision ihrer Bewegungen, die nicht vorhandene Ermüdung, die gut sicherzustellende Sterilität und die mögliche physische Distanz zwischen Operateur und Patient [23-26]. Weitere Vorteile der Robotiksysteme sind eine stabile und flexible Kameraführung sowie die Möglichkeit ergonomischere

Arbeitshaltungen einzunehmen [27-30]. Robotiksysteme werden aktuell vor allem in der Urologie, Viszeralchirurgie, Herzchirurgie und Gynäkologie eingesetzt [20, 26, 31-36].

1.2. Abgrenzung herkömmlicher Laparoskopie von SILS und NOTES

In der minimalinvasiven Chirurgie sind heute zwei herkömmliche Laparoskopietechniken und deren Hybridverfahren, das Single incision laparoscopic surgery (SILS) und das Natural orifice transluminal endoscopic surgery (NOTES) zu unterscheiden. Mit beiden Verfahren lassen sich Operationen im menschlichen Situs möglichst minimalinvasiv durchführen [37]. Die herkömmliche Laparoskopie wird über multiple kleine Einschnitte durchgeführt. Dabei werden meist eine Optik und zwei Instrumente mit Hilfe mehrerer Trokare durch die Bauchdecke eingeführt. Die SILS- und NOTES-Techniken versuchen im Vergleich zur herkömmlichen Laparoskopie Einschnitte, Zugangstrauma, postoperative Liegezeit und postoperative Befindlichkeitsstörungen der Patienten zu verbessern [3]. Besonders für Patienten mit hohen kosmetischen Ansprüchen können diese Verfahren eine sehr interessante Option sein [4, 38-42].

Die SILS-Technik wird im Unterschied zu herkömmlicher Laparoskopie über eine einzige künstliche Eröffnung des Körpers, beispielsweise durch den Bauchnabel, durchgeführt und hinterlässt damit für den Patienten kaum sichtbare Operationsnarben [39, 42]. Die SILS-Technik wird heute vor allem bei Appendektomien, Gallenblasenentfernungen, Leistenhernien, Nierenentfernungen, Adipositaschirurgie, kolorektaler Chirurgie, Kinderchirurgie und gynäkologischen sowie urologischen Eingriffen angewendet [4, 15, 16]. Dieses Verfahren ist jedoch aufwendiger zu erlernen und bringt längere Operationszeiten mit sich [42, 43].

Die reine NOTES-Technik nutzt ebenfalls nur eine Inzision, die sich allerdings im Lumen einer natürlichen Körperöffnung bzw. -höhle wie Oesophagus, Magen, Blase, Vagina oder dem Rektum befindet [3]. Einer der Mitbegründer des modernen transanalen NOTES-Verfahrens war der Chirurg Prof. Dr. med.

Gerhard Buess. Er entwickelte die NOTES-Technik in den 1980er-Jahren im Rahmen der „Transanalen endoskopischen Mikrochirurgie“ (TEM) weiter [44, 45]. Heute sind im NOTES- bzw. Hybrid-NOTES-Verfahren die Tumorresektionen durch den Oesophagus und Magen, transanale Kolon- und Sigmoidteilresektionen sowie auch transvaginale Nieren-, Blasen- und Gallenblasenentfernungen möglich [3, 40]. Bei Hybrid-NOTES wird eine zusätzliche Öffnung zur Einführung der Optik geschaffen. Die häufigste im Hybrid-NOTES-Verfahren durchgeführte Operation ist heute die Gallenblasenentfernung [40, 46]. Ein Vorteil des Hybrid-NOTES-Verfahrens gegenüber dem reinen NOTES-Verfahren ist, dass die Operationsabläufe weniger von denen der herkömmlichen Laparoskopie abweichen [3].

Laparoskopische-Endoskopische-Single-Site (LESS) Verfahren sind laut Studien im Vergleich zu herkömmlichen multiport Laparoskopieverfahren die anspruchsvolleren und anstrengenderen Operationsverfahren, da die Operateure nachweislich in belastenderen Arbeitshaltungen operieren müssen [43, 47, 48]. Zudem erschweren sie die Bestimmung der Effektorenlage im Situs [49]. Die ergonomischen Gegebenheiten der LESS könnten durch den Einsatz der Robotik aufgrund der räumlichen Trennung von Operateur und Patient deutlich verbessert werden [17, 18, 37, 49-51]. Zahlreiche Studien zeigen, dass robotergestützte Eingriffe im Vergleich zu herkömmlicher Laparoskopie für den Operateur körperlich und mental weniger belastend sind [17, 27, 52, 53]. Zudem können im Rahmen der robotergestützten Laparoskopischen-Endoskopischen-Single-Site-Surgery (R-LESS) haptisches Feedback, Herabskalierung der Eingabebewegung und die Nutzung von Bildstabilisatoren implementiert werden [3, 18, 54]. Die R-LESS bietet außerdem die Möglichkeit der Triangulation [49]. Mit Hilfe der Triangulation erfolgt die Bestimmung der Lage der Effektoren im Situs. Die Durchführung der Operation wird durch die verbesserte Orientierung im Situs deutlich erleichtert. Die meisten dieser Vorteile sind in modernen Systemen bereits heute umgesetzt oder in naher Zukunft realisierbar [52, 54].

1.3. Robotik-Systeme in der heutigen Medizin

Eine bestimmte Bauart medizinischer Roboter werden Master-Slave-Systeme genannt. Der Master ist eine Bedieneinheit, an welcher der Operateur die Eingabe tätigt [55]. Der Slave ist der Endeffektor, der die vom Master angewiesenen Handlungen ausführt [55]. Vereinfacht ausgedrückt ist es ein Fernsteuerungssystem mit Bildrückübertragung. Der Master ist in Abb. 1 am Beispiel des wohl bekanntesten Master-Slave-Robotik-Operationssystems, dem aktuellen „da Vinci Si[®]“ System von Intuitive Surgical Inc. (Kalifornien, USA), dargestellt.



Abb. 1: Master-Eingabekonsolle des „da Vinci[®]“-Operationssystems. Links ist eine Nahaufnahme der Arbeitshaltung am „da Vinci S[®]“-Master zu sehen. Im Vergleich dazu ist rechts eine Arbeitshaltung am „da Vinci Si[®]“-Master aus aktueller Fachliteratur abgebildet [56].

Es gab und gibt weitere klinisch erprobte Robotik Systeme [55]. Der 1995 erschienene „ZEUS[®]“ von „Computer Motion“ war ebenfalls ein Master-Slave-System und damals ein direkter „da Vinci[®]“-Konkurrent. Nach der Fusion von Computer Motion und Intuitive Surgical Inc. wurde die Entwicklung des „ZEUS[®]“

eingestellt [23]. Weitere in Entwicklung befindliche Master-Slave-Robotersysteme sind der „MiroSurge[®]“ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt, das „Raven Surgical System“ der University of California, der „MASTER[®]“ der Nanyang Technological University China, der „Miniature In Vivo Robot[®]“ der University of Nebraska/Lincoln und der „Telelap ALF-X“ der SOFAR S.p.A Italy [18, 19, 23, 29, 46, 54, 55, 57, 58]. Alle diese Systeme nutzen das beschriebene Master-Slave-Grundprinzip.

1.4. FLEXMIN als NOTES nutzendes Master-Slave-System

Das FLEXMIN-Projekt, genauer „Flexibilitätserweiterung in der Minimalinvasiven Chirurgie“, ist eine von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderte Kooperation der Technischen Universität Darmstadt und des Universitätsklinikums Tübingen. Es handelt sich dabei um die Entwicklung von Strategien und Konzepten intrakorporaler Mikromanipulatoren für minimalinvasive Eingriffe im Bauchraum. In diesem Rahmen wurde ein Master-Slave-Telemanipulationssystem entwickelt und gebaut. Neuartig ist die Verwendung von parallelkinematischen Steuerungsanteilen. Diese haben eine erhöhte Steifigkeit im Vergleich zu Kabelzugsystemen. Es können so größere Kräfte am Endeffektor ausgeübt und einwirkende Kräfte besser erfasst werden, was die Rückgabe eines haptischen Feedbacks an den Benutzer ermöglicht [59].

Die angestrebte Operation ist eine in reinem NOTES-Verfahren durchgeführte transanale Entfernung des Sigmoids. Hierfür wird dem Patienten das starre Rohr mit der Spitze des Slaves rektal eingeführt. Die Einführung des Systems durch eine ausreichend große Hautinzision soll im Laufe der Entwicklung ebenfalls möglich werden. Operiert wird mit zwei Manipulatoren (Abb. 2 und Abb. 3). Das eingeführte Basisrohr hat einen Durchmesser von 40 mm, eine Länge von 240 mm und orientiert sich damit an den Abmessungen üblicher TEM-Rohre. Auf dieser im Durchmesser 40 mm großen Kreisfläche finden ein Ø 11 mm breiter Kamerakanal, ein ebenfalls Ø 11 mm breiter Arbeitskanal und sechs Kanäle für die jeweils drei parallelkinematischen Stangen der beiden Endeffektoren Platz (Abb. 2 und Abb. 3).

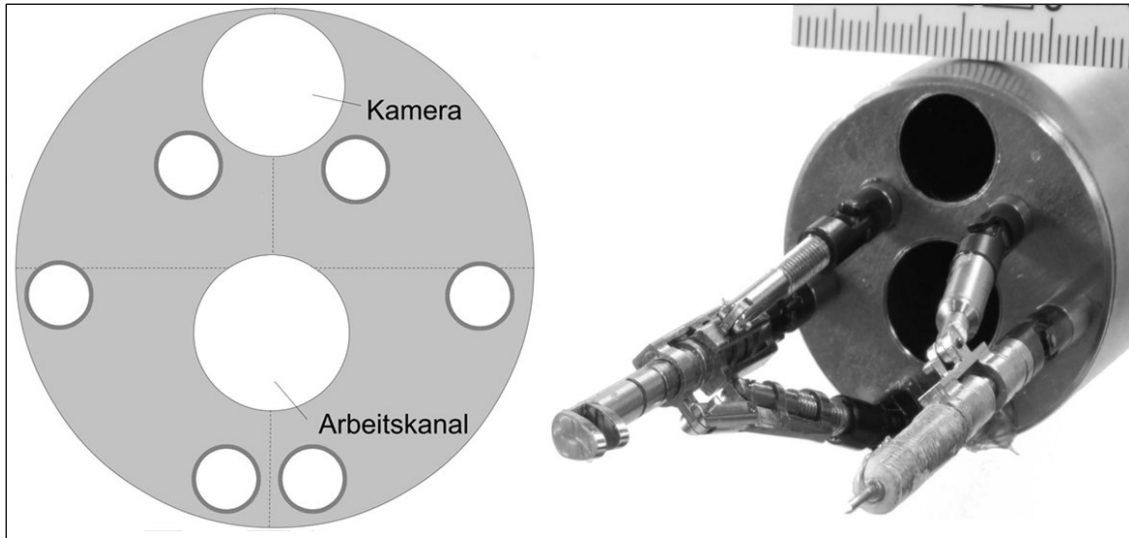


Abb. 2: Frontalansicht FLEXMIN-Roboter-Slave-Einheit. Durchmesser des Rohres = 40mm. Durchmesser Kamerakanal = 11 mm. Durchmesser Arbeitskanal = 11 mm. Die sechs kleinen, symmetrisch angeordneten Öffnungen (links) beherbergen die parallelkinematischen Stangen (rechts). Mit freundlicher Genehmigung der TU Darmstadt, Institut für EMK [59].

Der Antrieb dieser parallelkinematischen Stangen liegt extrakorporal. Dadurch kommen intrakorporal nur passive Komponenten zum Einsatz. Dies erleichtert die Sterilisierbarkeit der Teile mit direktem Patientenkontakt und spart Platz ein. Eine parallelkinematische Einheit besteht aus drei parallel angeordneten Stangen und dient der Bewegung jeweils eines Greifers (Abb. 2 und Abb. 3). Diese parallelkinematischen Stangen können simultan vor- und zurückbewegt werden und so die Orientierung der jeweiligen Effektorenspitze im Raum verändern. Die beiden Endeffektoren sollen nach Abschluss der Entwicklungsarbeit fünf Freiheitsgrade besitzen. Der Aktionsradius des FLEXMIN-Roboters soll dann einen Arbeitsraum von 40x40x60 mm, also 96 cm³ umfassen. In jedem Punkt dieses Arbeitsraumes sollen Kräfte von 0-5 N ausgeübt werden können.

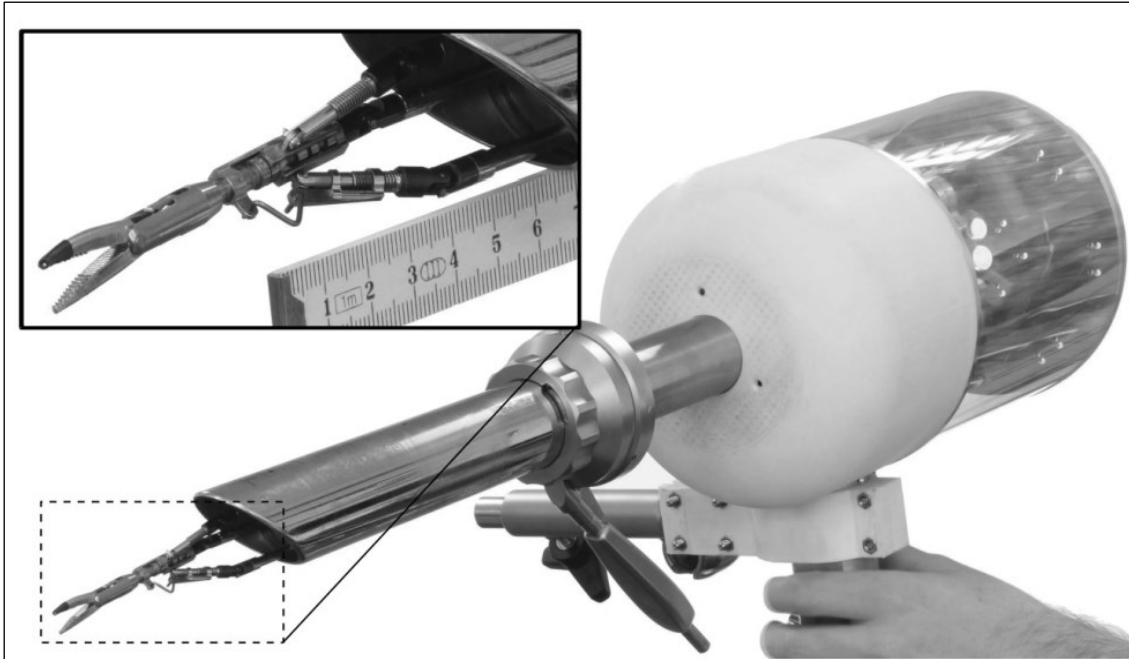


Abb. 3: FLEXMIN-Roboter-Slave-Einheit. Zu sehen ist die FLEXMIN-Slave-Einheit mit nur einem Effektor links im Bild. Mittig im Bild ist das im Durchmesser 4 cm breite und starre Rohr erkennbar. Mit freundlicher Genehmigung der TU Darmstadt, Institut für EMK [60].

1.5. Die Eingabeseite der Telemedizin

Verschiedene Quellen zeigen, dass durch die Verwendung von Operationsrobotern die physische und psychische Belastung der Operateure abnimmt und so beispielsweise weniger Muskelschmerzen unter den Operateuren auftreten [5, 17, 43, 61]. Dies beruht auch auf der freieren Konfiguration des Arbeitsplatzes. Zudem sind laparoskopische Operationsverfahren für den Chirurgen nachweislich körperlich belastend [5, 27, 33, 57, 61, 62]. Die telechirurgischen Robotersysteme können auch zur Verminderung laparoskopischer Einschränkungen beitragen. Dies kann beispielsweise durch erhöhte Beweglichkeit, Korrektur invertierter Instrumentenausrichtung und durch Tremor-Kompensation erfolgen [17, 26, 63, 64]. Die Slave-Einheit wird von der Mastereinheit ferngesteuert. Der Master kann sich auch in großer räumlicher Entfernung vom Slave befinden. Voraussetzung dafür ist jedoch eine verzögerungsfreie und konstante Datenübermittlung.

1.5.1. Nicht immersive vs. immersive Eingabekonsole

Prinzipiell können zwei Typen von Eingabekonsolen, die offene und die eher abgeschlossene Eingabekonsole, unterschieden werden. Die abgeschlossene Eingabekonsole wird auch als „immersive“ bezeichnet. Der Begriff „immersiv“ beschreibt dabei ein Eingabekonzept, welches den Benutzer von der Außenwelt abschirmt.

Robotiksysteme, die ein offenes und nicht immersives Eingabekonzept nutzen, sind z.B. der MiroSurge des Deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt und der Raven Surgical Robot® der University of Santa Cruz (Kalifornien, USA) [54, 65]. In Abb. 4 ist ein nicht immersives Eingabekonzept zu sehen. Der bekannteste Vertreter einer immersiven Eingabekonsole ist das da Vinci® System von Intuitive Surgical (Kalifornien, USA) [29, 36].

Da beide Konsolen Vor- und Nachteile mit sich bringen, ist in Tabelle 1 ein Überblick der grundlegenden Unterschiede aufgeführt. In der Literatur gibt es sehr wenige Grundlagen auf diesem Gebiet und die Zusammenstellung der Tabelle stützt sich auf die grundsätzlichen Überlegungen des Autors. Im Rahmen des FLEXMIN-Projekts fiel die Entscheidung aufgrund der geringeren Kommunikationseinschränkung des OP-Teams, der aktuell geringeren Kosten und der leichteren Austauschbarkeit der Baugruppen auf die Anwendung einer nicht immersiven Eingabeeinheit.

Tabelle 1: Grundlegende Unterschiede immersiver und nicht immersiver Eingabe.

Eigenschaften:	nicht immersiv	immersiv
3D-fähige Anzeige	möglich	möglich
High-Definition Anzeige	möglich	möglich
Kosten der Anzeigeeinheit	geringer	höher
Störlichtanfälligkeit der Anzeige	möglich	nein
Ausprägung der Immersivität	gering	hoch
Intuitive Eingabeerfahrung	möglich	möglich
Kommunikation des OP-Teams	ähnlich Laparoskopie	erschwert
Umsetzbarkeit verschiedener Haltungen	möglich	möglich
Anpassbarkeit an Operateur	möglich	möglich
Haptisches Feedback	möglich	möglich
Freie Konfiguration der Teile im Raum	möglich	erschwert

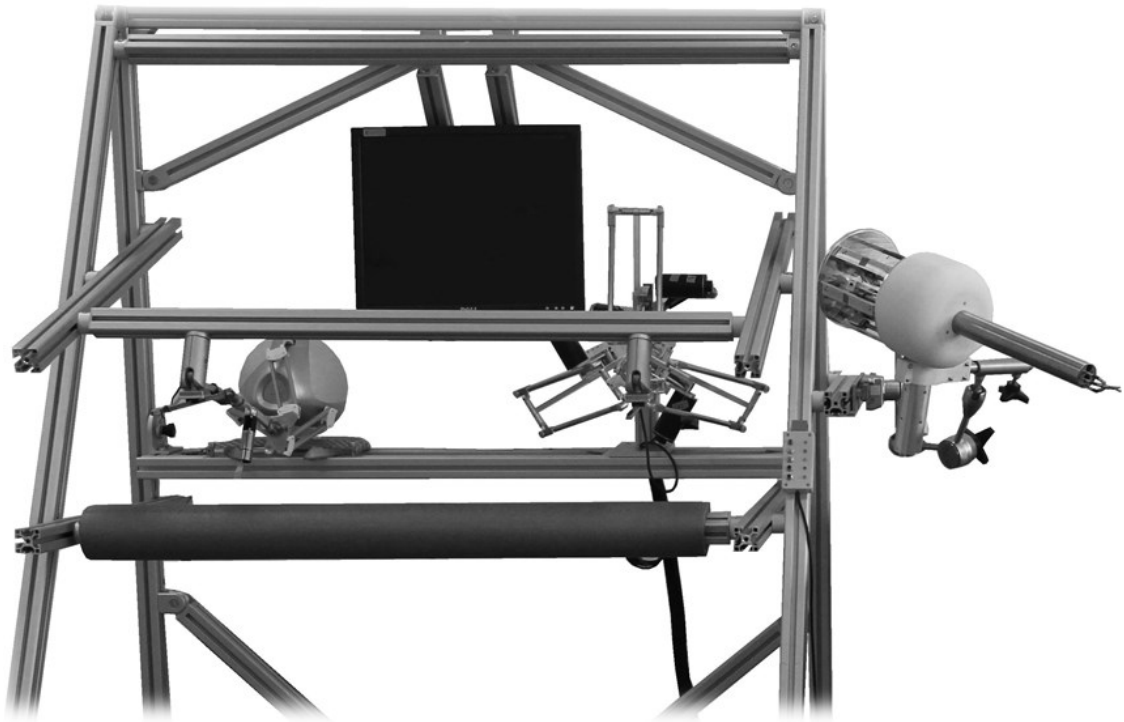


Abb. 4: FLEXMIN-Master- und Slave der TU Darmstadt. Links im Bild die nicht immersive Eingabeeinheit (Master). Rechts im Bild der Endeffektor (Slave). Mit freundlicher Genehmigung der TU Darmstadt, Institut für EMK. Zur besseren Veranschaulichung wurde diese Abbildung digital nachbearbeitet.

1.6. Steuerung der Endeffektoren

Die beiden Greifer der Slave-Einheit werden vom Operateur mit zwei Eingabegeräten gesteuert, diese müssen dazu eine dreidimensionale Eingabe ermöglichen. An diese 3D-Eingabegeräte wird im Fall des FLEXMIN-Projektes ein Eingabestift angebracht, der von einem Medizintechnikstudenten im Rahmen seiner Bachelorarbeit entwickelt und gebaut wurde (Abb. 5 und Abb. 6) [66]. Dieser Stift hat außer den räumlichen Bewegungsrichtungen in X-, Y- und Z-Richtung eine zusätzliche Rotationsfähigkeit. Dies wird durch die Aufhängung über zwei Kardangelenke ermöglicht. Zwei pinzettenartige Taster sollen die präzise Steuerung der Greifbewegung der Endeffektoren ermöglichen [66].



Abb. 5: Am 3D-Eingabegerät montierter Stift-Pinzetten-Hybrid. Stift-Pinzetten-Hybrid zur Bedienung des 3D-Eingabesystems. Mit freundlicher Genehmigung von Gregor Mayer-Ullmann [66]. Zur besseren Veranschaulichung wurde diese Abbildung digital nachbearbeitet.

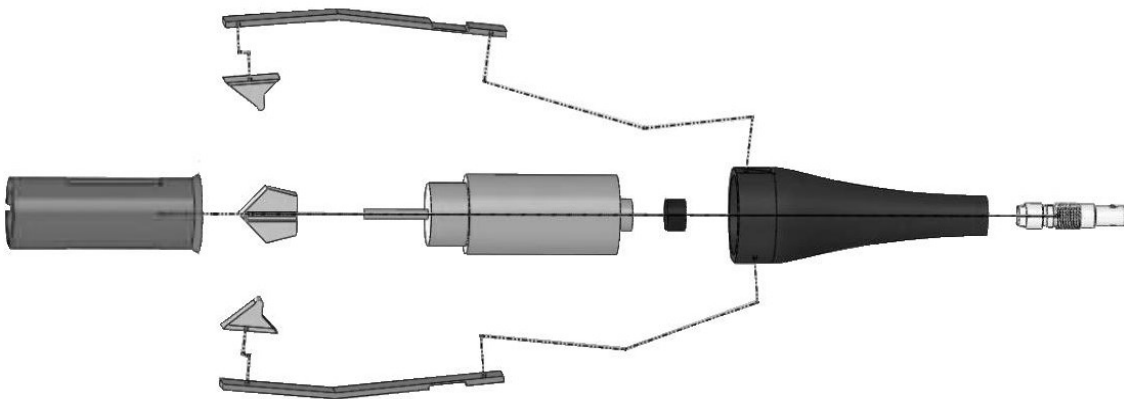


Abb. 6: Explosionszeichnung des Stift-Pinzetten-Hybriden. Zu sehen sind die Einzelteile des Stift-Pinzetten-Hybrid. Mit freundlicher Genehmigung von Gregor Mayer-Ullmann [66]. Zur besseren Veranschaulichung wurde diese Abbildung digital nachbearbeitet.

1.6.1. Grundlagen der Ergonomie und Intuitivität

Ergonomie ist die Wissenschaft der Anpassung von Technik an den Menschen zur Steigerung der Effizienz, Sicherheit und Komfortabilität von Arbeitsabläufen [67, 68]. Operativ tätige Ärzte werden täglich mit den ergonomischen Gegebenheiten ihrer Arbeitsumgebung und Werkzeugen konfrontiert [47]. Für die Gesundheit des Operators und der Patienten sollte die Ergonomie daher bei der Entwicklung neuer Systeme unbedingt bedacht werden [5, 48, 61, 69-73]. Das Wissen um ergonomische Grundlagen unter Anwendern und Entwicklern ist allerdings gering; dementsprechend zeigen Umfragen unter Operateuren ein eindeutiges Interesse an ergonomischen Grundkenntnissen [71, 74-78].

Verschiedene Veröffentlichungen befassen sich mit häufigen Fehlhaltungen im Operations- und Arbeitsalltag und beschreiben entsprechende Lösungsansätze [5, 48, 67, 71, 73, 78-80]. Auch im Zusammenhang mit Robotersystemen werden ungünstige und zu Schmerzen führende Eingabehaltungen beschrieben [37, 72,

78]. Die Möglichkeiten zur Arbeitsplatzanpassung und zu intraoperativen Körperhaltungswechseln spielen eine wichtige Rolle in der Prävention von Ermüdung und Muskelschmerzen des Operateurs [71, 81-83]. Die Grundhaltung des Operateurs am Eingabebereich sollte so gewählt werden, dass die muskuläre Belastung minimal ist [76, 80]. Speziell statische Haltearbeit, wie sie häufig bei laparoskopischem Operieren auftritt, führt zu Muskelverspannungen und sollte nach Möglichkeit vermieden werden [75, 76, 83-85]. Vielen Operateuren ist die OP-Tischhöhe nicht variabel genug einstellbar und die Monitorpositionierung wird oft als ungünstig empfunden. Dies kann Ursache dauerhafter muskulärer Anspannung und Schmerzen sein [71, 75, 81]. Der Monitor sollte laut aktueller Empfehlungen zentral vor dem Operateur platziert werden [67, 75, 86, 87]. Je nach Studie wird eine 15°-45° abwärts gerichtete Blickachse empfohlen [71, 76, 87-89]. Der Monitor soll sich dabei fast auf Höhe des Operationsfelds befinden, dies entspricht bei robotergestützten Systemen der Höhe der Eingabemodule [67]. Bei der Konfiguration des Eingabebereiches sollte die Auge-Hand-Ziel-Achse eingehalten werden, wobei die parallel verlaufende Blick- und Arbeitsachse die Intuitivität verbessern soll [67, 86, 87]. Die Entfernung zwischen Auge und Monitor ist von Monitorgröße und Auflösung abhängig und als grober Richtwert werden 80-120 cm angegeben [67, 86]. Eine aufrechte Haltung ist sowohl im Sitzen als auch im Stehen einzuhalten, um besonders degenerativen Wirbelsäulenveränderungen vorzubeugen [71]. In der Grundhaltung sind die Ellenbogen bzw. Unterarme bei entspanntem Schultergürtel und aufrechtem Rücken auf den Armablagen abgelegt [71]. Dabei sollten sich die Unterarme zwischen Pro- und Supination befinden und die Handgelenke nicht nach ulnar oder radial abgewinkelt sein [81].

Die korrekte Positionierung von Fußpedalen ist ebenfalls von Bedeutung, denn die Pedalnutzung wird von vielen Operateuren ebenfalls als unkomfortabel empfunden [75, 77, 81]. Die Fußpedale sollten an der Arbeitsrichtung des Oberkörpers orientiert sein und möglichst nahe der Füße platziert werden [71].

1.7. Wissenschaftliche Zielsetzung

Das Ziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist die Entwicklung eines telemedizinischen Eingabebereiches und der Vergleich verschiedener Eingabehaltungen des Anwenders an diesem.

In einem ersten Versuch werden verschiedene als intuitiv und ergonomisch eingeschätzte Eingabehaltungen verglichen. Auf Basis der Literaturrecherche und der Ergebnisse dieses ersten Versuches wird dann ein Prototyp des telemedizinischen Eingabebereiches konstruiert und gebaut.

An diesem Prototyp sollen in einem weiteren Versuch Unterschiede der aus dem ersten Versuch hervorgegangenen Eingabehaltung und einer der laparoskopischen Sigmaresektion ähnlichen Chirurgenhaltung untersucht werden. Dabei wird die Eignung der Eingabehaltung sowohl anhand der resultierenden Zeitwerte als auch anhand der mittels Fragebogen erhobenen Ergonomie- und Intuitivitätswerte beurteilt. Der Einfluss bestehender individueller Vorerfahrungen der Probanden auf die erzielten Ergebnisse soll ebenfalls erhoben und betrachtet werden.

Darüber hinaus soll auf Basis dieser Versuche, den Erfahrungen aus der Konstruktion des Eingabebereiches und unter Einbeziehung aktueller Literatur eine orientierende Empfehlung zur Gestaltung der Eingabehaltung an einem nicht immersiven telemedizinischen Eingabebereiches abgegeben werden.

Abschließend sollen die gewonnenen Erkenntnisse in den Kontext der aktuellen Literatur eingeordnet werden. Dabei wird auf die Bereiche telemedizinische Operationen und Robotik sowie intuitives und ergonomisches Arbeiten eingegangen und eine zusammenfassende Schlussfolgerung gezogen.

2. MATERIAL / METHODEN

2.1. Übersicht über die Vorgehensweise

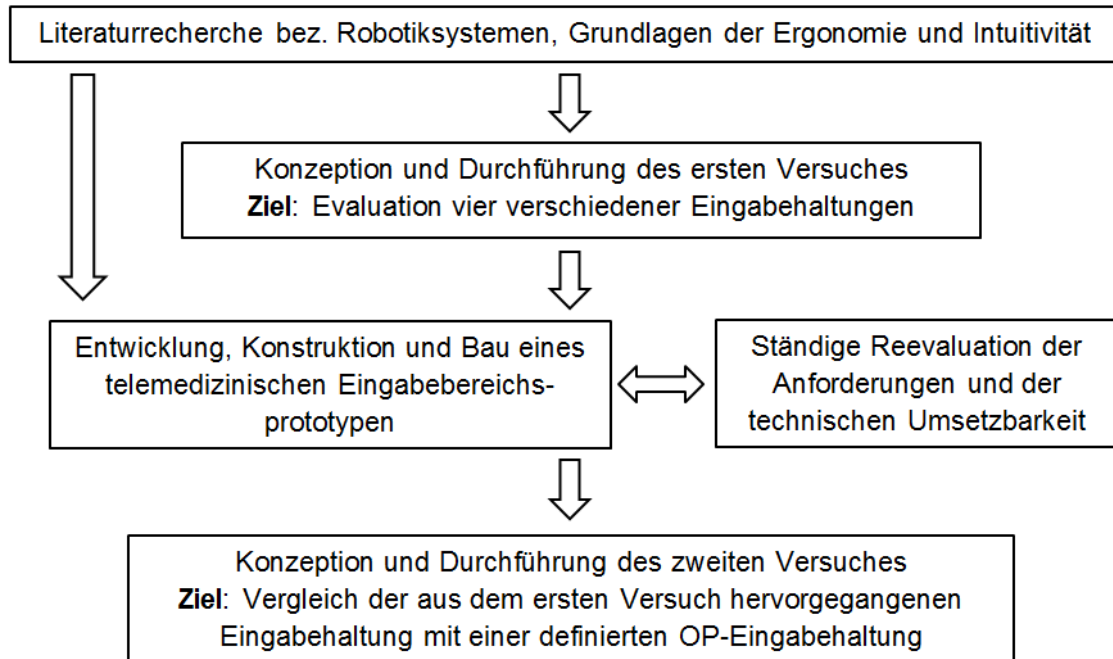


Abb. 7: Vorgehensweise im Rahmen der Studie.

Nach der Literaturrecherche bezüglich aktueller Robotiksysteme und deren Eingabeeinheiten sowie Abwägung zwischen immersivem und nicht immersivem Design folgt die Recherche bezüglich Grundlagen der Ergonomie und Intuitivität. Auf Basis der gewonnenen Informationen erfolgt die Ausarbeitung und Durchführung des ersten Versuches. Dabei werden verschiedene als ergonomisch und intuitiv anzusehende Eingabehaltungen im Rahmen einer Probandenstudie anhand von Zeit- und Fehlerwerten verglichen und die subjektive Erfahrung der Probanden erfasst. Auf Basis der Recherche und Ergebnisse des ersten Versuches wird ein Prototyp konstruiert, gebaut und innerhalb der Arbeitsgruppe reevaluiert. Am fertigen Prototyp wird dann der zweite Versuch durchgeführt. In diesem wird die aus dem ersten Versuch hervorgegangene Eingabehaltung mit einer der laparoskopischen Sigmaresektion ähnliche OP-Eingabehaltung verglichen. Der Vergleich erfolgt sowohl in stehender als auch in sitzender Körperhaltung.

2.2. Erster Versuch: Vergleich möglicher Ausrichtungen der Eingabeeinheit

2.2.1. Ziel und Struktur des ersten Versuches

Ziel des Versuchs ist der Vergleich verschiedener Handgelenks- und Armpositionen hinsichtlich ihrer möglichen Präzision der Bewegung und ihrer Ergonomie. Die Haltung, die sich als am günstigsten herausstellt, wird in einem zweiten Versuch mit einer weiteren Eingabehaltung verglichen werden. Es wird ein Versuchsaufbau verwendet, dessen zentraler Eingabebestandteil ein Graphiktablett ist (Abb. 8). Es werden dabei verschiedene Neigungsgrade der Ausrichtung dieses Tablets und damit des Handgelenks verglichen (Abb. 10).

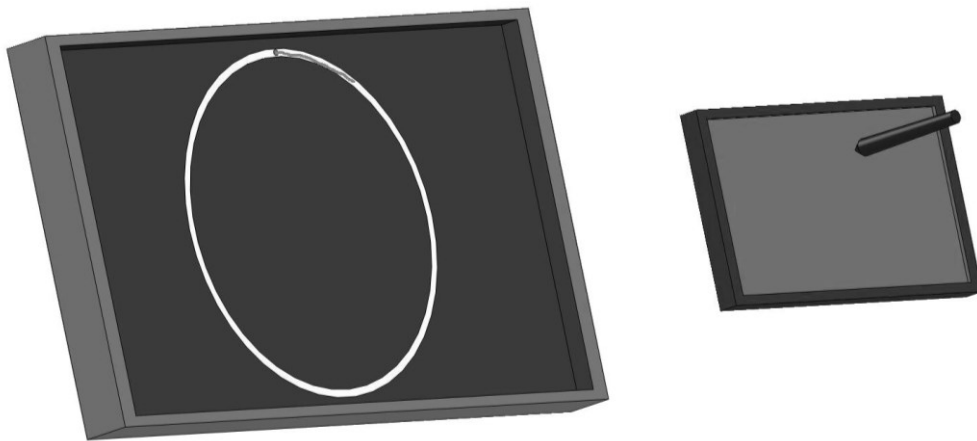


Abb. 8: Darstellung von Monitor und Graphiktablett. Zu sehen ist der um 30° nach hinten geneigte Monitor (links) und das Graphiktablett (rechts).

In Tabelle 2 sind die Einstellungen des Tablets aufgeführt. Die Winkel entsprechen der Kippung des Graphiktablets. Die zusätzliche 20°-Rotation in der 60°/20°-Position ist in Draufsicht gegen den Uhrzeigersinn gerichtet. Die laterale Seite des Graphiktablets wird dabei in Richtung des Monitors gedreht.

Tabelle 2: Tablet-Einstellungen im ersten Versuch.

Haltung	Winkel β	Rotation in Draufsicht gegen Uhrzeigersinn
45°	45°	0°
60°	60°	0°
75°	75°	0°
60°/20°	60°	20°

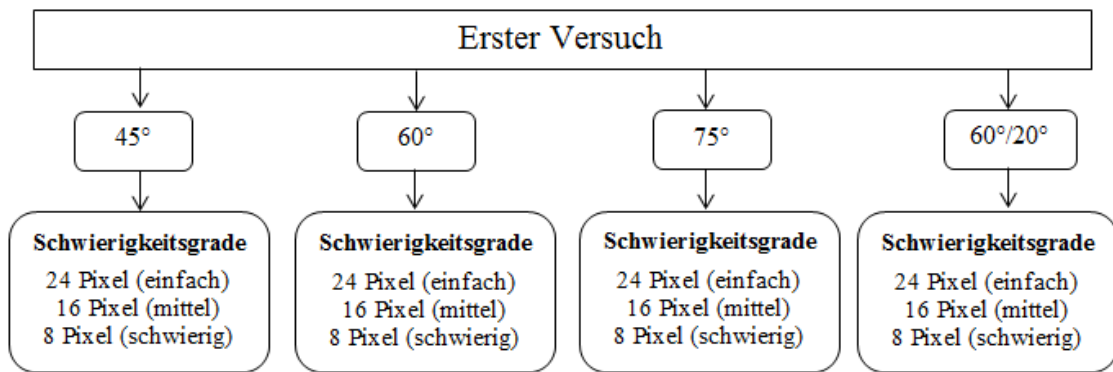


Abb. 9: Übersicht der Struktur des ersten Versuches. Es handelt sich um die vier Haltungen und die jeweiligen Schwierigkeitsgrade mit 24, 16 und 8 Pixel breiten Kreisbahnen.

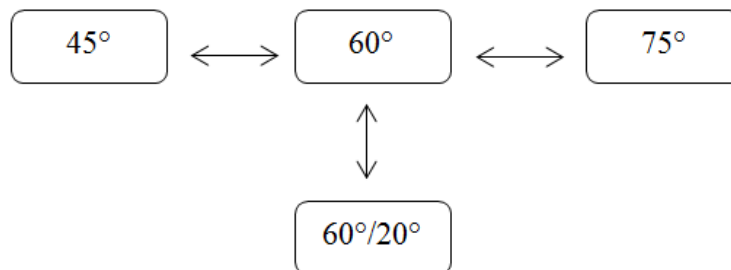


Abb. 10: In dieser Weise werden die Eingabehaltungen untereinander verglichen.

2.2.2. Material

Tabelle 23 im Anhang gibt einen Überblick über die benötigten Materialien. Tabelle 24 im Anhang zeigt die Maße der digitalen Zeichenvorlagen. Dabei gilt als Bezugspunkt die linke obere Ecke des Monitors. Die jeweilige Zeichenvorlage für jede der drei Schwierigkeitsgrade ist im Folgenden in Abb. 11 zu sehen. Diese Vorlagen werden von den Probanden während des ersten Versuches möglichst fehlerfrei nachgefahren.

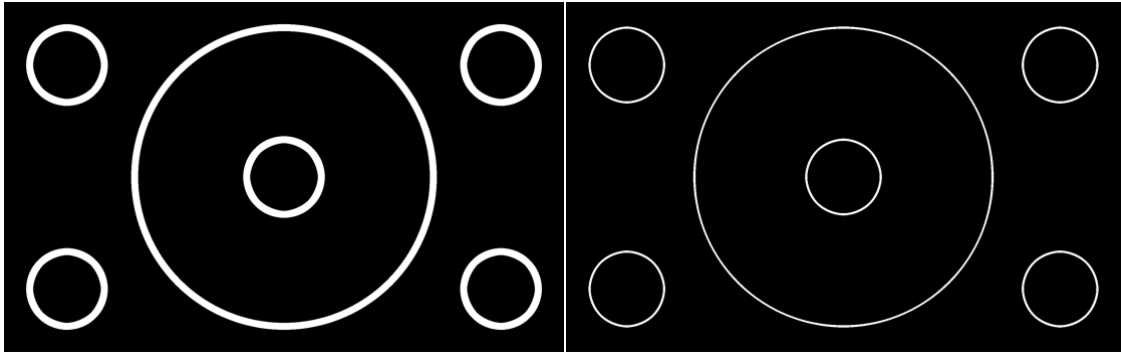


Abb. 11: Erster Versuch: Digitale Zeichenvorlagen. Zu sehen sind (links) eine einfache (24 Pixel) und (rechts) eine schwierige (8 Pixel) Zeichenvorlage. Diese Kreise sollen die Probanden im ersten Versuch mit einer 3 Pixel breiten roten Linie im Uhrzeigersinn nachfahren.

2.2.3. Versuchsaufbau

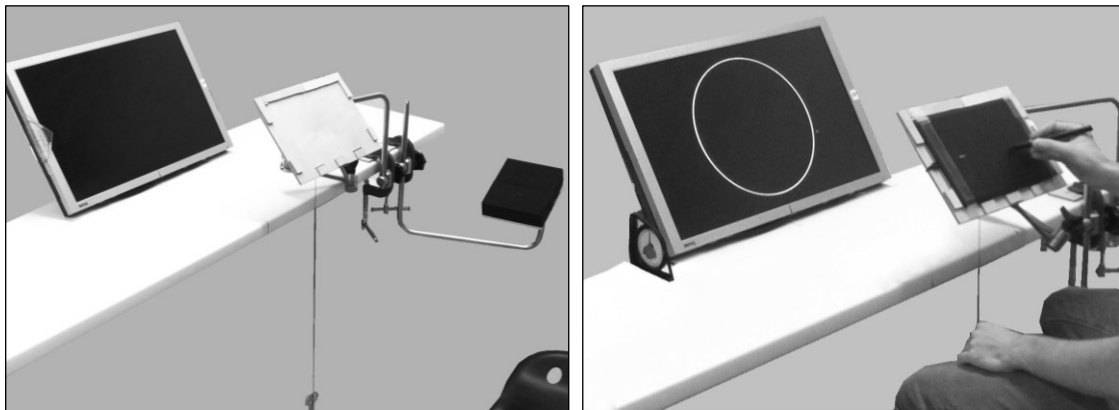


Abb. 12: Erster Versuch: Aufbau. Links ist der Versuchsaufbau mit Monitor, Tablet-Halterung und Armablage abgebildet. Rechts mit einem Probanden während der Durchführung des Versuchs. Zur besseren Veranschaulichung wurden diese Abbildungen digital nachbearbeitet.

Dieser Versuch ist nur auf Rechtshänder ausgelegt. Der Bildschirm wird um 30° nach hinten gekippt. Dadurch entsteht ein Winkel von 60° zwischen Bildschirm und Tischebene (Abb. 8 und Abb. 12). Das Graphiktablet wird durch einen OP-Haltearm in 30 cm Entfernung vom Monitor fixiert und ist 1:1 mit dessen Bildschirmpunkten zu koppeln. Das Zentrum des Tablets muss dabei dem Zentrum des Monitors entsprechen. Die Armablage (Abb. 12, links) wird ebenfalls an einem Haltearm zur Rechten des Probanden montiert. Der Proband sitzt nun mittig vor dem Bildschirm mit dem rechten Ellenbogen nah am Körper und auf der Armablage ruhend. Der Stift sollte dabei nur an der Markierung, die sich im Bereich der Knöpfe befindet, gegriffen werden und die Stiftspitze in der Mitte des Graphiktablets platziert werden. Nun wird die

Sitzhöhe so eingestellt, dass die Blickachse im 90° Winkel auf die Displayoberfläche trifft. Die Blickachse des Probanden sollte dabei mit einem Inklinationswinkel von 30° nach unten gerichtet sein. Im nächsten Schritt wird die Armablage angepasst. Verlieren die Füße den Bodenkontakt, so wird ein Hocker bereitgestellt. Für den Vergleich der vier Eingabehaltungen wird das Tablet jeweils nach den Werten der im Anhang abgebildeten Tabelle 25 eingestellt.

2.2.4. Versuchsablauf

In jeder Haltung werden drei Schwierigkeitsgrade durchlaufen. Die Kreise werden jeweils einzeln und in folgender Reihenfolge eingeblendet:

1. Großer Kreis (Gr. Kr.) → 2. Kleiner mittlerer Kreis (mi.) → 3. Kleiner Kreis rechts oben (r. o.) → 4. Kleiner Kreis rechts unten (r. u.) → 5. Kleiner Kreis links unten (l. u.) → 6. Kleiner Kreis links oben (l. o.). Es ist immer nur ein Kreis sichtbar.

Für jeden Kreis werden Zeit und Fehleranzahl erfasst. Insgesamt werden die sechs Kreise in drei ansteigenden Schwierigkeitsgraden durchlaufen. Danach werden dem Probanden folgende drei Fragen vorgelegt: „Waren die großen oder die kleinen Kreise leichter nachzufahren?“, „War einer der kleinen Kreise für Sie subjektiv schwieriger nachzufahren als die anderen kleinen Kreise? Wenn ja; welcher war dies?“. Nach einer mindestens 30-minütigen Pause wird die nächste Eingabehaltung getestet. Um nun die weiteren Tablet-Positionen zu testen wird der oben beschriebene Prozess mit den noch fehlenden Tablet-Einstellungen erneut durchgeführt. Zum besseren Verständnis des Versuchsablaufes dient das Flussdiagramm des ersten Versuches (Abb. 13).

Nach Durchlauf aller Haltungen wird folgende Frage gestellt: „Welche der Eingabehaltungen würden Sie nun, auch in Anbetracht einer längeren Nutzungsdauer, bevorzugen?“.

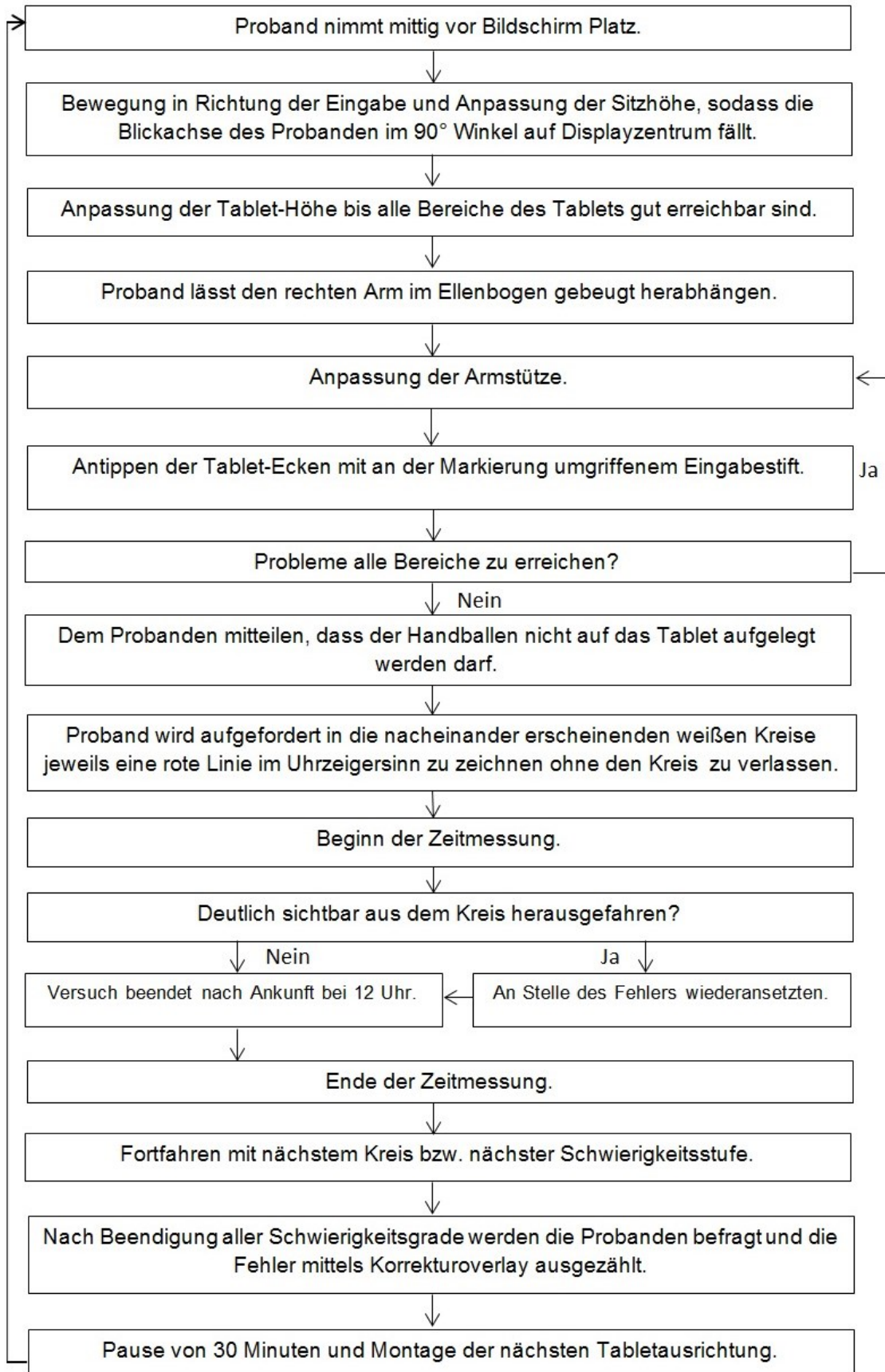


Abb. 13: Erster Versuch: Flussdiagramm des Versuchsablaufes.

Gruppenbildung

Fünf der zehn Probanden durchlaufen die Eingabehaltung in der Reihenfolge: 45°, 60°, 75° und 60°/20°. Die anderen fünf in der umgekehrten Reihenfolge: 60°/20°, 75°, 60° und 45°.

2.2.5. Auswertung der erhobenen Daten

Um die verschiedenen Eingabehaltungen zu vergleichen wird zum einen die benötigte Zeit für das Zeichnen der einzelnen Kreise gemessen. Zum anderen wird mittels einer Korrekturschablone die Fehleranzahl je Kreis ermittelt (Abb. 14). Es wird für jeden Schwierigkeitsgrad eine angepasste Korrekturschablone benötigt. Diese Korrekturschablone wird über eine sogenannte Ebene im Programm Photoshop (Adobe Systems® Software Ireland Ltd.) realisiert. Sie bestehen aus sechs schwarzen Kreisen, die die sechs weißen Kreise der jeweiligen Zeichenvorlage überlagern (Abb. 14). Diese schwarzen Überlagerungskreise sind innen und außen um zwei Pixel breiter als die weißen von den Probanden nachzufahrenden Kreise. Der vom Probanden erzeugte rote Strich ist drei Pixel breit und so erscheint nach Überlagerung mit den schwarzen Kreisen der Korrekturvorgabe nur dann ein roter Punkt, wenn mindestens drei Pixel weit aus der weißen Zeichenvorgabe herausgefahren wird. Dies ist die Definition von einem Fehler. Demzufolge ist der Bildschirm nach Überlagerung mit der Korrekturschablone schwarz, wenn der Proband keine Fehler macht. Man erhält so Zeit- und Fehlerwerte für jeden Probanden, jede Eingabehaltung und jeden nachgefahrenen Kreis. Der Vergleich der Haltungen erfolgt nach dem in Abb. 10 gezeigten Schema.

Nach jedem Durchlauf einer Eingabehaltung werden dem Probanden standardisierte Mehrfachauswahlfragen zur subjektiven Einschätzung der Haltung vorgelegt (Kapitel 2.2.4 und Abb. 13). Dabei wird ihnen auch die Möglichkeit gegeben einen freien Kommentar zu den jeweiligen Eingabehaltungen abzugeben; diese werden zusätzlich zu den Zeit- und Fehlerwerten im Ergebnissteil betrachtet. Die Fragen werden den Probanden in standardisierter Textform vorgelegt und die Antworten direkt in ein Excel-Formular eingetragen.

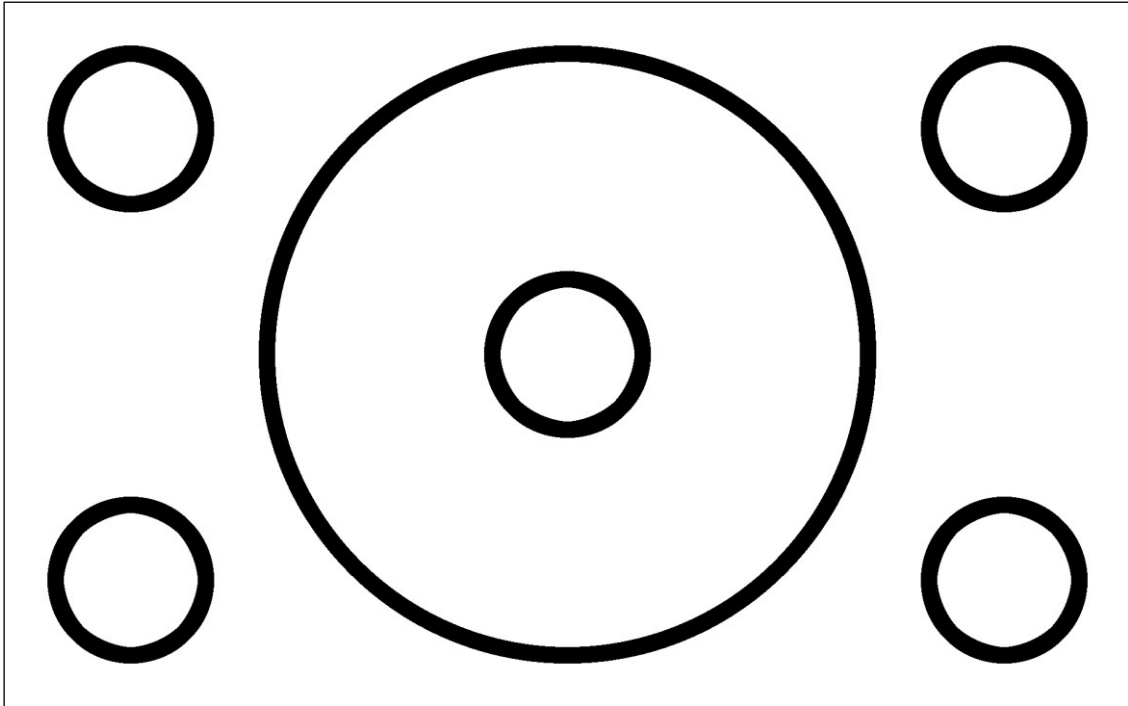


Abb. 14: Erster Versuch: Korrekturschablone für den mittleren Schwierigkeitsgrad. Die weiße Fläche ist transparent. Die hier 20 Pixel breiten Kreisbahnen werden über die 16 Pixel breiten Kreise der Zeichenvorlagen gelegt und die Fehler werden deutlicher sichtbar.

2.3. Zweiter Versuch: Vergleich verschiedener Eingabehaltungen am telemedizinischen Eingabebereich

2.3.1. Ziel und Struktur des zweiten Versuches

Das Ziel dieses Versuches ist der Vergleich zweier Eingabehaltungen. Zum einen die „OP-Haltung“, die sich an der Haltung des Operateurs während der laparoskopischen Sigmaresektion orientiert. In dieser Haltung arbeitet der Operateur stärker nach unten und nicht parallel zur Blickachse. Zum anderen die aus dem ersten Versuch bekannte „60°/20°-Eingabehaltung“ in der der Operateur entlang seiner Blickachse in Richtung Bildschirmzentrum arbeitet.

Es werden zudem zwei, zu den sitzenden Haltungen korrespondierenden, stehenden Eingabehaltungen getestet. Die Abb. 15 und Abb. 16 zeigen je eine Übersicht der Eingabehaltungsvergleiche zum besseren Verständnis.

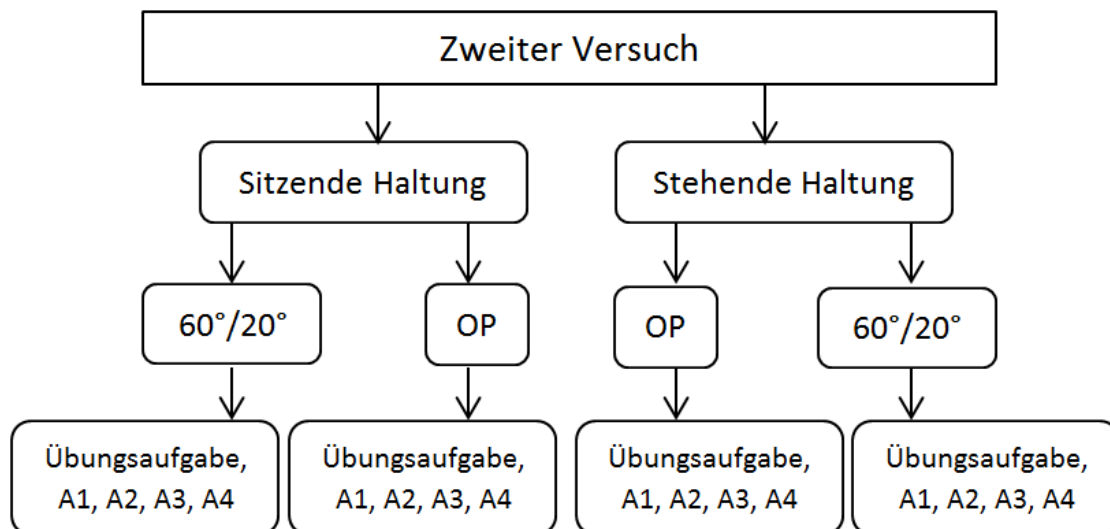


Abb. 15: Zweiter Versuch: Übersicht der Struktur. Es handelt sich um die vier Eingabehaltungen und die fünf Aufgaben (Übungsaufgabe, A1, A2, A3 und A4), die zu bewältigen sind.

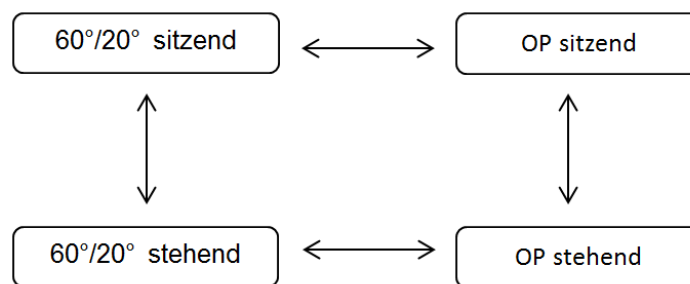


Abb. 16: Auf diese Weise werden die Eingabehaltungen untereinander verglichen.

2.3.2. Material

Die benötigten Materialien können der Tabelle 26 im Anhang entnommen werden.

Bestandteile des telemedizinischen Eingabebereiches

Der telemedizinische Eingabebereich besteht aus einem Monitor, den zwei 3D-Eingabegeräten, zwei Armablagen und einer Aluminiumkonstruktion, die diese Komponenten in variabler Weise verbindet. Die Eingabe erfolgt durch einen Stift-Pinzetten-Hybrid, der am 3D-Eingabegerät befestigt wird. Das 3D-Eingabegerät ist in diesem Fall der Falcon (© Novint, USA).

Der Stift-Pinzetten-Hybrid wurde von Gregor Mayer-Uhlmann entworfen und gebaut [66]. Der Prototyp wird für diesen Versuch leicht modifiziert. Anstatt des

zu haptischem Feedback fähigen Pinzettenspangensystems wird unter einer der Pinzettenspangen ein einfacher elektronischer Taster platziert. Durch diesen kann die benötigte Funktion der jeweiligen Aufgabenstellungen aktiviert werden. Es wird außerdem mittels Software-Skript die Schwerkraftkompensation des 3D-Eingabegerätes deaktiviert.

2.3.3. Erklärung der Aufgaben

Den Probanden wird die Arbeitsanweisung zuerst in schriftlicher und bildlicher Form vorgelegt, dann werden ihnen die Aufgaben als Video mit Untertitel erneut gezeigt. Nach einer Übungsaufgabe werden in allen Aufgaben die Zeitwerte zur Bewältigung der Aufgabenstellung erfasst.

Übungsaufgabe

Die Übungsaufgabe besteht aus Anteilen der vier gewerteten Aufgaben. Sie wird sieben Mal zu Beginn in einer definierten Nullstellung des Falcons durchgeführt, dabei hängt der Falcon 0° gekippt und 0° rotiert oberhalb des Ellenbogens. Darüber hinaus wird die Übungsaufgabe als erste Aufgabe in jeder der vier definierten Eingabehaltungen einmalig durchlaufen (Abb. 17).

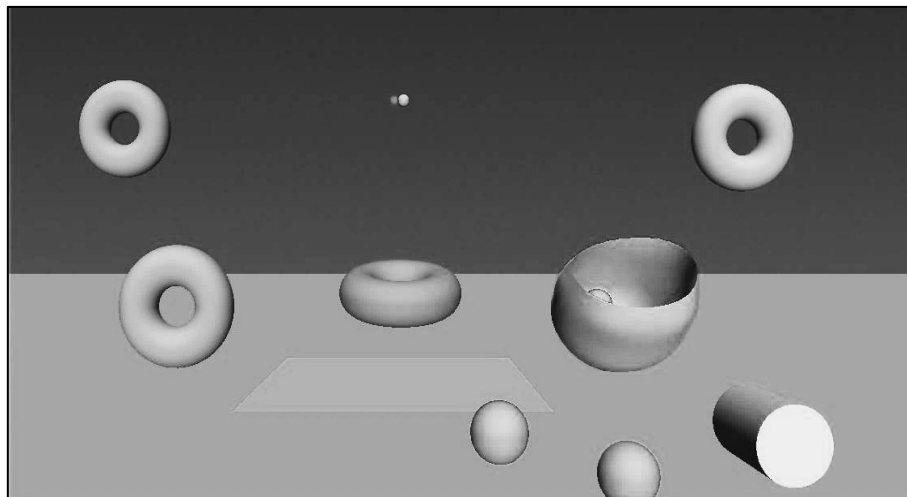


Abb. 17: Übungsaufgabe zweiter Versuch. Diese Übung beinhaltet Anteile jeder nachfolgenden Aufgabe und dient der Gewöhnung an das 3D-Eingabesystem.

Aufgabenstellung 1: „Ringe durchfahren“

Der Proband soll die sechs Ringe in einer definierten Reihenfolge mit dem Auswahlball durchfahren (Abb. 18). Gestartet wird dabei von einer definierten Ausgangsstellung in der Mitte des Raumes.

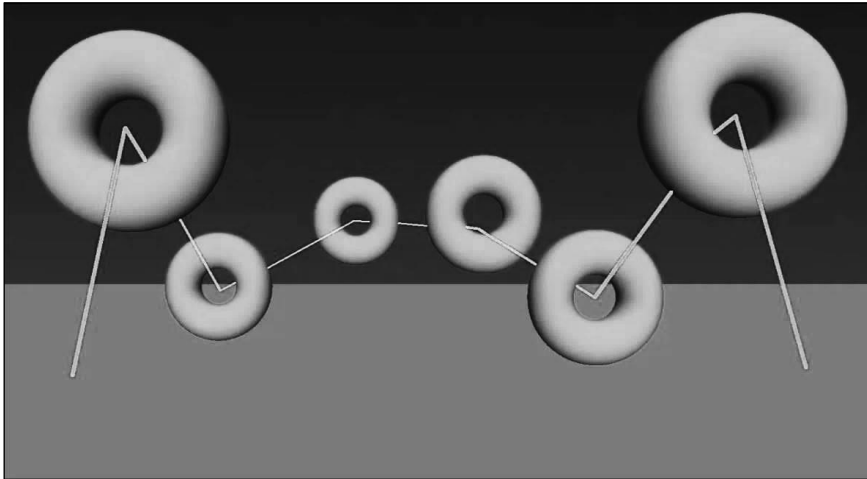


Abb. 18: Aufgabe 1 / Ringe durchfahren. Die sechs roten Ringe sollen mit dem Auswahlball durchfahren werden. Zum besseren Verständnis ist der Weg im Erklärungsvideo eingezeichnet.

Aufgabenstellung 2: „Geweberetraktion“

Aufgabe ist es die Fläche von der Unterseite kommend so zu deformieren, dass sie sich nach oben in die fünf weißen Ringe hineinwölbt (Abb. 19). Dazu muss der Proband den Auswahlball unter die Fläche und dann nach oben bewegen. Der betroffene Bereich verformt sich und wird mittels Knopfdruck im weißen Ring fixiert. Die Startposition und die Reihenfolge sind definiert.

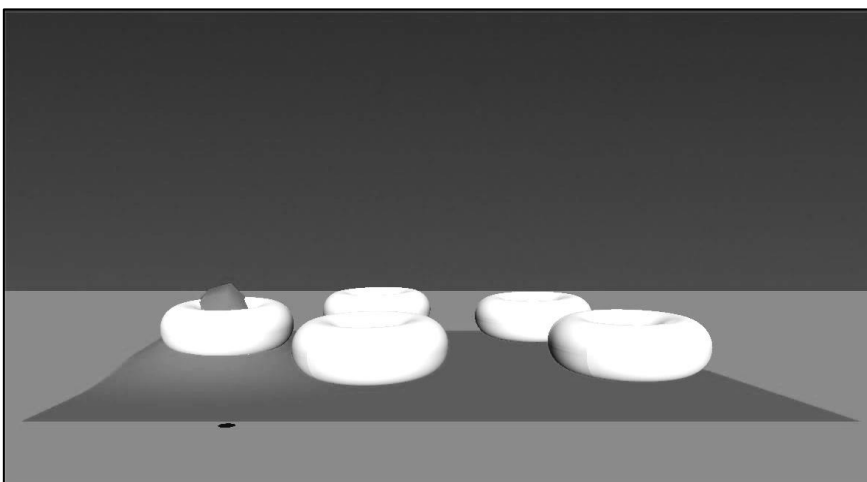


Abb. 19: Aufgabe 2 / Geweberetraktion. Hier wird die Verformung von Gewebe simuliert. Im Versuch ist die Fläche grün, die Ringe weiß.

Aufgabenstellung 3: „Befüllung Bergebeutel“

Aufgabe ist es die fünf Bälle (links im Bild) in den Bergebeutel (rechts im Bild) zu bewegen (Abb. 20). Dazu muss der Proband mit dem Auswahlball die jeweilige Kugel per Knopfdruck greifen. Der Startpunkt ist definiert und die Reihenfolge variabel.

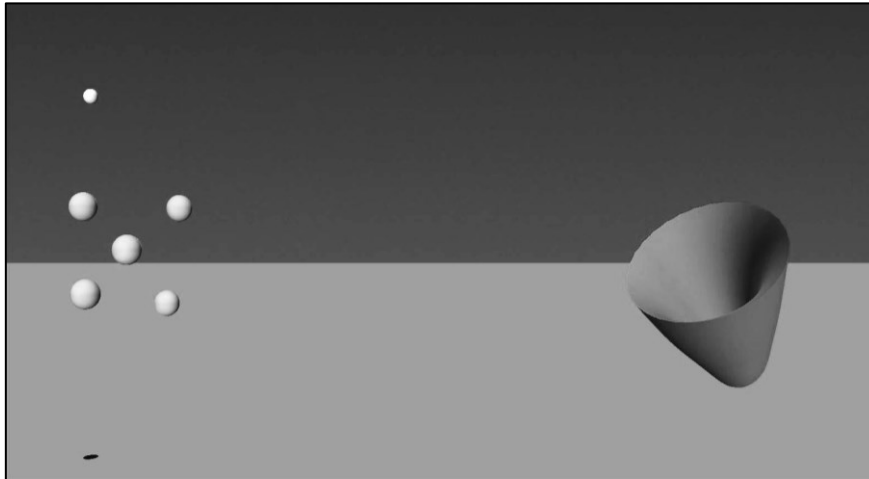


Abb. 20: Aufgabe 3 / Befüllung Bergebeutel. Die im Versuch orangenen Kugeln sollen in den grünen Bergebeutel befördert werden.

Aufgabenstellung 4: „Zylinderpositionierung“

Die drei farbigen Zylinder sollen in die farbgleichen Ringe befördert werden (Abb. 21). Das Vorgehen ist ähnlich dem Bergebeutelversuch, allerdings ist noch präziseres Arbeiten erforderlich, da die Endpunkte durch die Ringe exakt vorgegeben sind. Start und Reihenfolge sind von links nach rechts definiert.

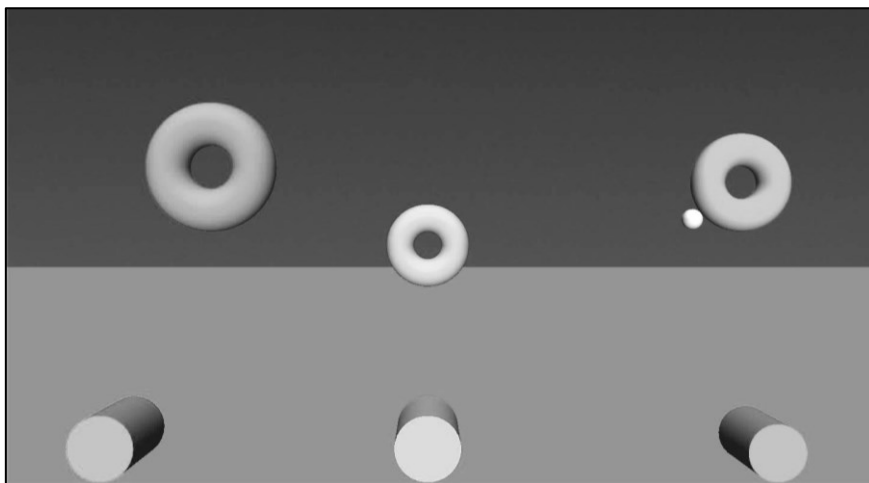


Abb. 21: Aufgabe 4 / Zylinderpositionierung. Aufgabe ist es die drei Zylinder in die jeweils gleichfarbigen Ringe zu befördern.

Fragebogen

Nach der Durchführung der Aufgaben wird ein Fragebogen ausgehändigt. In diesem soll die Erfahrung im Umgang mit den Eingabehaltungen angegeben werden. Folgende Bereiche soll der Proband auf einer Skala von 0 bis 10 bewerten. 0 entspricht dabei „eher gering“ bzw. „sehr schlecht/keine“ und 10 entspricht „hoch bzw. sehr gut/täglich“ (siehe Anhang; Kapitel 9.2).

- Ergonomie der jeweiligen Eingabehaltung
- Erreichbarkeit der Bildpunkte der Eingabehaltung
- Intuitivität der Eingabehaltung
- Erfahrung im Umgang mit Computern
- Videospieleerfahrung
- 3D-Eingabeerfahrung
- Laparoskopieerfahrung

Erfragt wird außerdem Alter, Geschlecht, Händigkeit und die vom Probanden nach der Versuchsdurchführung präferierte Eingabehaltung. Der genutzte Fragebogen befindet sich im Anhang in Kapitel 9.2.

2.3.4. Versuchsaufbau

Die zu vergleichenden Konfigurationen der Eingabehaltung

In der 60°/20°-Eingabehaltung, bekannt aus dem ersten Versuch, verläuft die Arbeitsrichtung parallel zur Blickachse des Probanden auf den Bildschirm zu. In der OP-Haltung zeigt die Arbeitsachse steiler nach unten als die Blickachse und somit unterhalb des Monitors vorbei. Beide Eingabehaltungen werden auch in stehender Position getestet.

Tabelle 3: Die Eingabehaltungen im zweiten Versuch. TCP: Tool center point.

Eingabehaltung Zweiter Versuch	Neigung der Arbeitsachse zum Horizont	Rotation des TCP nach lateral in Draufsicht
OP-Haltung-Sitzend	60°	20°
60°/20°-Haltung-Sitzend	30°	20°
OP-Haltung-Stehend	60°	20°
60°/20°-Haltung-Stehend	30°	20°

Einrichtung der telemedizinischen Eingabeeinheit

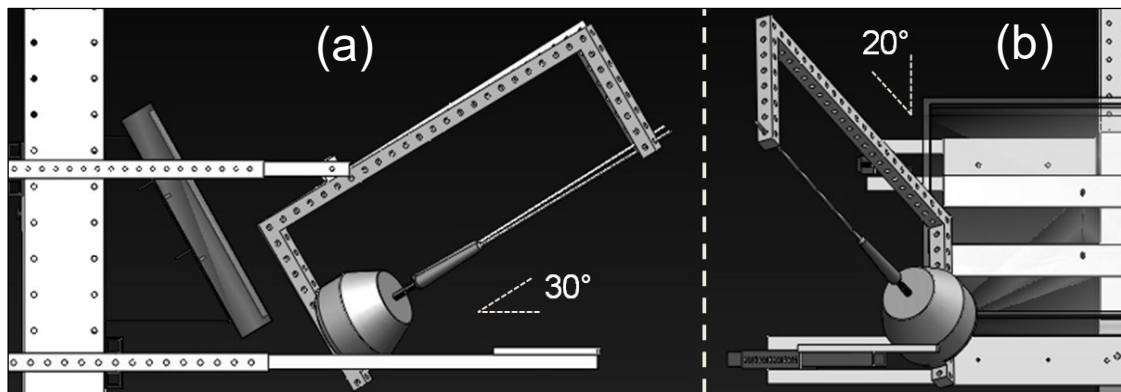


Abb. 22: Rotation der Eingabeeinheit. In der Seitansicht „a“ ist die um 30° geneigte Arbeitsachse zu erkennen, in der Frontalansicht „b“ ist die Rotation der Arbeitsachse um 20° abgebildet.

Am telemedizinischen Eingabebereich wird eine der in Tabelle 3 aufgeführten Eingabehaltungen eingestellt. Dabei muss der Arbeitsplatz an die körperlichen Gegebenheiten des Probanden angepasst werden. Die $60^\circ/20^\circ$ -Haltungen hat sowohl im Sitzen als auch im Stehen eine um 30° gesenkte Arbeitsachse, was parallel zur Blickachse des Probanden auf den Bildschirm ist (Abb. 22 „a“). Die OP-Einstellung hat sowohl im Sitzen als auch im Stehen einen, verglichen mit der $60^\circ/20^\circ$ -Einstellung, steileren Winkel (Tabelle 3). In allen vier Eingabehaltungen findet eine Rotation der Eingabeeinheit um 20° in Richtung der durch den Bildschirm verlaufenden Mittellinie statt (Abb. 22 „b“).



Abb. 23: Proband bei Durchführung der Übungsaufgabe. Es handelt sich hierbei um einen Probanden in der „stehenden OP-Eingabehaltung“. Zur besseren Veranschaulichung wurde diese Abbildung digital nachbearbeitet.

2.3.5. Versuchsablauf

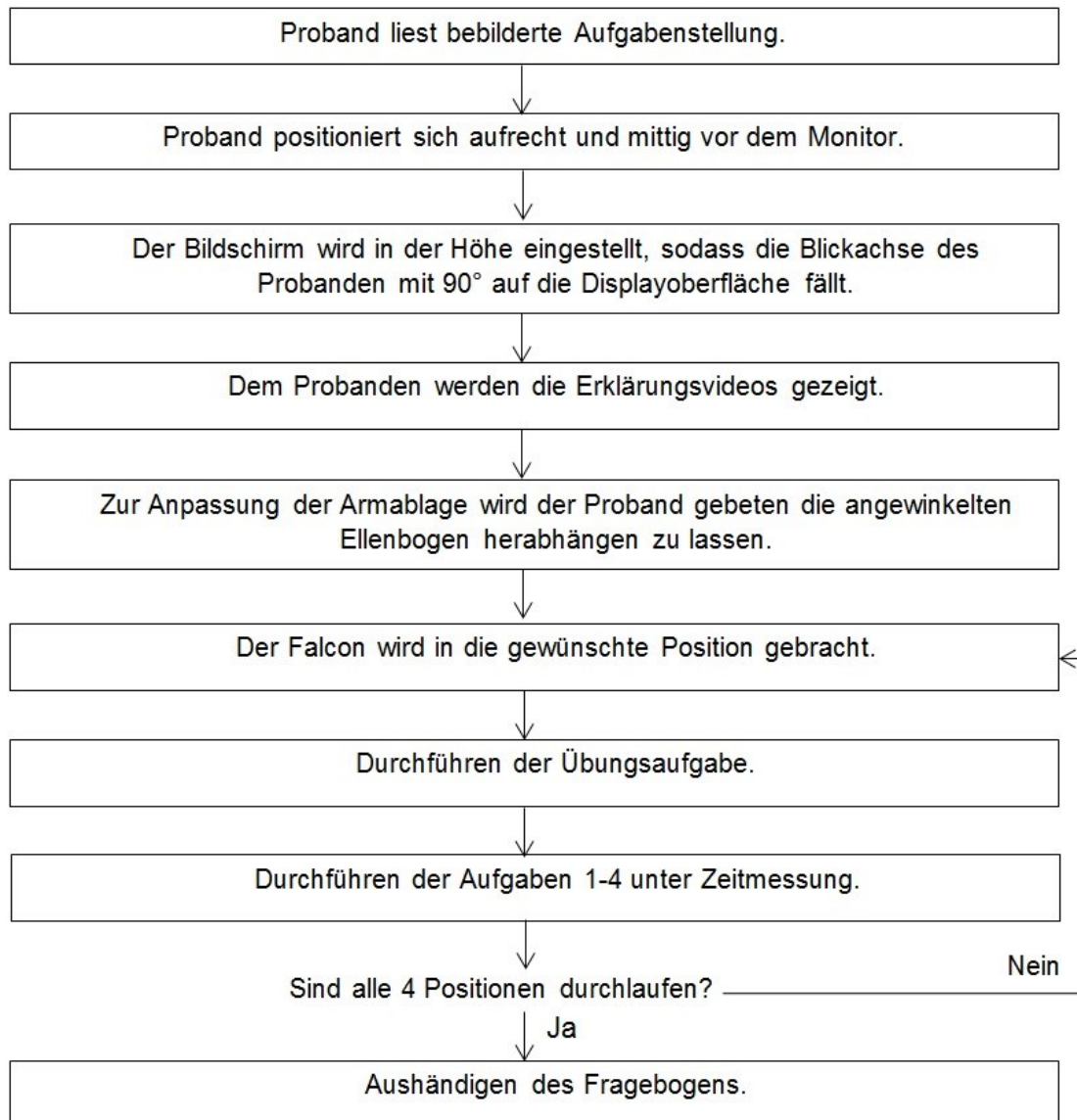


Abb. 24: Zweiter Versuch: Flussdiagramm des Versuchsablaufes.

Gruppenbildung

Die 20 Probanden werden randomisiert in vier Gruppen zu je fünf Probanden eingeteilt. Jede Gruppe hat eine andere Reihenfolge der Eingabehaltungen. Aufgeführt sind die verschiedenen Reihenfolgen in Tabelle 4.

Tabelle 4: Reihenfolge der Eingabehaltung je Gruppe.

Gr.	Neutrale Haltung	1. Haltung	2. Haltung	3. Haltung	4. Haltung
1	7x Übungsaufgabe	60°/20°- Sitzend	OP- Sitzend	60°/20°- Stehend	OP- Stehend
2	7x Übungsaufgabe	OP- Sitzend	60°/20°- Sitzend	OP- Stehend	60°/20°- Stehend
3	7x Übungsaufgabe	60°/20°- Stehend	OP- Stehend	60°/20°- Sitzend	OP- Sitzend
4	7x Übungsaufgabe	OP- Stehend	60°/20°- Stehend	OP- Sitzend	60°/20°- Sitzend

2.3.6. Auswertung der erhobenen Daten

Betrachtung der Zeitwerte und Korrelation mit den Fragebogendaten

Um die Haltungen zu vergleichen, betrachtet man die benötigte Gesamtzeit zur Bewältigung der Aufgaben je Eingabehaltung und gleicht diese mit den Angaben der Probanden in den Fragebögen ab. Dabei werden die Mittlere Gesamtzeit zur Bewältigung der Aufgaben je Eingabehaltung, die Gesamtzeitwerte der Gruppen sowie die Korrelation von Gesamtzeitwerten und Fragebogenangaben untersucht.

Betrachtung der Daten des Fragebogens

Die Fragebögen wurden den Probanden in standardisierter schriftlicher Form vorgelegt (siehe Anhang Kapitel 9.2). Es wurden nicht evidenzbasierte Fragebögen verwendet, die lediglich einen groben Überblick über die subjektive Erreichbarkeit, Ergonomie und Intuitivität geben sollen. Zur Analyse der Fragebögen werden die erhobenen subjektiven Werte für Erreichbarkeit, Ergonomie und Intuitivität der vier Eingabehaltungen verglichen. Außerdem erfolgt die Erfassung der von den jeweiligen Probanden präferierte Stellung. Die von den Probanden angegebenen Erfahrungen in den Bereichen Computer, Videospiele, Laparoskopie und 3D-Eingabemedien werden ebenfalls erhoben und ihre Auswirkungen auf die Gesamtzeit dargestellt. Der verwendete Fragebogen ist im Anhang (Kapitel 9.2) zu finden. Der Vergleich zwischen den mittels Likert-Skala erhobenen Werten der Eingabehaltungen erfolgt nach dem in Abb. 16 dargestellten Muster.

3. ERGEBNISSE

3.1. Erster Versuch: Vergleich möglicher Ausrichtungen der Eingabeeinheit

In diesem Versuch werden sowohl die Zeitwerte zur Durchführung der Kreise als auch die auftretende Fehleranzahl für jeden Probanden erfasst. Die in Klammern stehenden Zahlen (24P: schwierigster Schwierigkeitsgrad, 16P: mittlerer Schwierigkeitsgrad und 8P: leichtester Schwierigkeitsgrad) verweisen auf den jeweiligen Schwierigkeitsgrad bzw. die Pixelbreite der vorgegebenen Kreisbahnen. Als „Gesamtzeit“ bzw. „Gesamtfehleranzahl“ werden dabei die kumulierten Werte eines Probanden verstanden, die er bei der Bewältigung aller 6 Kreise in einem der drei Schwierigkeitsgrade erzielt hat. Der arithmetische Mittelwert mit Standardabweichung wird als Vergleichsmaß der Eingabehaltungen genutzt. Aufgrund der nicht vorhandenen Normalverteilung der Gesamtzeitwerte erfolgt die Signifikanzprüfung im Folgenden mit dem nicht parametrischen Mann-Whitney-U-Test. Einen Überblick über das Vorgehen beim Vergleich der Haltungen gibt Abb. 10.

3.1.1. Zusammensetzung des Probandenkollektivs

Das Alter der 10 teilnehmenden Probanden liegt zwischen 22 und 40 Jahren. Sowohl 4 Frauen als auch 6 Männer nehmen an der Studie teil. Ein Zusammenhang zwischen Alter und Gesamtzeit bzw. Fehler der Probanden wird bei Betrachtung der Werte nicht ersichtlich und kann mittels Spearman's rho Test nicht nachgewiesen werden.

3.1.2. Auswertung der Gesamtzeit- und Fehlerwerte

Gesamtzeit: Einfachster Schwierigkeitsgrad (24P)

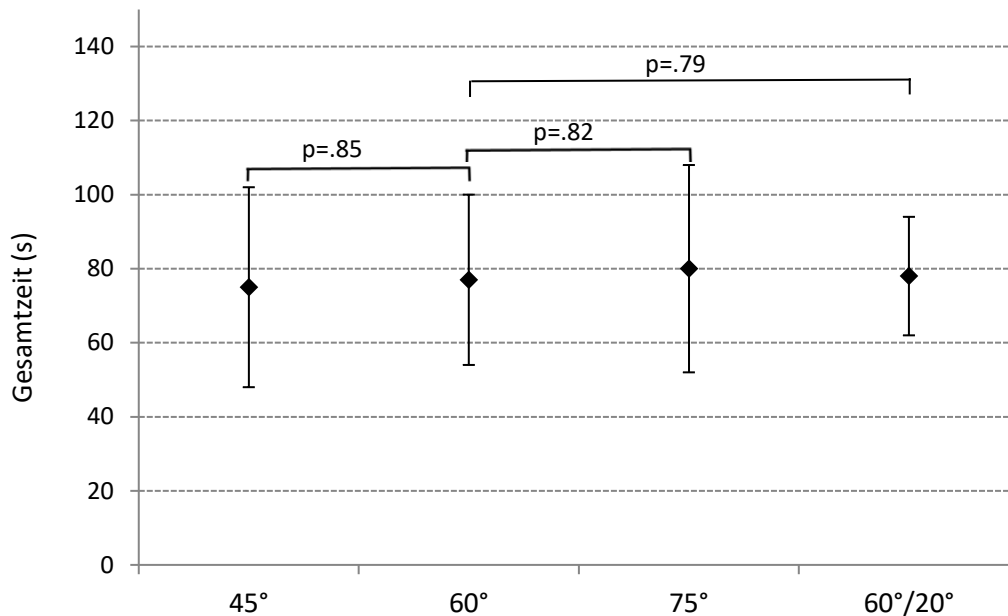


Abb. 25: Verteilung der Gesamtzeit der Probanden je Eingabehaltung (24P). Arithmetisches Mittel der Gesamtzeit aus den kumulierten Zeitwerten aller sechs Kreise und Standardabweichung.

Tabelle 5: Verteilung der Gesamtzeitwerte je Haltung (24P).

24P		Gesamtzeitwerte		
Haltung	arithmetisches Mittel *	Standardabweichung	Min	Max
45°	75 s	27 s	40 s	136 s
60°	77 s	23 s	44 s	123 s
75°	80 s	28 s	46 s	132 s
60°/20°	78 s	16 s	53 s	104 s

* In diesen Mittelwert fließen n=10 Gesamtzeitwerte je Haltung ein.

Im einfachsten Schwierigkeitsgrad liegen die mittleren Gesamtzeitwerte dicht beieinander, lediglich die Standardabweichung der 60°/20°-Haltung ist geringer als die der anderen Eingabehaltungen. Es kann kein signifikanter Unterschied in der Gesamtzeit gegenüber der 60°-Haltung nachgewiesen werden (Abb. 25).

Fehleranzahl: Einfachster Schwierigkeitsgrad (24P)

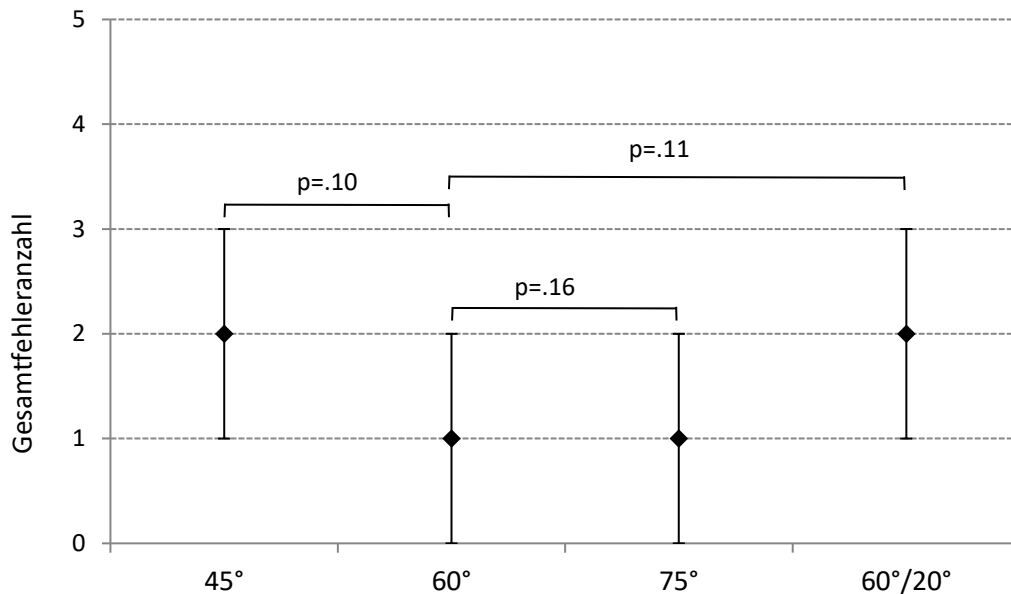


Abb. 26: Verteilung der Gesamtfehleranzahl der Probanden je Eingabehaltung (24P). Arithmetisches Mittel der Gesamtfehleranzahl der kumulierten Fehler aller sechs Kreise und Standardabweichung.

Tabelle 6: Verteilung der Gesamtfehleranzahl je Haltung (24P).

24P		Gesamtfehleranzahl		
Haltung	arithmetisches Mittel *	Standardabweichung	Min	Max
45°	2	1	0	3
60°	1	1	0	3
75°	1	1	0	3
60°/20°	2	1	0	5

*In diesen Mittelwert fließen n=10 Gesamtfehlerwerte je Haltung ein.

Im einfachsten Schwierigkeitsgrad liegen die mittleren Gesamtfehlerwerte dicht beieinander, auch die Standardabweichung ist gleich. Es kann kein signifikanter Unterschied in der Gesamtzeit gegenüber der 60°-Haltung nachgewiesen werden (Abb. 26).

Gesamtzeit: mittlerer Schwierigkeitsgrad (16P)

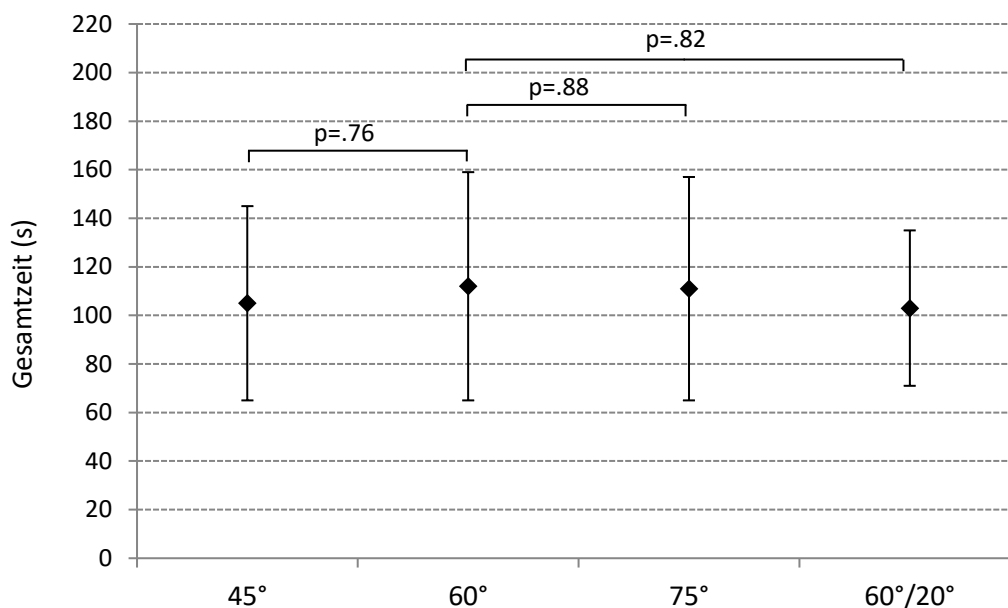


Abb. 27: Verteilung der Gesamtzeit der Probanden je Eingabehaltung (16P). Arithmetisches Mittel der Gesamtzeit aus den kumulierten Zeitwerten aller sechs Kreise und Standardabweichung.

Tabelle 7: Verteilung der Gesamtzeit und Gesamtfehler (16P).

16P		Gesamtzeitwerte		
Haltung	arithmetisches Mittel *	Standardabweichung	Min	Max
45°	105 s	40 s	52 s	180 s
60°	112 s	47 s	62 s	190 s
75°	111 s	46 s	64 s	194 s
60°/20°	103 s	32 s	60 s	166 s

* In diesen Mittelwert fließen n=10 Gesamtzeitwerte je Haltung ein.

Im mittleren Schwierigkeitsgrad liegen die mittleren Gesamtzeitwerte ebenfalls dicht beieinander, lediglich die Standardabweichung der 60°/20°-Haltung ist wiederum geringer als die der anderen Haltungen. Es kann kein signifikanter Unterschied in der Gesamtzeit gegenüber der 60°-Haltung nachgewiesen werden (Abb. 27).

Fehleranzahl: Mittlerer Schwierigkeitsgrad (16P)

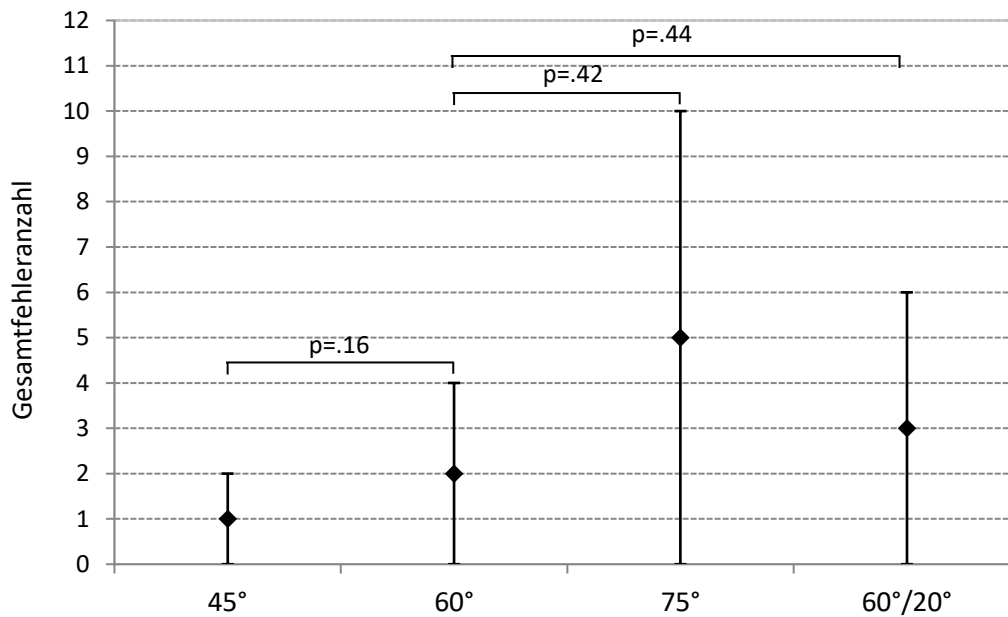


Abb. 28: Verteilung der Gesamtfehleranzahl der Probanden je Eingabehaltung (16P). Arithmetisches Mittel der Gesamtfehleranzahl der kumulierten Fehler aller sechs Kreise und Standardabweichung.

Tabelle 8: Verteilung der Gesamtfehleranzahl je Haltung (16P).

16P		Gesamtfehleranzahl		
Haltung	arithmetisches Mittel *	Standardabweichung	Min	Max
45°	1	1	0	3
60°	2	2	0	6
75°	5	5	0	19
60°/20°	3	3	1	8

*In diesen Mittelwert fließen n=10 Gesamtfehlerwerte je Haltung ein.

Im mittleren Schwierigkeitsgrad liegen die mittleren Gesamtfehlerwerte weniger dicht beieinander als im einfachen Grad. Auch hier kann kein signifikanter Unterschied in der Gesamtzeit der Eingabehaltungen gegenüber der 60°-Haltung nachgewiesen werden (Abb. 28).

Gesamtzeit: Höchster Schwierigkeitsgrad (8P)

Der höchste Schwierigkeitsgrad hat acht Pixel breite Kreisbahnen. In diesem zeigt sich ein stärkerer Unterschied der mittleren Zeit- und Fehlerwerte.

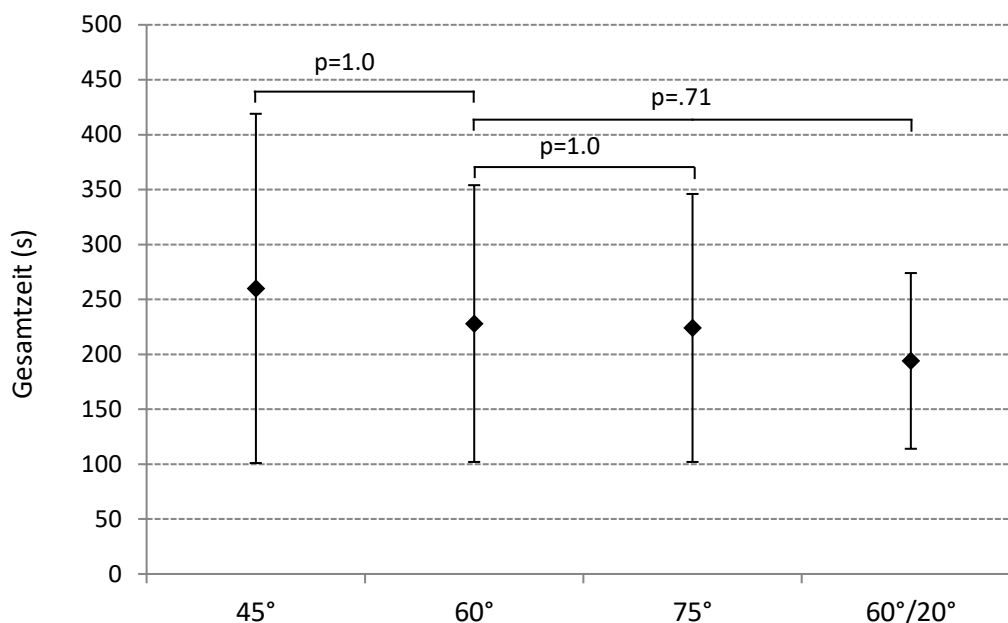


Abb. 29: Verteilung der Gesamtzeit der Probanden je Haltung (8P). Arithmetisches Mittel der Gesamtzeit aus den kumulierten Zeitwerten aller sechs Kreise und Standardabweichung.

Tabelle 9: Verteilung der Gesamtzeit (8P).

8P		Gesamtzeitwerte		
Haltung	arithmetisches Mittel *	Standardabweichung	Min	Max
45°	260 s	159 s	93 s	559 s
60°	228 s	126 s	112 s	423 s
75°	224 s	122 s	99 s	452 s
60°/20°	194 s	80 s	105 s	370 s

* In diesen Mittelwert fließen n=10 Gesamtzeitwerte je Haltung ein.

Außerdem ist eine vermehrte Streuung der Zeitwerte im Vergleich zu den beiden einfacheren Schwierigkeitsgraden erkennbar (vgl. dazu Abb. 25 und Abb. 27 mit Abb. 29). Die 60°/20°-Haltung weist den geringsten mittleren Gesamtzeitwert auf (Abb. 29). Die Standardabweichung und somit Streuung der Zeitwerte ist in der 60°/20°-Haltung am geringsten ausgeprägt (Abb. 29). Dennoch ist auch hier der Unterschied in der Gesamtzeit nicht signifikant.

Fehleranzahl: Höchster Schwierigkeitsgrad (8P)

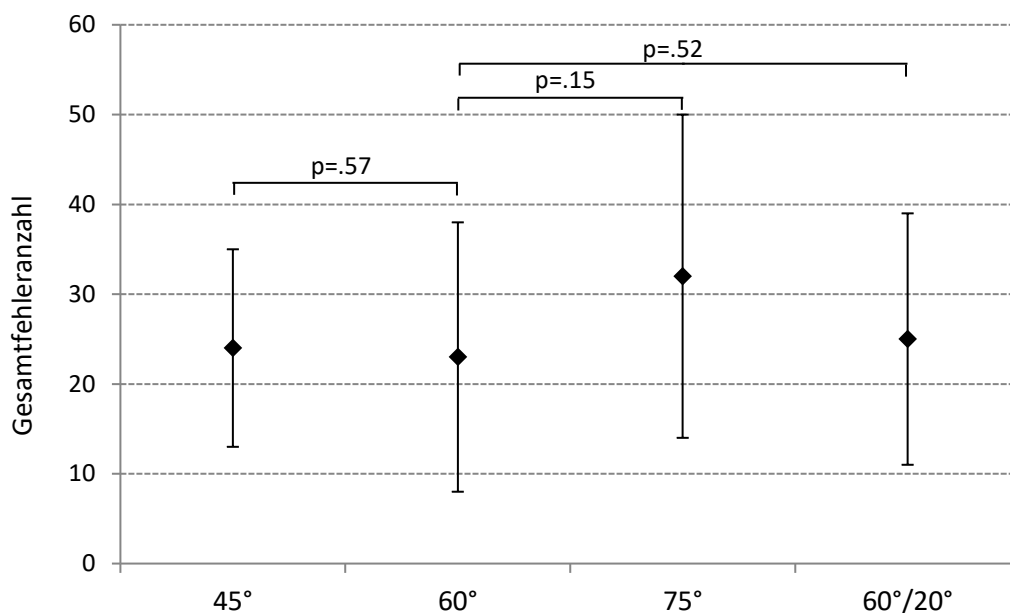


Abb. 30: Verteilung der Gesamtfehleranzahl der Probanden je Haltung (8P). Arithmetisches Mittel der Gesamtfehleranzahl der kumulierten Fehler aller sechs Kreise und Standardabweichung.

Tabelle 10: Verteilung der Gesamtfehleranzahl (8P).

8P		Gesamtfehleranzahl		
Haltung	arithmetisches Mittel*	Standardabweichung	Min	Max
45°	24	11	7	41
60°	23	15	5	54
75°	32	18	10	66
60°/20°	25	14	8	56

*In diesen Mittelwert fließen n=10 Gesamtfehlerwerte je Haltung ein.

Betrachtet man die Gesamtfehleranzahlen der Eingabehaltungen (Abb. 30), so hat die 75°-Haltung die höchste und die 60°-Haltung die geringste mittlere Fehleranzahl. Eine Signifikanz dieses Unterschieds kann nicht nachgewiesen werden (Abb. 30).

3.1.3. Vergleich der zwei Reihenfolgegruppen

Jeweils fünf Probanden bilden eine Reihenfolgegruppe. Die Reihenfolge der Eingabehaltungen für Gruppe 1 ist: 45°,60°,75°, 60°/20°. Für Gruppe 2 ist die Reihenfolge umgekehrt: 60°/20°, 75°, 60°, 45°.

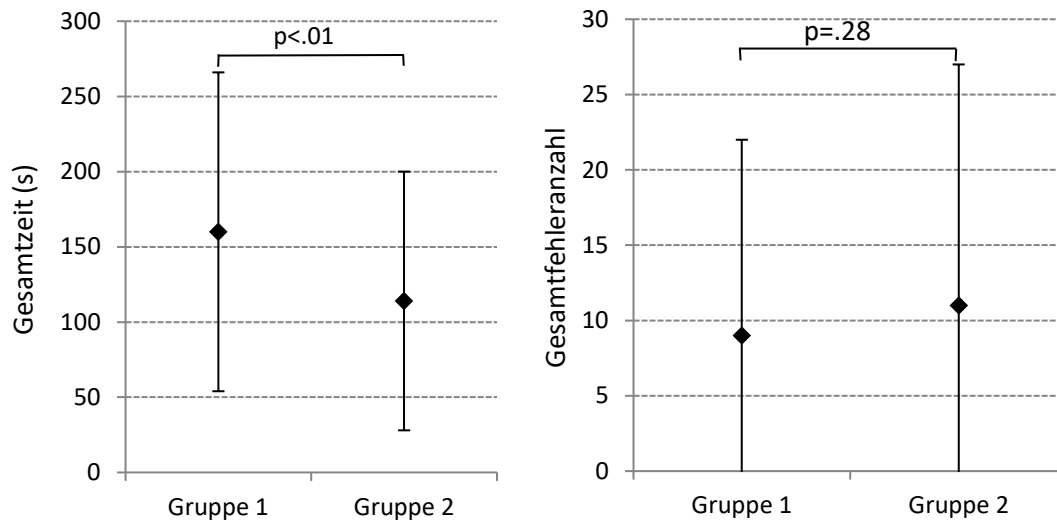


Abb. 31: Verteilung der Gesamtzeit- und Gesamtfehlerwerte der beiden Gruppen. Die Diagramme zeigen das arithmetische Mittel und die Standardabweichung für beide Gruppen über alle Schwierigkeitsgrade und Eingabehaltungen hinweg.

Der Mann-Whitney-U-Test zeigt bei nicht signifikant unterschiedlicher Fehleranzahlen einen signifikanten Unterschied der Gesamtzeit (Abb. 31).

3.1.4. Ergebnis der Probandenbefragung

Subjektive Schwierigkeit der kleinen Kreise und des großen Kreises

Bei der Probandenbefragung wird 34 Mal der große Kreis als schwieriger nachzufahren angegeben und 6 Mal einer der kleinen Kreise. Der rechte untere kleine Kreis wird besonders häufig als am schwierigsten nachzufahrender kleiner Kreis genannt (Tabelle 11). In der 60°/20°-Eingabehaltung hebt sich dieser Kreis deutlich weniger von den anderen ab. Zudem können fünf der zehn Probanden in der 60°/20°-Haltung keinen der kleinen Kreise als besonders schwierig benennen (Abb. 32). Der mittlere kleine Kreis erhält in keiner Eingabehaltung ein Votum und wird daher nicht in Abb. 32 aufgeführt.

Tabelle 11: Frage nach der Schwierigkeit der kleinen Kreise im Vergleich (8P).

Eingabehaltung	Ist einer der kleinen Kreise schwieriger?
45°	10 von 10 stimmten mit ja.
60°	8 von 10 stimmten mit ja.
75°	9 von 10 stimmten mit ja.
60°/20°	5 von 10 stimmten mit ja.

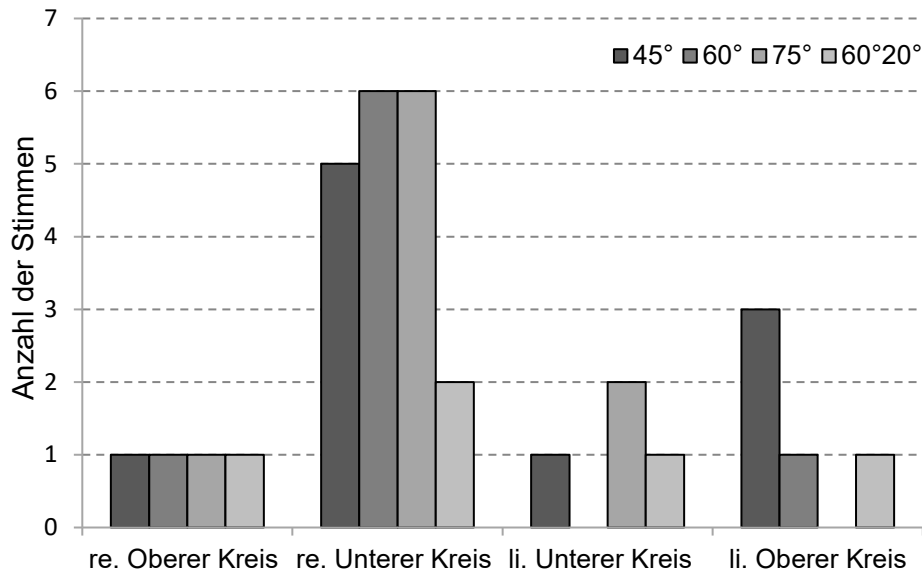


Abb. 32: Verteilung der Stimmen je kleinem Kreis nach Haltungen. Die Probanden dürfen sich nur für einen oder keinen der kleinen Kreise entscheiden. Ein Punkt entspricht einem einzelnen Votum für einen Kreis. Der mittlere kl. Kreis erhält insgesamt keine Stimmen.

Von Probanden präferierte Eingabehaltung

Acht der zehn Probanden entschieden sich nach dem Durchlaufen aller vier Eingabehaltungen für die 60°/20°-Eingabehaltung als persönlichen Favoriten. Lediglich ein Proband entscheidet sich für 60° bzw. 75°. Die 45°-Haltung wird von keinem Probanden präferiert (Tabelle 12).

Tabelle 12: Präferierte Eingabehaltung der Probanden.

Eingabehaltung	Welche Eingabehaltung wird präferiert?
45°	0
60°	1
75°	1
60°/20°	8

3.2. Der telemedizinische Eingabebereich

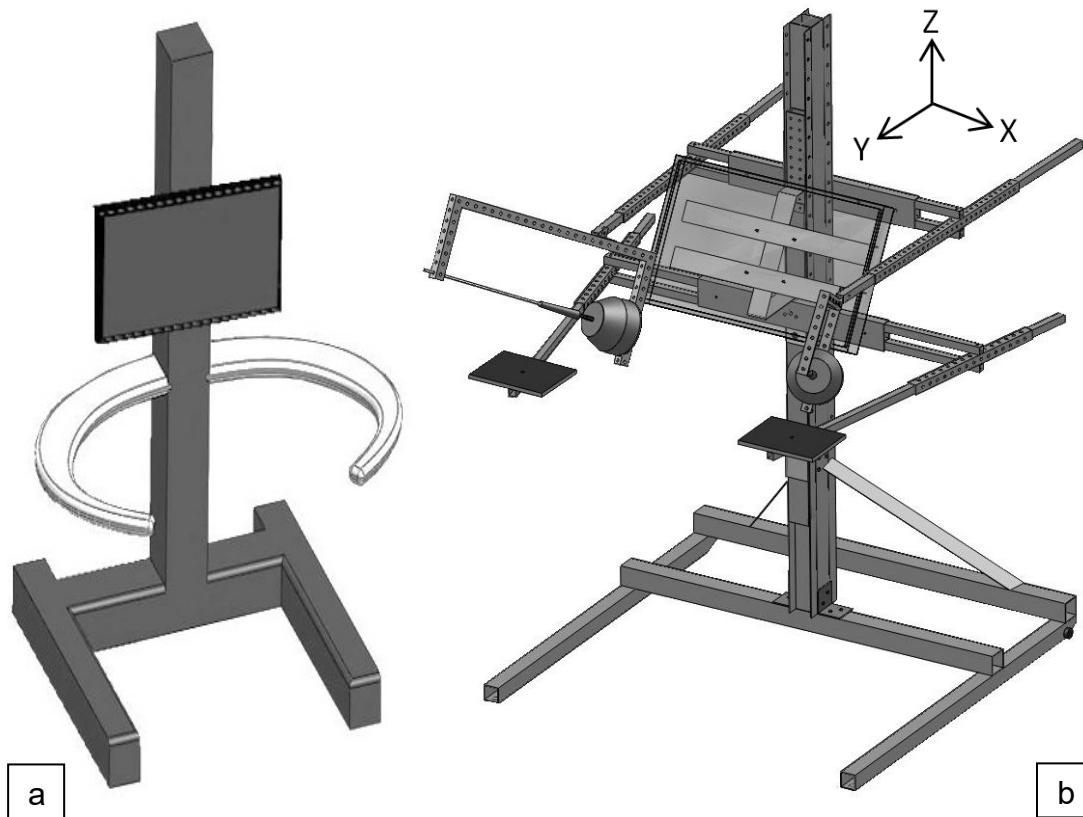


Abb. 33: CAD-Modell des frühen (a) und endgültigen (b) Eingabebereichentwurfes. Der frühe Entwurf (a) basiert auf einer Holzkonstruktion, der endgültige Eingabebereich (b) ist aus Aluminium gefertigt. In der rechten Abbildung sind die Armablagestützen nicht abgebildet.

3.2.1. Entwicklung des telemedizinischen Eingabebereiches

Die Entwicklung des telemedizinischen Eingabebereiches wurde zu Beginn von der Idee eines verstellbaren Tisches geprägt (Abb. 33a), ähnlich der frühen Eingabeeinheit des MiroSurge Projektes [54]. Es hat sich jedoch herausgestellt, dass im Fall von 3D-Eingabemodulen mehr Anpassbarkeit benötigt wird. Daher wurden bestimmte Bestandteile in Höhe und Raumorientierung variabel angelegt. Diese verstellbaren Bestandteile sind der Bildschirm, die Armauflageflächen und die Eingabeeinheiten. Die einzelne Mittelsäule wurde einer Konstruktion mit zwei lateralen Säulen aus Gründen der Transportfähigkeit, des Platzverbrauches bzw. Gewichtes und der Immersivität vorgezogen (vgl. Abb. 33 und Abb. 46). Diese Mittelsäule besteht aus einem kurzen oberen und einem langen unteren Segment, so lässt sich der Aufbau bei

Bedarf kürzen (Abb. 33b). Um die Stabilität dieser Mittelsäule zu verbessern, wurden zusätzlich zwei Verstrebungen zwischen dem unteren Segment der Mittelsäule und der Fußkonstruktion hinzugefügt (Abb. 33b). Im Verlauf der Entwicklung kamen an den Eingabeaufhängungen weitere Einstellungsmöglichkeiten hinzu. So können diese jeweils um drei Achsen rotiert werden, was auch eine Kippung des Eingabegeräts im Raum ermöglicht (Abb. 33b). Außerdem wurde eine Linearführung in die Falconaufhängung integriert. Diese Linearführung schränkt die Beweglichkeit der Eingabegeräte ein und passt sie den Limitationen des Endeffektors an. Die Entscheidung den Wert des Winkels „ β “ zwischen Monitorrückseite und der Transversalebene auf 60° festzulegen ergab sich aus den in 1.6.1 beschriebenen Überlegungen zu Intuitivität und Ergonomie (Abb. 8). Die Blickachse wird somit um 30° gesenkt und trifft bei korrekter Konfiguration des Eingabebereiches in einem rechten Winkel auf den Monitor. Die Armauflagen besitzen jeweils zwei Rotationspunkte und sind in allen Achsen des Raumes variabel. Da keine starr befestigten Fußpedale angebracht sind, können die meist bereits im OP vorhandenen Fußpedale verwendet werden.

3.2.2. Individuelle Anpassbarkeit

Der Eingabebereich bietet eine Vielzahl an Individualisierungsoptionen, um sich den körperlichen Gegebenheiten des Benutzers anzupassen und ein ergonomisches Arbeiten zu ermöglichen. Es ist sowohl sitzendes als auch stehendes Arbeiten und jede Zwischenhöhe in 25 mm Abständen einstellbar. In Tabelle 27 im Anhang ist eine zusammenfassende Auflistung des genauen Ausmaßes der Ausrichtungsmöglichkeiten zu finden.

Mögliche Positionierung des Monitors

Die Höhe des Displayzentrums (Z-Achse, Abb. 33) lässt sich unabhängig von den Armstützen zwischen 82 cm und 166 cm über dem Boden einstellen. Bei Bewegung der Armstütze nach oben lässt sich das Displayzentrum auf eine Maximalhöhe von 176 cm anpassen. Bei der Beurteilung der sitzenden Eingabehaltung liegt die geringste mögliche Augenhöhe des sitzenden

Operateurs bei 122 cm unter Berücksichtigung der oben beschriebenen Relationen zwischen Operateur und Eingabe. Das Monitorzentrum liegt nach dieser Einstellung 82 cm über dem Boden. Den Literaturempfehlungen entsprechend ist der Monitor zentral vor und in der Arbeitsrichtung des Operateurs platziert [67, 75, 86, 87]. Der Monitor ist nicht nach lateral beweglich. In Richtung des Operateurs und von diesem weg (Y-Achse) ist keine direkte Verstellbarkeit möglich und der Benutzer-Monitor-Abstand erfolgt durch eine Positionsänderung des Nutzers. Dabei müssen Armablage und Eingabemedium entsprechend angepasst werden. Die Entfernung von Auge zu Monitor ist so individuell auf jeden Probanden zwischen 50-100 cm einstellbar.

Mögliche Positionierung der Armablagen

Die Armablagehöhe ist zwischen 65 cm und 150 cm Höhe verstellbar (Z-Achse). Die Armablageausleger lassen sich in ihrer Entfernung zum Zentrum der Hauptschiene zwischen 48 cm und 72 cm nach lateral (X-Achse) verstellen (Abb. 34). Zudem lassen sie sich in der Y-Achse von den Hauptschienen zwischen 68 cm und 85 cm weit entfernen. Eine Verschiebung der Armablage entlang der Y-Achse ist auf den Nutzer zu oder von ihm weg gerichtet.

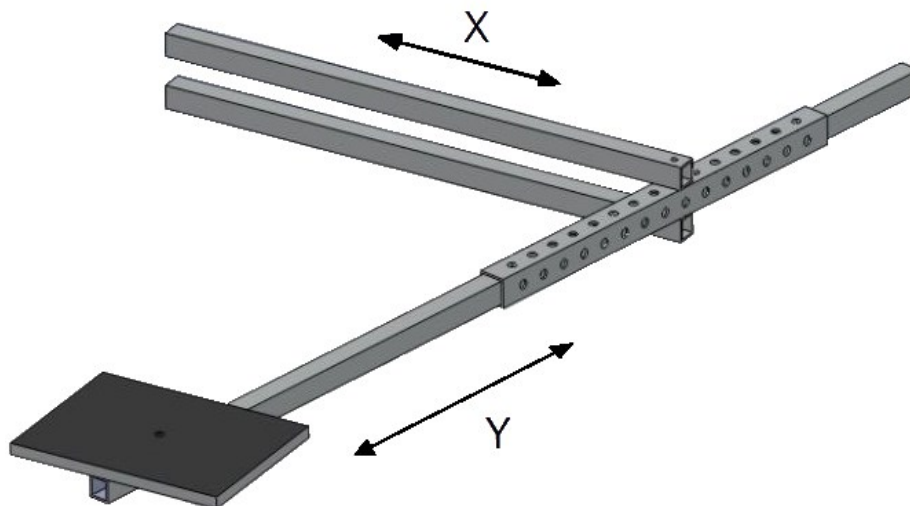


Abb. 34: Ausleger der Armablage. Die Höhenverstellbarkeit ist in Bezug auf das Zentrum der Armablageplatte angegeben.

Mögliche Positionierung der Eingabeeinheit

Die Hauptschiene der Eingabehalterung bietet eine Höhenverstellbarkeit zwischen 85 cm und 163 cm. Diese Höhe (Z-Achse) wird an der Befestigung der 3D-Eingabehalterung gemessen. Diese ist in Abb. 35 mit „D“ markiert. Der Ausleger bietet die Möglichkeit die 3D-Eingabeeinheit zwischen 26 cm und 49 cm nach lateral zu bewegen (X-Achse in Abb. 35). Zudem kann der Benutzer den Ausleger in 41 cm und 62 cm von der Hauptschiene positionieren (Y-Achse) (Abb. 35). Die grundsätzliche Angabe des Tool Center Point ist nicht möglich, da dieser seine Position je nach Art des 3D-Eingabesystems und je nach Rotation um Aufhängung „D“ verändert (Abb. 35). Die Verstellbarkeit der Eingabe- und Armablageausleger wird zusätzlich durch den Drehpunkt zwischen der X- und Y-Achse erweitert (Abb. 35).

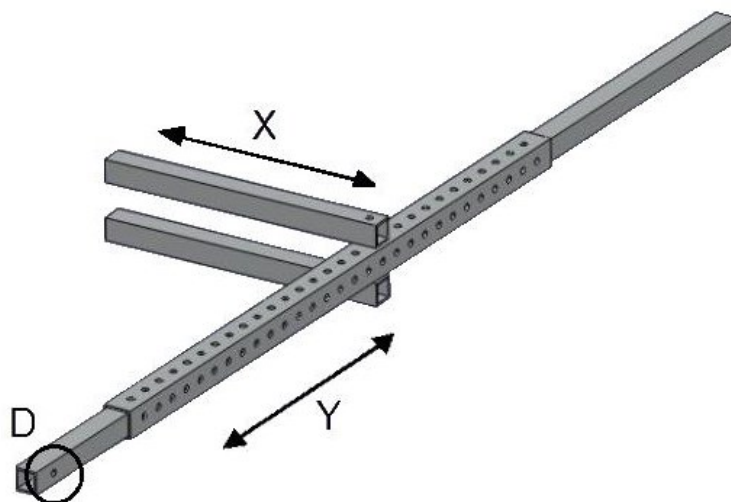


Abb. 35: Ausleger der Eingabehalterung. Die Verstellbarkeit ist in Bezug auf die markierte Bohrung (D) angegeben, da sich das daran folgende Eingabesystem verändern kann. Dies ist im zweiten Versuch der Falcon (Novint®).

3.2.3. Anpassung an weitere Eingabesystemen

Der telemedizinische Eingabebereich ist mit geringem Aufwand an neue 3D-Eingabesysteme anpassbar. Das entsprechende Eingabemodul wird an dem in Abb. 35 mit „D“ markierten Punkt montiert. So kann auch die „Delta Kinematik“ der TU-Darmstadt als Eingabesystem eingesetzt werden (Abb. 36). Dabei müssen die Abmessungen und das Gewicht des gewünschten Eingabesystems

beachtet werden. Da die Bohrungen der Monitorhalterung der VESA-Norm entsprechen stellt auch die Verwendung eines anderen Monitormodells kein Problem dar.

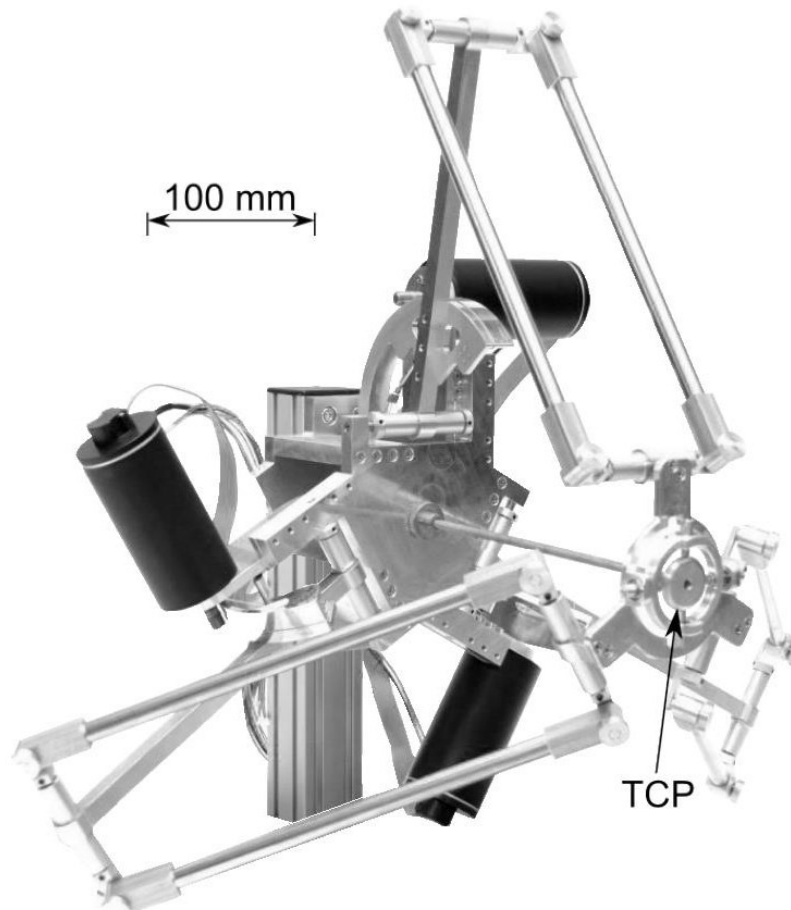


Abb. 36: Delta Kinematik der TU Darmstadt. Die Deltakinematik dient als Eingabegerät mit erhöhter Präzision. TCP steht für Tool Center Point, also die Spitze des benutzten Eingabemediums. Mit freundlicher Genehmigung der TU Darmstadt, Institut für EMK [90]. Zur besseren Veranschaulichung wurde diese Abbildung digital nachbearbeitet.

3.2.4. Hygieneaspekte des telemedizinischen Eingabebereiches

Sterilisierbarkeit, Desinfektion und Reinigung

Der Eingabebereich wird bei gewöhnlichem Gebrauch in keinem direkten Kontakt mit dem Patienten stehen und muss daher nicht sterilisiert werden. Der gesamte Aufbau mit Ausnahme der Armablagen ist aus Aluminium und in Teilen aus Edelstahl gefertigt. Somit ist er mit Desinfektionslösungen abwischbar. Selbst die momentan aus Schaumstoff bestehenden Armablagen

kann mit einem abwischbaren Material bezogen werden. Zur Verbesserung der Hygiene sind die Hauptschienen versiegelt. An den Auslegern ist diese Versiegelung der Innenräume schwierig umsetzbar, da hier Vierkantprofile im Sinne einer Schiene ineinander greifen.

Gleitfähigkeit der beweglichen Teile

Die beweglichen Bestandteile benötigen von Zeit zu Zeit eine Wartung. Um die Gleitfähigkeit verschiedener Bauteile zu gewährleisten sollte ein für den medizinischen Bereich zugelassenes Öl angewendet werden.

3.2.5. Kosten des telemedizinischen Eingabebereiches

Im Einkauf kosten die Bauteile des Prototypen inkl. Mehrwertsteuer 570 €. Darin sind die beiden 3D-Eingabegeräte und der Monitor nicht enthalten. Nach Abzug der Mehrwertsteuer erhält man Materialkosten von 479 €. In der Fertigung eines Prototyps entsteht mehr Verschnitt und es ergibt sich ein höherer Materialverbrauch als in der Serienfertigung. Des Weiteren sinken die Materialkosten bei steigender Einkaufsmenge. Ein Materialkostenpreis ohne Mehrwertsteuer unter 450 € wäre demnach theoretisch möglich.

3.2.6. Transportfähigkeit des telemedizinischen Eingabebereiches

Der telemedizinische Eingabebereich bietet verschiedene Transportoptionen. Der Transport über kurze Entfernungen erfolgt in gekipptem Zustand auf zwei Rollen, die sich im hinteren Bereich befinden. Da diese Rollen erst in gekipptem Zustand mit dem Boden in Kontakt kommen ist ein versehentliches Verschieben während der Benutzung ausgeschlossen. In der zusammengeklappten Transportform besitzt der Eingabebereich eine 1 m² große Grundfläche und eine Höhe von 160 cm (Abb. 37). Er bietet somit vergleichbare Abmessungen wie ein üblicher OP-Geräteturm (Abb. 37). Für den Transport über weite Strecken wird der Eingabebereich mittels acht Flügelkopfschrauben in kleinere Bauteilgruppen zerlegt, die jeweils kürzer als 1 m sind (Abb. 38). Es wird kein zusätzliches Werkzeug benötigt. Das Gewicht des Eingabebereiches inklusive zweier Falcons (Novint[®]) und des 24 Zoll großen LED-Monitors beträgt 29,5 kg.

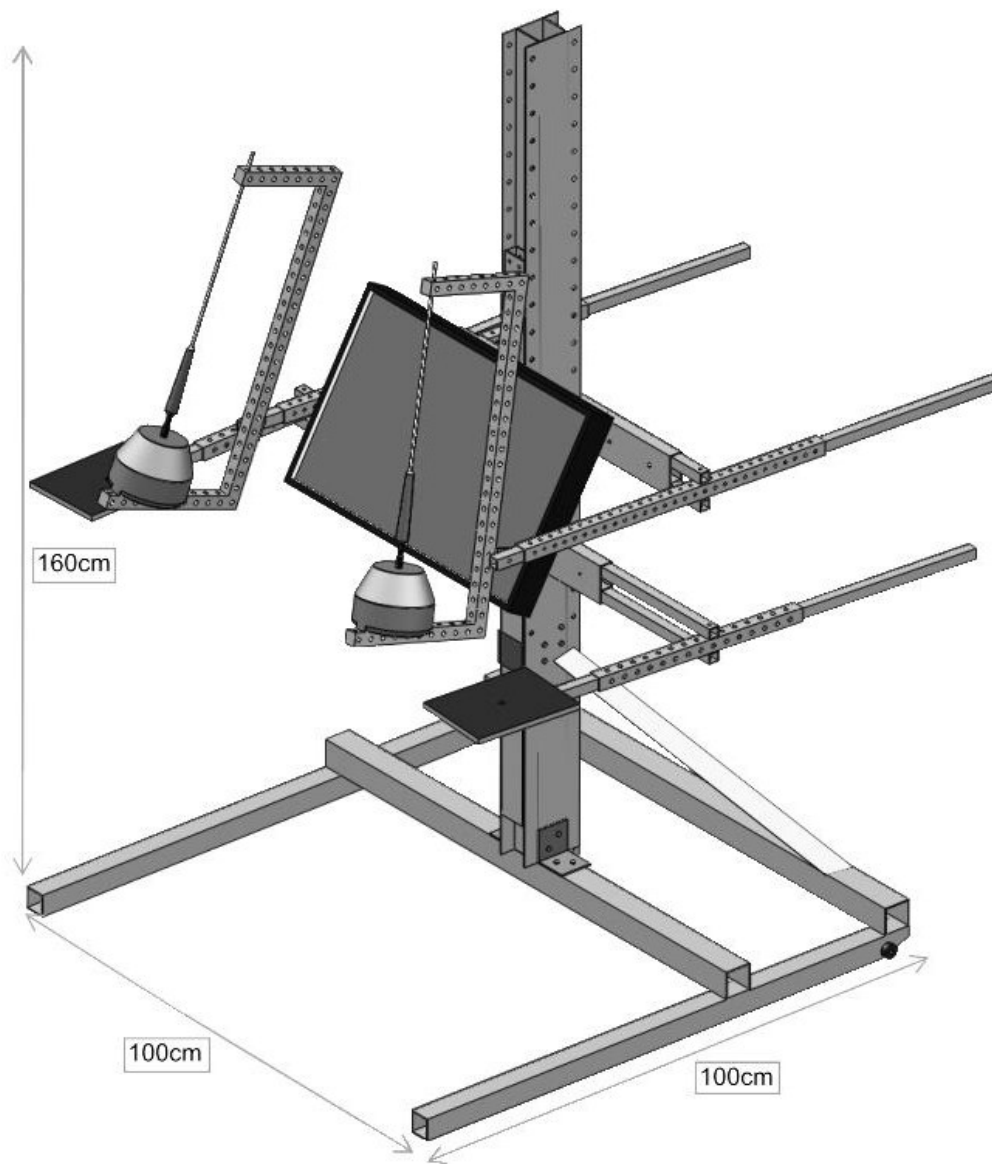


Abb. 37: Kurzstrecken-Transportform des Eingabebereiches.
Zur besseren Veranschaulichung wurde diese Abbildung digital nachbearbeitet.

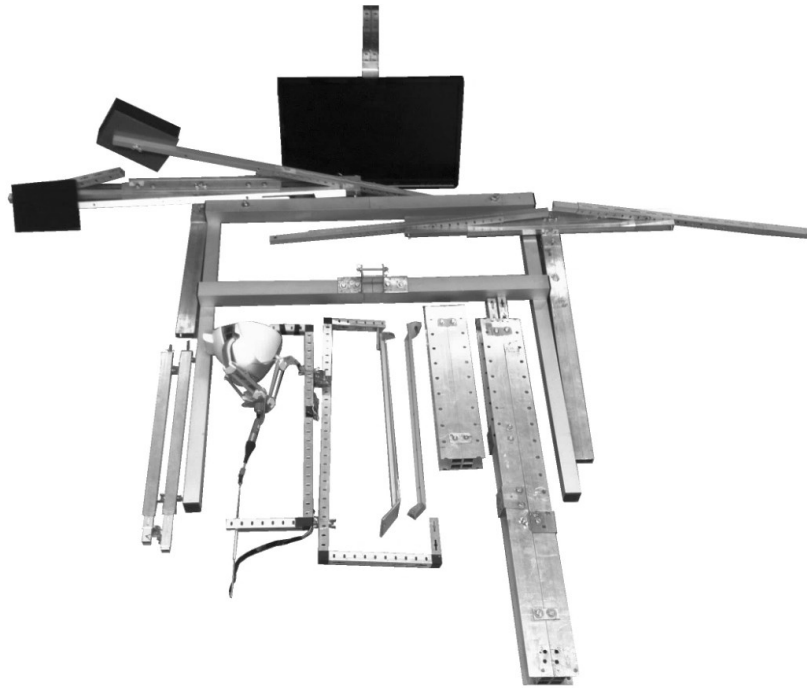


Abb. 38: Zerlegte Baugruppen des Eingabebereiches.
Zur besseren Veranschaulichung wurde diese Abbildung digital nachbearbeitet.



Abb. 39: 60°/20°-Einstellung am telemedizinischen Eingabebereich.
Zur besseren Veranschaulichung wurde diese Abbildung digital nachbearbeitet.

3.3. Zweiter Versuch: Vergleich verschiedener Eingabehaltungen am telemedizinischen Eingabebereich

3.3.1. Zusammensetzung des Probandenkollektivs

Das Alter der 20 Probanden liegt zwischen 22 und 28 Jahren. Sowohl das mittlere als auch das mediane Alter der Probanden entspricht dabei 24,5 Jahren. Alle Teilnehmer sind zum Durchführungszeitpunkt Studenten. Die Probanden setzen sich aus 10 Frauen und 10 Männer zusammen. Eine Korrelation zwischen Alter bzw. Geschlecht und Gesamtzeit des Probanden kann mittels Spearman`s rho nicht nachgewiesen werden. Obwohl in dem hier vorliegenden Altersintervall kein Einfluss ersichtlich ist, lässt sich daraus eine Korrelation in größeren Altersintervallen nicht ausschließen.

3.3.2. Zeitwerte der Eingabehaltungen

Verteilung der Gesamtzeitwerte der Eingabehaltung

Die Gesamtzeitwerte der Eingabehaltungen sind kumulative Zeitwerte der Aufgaben A1, A2, A3 und A4. Zuerst wird für jeden Probanden ein Gesamtzeitwert je Eingabehaltung errechnet. Diese Zeitwerte der Probanden werden mittels Shapiro-Wilk-Test sowie Kolmogorow-Smirnow-Test auf Normalverteilung geprüft. Da diese beiden Testverfahren keine Normalverteilung der vorliegenden Daten zeigen, wird der Mann-Whitney-U-Test als nicht parametrischer Test zur Unterschiedsprüfung herangezogen.

Vergleich der Gesamtzeitwerte der Eingabehaltungen

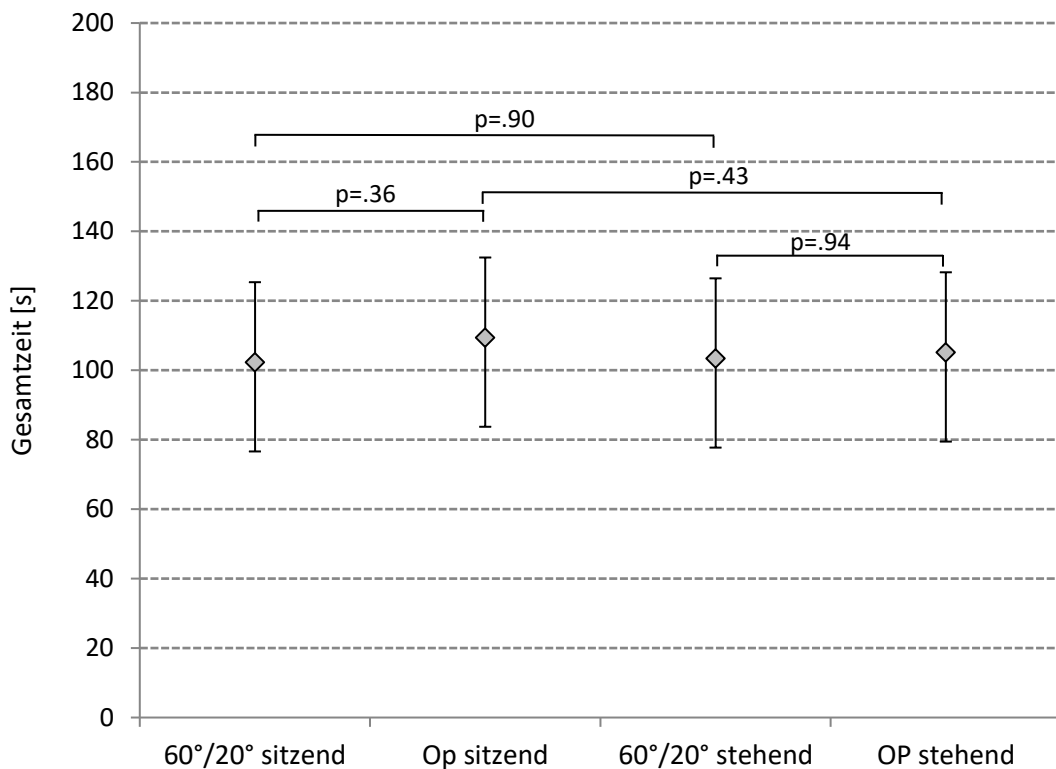


Abb. 40: Arithmetisches Mittel und Standardabweichung der Gesamtzeitwerte. Die jeweilige Gesamtzeit der Eingabehaltungen ergibt sich aus den kumulierten Zeitwerten der Aufgaben A1, A2, A3 und A4. Die Werte sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13: Verteilung der Gesamtzeitwerte der Eingabehaltungen.

	Mittelwert	Standardabweichung	Minimalwert	Maximalwert
60°/20° sitzend	102 s	20 s	76 s	168 s
OP sitzend	109 s	23 s	75 s	160 s
60°/20° stehend	103 s	26 s	72 s	161 s
OP stehend	105 s	28 s	67 s	150 s

Im arithmetischen Mittel liegen die Gesamtzeitwerte der Eingabehaltungen zwischen 102 s und 109 s (Tabelle 13). Dabei liegen die 60°/20°-Haltungen sitzend und stehend leicht unterhalb der beiden korrespondierenden OP-Eingabehaltungen (Abb. 40 und Tabelle 13). Die Standardabweichung ist jeweils in den 60°/20°-Eingabehaltungen etwas geringer ausgeprägt. Die Unterschiede der Gesamtzeiten zwischen den Eingabehaltungen haben laut Mann-Whitney-U-Test alle einen Wert von $p > 0.05$ und sind somit nicht signifikant (Abb. 40).

3.3.3. Ergebnisse der Probandenbefragung

In Tabelle 14 sind die Mediane der angegebenen Punktzahlen nach Auswertung der Fragebögen auf der graduellen Likert-Skala von 0-10 dargestellt. Dabei entspricht 0 dem schlechtesten und 10 dem besten Wert. Die Probanden bewerteten die Kategorien Erreichbarkeit, Ergonomie und Intuitivität anhand der subjektiv gemachten Erfahrung. Der Median wird hier verwendet, da die Werte der Likert-Skala rangskaliert sind und nicht angenommen werden kann, dass alle Probanden die verschiedenen Antwortmöglichkeiten als äquidistant wahrnehmen.

Tabelle 14: Ergebnisse der Fragebögen je Haltung im Median. Der Median errechnet sich hier aus N = 20 erhobenen Werten je Haltung und Kategorie.

Eingabehaltungen	Erreichbarkeit	Ergonomie	Intuitivität
OP-sitzend	7,5	6,5	7,0
60°/20°-sitzend	8,0	6,2	7,0
OP-stehend	8,0	6,0	7,5
60°/20°-stehend	8,0	6,0	7,0

In Tabelle 15 sind die von den Probanden angegebenen Unterschiede zwischen den Eingabehaltungen mittels Mann-Whitney-U-Test auf Signifikanz geprüft. Zum besseren Verständnis der Vergleiche siehe Kapitel 2.3.6.

Tabelle 15: Asymptotische Signifikanz der Haltungsunterschiede.

Asymptotische Signifikanz	2-seitig (p-Werte)	
	60°/20° sitzend	OP stehend
Erreichbarkeit		
OP sitzend	.95	.72
60°/20° stehend	.88	.99
Ergonomie		
OP sitzend	.48	.52
60°/20° stehend	.62	.44
Intuitivität		
OP sitzend	.06	.71
60°/20° stehend	.78	.19

Nach den in Tabelle 15 aufgeführten Ergebnissen konnten keine signifikanten Unterschiede im Vergleich der Eingabehaltungen bei Beurteilung der Ergonomie, Erreichbarkeit und Intuitivität berechnet werden. Im Bereich der

Intuitivität ist jedoch eine Tendenz zu erkennen. Denn im Vergleich der Eingabehaltungen 60°/20° sitzend und OP sitzend ergibt sich ein $p = .06$. Die Alternativhypothese, welche einen Unterschied zwischen den Eingabehaltungen in den abgefragten Bereichen annimmt, kann jedoch nicht bestätigt werden.

Präferierte Stellung der Probanden

Auf die Frage, welche Stellung die Probanden bei längerer Nutzungsdauer präferieren würden, ergibt sich die in Tabelle 16 zu sehende Verteilung. Die Eingabehaltung „OP-stehend“ liegt mit sechs Stimmen knapp vor den Vergleichshaltungen.

Tabelle 16: Präferierte Eingabehaltung der Probanden im zweiten Versuch.

Eingabehaltungen	Stimmenanzahl
OP-sitzend	5
60°/20°-sitzend	5
OP-stehend	6
60°/20°-stehend	4

3.3.4. Einflussfaktoren auf die erzielte Gesamtzeit der Probanden

Einfluss der angegebenen Videospielderfahrung auf die erzielte Gesamtzeit

Die im Fragebogen mittels Likert-Skala erfragten Videospielderfahrungswerte scheinen invers mit der erzielten Gesamtzeit der Probanden zu korrelieren (Abb. 41). Die Gesamtzeit je Proband ist dabei die kumulative Zeit eines Probanden für alle vier Eingabehaltungen und Aufgaben. Die zweiseitige Signifikanz erreicht einen Wert von $p < 0.05$ (Tabelle 17). Die Korrelation ist trotz Signifikanz als schwach einzustufen, da der Korrelationskoeffizient nach Spearman-Rho zwischen $-0,5$ und $0,5$ liegt (Tabelle 17).

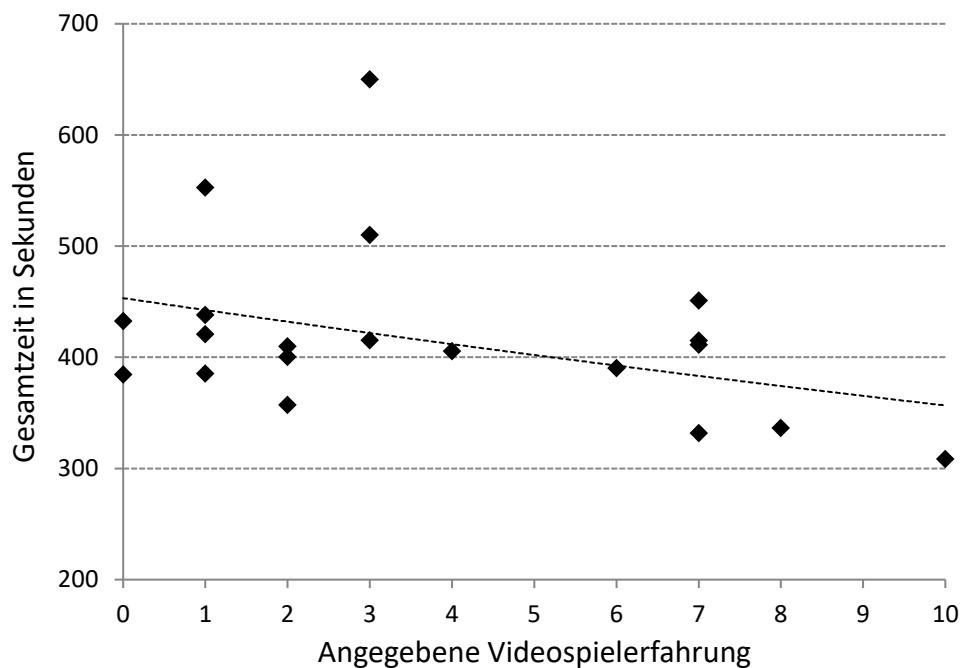


Abb. 41: Beziehung von Gesamtzeit und Videospielderfahrung. Jeder Punkt stellt die Werte eines Probanden dar. Die Ausgleichsgerade zeigt die sinkende Gesamtzeit mit steigender Videospielderfahrung.

Tabelle 17: Nichtparametrische Korrelation der logarithmierten Gesamtzeit und Videospielderfahrung. *Korrelation ist bei Niveau 0,05 signifikant (zweiseitig).

Spearman`s rho		Videospielderfahrung
Log. Gesamtzeit	Korrelationskoeffizient:	-,265*
	Sig. (2-seitig):	,018
	N:	80

Einfluss der angegebenen 3D-Eingabeerfahrung auf die Gesamtzeit

Auch die 3D-Eingabeerfahrung scheint eine inverse Korrelation mit der erzielten Gesamtzeit eines Probanden zu besitzen (Abb. 42). Die zweiseitige Signifikanz der Korrelation liegt bei einem Niveau von $p < 0.001$. Diese Korrelation ist als stärker einzuschätzen als die der Gesamtzeit und Videospieleerfahrung. Sie ist jedoch insgesamt ebenfalls als schwach zu kategorisieren, da der Korrelationskoeffizient auch hier zwischen -0,5 und 0,5 liegt.

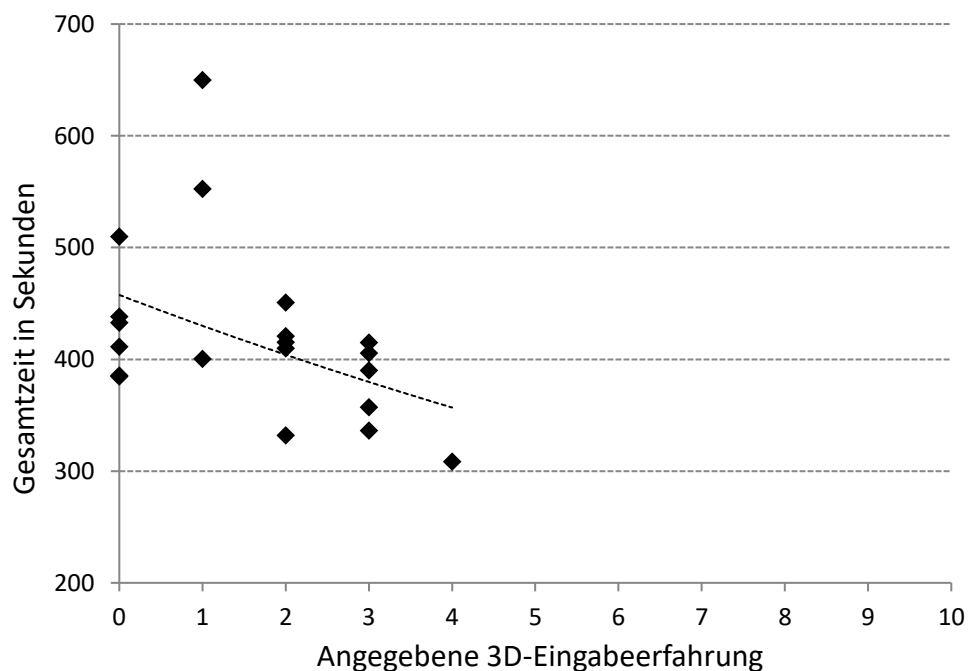


Abb. 42: Beziehung von Gesamtzeit und 3D-Eingabeerfahrung. Jeder Punkt stellt die Werte eines Probanden dar. Die Gesamtzeit sinkt mit steigender 3D-Eingabeerfahrung.

Tabelle 18: Nichtparametrische Korrelation der logarithmierten Gesamtzeit und 3D-Eingabeerfahrung. **Korrelation ist bei Niveau 0,01 signifikant (zweiseitig).

Spearman`s rho		3D-Eingabeerfahrung
Log. Gesamtzeit	Korrelationskoeffizient:	-.367**
	Sig. (2-seitig):	.001
	N:	80

Einfluss der angegebenen Laparoskopieerfahrung auf die Gesamtzeit

Bei Betrachtung der Laparoskopieerfahrung ist anhand der Punktwolke ebenfalls eine negative Korrelation zu erkennen (Abb. 43). Hier kann jedoch keine Signifikanz der Korrelation nachgewiesen werden. Das zweiseitige Signifikanzniveau liegt oberhalb der Signifikanzschwelle mit $p = 0.1$. Die Korrelation ist zudem als schwach einzustufen, da der Korrelationskoeffizient zwischen $-0,5$ bzw. $<0,5$ liegt.

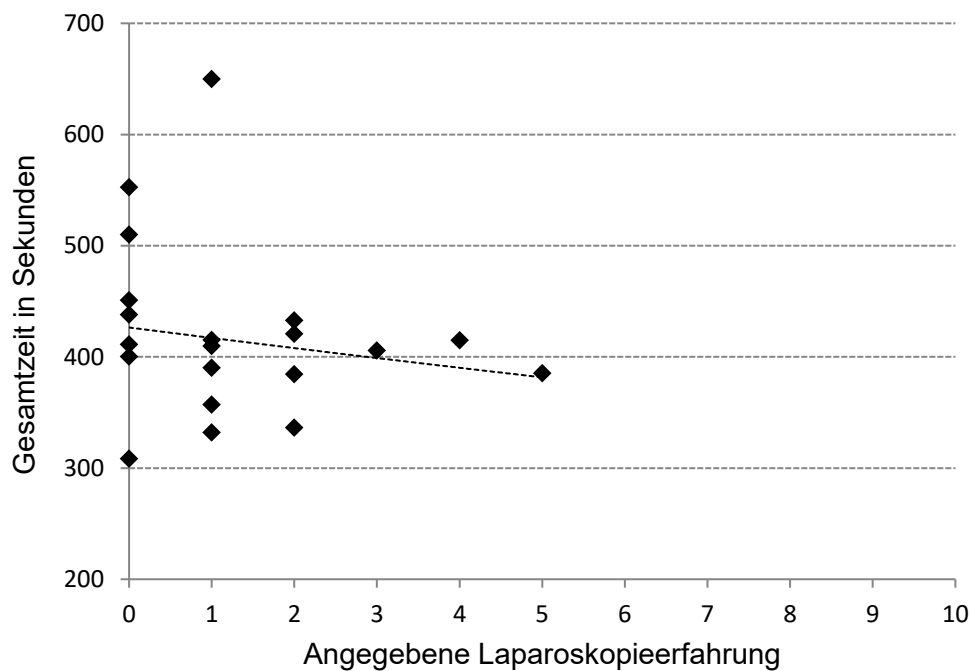


Abb. 43: Beziehung von Gesamtzeit und Laparoskopieerfahrung. Jeder Punkt stellt die Werte eines Probanden dar. Die Gesamtzeit sinkt mit steigender Laparoskopieerfahrung.

Tabelle 19: Nichtparametrische Korrelation der logarithmierten Gesamtzeit und Laparoskopieerfahrung.

Spearman's rho		Laparoskopie-Erfahrung
Log. Gesamtzeit	Korrelationskoeffizient:	-,183
	Sig. (2-seitig):	,104
	N:	80

Einfluss der angegebenen Computererfahrung auf die erzielte Gesamtzeit

Zwischen Computererfahrung und Gesamtzeit ist keine signifikante Korrelation nachweisbar (Abb. 44). Es befinden sich sehr viele Werte im Bereich von 9 und 10 Punkten, was zu einem Deckelungseffekt führt.

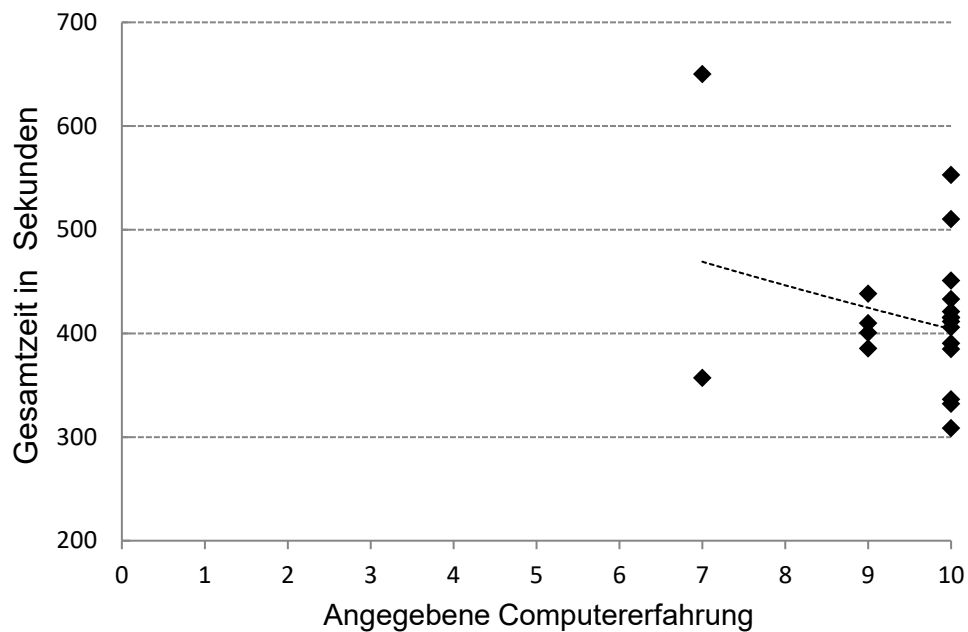


Abb. 44: Beziehung von Gesamtzeit und Computererfahrung. Jeder Punkt stellt die Werte eines Probanden dar. Es ist ein Deckelungseffekt zu erkennen.

Tabelle 20: Nichtparametrische Korrelation der logarithmierten Gesamtzeit und Computererfahrung

Spearman's rho		Computererfahrung
Log. Gesamtzeit	Korrelationskoeffizient:	-,091
	Sig. (2-seitig):	,421
	N:	80

Einfluss der Gruppenzuteilung auf die Gesamtzeit

In Abb. 45 erkennt man, dass Gruppe 3 im arithmetischen Mittel etwas schlechter abschneidet und eine größere Streuung der erreichten Ergebnisse aufweist. Der Unterschied zwischen Gruppe 3 und den anderen Gruppen ist bei Testung mittels Mann-Whitney-U-Test jedoch nur in Bezug auf Gruppe 1 signifikant ($p=0.01$). Gruppe 3 unterscheidet sich jedoch weder im Alter, noch in den angegebenen Vorerfahrungen von den anderen Gruppen. Auch bei Betrachtung der Gesamtzeitwerte der einzelnen Probanden kann kein einzelner Proband als Ausreißer erkannt werden. Gruppe 3 hat also als Kollektiv signifikant höhere Gesamtzeitwerte als Gruppe 1 erzielt.

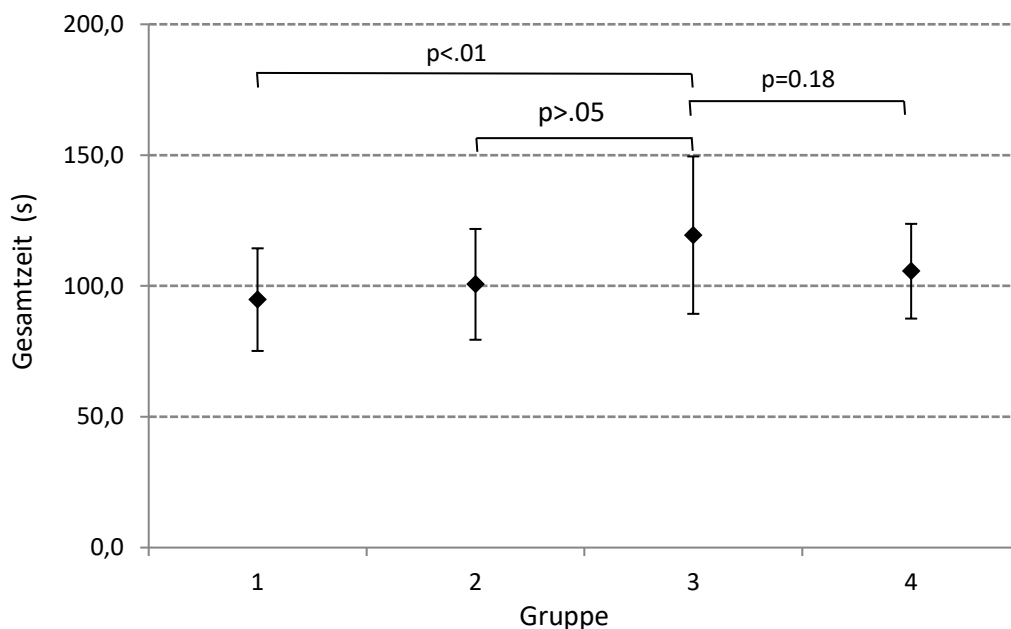


Abb. 45: Verteilung der Gesamtzeit innerhalb der Reihenfolgegruppen.

Tabelle 21: Verteilung der Gesamtzeit innerhalb der Reihenfolgegruppen.

Gruppe	Mittelwert	Standardabweichung	Minimalwert	Maximalwert
1	95 s	20 s	67 s	148 s
2	101 s	21 s	71 s	137 s
3	119 s	30 s	75 s	168 s
4	106 s	18 s	83 s	150 s

3.4. Zusammenfassung der Ergebnisse

Erster Versuch

Der einfachste Schwierigkeitsgrad (24P) des ersten Versuches hat vor allem die Funktion den Probanden mit Eingabemedium und Aufgabenstellung vertraut zu machen. Die mittleren Zeitwerte der Eingabehaltungen im einfachsten Grad sind sehr nah beieinander. Ebenso die Gesamtfehleranzahl (Abb. 25, Abb. 26, Tabelle 5 und Tabelle 6). Im mittleren Schwierigkeitsgrad (16P) liegen die Haltungen der mittleren Zeit- und Fehlerwerte ebenfalls sehr nahe beieinander (Abb. 27, Abb. 28, Tabelle 7 und Tabelle 8). Allerdings erkennt man im Bereich der Gesamtzeit Unterschiede der Standardabweichung. Dies spricht für eine unterschiedlich starke Streuung der von den Probanden erreichten Zeitwerte. Die mit Abstand geringste Streuung erreicht hier die 60°/20°-Haltung (Abb. 27, Tabelle 7). Auffällig ist die angestiegene Standardabweichung der Fehlerwerte der 75°-Haltung im mittleren Grad. Diese Entwicklung setzt sich im höchsten Schwierigkeitsgrad fort. Die 60°/20°-Haltung zeigt hingegen, ohne bei den Gesamtfehlern herauszustechen, in allen drei Schwierigkeitsgraden die geringste Standardabweichung der Zeitwerte. Signifikante Unterschiede zu der Vergleichshaltung 60° können jedoch in keinem der Schwierigkeitsgrade nachgewiesen werden.

Gruppe 2 schneidet in den Gesamtzeitwerten signifikant besser ab als Gruppe 1 (Abb. 31). In den Fehlerwerten verhält es sich umgekehrt, hier ist der Unterschied jedoch nicht signifikant.

Der große Kreis wird von den Probanden mehrheitlich als schwieriger zu bewältigen eingestuft. Einige Probanden erwähnen in den freien Kommentaren, dass das Zeichnen des großen Kreises auf Grund der fehlenden Möglichkeit zur Handballenablage als schwieriger empfunden wurde. In der Bewertung der Schwierigkeitsunterschiede zwischen den kleinen Kreisen wird in der 60°/20°-Haltung seltener ein deutlicher Unterschied zwischen den kleinen Kreisen angegeben (S.41, Tabelle 11). Der rechte untere kleine Kreis wird von den Probanden insgesamt am häufigsten als schwierigster Kreis genannt (S.41, Abb. 32).

Auf die Frage, welche Haltung die Probanden angesichts einer längeren Nutzungsdauer favorisieren würden, antworten acht der zehn Probanden mit der 60°/20°-Eingabehaltung.

Telemedizinischer Eingabebereich

Im Laufe der Entwicklung wurde der telemedizinische Eingabebereich um immer mehr Individualisierungsoptionen erweitert und ist nun an verschiedenste Bedürfnisse des Nutzers anpassbar. Dabei wird besonderer Wert auf die Ermöglichung intuitiver und ergonomischer Haltungen gelegt. Auf Grund des Forschungsansatzes des FLEXMIN-Projektes wird außerdem auf eine einfache Zerlegbarkeit, Transportfähigkeit und Erweiterbarkeit des Aufbaus geachtet. Auch Hygieneaspekte sind bedacht und fließen in die Auswahl der Materialien, sowie die Geometrie der Bauteile mit ein. So sind beispielsweise alle Bauteile mit Desinfektiva abwischbar und Hohlräume, in welchen sich Schmutz und Keime ansiedeln könnten, verschlossen. Eine möglichst günstige Herstellung des Aufbaus ist zudem realisierbar. Der telemedizinische Eingabebereich ist die Grundlage für die Durchführung des zweiten Versuches.

Zweiter Versuch

Die mittleren Gesamtzeitwerte der Eingabehaltungen differieren nur wenig und es konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Eingabehaltungen nachgewiesen werden (Abb. 40). Die Zeitwerte der stehenden und sitzenden Eingabehaltungen unterscheiden sich ebenfalls nur geringfügig und nicht signifikant (Abb. 40). Im Falle der Erreichbarkeit schneiden die vier Eingabehaltungen in den Fragebogenergebnissen sehr ähnlich ab und zeigen keine signifikanten Unterschiede (Tabelle 14 und Tabelle 15). Ebenso liegen die Ergonomiewerte der Eingabehaltungen dicht beieinander (Tabelle 14 und Tabelle 15). Die Intuitivität betreffend liegen die arithmetischen Mittelwerte der Eingabehaltungen im Bereich von 6,4 bis 7,3 Punkten (Tabelle 14). Eine Tendenz der Probanden zu einer Eingabehaltung ist nicht zu erkennen. Weder die stehenden noch sitzenden Eingabevarianten werden in der Befragung bevorzugt oder abgelehnt (Tabelle 16). Die von den Probanden auf der Likert-Skala angegebene Vorerfahrung in den vier abgefragten Kategorien hat

teilweise einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtzeit der einzelnen Probanden. So korreliert die Videospieleerfahrung signifikant invers mit der Gesamtzeit ($p < 0.02$) (Abb. 41 und Tabelle 17). Probanden mit höherer Videospieleerfahrung scheinen also niedrigere Gesamtzeiten zu erzielen. Die angegebene 3D-Eingabeerfahrung korreliert ebenfalls invers mit der erzielten Gesamtzeit der Probanden ($p < 0.01$) (Abb. 42 und Tabelle 18). Der Zusammenhang der jeweils angegebenen Laparoskopieerfahrung und der erzielten Gesamtzeit ist nicht signifikant ($p = 0.1$). Zwischen angegebener allgemeiner Computererfahrung und Gesamtzeit kann keine signifikante Korrelation aufgezeigt werden. Abb. 44 zeigt hierbei einen Deckelungseffekt.

4. DISKUSSION

4.1. Erster Versuch: Interpretation der Ergebnisse

Der erste Versuch dient der Ermittlung einer günstigen Eingabehaltung. Diese soll am eigens dafür entworfenen telemedizinischen Eingabebereich mit einer aus dem OP-Alltag entlehnten Operateurshaltung im zweiten Versuch verglichen werden.

4.1.1. Interpretation der Gesamtzeit- und Fehlerwerte

Der einfachste Schwierigkeitsgrad (24P) hat die Funktion den Probanden mit Eingabemedium und Aufgabenstellung vertraut zu machen. Die Trennschärfe dieses Grades ist daher gering. Dies ist wahrscheinlich die Ursache für die eng zusammen liegenden Gesamtzeitwerte bzw. die Gesamtfehleranzahl der jeweiligen Eingabehaltungen (Abb. 25, Abb. 26, Tabelle 5 und Tabelle 6).

Im mittleren Schwierigkeitsgrad (16P) steigt die Anforderung an die Geschicklichkeit der Probanden an. Durch die schmaler werdende Kreisbahn sind im Bereich der Gesamtfehleranzahl nun Unterschiede der Standardabweichung zwischen den Eingabehaltungen erkennbar (Abb. 27, Abb. 28, Tabelle 7 und Tabelle 8). Die geringste Streuung der Gesamtzeitwerte erreicht die 60°/20°-Haltung (Abb. 27, Tabelle 7). Dies scheint die günstigsten Bedingungen für die Eingabe zu bieten. Im Gegensatz dazu ist die stark ansteigende Standardabweichung der Fehlerwerte in der 75°-Eingabehaltung auffällig. Diese Haltung scheint den Probanden also erschwerte Bedingungen zu bieten. Bei Betrachtung der Anatomie des Handgelenkes erscheint folgender Zusammenhang schlüssig. Die maximale Radialabduktion des menschlichen Handgelenks in Neutral-Null-Stellung beträgt 20°, die maximale Ulnarabduktion beträgt 30° [91, 92]. In der 75°-Eingabehaltung ist die Hand etwas dorsalflektiert, wodurch der Processus styloideus ulnae die Ulnarabduktion erschwert. In der 60°-Haltung ist das Handgelenk bei korrekter Armablageeinstellung in der Neutral-Null-Stellung. Während der leichten Palmarflexion, welche zum Zeichnen des kleinen rechten unteren Kreises durchgeführt wird, stellt der Processus styloideus ulnae in dieser Haltung

keinen blockierenden Faktor der Bewegung dar. Durch eine Palmarflexion ist jedoch die Radialabduktion durch den Processus styloideus radii eingeschränkt. Durch die zusätzliche 20° Supination in der 60°/20°-Haltung rückt der linke obere Kreis, um welchen zu erreichen sich die Hand in der 45°- und 60°-Haltung strecken muss, in eine besser erreichbare Position. Zudem kann in der 60°/20°-Haltung der Vorteil einer Supinationsbewegung zur Erreichung des kleinen linken oberen Kreises voll ausgespielt werden. Durch diese Supination des Unterarms dreht sich zudem der Processus styloideus radii aus der Bewegungsrichtung einer Radialabduktion heraus [91, 92].

Die schlechteren Fehlerwerte der 75°-Eingabehaltung setzen sich im höchsten Schwierigkeitsgrad fort. Die 60°/20°-Haltung zeigt hingegen, ohne bei den Gesamtfehlern herauszustechen, in allen drei Schwierigkeitsgraden die geringste Standardabweichung der Zeitwerte. Signifikante Unterschiede zu der als Ursprungshaltung gewählten 60°-Haltung konnte jedoch in keinem der Schwierigkeitsgrade nachgewiesen werden. Gründe hierfür könnten die geringe Probandenanzahl oder die Verwendung des Mann-Whitney-U-Tests sein, welcher eine geringere statistische Power als vergleichbare parametrische Tests besitzt.

4.1.2. Unterschiede in den zwei Reihenfolgegruppen

Grund für den gemessenen Unterschied der Gesamtzeit könnten verschiedene Vorerfahrungen der Probanden mit ähnlichen Eingabemedien sein. Zudem könnte auch die Einfeldung der Probanden der Gruppe 2 in den Versuchsaufbau besser sein. Dies könnte theoretisch durch eine bessere Intuitivität der ersten Eingabehaltung bedingt sein. Um eine verlässliche Aussage hierzu treffen zu können, müsste der Versuch mit einer höheren Probandenanzahl und weiteren Reihenfolgegruppen durchgeführt werden.

4.1.3. Ergebnis der Probandenbefragung

Subjektive Schwierigkeit der kleinen Kreise und des großen Kreises

Als Grund für die angegebene bessere Nachfahrbarkeit der kleinen Kreise gegenüber dem großen Kreis kommen ein möglicher Konzentrationsabfall

sowie eine gröbere Bewegung aus dem Ellenbogen heraus in Frage. Die in Tabelle 11 dargestellte gleichmäßige Verteilung der Erreichbarkeit der kleinen Kreise in der 60°/20°-Eingabehaltung weist auf eine ähnlich gute Erreichbarkeit der Extrempunkte in dieser Haltung hin. Diese bessere Erreichbarkeit aller Extrempunkte bestätigt sich auch dadurch, dass in allen, außer der 60°/20°-Eingabehaltung, der rechte untere Kreis als am schwersten angegeben wurde. Es ist daher anzunehmen, dass sich in der 60°/20°-Haltung eine günstigere Handgelenksstellung ergibt. Dies ist analog zu den Gesamtzeit- und Fehlerwerten und den beschriebenen anatomischen Zusammenhängen.

Von Probanden präferierte Eingabehaltung

Obgleich acht von zehn Probanden die 60°/20°-Eingabehaltung präferieren, ist zu bedenken, dass zwischen der subjektiven Einschätzung, ob eine Haltung eine längere ermüdungsfreie Arbeit ermöglicht, und der auftretenden Ermüdung im tatsächlichen Langzeittest Unterschiede auftreten können. Um hier objektive Aussagen treffen zu können, müsste man Probanden über einen längeren Zeitraum in den Eingabehaltungen arbeiten lassen. Dabei müssten evidenzbasierte Fragebögen zur körperlichen Belastung genutzt werden und die Probanden beispielsweise parallel an ein Elektromyografie-Messgerät angeschlossen werden. So ließen sich verlässlichere Aussagen über die subjektive und objektive körperliche Belastung erheben.

4.1.4. Einschränkungen des ersten Versuches

Als größte Schwäche der Studie ist die Anzahl der Probanden zu sehen. Mit einer Anzahl von nur 10 Probanden müsste ein Unterschied sehr groß sein, um eine Signifikanz nachweisen zu können. Eine weitere Schwäche ist die Messung von zwei sich beeinflussenden Werten. So ist der Fehlerwert höher, wenn man besonders schnell arbeiten möchte. Den Probanden wurde deshalb mehrfach vor Start des Versuchs mitgeteilt, sie sollen möglichst fehlerfrei arbeiten. Im folgenden zweiten Versuch wurden daher Fehler nicht mehr gesondert erfasst. Sie wirken sich aber über die Gesamtzeit direkt aus, da die Probanden ihre Fehler zur Aufgabenbewältigung korrigieren müssen.

Einschränkungen des Versuchsaufbaus

Eines der definierten Ziele ist es eine hohe Intuitivität der Eingabe zu erreichen, darum sollte nahe am Bildschirmmittelpunkt gearbeitet werden. Einschränkungen bestehen dabei allerdings durch die Gegebenheiten des im weiteren Verlauf der Entwicklung Verwendung findenden 3D-Eingabemediums. In unserem Fall ist dies der Falcon (Novint®, USA). Der Falcon hat einen Maximalausschlag der Eingabeseite von 11 cm. Daher ist das Graphiktablet nicht beliebig nah an die Mittellinie heranführbar. Das Tablethalterungszentrum sollte nicht näher als 11 cm an die Mittellinie herangeführt werden, damit Kollisionen der zwei 3D-Eingabegeräte im Folgenden zweiten Versuch vermieden werden können.

4.1.5. Festlegung der Vergleichshaltung für den zweiten Versuch

Da keine Signifikanz der Unterschiede in Gesamtzeit und Fehlern nachgewiesen werden kann, müssen andere Kriterien zur Vergleichshaltungsfindung für den zweiten Versuch herangezogen werden. Die Betrachtung der subjektiven Angaben der Probanden lässt die Vermutung zu, dass alle Bereiche des Eingabefeldes in der 60°/20°-Haltung besser als in den Vergleichshaltungen erreichbar sind (Abb. 32). Dies erscheint wie beschrieben auch unter anatomischen Gesichtspunkten schlüssig [92, 93]. Weiterhin präferieren 8 von 10 Probanden, auch in Anbetracht einer längeren Nutzungsdauer, die 60°/20°-Eingabehaltung (Tabelle 12). Die 60°/20°-Haltung kommt zudem der von van Det et al beschriebenen Empfehlung zur Einhaltung der Auge-Hand-Ziel-Achse am ehesten nach [67, 86, 94]. Dies resultiert daraus, dass der Eingabestift und die Arbeitsachse in Richtung des Bildschirmzentrums gerichtet sind [67, 86]. Die Extrembereiche scheinen in der 60°/20°-Haltung also besser erreichbar und die Mehrheit der Probanden präferiert diese Eingabehaltung. Sie entspricht außerdem am besten den Empfehlungen für intuitives Arbeiten, wie beispielsweise die Einhaltung der Auge-Hand-Zielachse, die in Kapitel 1.6.1 dargelegt wurden. Die 60°/20°-Eingabehaltung wird daher als Vergleichshaltung gegenüber der OP-ähnlichen-Eingabehaltung für den zweiten Versuch ausgewählt.

4.2. Der telemedizinische Eingabebereich

Für den zweiten Versuch wurde ein telemedizinischer Eingabebereich entwickelt. Die Eigenschaften des in dieser Arbeit entwickelten telemedizinischen Eingabebereiches (siehe Kapitel 3.2.1) sollen nun mit aktuellen Systemen verglichen und beleuchtet werden.

4.2.1. Vergleich mit aktuellen Eingabekonsolen

Die drei mit unserem Eingabesystem vergleichbaren und aktuellen Eingabekonsolen sind das da Vinci® System (Intuitive Surgical Inc., Kalifornien, USA), Telelalp ALF-X (European comission joint research centre) und der MiroSurge (Deutsches Luft und Raumfahrtzentrum, Deutschland). In Tabelle 22 wird ein grober Vergleich dieser Systeme aufgezeigt [26, 29, 36, 54, 56, 58, 95-98].

Tabelle 22: Eigenschaften verschiedener Eingabekonsolen.

	da Vinci SI	Telelalp ALF-X	MiroSurge	FLEXMIN
Armablageart	Balken	ggf. an Stuhl	Balken	verstellbar Polster
Armablageposition	Frontal	(lateral)	frontal	lateral
Displayart	Bi-Okular	HD	Curved HD	HD
Displayhöhe verstellbar	Vertikal	nein	vertikal	vertikal
3D-Sicht möglich?	Ja	via Brille	via Brille	nachrüstbar
Display austauschbar?	Nein	ja	ja	ja
Immersivität	Hoch	gering	gering	gering
Art der Eingabe	Schlaufen	Lap.-ähnlich	Schlaufen	Pinzetten- Hybrid
Fußpedalanzahl	6	1	2	0-8
Pedale erweiterbar?	Nein	ja	ja	ja
Platzverbrauch	mittel	mittel	mittel	mittel

Das da Vinci® System ist das am weitesten verbreitete System und unterscheidet sich im Grundprinzip am stärksten von den anderen Systemen. Es wird im Folgenden näher mit den anderen Systemen verglichen. Der markanteste Unterschied ist die Visualisierung der Bildinhalte. Das da Vinci® System arbeitet mit einem Stereo-Okular, bei dem sich der Nutzer bei der

Anwendung leicht nach vorne lehnt und seine Stirn am Gerät anlegt (Abb. 1) [29, 36, 56]. Dies ermöglicht eine native 3D-Sicht, die vergleichbar mit der eines Stereo-Operationsmikroskops ist. Zudem hat der entstehende Körperkontakt den Vorteil, dass das da Vinci[®] System erkennen kann, ob der Operateur durch das Okular schaut. Falls dies nicht der Fall ist, kann eine versehentliche Eingabe verhindert werden. Im Falle der drei anderen Systeme ist ebenso eine 3D-Darstellung möglich. Hierzu kann zum jetzigen Zeitpunkt ein entsprechender Monitor zum Einsatz kommen. Die Abfrage, ob der Operateur auf den Monitor blickt, ist somit aktuell nicht ohne weiteres, beispielsweise mit einer Lichtschranke oder Drucksensor, umsetzbar. Dies ist beim da Vinci[®] System durch den engen Kontakt von Nutzer und Konsole möglich [97]. Der Eingabebereich des ALF-X zeigt eine interessante Lösungsmöglichkeit auf. Bei diesem wird der Nutzer von einem integrierten Kamerasystem beobachtet. Mithilfe dessen ist es möglich den Zoom der Kamera per Kopfgesten zu steuern bzw. die Fokussierung per Eye-Tracking auf einzelne Bildausschnitte zu richten [26, 58, 95, 99]. Über ein solches System ist auch die Implementierung einer Sicherheitsfunktion denkbar, wie dies bei den Fahrer-Assistenz-Systemen moderner PKWs der Fall ist. Diese Systeme, wie beispielsweise der Micro-Sleep Alerter[©] des Fraunhoferinstitutes, können erkennen, ob der Nutzer in eine bestimmte Richtung blickt und sogar ob er Anzeichen von Sekundenschlaf aufweist [100].

Ein weiterer Unterschied zwischen den Systemen besteht in der Art der Eingabemodule. Das da Vinci[®] System und der MiroSurge arbeiten mit Fingerschlaufen, in die Daumen und Zeigefinger gesteckt werden. Das ALF-X System nutzt dagegen Laparoskopie-ähnliche Eingabegeräte [56, 83, 84]. Im Rahmen des FLEXMIN-Projektes wurde die Entwicklung der Eingabe in Richtung eines Stift-Pinzetten-Hybriden gerichtet (Abb. 5) [66, 90, 101]. Die Schlaufenbedienung erinnert dabei eher an alltägliche Greifbewegungen, die Bedienung des ALF-X an laparoskopisches Vorgehen und das Arbeiten mit dem Stift-Pinzetten-Hybriden suggeriert ein offen chirurgisches Vorgehen. Der Hauptunterschied der Eingaben beim da Vinci[®] System ist jedoch die Möglichkeit des Entkoppelns, das so genannten „clutching“. Dies ermöglicht die

individuelle Ausrichtung der Eingabemodule ohne die Endeffektoren im Situs zu bewegen. Im Rahmen des FLEXMIN-Projektes ist diese Art der Ausrichtung aktuell noch nicht vorgesehen. Ein Vorteil ist die immer wieder aufs Neue anpassbare Handgelenkshaltung und somit die Möglichkeit zu ergonomischerem Arbeiten. Dies ist auch im Vergleich zu herkömmlichen laparoskopischen Vorgehensweisen positiv zu bewerten.

Die Anzahl der vorinstallierten Fußpedale ist beim da Vinci® System mit sechs Pedalen am höchsten. Sie ist jedoch auf Grund der Konstruktion in diesem Versuchsaufbau nicht erweiterbar. Diese Maximalanzahl ist sinnvoll, da sich bei Operateuren bereits bei geringerer Anzahl von Fußpedalen Probleme der Bedienbarkeit zeigen [72, 74, 76]. Der in dieser Arbeit entwickelte Eingabebereich ist allerdings bei Wunsch problemlos auf sechs bis acht Fußpedale aufrüstbar. Der Vorteil der Nachrüstbarkeit ist, dass bereits im OP vorhandene herkömmliche Fußpedale benutzt werden können. Die Intuitive Surgical Inc. bietet mit dem da Vinci® System hier einen ganzheitlicheren Ansatz als das FLEXMIN-Projekt mit seinem universitären Forschungscharakter. Beim FLEXMIN-Projekt steht die Flexibilität und Austauschbarkeit der Komponenten im Vordergrund und nicht der Verkauf eines Master-Slave-Komplettsystems.

Betrachten wir nun die grundlegende Sitzhaltung am da Vinci® System und an den drei anderen Eingabekonsolen. Das da Vinci® System versetzt den Operateur durch sein Stereo-Okular in eine leicht nach vorn gebeugte Eingabehaltung (Abb. 1). In dieser Position haben Stirn und Unterarme Kontakt mit der Konsole. Beim MiroSurge sitzt der Operateur aufrecht und blickt auf einen frontal vor ihm platzierten Bildschirm; die Unterarmhaltung ist dabei ähnlich der an der da Vinci®-Eingabekonsole. Der ALF-X nutzt wie MiroSurge und FLEXMIN einen Monitor zur Visualisierung, daher sitzt auch hier der Operateur aufrecht [95, 99, 102]. Im Gegenteil zu allen anderen Systemen sind die Armablagen am Stuhl des Operateurs bei der ALF-X-Eingabekonsole lateral des Körpers [95, 102]. Die Arbeitsachse ist dabei nach zentral unten gerichtet und ist ähnlich der in dieser Arbeit getesteten OP-Eingabehaltung [95, 96]. Der FLEXMIN-Eingabebereich lässt alle gewünschten Körperhaltungen zu. Der

Chirurg kann sowohl nach vorn gebeugt als auch aufrecht oder nach hinten gelehnt sitzen. Dabei lassen sich die Armablagen vor oder lateral dem Operateur positionieren und bei Bedarf komplett entfernen. Die Variabilität der zugehörigen Eingabeeinheiten bietet einen ebenso großen Umfang. So sieht beispielsweise keines der anderen Systeme die Möglichkeit vor stehende Haltungen zu testen.

Zusammenfassend bieten die Eingabekonsolen alle eine gewisse Variabilität der Eingabehaltung und ermöglichen größtenteils die Einhaltung ergonomischer Standards und Anforderungen im Operationssaal [67, 75, 81, 86, 87]. Der FLEXMIN-Eingabebereich bietet verglichen mit den anderen Eingabesystemen aufgrund seiner umfangreichen Individualisierungsoptionen eine größere Einstellungsbreite. Diese Variabilität und Nachrüstbarkeit wird im OP-Alltag meist nicht bemerkt, ist aber im Forschungs- und Entwicklungsbereich vorteilhaft (siehe Kapitel 4.2.2).

Eine weitere alternative Konzeption der Eingabekonsole

Unsere Kooperationspartner der Technischen Universität Darmstadt konstruierten einen Eingabebereich aus einem Fertigbausystem (Abb. 46). Ihr Aufbau hat zwei laterale Hauptschienen und bietet den Vorteil einer höheren Stabilität und weniger Schwingungsprobleme. Gegen diese Konstruktionsweise sprechen der höhere Platzverbrauch sowie die stärkere Sichteinschränkung auf den OP-Betrieb. Zudem bietet der Eingabebereich weniger Konfigurationsoptionen und dadurch eine geringere Individualisierbarkeit.

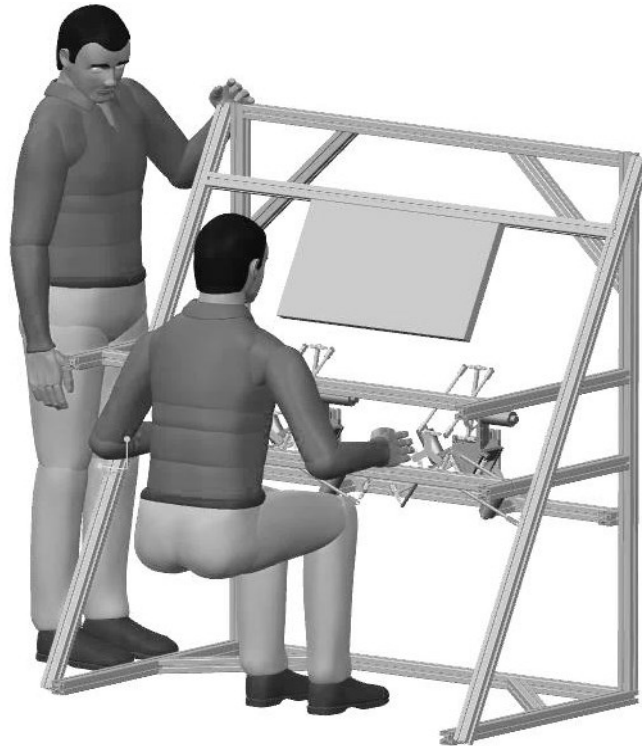


Abb. 46: Eingabebereich der TU Darmstadt. Zu sehen ist ein Aufbau mit zwei lateralen Trägern. Mit freundlicher Genehmigung der TU Darmstadt, Institut für EMK.

4.2.2. Bewertung der individuellen Anpassbarkeit

Mögliche Positionierung des Monitors

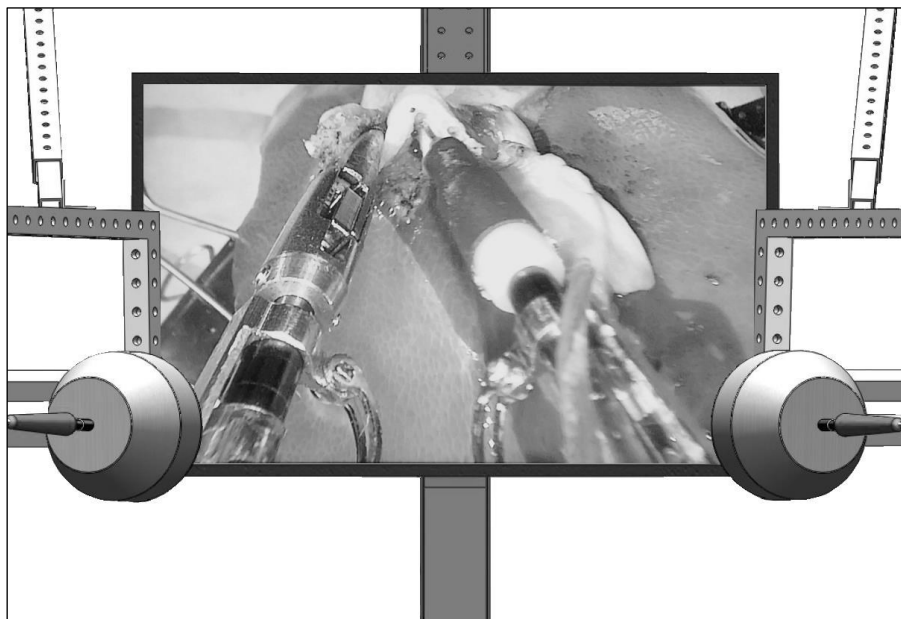


Abb. 47: Mögliches Sichtfeld des Chirurgen auf die Eingabeeinheit. Zur besseren Veranschaulichung wurde diese Abbildung digital nachbearbeitet.

Die von Zehetner et al. im Jahr 2009 empfohlene Bildschirmdurchschnittshöhe von 160 cm für stehende laparoskopische Operationen und weitere Vorgaben zur optimalen Positionierung bis ins Jahr 2015 sind an diesem telemedizinischen Eingabebereich umsetzbar [76, 77, 81, 86, 87]. Blickt der Operateur mit einer -30° Blickachse aus 80 cm Entfernung auf den zentral vor ihm liegenden Monitor, so könnte er rechnerisch eine Augenhöhe von 216 cm haben und dennoch im Stehen nach ergonomischen Vorgaben arbeiten. Die Blickachse treffe dennoch im 90° Winkel auf das Display und würde nach wie vor optimale Sicht ermöglichen. In Abb. 47 ist exemplarisch ein mögliches Sichtfeld an dem in dieser Arbeit entwickelten Eingabebereich dargestellt.

Die mittlere Augenhöhe von deutschen Männern (Alter 18-65 Jahre) in stehender Haltung beträgt im Vergleich 163 cm [103]. Auch die ermöglichte Mindestaugenhöhe im Sitzen von 122 cm liegt weit unter dem deutschen Durchschnittswert und die Displayhöhe im empfohlenen Bereich [86, 103]. Der Monitor kann auf Grund der aktuellen Empfehlungen in der Literatur nur zentral frontal vor dem Operateur platziert werden [67, 71, 75, 86, 87]. Der Abstand zwischen Operateur und Monitor kann im Rahmen der Empfehlungen durch Anpassung der 3D-Eingabeeinheiten und der Armablageausleger ebenfalls adjustiert werden und so sind Auge-Monitor Abstände zwischen 50-100 cm realisierbar. Der Auge-Monitorabstand wird von vielen Faktoren beeinflusst und ist interindividuell unterschiedlich. Die Fachliteratur empfiehlt hier einen Abstand von 80-120 cm [67, 86].

Mögliche Positionierung der Armablagen

Die Ellenbogenhöhe der männlichen deutschen Bevölkerung zwischen 18 bis 65 Jahren liegt im Mittel bei 110 cm [103]. Damit haben auch sehr große Benutzer in stehender Haltung keine Probleme ihre Ellenbogen am telemedizinischen Eingabebereich aufzulegen. Die Schulterbreite liegt dabei im Mittel bei 48 cm [103]. Diesen Abstand zwischen den Armablagen können die Armausleger problemlos gewährleisten, da die mögliche Entfernung zwischen den beiden Armauflagen 0-142 cm beträgt.

Mögliche Positionierung der Eingabeeinheit

Die Positionierung der Eingabeeinheit ist flexibler als die der Armablagen und bietet durch den Drehpunkt „D“ (Abb. 35) eine zusätzliche Neigungsmöglichkeit der Eingabeeinheit. Die Positionierung der Eingabeeinheit ist durch die Aufhängung an diesem Punkt besonders flexibel und einfach umrüstbar. Der Punkt „D“ wurde zudem als Messpunkt für die Angabe der Einstellungsmöglichkeiten gewählt, da die Position des TCP der Eingabe je nach Eingabesystem variabel ist.

4.2.3. Verbesserungspotential des Prototypen

Ein generelles Problem dieser Konstruktionsform mit einer einzelnen Mittelsäule und vielen Auslegern (Abb. 33 rechts) sind Schwingungen. Um diesen entgegenzuwirken könnte die gesamte Konstruktion aus massiveren Bauteilen gefertigt werden. Breitere Schienen, präzisere Abstimmung von Schlitten und Schiene sowie zusätzliche Klemmschrauben erhöhen dabei die Stabilität. Eine weitere Möglichkeit ist auch die zusätzliche Verstrebung mit Stahlzügen, die allerdings die Verstellbarkeit des Eingabebereiches einschränkt. Zusätzliche Dämpfer zwischen den verschiedenen Bauteilgruppen könnten übertragene Schwingungen ebenfalls minimieren. Eine weitere Lösung wäre die feste Verbindung der Bauteilgruppen, beispielsweise durch Schweißnähte, zu Ungunsten der Zerlegbarkeit und somit Transportfähigkeit. Eine entsprechende professionelle und maschinelle Fertigung des Eingabebereiches sollte die Schwingungsproblematik ebenfalls verringern. Auch eine zusätzliche Winkelverstellbarkeit des Monitors wäre denkbar. Zur Kostenreduktion des Eingabebereiches könnten statt Aluminium auch günstigere Metalle verwendet werden, die jedoch mögliche Nachteile, wie z.B. Oxidation, aufweisen können. Je nach Konfiguration der 3D-Eingabeeinheit in Bezug auf Display und Blickachse des Operateurs können Teile der Anzeige verdeckt werden. Dies ist ein Problem des möglichst flexiblen Aufbaus und könnte nur unter teilweiser Aufgabe dieser Flexibilität behoben werden. Die Weiterentwicklungen der modernen Virtual-Reality-Brillen könnten diese Möglichkeit der Sichtfeldproblematik deutlich verbessern und für den Operateur weiterhin die

gewünschte Flexibilität gewährleisten. Weiterhin ist die zusätzliche Sicherheitsfunktion der Operateur-Überwachung zu überdenken. Dies ist bei dem da Vinci[®] System erkennbar, da hier durch Entfernung des Kopfes vom Okular die Übertragung der Eingabe auf den Endeffektor pausiert. So können versehentliche Eingabebefehle durch automatischen Abbruch der Übertragung vermieden werden.

4.2.4. Einrichten eines telemedizinischen Eingabebereiches

Aus den in Kapitel 1.6.1 beschriebenen ergonomischen Grundlagen und den Erfahrungen aus der Konstruktion und der Testung des telemedizinischen Eingabebereiches ergeben sich die folgenden Empfehlungen zur Einstellung eines modernen telemedizinischen Eingabebereiches. Der erste Schritt ist die Einstellung der Sitzhöhe. Die Oberschenkel des Operateurs zeigen waagrecht in Richtung der Eingabekonsole und die Fersen berühren den Boden, damit eine komfortable und stabile Sitzposition gewährleistet werden kann. Die Rückenlehne sollte eine aufrechte Oberkörperhaltung unterstützen. Im zweiten Schritt wird der Monitor zentral vor dem Operateur positioniert werden, um eine Rotation der Halswirbelsäule zu vermeiden. Die Oberkante des Monitors sollte unterhalb der Augenhöhe liegen. Die Höhendifferenz zwischen Augen und Monitor sollte zu einer Kopfneigung von 15°-45° führen, um Muskelverspannungen zu minimieren. Der Kopf sollte während der Operation nicht in Richtung Monitor gestreckt werden, da dies zu starker Belastung der Halswirbelsäule führt. Im nächsten Schritt wird nun die Höhe und Position der Armablage so angepasst, dass je nach gewählter Position die Ellenbogen bzw. Unterarme aufliegen und die Schultermuskulatur spannungsfrei erscheint. Danach folgt die Positionierung der Eingabeeinheit in einer gut erreichbaren Stellung. Es ist darauf zu achten, dass in der Grundhaltung keine Deviation der Hände nach ulnar oder radial zu erkennen ist. Die Fußpedale sollten im letzten Schritt nach Möglichkeit vom Benutzer einsehbar sein; nahe den Füßen und in der Arbeitsrichtung des Oberkörpers liegen.

4.3. Zweiter Versuch: Interpretation der Ergebnisse

Unsere Alternativhypothese ist, dass sich die 60°/20°-Eingabehaltung von der korrespondierenden OP-Eingabehaltung in Arbeitsgeschwindigkeit, Erreichbarkeit, Ergonomie und Intuitivität unterscheidet. Diese Unterschiede werden sowohl im Sitzen als auch im Stehen vermutet. Zudem soll ein Unterschied im Bereich Ergonomie zwischen den sitzenden und den jeweils korrespondierenden stehenden Eingabehaltungen untersucht werden. Die Frage, ob sitzendes oder stehendes Arbeiten gesünder ist, stellt sich nicht nur im Operationssaal, sondern ist ein aktuelles Thema in der gesamten Arbeitswelt. Es werden zudem in aktuellen Studien weitreichendere Folgen als nur Rückenschmerzen und Muskelverspannungen untersucht [104-107]. Im Zuge dessen wird diskutiert, ob eine stehende Arbeitshaltung die Produktivität der Angestellten steigert und wie sich die Arbeitshaltung auf die grundsätzliche Gesundheit der Mitarbeiter auswirkt [79, 83, 106-111].

4.3.1. Interpretation der Zeitwerte der Eingabehaltungen

Da keine signifikanten Zeitwertunterschiede zwischen den verschiedenen Eingabehaltungen nachgewiesen werden können (Abb. 40), scheinen die Eingabehaltungen eine ähnliche Leistungsfähigkeit der Nutzer zu gewährleisten. Interessant ist, dass auch zwischen den sitzenden und den korrespondierenden stehenden Eingabehaltungen kein signifikanter Unterschied ersichtlich wird. Dies weist darauf hin, dass die stehenden Haltungen die Probanden in unserem Versuchsaufbau nicht messbar einschränken. Dies entspricht der aktuellen Unklarheit, ob eine stehende Haltung sich positiv auf Muskelverspannungen und Gesundheit auswirkt, der Operationssaal bringt hier im Vergleich zu Bürotätigkeit mit Sicherheit andere Voraussetzungen und Verbesserungsmöglichkeiten mit sich [78, 79, 105-108, 112, 113]. In diesem Zusammenhang ist zu bedenken, dass man bei sehr geringen Unterschieden zum Nachweis einer Signifikanz hohe Fallzahlen benötigt. Um etwaige sehr geringe Unterschiede zwischen den Eingabehaltungen genauer evaluieren zu können, müsste die Studie daher mit höherer Probandenanzahl erneut durchgeführt werden. Zudem könnten mehr

und in ihrer Bandbreite unterschiedlichere Testaufgaben erstellt werden, um eine höhere Trennschärfe zu erreichen.

4.3.2. Ergebnisse der Probandenbefragung

Vergleich von Erreichbarkeit, Ergonomie und Intuitivität

Die Ergebnisse der Fragebögen müssen kritisch interpretiert werden, da sie zwar standardisiert sind, jedoch keine evidenzbasierten Vorlagen zugrunde liegen. Um genauere Aussagen zu Ergonomie und Intuitivität zu ermöglichen, müssten umfangreichere evidenzbasierte Fragebögen zur Überprüfung der einzelnen Kategorien genutzt werden. Zudem wäre die Durchführung einer Elektromyografie denkbar, um zu den subjektiven Fragebogendaten objektive Muskelpotentialmessungen durchzuführen. Aufgrund der sehr ähnlichen Werte im Bereich Erreichbarkeit und Ergonomie scheinen die Eingabehaltungen den Probanden sehr ähnliche Arbeitsbedingungen zu bieten (Tabelle 14 und Tabelle 15). Die Erreichbarkeit wurde hier im Mittel mit 7,9 Punkten jedoch deutlich besser bewertet als die Ergonomie mit 6,5 Punkten. Eine Begründung hierfür ist möglicherweise, dass die Art der Steuerung für die Probanden ungewohnt ist und deshalb keine höheren Ergonomiewerte erreicht werden. Zudem wurde der Versuch mit nur einem Eingabegerät durchgeführt, was vom Probanden als unangenehme Asymmetrie empfunden werden kann und so das Ergebnis negativ beeinflusst. Ebenso wie aktuell in der Literatur diskutiert, kann auch in unserer Studie kein signifikanter ergonomischer Unterschied zwischen sitzender und stehender Haltung gezeigt werden (Tabelle 15) [79, 104-108]. Der Intuitivitätsunterschied zwischen der sitzenden OP-Haltung und der sitzenden 60°/20°-Haltung liegt knapp oberhalb der Signifikanzschwelle von $p < 0.05$; mit einem p-Wert von 0.056 (Tabelle 15). Man kann hier also von einem Trend hin zur 60°/20°-Eingabehaltung als intuitivere Eingabehaltung sprechen. Diese Tendenz könnte eine Studie mit höherer Probandenzahl validieren.

Von Probanden präferierte Eingabebehaltung

Das Ergebnis der direkten Frage nach einer präferierten Eingabebehaltung bestätigt die Annahme, wie bereits in der Ergonomie-Befragung und den erreichten Zeitwerten ersichtlich, dass weder stehende oder sitzende Haltungen als grundsätzlich besser bezeichnet werden können. Dies entspricht der aktuell nicht eindeutigen Meinung der Fachliteratur [79, 80, 105, 106, 108, 109, 111].

4.3.3. Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Gesamtzeit

Einfluss der angegebenen Vorerfahrung auf die erreichte Gesamtzeit

Der gezeigte Zusammenhang zwischen Videospieleerfahrung bzw. 3D-Eingabeerfahrung steht dem Ergebnis von Haagen et al. aus dem Jahr 2009 und Harper et. al. aus dem Jahr 2007 entgegen, die keinen positiven Effekt von gezeigten Videospielefähigkeiten auf den Umgang mit dem da Vinci® System darstellen konnten. Es zeigte sich bei jenen Untersuchungen jedoch ein positiver Effekt von regelmäßiger sportlicher Betätigung der Teilnehmer [114, 115]. Ein Grund für diesen Unterschied könnte sein, dass unsere Probanden nicht nach ihrer sportlichen Betätigung befragt wurden und dieser Aspekt die Ergebnisse unbemerkt beeinflussen konnte. Die Untersuchung von Haagen et al. stellte einen Zusammenhang zwischen Laparoskopieerfahrung und erzielter Leistung im Umgang mit dem da Vinci® System fest, wie in dieser Arbeit auch dargestellt. Eine zuverlässige Aussage ist aber aufgrund der bei allen Probanden gering ausgeprägten Laparoskopieerfahrung schwierig. Dies ist an der nach links tendierenden Punktwolke in Abb. 43 erkennbar. Die fehlende Korrelation zwischen Computererfahrung und Gesamtzeit lässt sich anhand eines Deckelungseffekts erklären, da der Großteil der Probanden im Fragebogen Computererfahrungswerte im Bereich von 9 und 10 Punkten angab. Hier wäre es interessant, ältere Probanden zu testen, deren Generation weniger Erfahrung mit digitalen Systemen im Allgemeinen aufweist.

Einfluss der Gruppenzuteilung auf die Gesamtzeit

Die randomisierten Gruppen 1,2 und 4 unterscheiden sich in ihren mittleren Gesamtzeitwerten nur geringfügig voneinander (Tabelle 21 und Abb. 45). Für

die Abweichung der Gruppe 3 ist kein Grund ersichtlich. So sind zwar die angegebenen Vorerfahrungswerte gegenüber Gruppe 1 niedriger, dies trifft jedoch auch für Gruppe 4 zu, welche nicht in diesem Maße von Gruppe 1 abweicht. Hier kommen nicht gemessene Vorerfahrungen als Ursache der Unterschiede in Frage.

4.3.4. Einschränkungen des zweiten Versuches

Ein einschränkender Faktor der Studie ist die Versuchsdauer. Die Probanden arbeiten lediglich zwischen 20 und 30 Minuten mit dem Gerät, d.h. dass Aussagen über Langzeitnutzung, ähnlich wie sie in Operationen vorkommt, nur schwer zu formulieren sind. Zu beachten ist auch, dass kein 3D-Monitor verwendet wird und so die Bedienung erschwert sein kann. Ziel ist jedoch die Benutzerhaltung zu untersuchen und nicht das Eingabesystem als solches. Da dabei alle Probanden mit der fehlenden Dreidimensionalität arbeiten müssen, sollte sich diese nicht in messbaren Unterschieden zeigen. Auch die in dieser Arbeit erfassten subjektiven Eindrücke sind im Vergleich zu objektiven Messung, wie beispielsweise Muskelpotentialmessungen, weniger verlässlich. Es ist jedoch zu bedenken, dass gerade im Bereich Intuitivität und Ergonomie das interindividuelle Empfinden eine große Rolle spielt, weshalb dieses hier unter anderem als Vergleichsparameter herangezogen wird.

4.3.5. Direkter Vergleich der Eingabehaltungen

Die OP-Eingabehaltung und die 60°/20°-Eingabehaltung sind sich bei Betrachtung der Gesamtzeit und der Erreichbarkeit der Extrempunkte sehr ähnlich und zeigen keinen signifikanten Unterschied. Die sitzende OP-Haltung wird von der Mehrheit der Probanden als am ergonomischsten und ermüdungsfreiesten eingeschätzt, wenngleich dieses Ergebnis nicht signifikant ist. Zwischen den stehenden und sitzenden Haltungen kann auch in unserer Studie kein signifikanter Unterschied nachgewiesen werden. Allerdings bietet der entwickelte Eingabebereich dem Nutzer die Möglichkeit beides zu realisieren und ist so auf zukünftige Forschungsergebnisse im Bereich Ergonomie vorbereitet. Bezüglich der Intuitivität bevorzugen die Probanden die 60°/20°-Haltungen. Der Trend hin zur 60°/20°-Haltung als intuitiver kann mit

Erkenntnissen zur Ergonomie an Arbeitsplätzen und im OP-Bereich begründet werden. Die 60°/20°-Haltung hält die für die Intuitivität bereits erwähnte Auge-Hand-Ziel-Achse ein, die OP-Haltung zeigt dagegen eine im Vergleich zur Blickachse deutlich gesenkte Arbeitsachse [67, 71, 86-88]. Es entsprechen beide Haltungen weitgehend der Empfehlung für ergonomisches Arbeiten von Matern aus dem Jahr 2009. Diese besagt, dass der Winkel im Ellenbogen zwischen 90-120° liegen sollte [81]. Auch den Forderungen der neutralen Haltung des Unterarms zwischen Pro- und Supination bzw. einer neutralen Handgelenksstellung ohne radiale oder ulnare Abknickung kommen beide Eingabehaltungen nach [81]. Jedoch zeigt nur die OP-Haltung eine horizontale Ausrichtung des Unterarms, was als wichtig für ermüdungsfreies Operieren angesehen wird [81].

Es stellt sich die Frage, ob der mögliche Intuitivitätszugewinn der 60°/20°-Haltung eine Veränderung der Unterarmposition und damit eine mögliche Verringerung der Ergonomie gegenüber der OP-Haltung rechtfertigt. Die Anpassung der Monitorposition an die Arbeitsrichtung der OP-Haltung ist dabei keine Lösung, da der Inklinationswinkel der Halswirbelsäule dabei -45° unterschreiten würde, was als nicht ergonomisch gilt [67, 71, 76, 78, 81, 86-89]. Ein Kompromiss zwischen Ergonomie und Intuitivität könnte die Lösung sein. Unerfahrene Operateure könnten den Fokus auf hohe Intuitivität legen und mit zunehmender Erfahrung auf Ergonomie umschwenken. Dies kann auch mit der Argumentation begründet werden, dass unerfahrenere Operateure eher kurze Operationen mit einem für sie neuen System durchführen werden, wohingegen erfahrene Operateure komplexere und langwierigere Operationen bewältigen müssen. Die längeren Belastungszeiträume machen Ergonomie dabei umso wichtiger.

4.4. Ökonomische Aspekte der Telemedizin und Robotik

Die Anwendung von Telemedizin, Telechirurgie und Robotik im klinischen Bereich verursacht hohe Kosten für die betreffenden Kliniken und für das gesamte Gesundheitssystem [23, 36, 116]. Diese Kosten entstehen größtenteils durch die Anschaffung und die Instandhaltung der eingesetzten Systeme [30].

Neue Möglichkeiten zur Versorgung von Patienten, die trotz großer Distanz zu professioneller Versorgung durch die Anwendung von telemedizinischen Systemen behandelt werden können, werden die Gesundheitsversorgung in den kommenden Jahren verändern. Dazu gehören unter anderem die Lösung von Versorgungsproblemen in abgelegenen Regionen oder Kriegsgebieten [37]. Sogar die telemedizinische Versorgung von Astronauten ist eine Vision [22, 25]. Dennoch gilt es zu bedenken, ob die neuen Möglichkeiten der Telemedizin die immensen Investitionen rechtfertigen. Daraus resultiert auch die Frage, ob der DRG-Katalog in Deutschland auf eine Förderung der Verbreitung von Robotik nutzender Verfahren ausgelegt werden sollte. Die Konstruktion dieses Prototypen zeigt jedoch, dass die Verwirklichung eines telemedizinischen Eingabebereiches mit umfangreichen Individualisierungsoptionen für einen Materialkostenpreis von unter 500 € durchaus möglich ist. Zu diesen reinen Materialkosten kommen in der medizintechnischen Praxis natürlich noch weitere Kosten hinzu. Hierzu zählen unter anderem die Entwicklungs- und Zulassungskosten sowie Fertigungs- und Lagerungskosten.

4.5. Einordnung der Ergebnisse in den wissenschaftlichen Kenntnisstand

Aktuelle Studien zeigen den Wunsch und die Notwendigkeit zur Schaffung ergonomischer Verhältnisse im Bereich des Operationssaals [37, 70-72, 75, 77, 78]. In der Disziplin der laparoskopischen Chirurgie begeben sich Operateure täglich in sehr unangenehme Körperhaltungen und gerade hier kann sich das große Potential telemedizinischer Eingabebereiche entfalten [5, 17, 27, 48, 52, 53, 67, 71, 75-77, 81, 84]. Die telemedizinischen Eingabebereiche können mögliche gesundheitliche Risiken für Operateure verringern und damit auch ihre Leistungsfähigkeit erhöhen [28, 53, 67, 72, 84]. Muskuläre sowie mentale Ermüdung kann reduziert und die Präzision ihrer Bewegungen erhöht werden [17, 23, 24, 27, 28, 30, 50, 63, 75]. Durch einen intuitiven und anpassbaren Aufbau der Eingabeeinheit können zudem Berührungszonen mit den Verfahren verringert werden.

Der im Rahmen dieser Arbeit konstruierte telemedizinische Eingabebereich bietet dem Operateur diese gewünschte individuelle und ergonomische Anpassungsmöglichkeit und kann somit zur Vermeidung von Verspannungen und Muskelschmerz beitragen. Aktuell diskutierte „Micro-Breaks“ (Mikropausen), sind für den Operateur unkomplizierter durchführbar, da er während der Operation nicht steril sein muss [117, 118]. Zudem wurden bei der Konstruktion des Eingabebereiches verschiedene ergonomische und intuitive Grundlagen sowie anthropometrische Körpermaße berücksichtigt (Kapitel 1.6.1). An diesem Eingabebereich kann schnell und einfach die Blick- und Arbeitsachse des Operateurs verändert werden. Auch eine Veränderung der Eingabehaltung während einer längeren Operation ist möglich, was nachweislich zur Entlastung verspannter Muskelgruppen beiträgt und auf diese Weise Schmerzentstehung verhindert [71, 78, 81, 118]. Des Weiteren können dadurch, wie in unseren Versuchen durchgeführt, verschiedene Formen der Eingabehaltung direkt miteinander verglichen werden. Der im Rahmen dieser Arbeit konstruierte Eingabebereich bietet so die Möglichkeit weiterführende Forschung zu betreiben.

Die im zweiten Versuch mittels Likert-Skala erhobenen Vorerfahrungswerte der Probanden in verschiedenen Bereichen scheinen Einfluss auf den Umgang mit dem 3D-Eingabemedium auszuüben. Es zeigte sich eine signifikant negative Korrelation der benötigten Gesamtzeit mit der angegebenen Videospiel- und 3D-Eingabevorerfahrung. In der Literatur finden sich hierzu unterschiedliche Ansichten. Einerseits zeigen Studien, dass Personen mit Videospielexfahrung laparoskopisches Vorgehen schneller erlernen, jedoch ist bei robotergestütztem Vorgehen kein Vorteil nachweisbar [119-121]. Andere Studien belegen, dass Videospiel- und Laparoskopieerfahrung wiederum einen positiven Effekt auf das Erlernen robotergestützter Operationen haben [27, 122, 123]. Die Vorerfahrung in verschiedenen Bereichen ist schwer quantifizierbar und deshalb kritisch zu beurteilen.

4.6. Zusammenfassende Betrachtung und Schlussfolgerung

Aus dem ersten Versuch ergibt sich die 60°/20°-Haltung im Vergleich als günstigste Eingabehaltung. Da durch die gemessenen Zeit- und Fehlerwerte keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden können, werden das Ergebnis der Probandenbefragung sowie anatomische Überlegungen als Entscheidungshilfe herangezogen. In Zusammenschau mit aktueller Ergonomie-Literatur und anatomischen Überlegungen ist daher anzunehmen, dass die 60°/20°-Eingabehaltung eine günstigere Handgelenksausrichtung und somit eine bessere Extrempunkterreichbarkeit als die Vergleichshaltungen ermöglicht [5, 48, 67, 71, 73, 78, 81, 93].

Im zweiten Versuch können zwischen 60°/20°-Haltung und OP-Haltung in den Bereichen der Bearbeitungszeit und Erreichbarkeit der Extrempunkte keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Bezüglich der Intuitivität bevorzugen die Probanden die 60°/20°-Eingabehaltungen. Obwohl die Signifikanz im Intuitivitätsunterschied zwischen den beiden sitzenden Eingabehaltungen bei $p = 0.06$ lag und damit knapp oberhalb der Signifikanzschwelle, kann man hier von einem Trend hin zur 60°/20°-Eingabehaltung sprechen. Dieser Trend kann mit Erkenntnissen über intuitives Arbeiten begründet werden. Die 60°/20°-Haltung hält die für die Intuitivität wichtige Auge-Hand-Ziel-Achse ein, wohingegen die OP-Haltung eine im Vergleich zur Blickachse deutlich nach unten abweichende Arbeitsachse aufweist [67, 71, 86-88]. Es entsprechen dabei beide Eingabehaltungsformen größtenteils den Empfehlungen für ergonomisches Arbeiten von Matern et al. [81]. Es ist also fraglich, ob gleichzeitig ein Maximum an Intuitivität und ein Maximum an Ergonomie erreicht werden kann.

Kann ein möglicher Intuitivitätszugewinn in der 60°/20°-Haltung eine Veränderung der Unterarmposition und damit eine mögliche Verringerung der Ergonomie gegenüber der OP-Haltung rechtfertigen? Das Anpassen der Monitorposition an die Arbeitsrichtung der OP-Eingabehaltung ergäbe zwar einen Intuitivitätszugewinn, jedoch wäre dies aufgrund des zu hohen Inklinationswinkels der Halswirbelsäule als ergonomisch ungünstig zu bewerten [67, 71, 76, 81, 86-89]. Eine Lösung für diese Problematik könnte sein, dass

unerfahrene Operateure den Fokus auf hohe Intuitivität legen und mit wachsender Erfahrung auf ergonomischere und deutlich günstigere Haltungen umschwenken.

Darüber hinaus wird die sitzende OP-Haltung im Vergleich zur stehenden Haltung von den meisten Probanden als ermüdungsfreier bewertet. Zwischen stehenden und sitzenden Eingabehaltungen können jedoch keine signifikanten Unterschiede nachgewiesen werden. Dies entspricht der aktuell geführten Diskussion in der Literatur. Wobei nicht klar ist inwiefern stehende Eingabehaltungen die Gesundheit der Angestellten positiv oder negativ beeinflussen [70, 78, 79, 81, 105-107, 109, 111].

Es ist schwierig, eine für alle Nutzer optimale Eingabehaltung zu empfehlen, da die interindividuell unterschiedlichen Erfahrungen und Vorlieben in die Gestaltung eines Arbeitsplatzes hineinspielen. Auch eine über längere Zeiträume aufgebaute Gewöhnung an unterschiedliche Techniken und Instrumente sollte miteinfließen [70]. So muss jeder Nutzer selbst einschätzen, welche Erfahrungen er mitbringt und ob er seinen Fokus zu Beginn eher auf Ergonomie oder Intuitivität legen möchte. Da jedoch ein großes Interesse an ergonomischem Arbeiten besteht, um den Operateuren im Hinblick auf ihre Gesundheit und bestmögliche Behandlungsergebnisse optimale Voraussetzungen aufzuzeigen, sind verständliche Leitlinien zum Einrichten eines ergonomischen Operationsfeldes bzw. eines telemedizinischen Eingabebereiches notwendig [77, 78, 118, 124]. Zudem sollte auch die Umsetzung dieser Kenntnisse im operativen Alltag durch entsprechende Ausstattung des OP-Bereiches ermöglicht und gefördert werden. Durch bessere ergonomische Kenntnisse und durch umfangreich individualisierbare, telemedizinische Eingabebereiche könnten so körperliche Beschwerden der Operateure in Zukunft verringert werden [5, 26, 78, 112]. Neben der Kosteneffizienz und den klinischen Ergebnissen wird auch die Akzeptanz unter den Nutzern die weitere Verbreitung der Telerobotik beeinflussen, auch deshalb sollten die Hersteller die intuitive und ergonomische Bedienung der Geräte nicht außer Acht lassen [26].

Das Ziel eines individuellen, an ergonomische Bedürfnisse anpassbaren und intuitiven telemedizinischen Eingabebereiches konnte im Rahmen dieser wissenschaftlichen Arbeit erreicht werden. Es konnte gezeigt werden, dass bei geringen Materialkosten ein solider und umfangreich anpassbarer Eingabebereich realisierbar ist. Durch das Gewicht von weniger als 30 kg und mit Hilfe der angebrachten Rollen ist er zudem gut transportabel. Weiterhin wird die Transportfähigkeit durch einfaches und schnelles Zerlegen ohne zusätzliches Werkzeug erhöht.

Die medizintechnischen Entwicklungen der kommenden Jahre werden das Arbeitsumfeld „Operationssaal“ und damit die Arbeitsbedingungen der Chirurgen sicherlich verändern. Es besteht die Hoffnung, dass die Operateure durch individuell anpassbare und ergonomische Arbeitsbedingungen vor berufsbedingten Erkrankungen geschützt werden und so ihrer verantwortungsvollen Arbeit möglichst lange nachgehen können.

5. ZUSAMMENFASSUNG

Einleitung: Die moderne robotergestützte Chirurgie bringt die Notwendigkeit der Entwicklung neuer Eingabebereiche mit sich. Diese neuen chirurgischen Eingabebereiche können grundsätzlich in offene und geschlossene Systeme unterteilt werden. Im Rahmen eines DFG geförderten Flexmin-Projektes wird in dieser Arbeit ein offener Eingabebereich nach Bedingungen der Parallelkinematik konstruiert. Grundlegendes Ziel ist dabei die Entwicklung eines für die robotergestützte Chirurgie geeigneten und individualisierbaren Eingabebereiches.

Material und Methoden: Der erste Versuch verglich vier Eingabehaltungen bezüglich Genauigkeit der Bewegung und Ergonomie. Die Probanden mussten dabei mit möglichst hoher Präzision verschiedene Kreisbahnen nachzeichnen. Aus diesem Vergleich ging die 60°/20°-Eingabehaltung als Favorit hervor. Sie stand im zweiten Versuch der sogenannten OP-Eingabehaltung gegenüber. Die OP-Eingabehaltung wurde der Körperhaltung des Chirurgen während der laparoskopischen transanalen Sigma-Resektion nachempfunden. Als Versuchsumgebung dienten der zuvor dafür konstruierte telemedizinische Eingabebereich sowie diverse digitale Geschicklichkeitsprüfungen. Diese wurden gängigen Laparoskopieübungen nachempfunden. Zur Verringerung von Lerneffekten wurden Übungsaufgaben durchlaufen und randomisierte Reihenfolgegruppen gebildet. Sowohl sitzende als auch stehende Eingabehaltungen waren dabei Teil des Versuches.

Ergebnisse: Aus dem vier Eingabehaltungen und zehn Probanden umfassenden ersten Versuchsaufbau mit insgesamt zwölf Testdurchläufen je Proband ging die 60°/20°-Eingabehaltung aufgrund der erfragten Probandeneinschätzungen und grundsätzlicher anatomischer Überlegungen als günstigste Eingabehaltung hervor. Als Grundlage für den zweiten Versuchsaufbau wurde dann ein individualisierbarer telemedizinischer Eingabebereich konstruiert. An diesem durchliefen die zwanzig Probanden je sechzehn Testungen. Es zeigten sich bezüglich Bearbeitungszeit und Erreichbarkeit der Extrempunkte zwischen den vier Eingabehaltungen keine signifikanten Unterschiede. Die sitzende OP-Eingabehaltung wurde allerdings gegenüber den Vergleichshaltungen von den Probanden als ergonomischer und ermüdungsfreier bewertet. Bezüglich der Intuitivität bevorzugten die Probanden die 60°/20°-Eingabehaltung. Dabei lag der Unterschied zwischen den sitzenden Eingabehaltungen mit einem p-Wert von .056 nur knapp oberhalb der Signifikanzschwelle. Zwischen benötigter Zeit und angegebener Videospiele- und 3D-Eingabeerfahrung zeigte sich eine signifikant negative Korrelation.

Schlussfolgerung: In den durchgeführten Versuchen zeigte sich, dass eine hohe Intuitivität bei gleichzeitig hoher Ergonomie nicht immer realisierbar ist. Es sollte dem Nutzer daher die grundsätzliche Entscheidung ermöglicht werden, ob er seinen Fokus auf Ergonomie oder Intuitivität richten möchte. In diese Entscheidung sollten verschiedene Vorerfahrungen des Operators miteinfließen. Grundlegend für die Umsetzung der Entscheidung ist die Anpassbarkeit des jeweiligen Eingabebereiches an die Bedürfnisse des Nutzers. Diese notwendige Individualisierbarkeit bietet der im Rahmen dieser Dissertation entwickelte telemedizinische Eingabebereich. Er ist zudem leicht transportabel, schnell zerlegbar und einfach erweiterbar. Durch die Entwicklung und den vermehrten Einsatz solcher telemedizinischer Eingabebereiche könnten Operateure schon in naher Zukunft mit weniger körperlichen Beschwerden konfrontiert werden als dies aktuell noch der Fall ist.

6. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Master-Eingabekonsole des „da Vinci [®] “-Operationssystems.	8
Abb. 2: Frontalansicht FLEXMIN-Roboter-Slave-Einheit.	10
Abb. 3: FLEXMIN-Roboter-Slave-Einheit.	11
Abb. 4: FLEXMIN-Master- und Slave der TU Darmstadt.	13
Abb. 5: Am 3D-Eingabegerät montierter Stift-Pinzetten-Hybrid.	14
Abb. 6: Explosionszeichnung des Stift-Pinzetten-Hybriden.	14
Abb. 7: Vorgehensweise im Rahmen der Studie.	17
Abb. 8: Darstellung von Monitor und Graphiktablett.	18
Abb. 9: Übersicht der Struktur des ersten Versuches.	19
Abb. 10: In dieser Weise werden die Eingabehaltungen untereinander verglichen.	19
Abb. 11: Erster Versuch: Digitale Zeichenvorlagen.	20
Abb. 12: Erster Versuch: Aufbau.	20
Abb. 13: Erster Versuch: Flussdiagramm des Versuchsablaufes.	22
Abb. 14: Erster Versuch: Korrekturschablone für den mittleren Schwierigkeitsgrad.	24
Abb. 15: Zweiter Versuch: Übersicht der Struktur.	25
Abb. 16: Auf diese Weise werden die Eingabehaltungen untereinander verglichen.	25
Abb. 17: Übungsaufgabe zweiter Versuch.	26
Abb. 18: Aufgabe 1 / Ringe durchfahren.	27
Abb. 19: Aufgabe 2 / Geweberetraktion.	27
Abb. 20: Aufgabe 3 / Befüllung Bergebeutel.	28
Abb. 21: Aufgabe 4 / Zylinderpositionierung.	28
Abb. 22: Rotation der Eingabeeinheit.	30
Abb. 23: Proband bei Durchführung der Übungsaufgabe.	30
Abb. 24: Zweiter Versuch: Flussdiagramm des Versuchsablaufes.	31
Abb. 25: Verteilung der Gesamtzeit der Probanden je Eingabehaltung (24P).	34
Abb. 26: Verteilung der Gesamtfehleranzahl der Probanden je Eingabehaltung (24P).	35
Abb. 27: Verteilung der Gesamtzeit der Probanden je Eingabehaltung (16P).	36
Abb. 28: Verteilung der Gesamtfehleranzahl der Probanden je Eingabehaltung (16P).	37
Abb. 29: Verteilung der Gesamtzeit der Probanden je Haltung (8P).	38
Abb. 30: Verteilung der Gesamtfehleranzahl der Probanden je Haltung (8P).	39
Abb. 31: Verteilung der Gesamtzeit- und Gesamtfehlerwerte der beiden Gruppen.	40
Abb. 32: Verteilung der Stimmen je kleinem Kreis nach Haltungen.	41
Abb. 33: CAD-Modell des frühen (a) und endgültigen (b) Eingabebereichtwurfes.	42
Abb. 34: Ausleger der Armablage.	44
Abb. 35: Ausleger der Eingabehalterung.	45
Abb. 36: Delta Kinematik der TU Darmstadt.	46
Abb. 37: Kurzstrecken-Transportform des Eingabebereiches.	48
Abb. 38: Zerlegte Baugruppen des Eingabebereiches.	49
Abb. 39: 60°/20°-Einstellung am telemedizinischen Eingabebereich.	49
Abb. 40: Arithmetisches Mittel und Standardabweichung der Gesamtzeitwerte.	51
Abb. 41: Beziehung von Gesamtzeit und Videospieleerfahrung.	54
Abb. 42: Beziehung von Gesamtzeit und 3D-Eingabeerfahrung.	55
Abb. 43: Beziehung von Gesamtzeit und Laparoskopieerfahrung.	56
Abb. 44: Beziehung von Gesamtzeit und Computererfahrung.	57
Abb. 45: Verteilung der Gesamtzeit innerhalb der Reihenfolgegruppen.	58
Abb. 46: Eingabebereich der TU Darmstadt.	70
Abb. 47: Mögliches Sichtfeld des Chirurgen auf die Eingabeeinheit.	70

7. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Grundlegende Unterschiede immersiver und nicht immersiver Eingabe.	12
Tabelle 2: Tablet-Einstellungen im ersten Versuch.	18
Tabelle 3: Die Eingabehaltungen im zweiten Versuch.	29
Tabelle 4: Reihenfolge der Eingabehaltung je Gruppe.	32
Tabelle 5: Verteilung der Gesamtzeitwerte je Haltung (24P).	34
Tabelle 6: Verteilung der Gesamtfehleranzahl je Haltung (24P).	35
Tabelle 7: Verteilung der Gesamtzeit und Gesamtfehler (16P).	36
Tabelle 8: Verteilung der Gesamtfehleranzahl je Haltung (16P).	37
Tabelle 9: Verteilung der Gesamtzeit (8P).	38
Tabelle 10: Verteilung der Gesamtfehleranzahl (8P).	39
Tabelle 11: Frage nach der Schwierigkeit der kleinen Kreise im Vergleich (8P).	41
Tabelle 12: Präferierte Eingabehaltung der Probanden.	41
Tabelle 13: Verteilung der Gesamtzeitwerte der Eingabehaltungen.	51
Tabelle 14: Ergebnisse der Fragebögen je Haltung im Median.	52
Tabelle 15: Asymptotische Signifikanz der Handlungsunterschiede.	52
Tabelle 16: Präferierte Eingabehaltung der Probanden im zweiten Versuch.	53
Tabelle 17: Nichtparametrische Korrelation der logarithmierten Gesamtzeit und Videospieleerfahrung.	54
Tabelle 18: Nichtparametrische Korrelation der logarithmierten Gesamtzeit und 3D- Eingabeerfahrung.	55
Tabelle 19: Nichtparametrische Korrelation der logarithmierten Gesamtzeit und Laparoskopieerfahrung.	56
Tabelle 20: Nichtparametrische Korrelation der logarithmierten Gesamtzeit und Computererfahrung.	57
Tabelle 21: Verteilung der Gesamtzeit innerhalb der Reihenfolgegruppen.	58
Tabelle 22: Eigenschaften verschiedener Eingabekonsolen.	66
Tabelle 23: Übersicht der im ersten Versuch benötigten Materialien.	93
Tabelle 24: Maße der Zeichenvorlagen des ersten Versuches.	93
Tabelle 25: Ausrichtung des Graphiktablet im Raum im ersten Versuch.	94
Tabelle 26: Übersicht der im zweiten Versuch benötigten Materialien.	94
Tabelle 27: Übersicht der Einstellungsoptionen des Eingabebereiches.	94

8. LITERATURVERZEICHNIS

1. Tsermoulas, G., A. Aidonis, and G. Flint, *The skull of Chios: trepanation in Hippocratic medicine*. J Neurosurg, 2014. **121**(2): p. 328-32.
2. Hernigou, P., *Medieval orthopaedic history in Germany: Hieronymus Brunschwig and Hans von Gersdorff*. Int Orthop, 2015.
3. Fuchs, K.H., et al., *Euro-NOTES Status Paper: from the concept to clinical practice*. Surg Endosc, 2013. **27**(5): p. 1456-67.
4. Daher, R., E. Chouillard, and Y. Panis, *New trends in colorectal surgery: single port and natural orifice techniques*. World J Gastroenterol, 2014. **20**(48): p. 18104-20.
5. Steinhilber, B., et al., *Development of an arm support system to improve ergonomics in laparoscopic surgery: study design and provisional results*. Surg Endosc, 2015. **29**(9): p. 2851-8.
6. Nilsson, G., S. Larsson, and F. Johnsson, *Randomized clinical trial of laparoscopic versus open fundoplication: blind evaluation of recovery and discharge period*. Br J Surg, 2000. **87**(7): p. 873-8.
7. Stiff, G., et al., *Long-term pain: less common after laparoscopic than open cholecystectomy*. Br J Surg, 1994. **81**(9): p. 1368-70.
8. Vanek, V.W., R. Rhodes, and D.J. Dallis, *Results of laparoscopic versus open cholecystectomy in a community hospital*. South Med J, 1995. **88**(5): p. 555-66.
9. Coccolini, F., et al., *Open versus laparoscopic cholecystectomy in acute cholecystitis. Systematic review and meta-analysis*. Int J Surg, 2015. **18**: p. 196-204.
10. Lee, N.G., et al., *Bi-Institutional Comparison of Robotic-Assisted Laparoscopic vs. Open Ureteroureterostomy in the Pediatric Population*. J Endourol, 2015.
11. Arita, N.A., et al., *Laparoscopic repair reduces incidence of surgical site infections for all ventral hernias*. Surg Endosc, 2015. **29**(7): p. 1769-80.
12. Klarenbeek, B.R., et al., *Laparoscopic versus open sigmoid resection for diverticular disease: follow-up assessment of the randomized control Sigma trial*. Surg Endosc, 2011. **25**(4): p. 1121-6.
13. Klarenbeek, B.R., et al., *Laparoscopic sigmoid resection for diverticulitis decreases major morbidity rates: a randomized control trial: short-term results of the Sigma Trial*. Ann Surg, 2009. **249**(1): p. 39-44.
14. Alves, A., et al., *French multicentre prospective observational study of laparoscopic versus open colectomy for sigmoid diverticular disease*. Br J Surg, 2005. **92**(12): p. 1520-5.
15. Maggiori, L., et al., *Single-incision laparoscopy for colorectal resection: a systematic review and meta-analysis of more than a thousand procedures*. Colorectal Dis, 2012. **14**(10): p. e643-54.
16. Keshava, A., et al., *A historical comparison of single incision and conventional multiport laparoscopic right hemicolectomy*. Colorectal Dis, 2013. **15**(10): p. e618-22.
17. van der Schatte Olivier, R.H., et al., *Ergonomics, user comfort, and performance in standard and robot-assisted laparoscopic surgery*. Surg Endosc, 2009. **23**(6): p. 1365-71.
18. Sun, Z., et al., *Enhancement of a master-slave robotic system for natural orifice transluminal endoscopic surgery*. Ann Acad Med Singapore, 2011. **40**(5): p. 223-30.
19. Sakai, P. and J. Faintuch, *Evolving endoscopic surgery*. J Gastroenterol Hepatol, 2014. **29**(6): p. 1132-8.
20. Parekattil, S.J. and M.E. Moran, *Robotic instrumentation: Evolution and microsurgical applications*. Indian J Urol, 2010. **26**(3): p. 395-403.
21. Kakar, P.N., et al., *Robotic invasion of operation theatre and associated anaesthetic issues: A review*. Indian Journal of Anaesthesia, 2011. **55**(1): p. 18-25.
22. Marescaux, J., et al., *Transcontinental robot-assisted remote telesurgery: feasibility and potential applications*. Ann Surg, 2002. **235**(4): p. 487-92.
23. Ruurda, J.P., T.J. van Vroonhoven, and I.A. Broeders, *Robot-assisted surgical systems: a new era in laparoscopic surgery*. Ann R Coll Surg Engl, 2002. **84**(4): p. 223-6.

24. Ryska, M., [From classical open, via laparoscopic to a robot-assisted laparoscopic surgery]. *Rozhl Chir*, 2006. **85**(9): p. 455-62.
25. Haidegger, T., J. Sandor, and Z. Benyo, *Surgery in space: the future of robotic telesurgery*. *Surg Endosc*, 2011. **25**(3): p. 681-90.
26. Avgousti, S., et al., *Medical telerobotic systems: current status and future trends*. *Biomed Eng Online*, 2016. **15**(1): p. 96.
27. Berguer, R. and W. Smith, *An ergonomic comparison of robotic and laparoscopic technique: the influence of surgeon experience and task complexity*. *J Surg Res*, 2006. **134**(1): p. 87-92.
28. Elhage, O., et al., *An assessment of the physical impact of complex surgical tasks on surgeon errors and discomfort: a comparison between robot-assisted, laparoscopic and open approaches*. *BJU Int*, 2015. **115**(2): p. 274-81.
29. Simorov, A., et al., *Review of surgical robotics user interface: what is the best way to control robotic surgery?* *Surg Endosc*, 2012. **26**(8): p. 2117-25.
30. Corcione, F., et al., *Advantages and limits of robot-assisted laparoscopic surgery: preliminary experience*. *Surg Endosc*, 2005. **19**(1): p. 117-9.
31. Rodriguez, E., et al., *Robotic mitral surgery at East Carolina University: a 6 year experience*. *Int J Med Robot*, 2006. **2**(3): p. 211-5.
32. Marengo, F., et al., *Learning experience using the double-console da Vinci surgical system in gynecology: a prospective cohort study in a University hospital*. *Arch Gynecol Obstet*, 2012. **285**(2): p. 441-5.
33. Renda, A. and G. Vallancien, *Principles and advantages of robotics in urologic surgery*. *Curr Urol Rep*, 2003. **4**(2): p. 114-8.
34. Giedelman, C.A., et al., *The impact of robotic surgery in urology*. *Actas Urol Esp*, 2013. **37**(10): p. 652-7.
35. Watanabe, G. and N. Ishikawa, [da Vinci surgical system]. *Kyobu Geka*, 2014. **67**(8): p. 686-9.
36. Crusco, S., T. Jackson, and A. Advincula, *Comparing the da Vinci si single console and dual console in teaching novice surgeons suturing techniques*. *JLS*, 2014. **18**(3).
37. Autorino, R., et al., *Current status and future directions of robotic single-site surgery: a systematic review*. *Eur Urol*, 2013. **63**(2): p. 266-80.
38. Chew, M.H., et al., *Conventional laparoscopic versus single-incision laparoscopic right hemicolectomy: a case cohort comparison of short-term outcomes in 144 consecutive cases*. *Surg Endosc*, 2013. **27**(2): p. 471-7.
39. Garg, P., S. Tharani, and J.D. Thakur, *Cosmetic outcome is an important parameter when comparing single-incision laparoscopic surgery (SILS) and conventional multiport laparoscopic cholecystectomy (CLC)*. *Surg Endosc*, 2012. **26**(10): p. 2998-9; author reply 3000-1.
40. Moris, D.N., et al., *Surgery via natural orifices in human beings: yesterday, today, tomorrow*. *Am J Surg*, 2012. **204**(1): p. 93-102.
41. Bulian, D.R., et al., *Transvaginal/transumbilical hybrid--NOTES--versus 3-trocar needlescopic cholecystectomy: short-term results of a randomized clinical trial*. *Ann Surg*, 2015. **261**(3): p. 451-8.
42. Markar, S.R., et al., *Single-incision laparoscopic surgery (SILS) vs. conventional multiport cholecystectomy: systematic review and meta-analysis*. *Surg Endosc*, 2012. **26**(5): p. 1205-13.
43. Santos, B.F., et al., *Single-incision laparoscopic surgery (SILS) versus standard laparoscopic surgery: a comparison of performance using a surgical simulator*. *Surg Endosc*, 2011. **25**(2): p. 483-90.
44. Raestrup, H., et al., *Indications and technique for TEM (transanal endoscopic microsurgery)*. *Endosc Surg Allied Technol*, 1994. **2**(5): p. 241-6.
45. Sailer, M. and C. Mollmann, [Transanal endoscopic operation: indications and technique]. *Chirurg*, 2012. **83**(12): p. 1049-59.
46. Lehmann, K.S., et al., *The German registry for natural orifice transluminal endoscopic surgery: report of the first 551 patients*. *Ann Surg*, 2010. **252**(2): p. 263-70.

47. Esposito, C., et al., *Work-related upper limb musculoskeletal disorders in pediatric minimally invasive surgery: a multicentric survey comparing laparoscopic and sils ergonomics*. *Pediatr Surg Int*, 2014. **30**(4): p. 395-9.
48. Alleblas, C.C., et al., *The Physical Workload of Surgeons: A Comparison of SILS and Conventional Laparoscopy*. *Surg Innov*, 2015. **22**(4): p. 376-81.
49. Samarasekera, D. and J.H. Kaouk, *Robotic single port surgery: Current status and future considerations*. *Indian J Urol*, 2014. **30**(3): p. 326-32.
50. Stefanidis, D., et al., *Robotic assistance improves intracorporeal suturing performance and safety in the operating room while decreasing operator workload*. *Surg Endosc*, 2010. **24**(2): p. 377-82.
51. Lee, E.C., et al., *Ergonomics and human factors in endoscopic surgery: a comparison of manual vs telerobotic simulation systems*. *Surg Endosc*, 2005. **19**(8): p. 1064-70.
52. Lee, G.I., et al., *Comparative assessment of physical and cognitive ergonomics associated with robotic and traditional laparoscopic surgeries*. *Surg Endosc*, 2014. **28**(2): p. 456-65.
53. Klein, M.I., et al., *Mental workload and stress perceived by novice operators in the laparoscopic and robotic minimally invasive surgical interfaces*. *J Endourol*, 2012. **26**(8): p. 1089-94.
54. Hagn, U., et al., *DLR MiroSurge: a versatile system for research in endoscopic telesurgery*. *Int J Comput Assist Radiol Surg*, 2010. **5**(2): p. 183-93.
55. Moustiris, G.P., et al., *Evolution of autonomous and semi-autonomous robotic surgical systems: a review of the literature*. *The International Journal of Medical Robotics and Computer Assisted Surgery*, 2011. **7**(4): p. 375-392.
56. Roy, S. and C. Evans, *Overview of robotic colorectal surgery: Current and future practical developments*. *World J Gastrointest Surg*, 2016. **8**(2): p. 143-50.
57. Wortman, T.D., et al., *Laparoendoscopic single-site surgery using a multi-functional miniature in vivo robot*. *Int J Med Robot*, 2011. **7**(1): p. 17-21.
58. Rossitto, C., et al., *Use of robot-specific resources and operating room times: the case of Telelap Alf-X robotic hysterectomy*. *Int J Med Robot*, 2016.
59. Matich, S., et al. *A new single-port robotic system based on a parallel kinematic structure*. in *Intelligent Robots and Systems (IROS), 2015 IEEE/RSJ International Conference on*. 2015.
60. Matich, S., et al. *Design of a drive unit for a new single port surgical robot with 12 degrees of freedom*. in *IKMT 2015; 10. ETG/GMM-Symposium Innovative small Drives and Micro-Motor Systems; Proceedings of*. 2015.
61. Soueid, A., et al., *The pain of surgery: Pain experienced by surgeons while operating*. *International Journal of Surgery*. **8**(2): p. 118-120.
62. Emam, T.A., G. Hanna, and A. Cuschieri, *Ergonomic principles of task alignment, visual display, and direction of execution of laparoscopic bowel suturing*. *Surg Endosc*, 2002. **16**(2): p. 267-71.
63. Ruurda, J.P. and I.A. Broeders, *Robot-assisted laparoscopic intestinal anastomosis*. *Surg Endosc*, 2003. **17**(2): p. 236-41.
64. LaGrange, C.A., et al., *Evaluation of three laparoscopic modalities: robotics versus three-dimensional vision laparoscopy versus standard laparoscopy*. *J Endourol*, 2008. **22**(3): p. 511-6.
65. Lum MJ, F.D., Sankaranarayanan G, King H, Fodero K, and H.B. Leuschke R, *The RAVEN: Design and validation of a telesurgery system*. *Int J Robot Res* 2009. **28**(9):1183–1197.
66. Mayer-Ullmann, G., *Design einer ergonomischen Eingabeeinheit zur Integration in ein parallelkinematisches Operationsrobotersystem* 2014: p. 37.
67. van Det, M.J., et al., *Optimal ergonomics for laparoscopic surgery in minimally invasive surgery suites: a review and guidelines*. *Surg Endosc*, 2009. **23**(6): p. 1279-85.
68. Prof. Dr.-Ing. Martin Schmauder, P.D.p.h.D.B.S.-U., *Ergonomie - Grundlagen zur Interaktion von Mensch, Technik und Organisation*. 2014: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG.

69. Berguer, R., et al., *An ergonomic comparison of in-line vs pistol-grip handle configuration in a laparoscopic grasper*. Surg Endosc, 1998. **12**(6): p. 805-8.
70. Sataa, S., A. Benzarti, and A. Ben Jemaa, *From an urologist view: are we safe with endoscopic surgery? Overview of ergonomic problems encountered by the urologist during video endoscopic surgery*. Tunis Med, 2012. **90**(12): p. 843-6.
71. Rosenblatt, P.L., J. McKinney, and S.R. Adams, *Ergonomics in the operating room: protecting the surgeon*. J Minim Invasive Gynecol, 2013. **20**(6): p. 744.
72. Craven, R., et al., *Ergonomic deficits in robotic gynecologic oncology surgery: a need for intervention*. J Minim Invasive Gynecol, 2013. **20**(5): p. 648-55.
73. Janki, S., et al., *Ergonomics in the operating room*. Surg Endosc, 2016.
74. Buchel, D., et al., *Ergonomics of disposable handles for minimally invasive surgery*. Surg Endosc, 2010. **24**(5): p. 992-1004.
75. Wauben, L.S., et al., *Application of ergonomic guidelines during minimally invasive surgery: a questionnaire survey of 284 surgeons*. Surg Endosc, 2006. **20**(8): p. 1268-74.
76. van, V., Jakimowicz, and Kazemier, *Improved physical ergonomics of laparoscopic surgery*. Minim Invasive Ther Allied Technol, 2004. **13**(3): p. 161-6.
77. Liang, B., et al., *Ergonomic status of laparoscopic urologic surgery: survey results from 241 urologic surgeons in china*. PLoS One, 2013. **8**(7): p. e70423.
78. Lee, G.I., et al., *Surgeons' physical discomfort and symptoms during robotic surgery: a comprehensive ergonomic survey study*. Surg Endosc, 2016.
79. Engelen, L., et al., *Is Active Design changing the workplace? - A natural pre-post experiment looking at health behaviour and workplace perceptions*. Work, 2017.
80. Gozen, A.S., et al., *Direct comparison of the different conventional laparoscopic positions with the ethos surgical platform in a laparoscopic pelvic surgery simulation setting*. J Endourol, 2015. **29**(1): p. 95-9.
81. Matern, U., *Ergonomic deficiencies in the operating room: examples from minimally invasive surgery*. Work, 2009. **33**(2): p. 165-8.
82. Berguer, R., et al., *A comparison of surgeons' posture during laparoscopic and open surgical procedures*. Surg Endosc, 1997. **11**(2): p. 139-42.
83. Szeto, G.P., et al., *Surgeons' static posture and movement repetitions in open and laparoscopic surgery*. J Surg Res, 2012. **172**(1): p. e19-31.
84. Nguyen, N.T., et al., *An ergonomic evaluation of surgeons' axial skeletal and upper extremity movements during laparoscopic and open surgery*. Am J Surg, 2001. **182**(6): p. 720-4.
85. Vereczkei, A., et al., *Ergonomic assessment of the static stress confronted by surgeons during laparoscopic cholecystectomy*. Surg Endosc, 2004. **18**(7): p. 1118-22.
86. Kelts, G.I., et al., *Monitor height ergonomics: A comparison of operating room video display terminals*. Allergy Rhinol (Providence), 2015. **6**(1): p. 28-32.
87. Zehetner, J., et al., *Screen height as an ergonomic factor in laparoscopic surgery*. Surg Endosc, 2006. **20**(1): p. 139-41.
88. Ramakrishnan, V.R. and P.N. Montero, *Ergonomic considerations in endoscopic sinus surgery: lessons learned from laparoscopic surgeons*. Am J Rhinol Allergy, 2013. **27**(3): p. 245-50.
89. Ayad, T., L. Peloquin, and F. Prince, *Ergonomics in endoscopic sinus surgery: systematic review of the literature*. J Otolaryngol, 2005. **34**(5): p. 333-40.
90. Misgeld, B., et al., *9th IFAC Symposium on Biological and Medical Systems BMS 2015 Haptic User Interface for a Telerobotic System – Design based on a Network Model*. IFAC-PapersOnLine, 2015. **48**(20): p. 201-206.
91. <Prometheus Allgemeine Anatomie und Bewegungssysteme.pdf>.
92. Papst, R.P.u.R., *Sobotta Anatomie des Menschen*. 2007. **22. Auflage**.
93. Michael Schünke, E.S., Udo Schumacher, Markus Voll, Karl Wesker, *Prometheus Lernetlas der Anatomie: Allgemeine Anatomie und Bewegungssystem*. 2009. **2. Auflage**.
94. van Det, M.J., et al., *Ergonomic assessment of neck posture in the minimally invasive surgery suite during laparoscopic cholecystectomy*. Surg Endosc, 2008. **22**.

95. Fanfani, F., et al., *The new robotic TELELAP ALF-X in gynecological surgery: single-center experience*. Surg Endosc, 2016. **30**(1): p. 215-21.
96. Rossitto, C., et al., *Learning a new robotic surgical device: Telelap Alf X in gynaecological surgery*. Int J Med Robot, 2016. **12**(3): p. 490-5.
97. Freschi, C., et al., *Technical review of the da Vinci surgical telemanipulator*. Int J Med Robot, 2013. **9**(4): p. 396-406.
98. Gidaro, S., et al., *Telelap Alf-X: a novel telesurgical system for the 21st century*. Surg Technol Int, 2012. **22**: p. 20-5.
99. Stark, M., et al., *A new telesurgical platform--preliminary clinical results*. Minim Invasive Ther Allied Technol, 2015. **24**(1): p. 31-6.
100. Husar, P.D.-I.P., *Micro-Sleep Alerter des Fraunhofer Institutes für Digitale Medientechnologie IDMT*. 2016.
101. Matich, S., et al., *A New 4 DOF Parallel Kinematic Structure for use in a Single Port Robotic Instrument with Haptic Feedback*. Biomed Tech (Berl), 2013.
102. Fanfani, F., et al., *Total Laparoscopic (S-LPS) versus TELELAP ALF-X Robotic-Assisted Hysterectomy: A Case-Control Study*. J Minim Invasive Gynecol, 2016. **23**(6): p. 933-8.
103. Jürgens, P.D.D.H.W. *Erhebung anthropometrischer Maße zur Aktualisierung der DIN 33 402 - Teil 2*. 2004; Available from: www.baua.de.
104. Pulsford, R.M., et al., *Sitting behavior and obesity: evidence from the Whitehall II study*. Am J Prev Med, 2013. **44**(2): p. 132-8.
105. Pulsford, R.M., et al., *Associations of sitting behaviours with all-cause mortality over a 16-year follow-up: the Whitehall II study*. Int J Epidemiol, 2015. **44**(6): p. 1909-16.
106. Mantzari, E., et al., *Impact of sit-stand desks at work on energy expenditure and sedentary time: protocol for a feasibility study*. Pilot Feasibility Stud, 2016. **2**: p. 30.
107. Biddle, S.J., et al., *Reducing sedentary time in adults at risk of type 2 diabetes: process evaluation of the STAND (Sedentary Time ANd Diabetes) RCT*. BMC Public Health, 2017. **17**(1): p. 80.
108. Shrestha, N., et al., *Workplace interventions for reducing sitting at work*. Cochrane Database Syst Rev, 2016. **3**: p. CD010912.
109. Luttmann, A., M. Jäger, and J. Sökeland, *Ergonomic assessment of the posture of surgeons performing endoscopic transurethral resections in urology*. Journal of Occupational Medicine and Toxicology, 2009. **4**(1): p. 26.
110. O'Connell, S.E., et al., *Providing NHS staff with height-adjustable workstations and behaviour change strategies to reduce workplace sitting time: protocol for the Stand More AT (SMArT) Work cluster randomised controlled trial*. BMC Public Health, 2015. **15**: p. 1219.
111. Kim, F.J., et al., *Initial experience of a novel ergonomic surgical chair for laparoscopic pelvic surgery*. Int Braz J Urol, 2011. **37**(4): p. 455-60.
112. Jason M. Franasiak, M., and Paolo A. Gehrig, MD *Ergonomic Strain in Minimally Invasive Surgery: Addressing the Strain Epidemic*. jcomjournal, 2015. **Vol.22 No. 6 June 2015**: p. 267-273.
113. Aitchison, L.P., et al., *A feasibility study determining surgical ergonomics in a live surgical setting*. J Minim Invasive Gynecol, 2015. **22**(4): p. 626-30.
114. Hagen, M.E., et al., *Impact of IQ, computer-gaming skills, general dexterity, and laparoscopic experience on performance with the da Vinci surgical system*. Int J Med Robot, 2009. **5**(3): p. 327-31.
115. Harper, J.D., et al., *Prior video game exposure does not enhance robotic surgical performance*. J Endourol, 2007. **21**(10): p. 1207-10.
116. Ramsay, C., et al., *Systematic review and economic modelling of the relative clinical benefit and cost-effectiveness of laparoscopic surgery and robotic surgery for removal of the prostate in men with localised prostate cancer*. Health Technol Assess, 2012. **16**(41): p. 1-313.
117. Park, A.E., et al., *Intraoperative "Micro Breaks" With Targeted Stretching Enhance Surgeon Physical Function and Mental Focus: A Multicenter Cohort Study*. Ann Surg, 2017. **265**(2): p. 340-346.

118. Hallbeck, M.S., et al., *The impact of intraoperative microbreaks with exercises on surgeons: A multi-center cohort study*. Appl Ergon, 2017. **60**: p. 334-341.
119. Lynch, J., P. Aughwane, and T.M. Hammond, *Video games and surgical ability: a literature review*. J Surg Educ, 2010. **67**(3): p. 184-9.
120. Ou, Y., et al., *Does playing video games improve laparoscopic skills?* Int J Surg, 2013. **11**(5): p. 365-9.
121. Oge, T., et al., *Impact of current video game playing on robotic simulation skills among medical students*. J Turk Ger Gynecol Assoc, 2015. **16**(1): p. 1-4.
122. Kolga Schlickum, M., et al., *Transfer of systematic computer game training in surgical novices on performance in virtual reality image guided surgical simulators*. Stud Health Technol Inform, 2008. **132**: p. 210-5.
123. Schlickum, M.K., et al., *Systematic video game training in surgical novices improves performance in virtual reality endoscopic surgical simulators: a prospective randomized study*. World J Surg, 2009. **33**(11): p. 2360-7.
124. Franasiak, J., et al., *Feasibility and Acceptance of a Robotic Surgery Ergonomic Training Program*. JSLS, 2014. **18**(4).

9. ANHANG

9.1. Tabellen

Tabelle 23: Übersicht der im ersten Versuch benötigten Materialien.

Material	Genauere Erläuterung
Rechner mit Grafikprogramm	Bsp. Photoshop © Adobe
Monitor, 24 Zoll	16:10 Verhältnis
Graphiktablet	15x9 cm Zeichenfläche
Armablage	15x15 cm Auflagefläche
Höhenverstellbarer Hocker	ohne Armlehnen
Zwei Haltearme	zur Tablet- / Armablagebefestigung
Lot	zur Ausrichtung der Komponenten im Raum
Winkel	Blickachse zum Bildschirm einstellen
Winkelmesser	Einstellung der Tabletneigung
Maßband	Einstellung der Tablethöhe
Stift	zur Anzeichnung von Hilfslinien
Digitale Zeichenvorlagen, drei Stück	Erstellt in Grafikprogramm, 1920x1200 Pixel

Tabelle 24: Maße der Zeichenvorlagen des ersten Versuches.

Zeichenvorlagen	8 Pixel breite Bahnen	16 Pixel breite Bahnen	24 Pixel breite Bahnen
Erster Versuch	Radien in Pixeln (innen/Mitte/außen)	Radien in Pixeln (innen/Mitte/außen)	Radien in Pixeln (innen/Mitte/außen)
großer Kreis	508 / 512 / 516	504 / 512 / 520	500 / 512 / 524
kleine Kreise	124 / 128 / 132	120 / 128 / 136	116 / 128 / 140
Koordinaten Kreismitte	(Breite x Höhe)		
großer Kreis	960 x 600 Pixel	960 x 600 Pixel	960 x 600 Pixel
kl. Kreis Mitte	960 x 600 Pixel	960 x 600 Pixel	960 x 600 Pixel
kl. Kreis r. o.	1704 x 216 Pixel	1704 x 216 Pixel	1704 x 216 Pixel
kl. Kreis r. u.	1704 x 984 Pixel	1704 x 984 Pixel	1704 x 984 Pixel
kl. Kreis l. u.	216 x 984 Pixel	216 x 984 Pixel	216 x 984 Pixel
kl. Kreis l. o.	216 x 216 Pixel	216 x 216 Pixel	216 x 216 Pixel

Tabelle 25: Ausrichtung des Graphiktablet im Raum im ersten Versuch. THZ: Tablet-Halterungs-Zentrum; ist das Zentrum der Halterung auf der Rückseite des Tablet. BML: Bildschirmmittellinie; entspricht der Tischmittellinie und teilt diesen mittig.

Winkel zur Horizontalen:	Rotation in Draufsicht:	Höhe (THZ über Boden)	Seitenversatz (THZ zu BML)	Entfernung (THZ zum Monitor)
45°	0°	92 cm	3 cm	30 cm
60°	0°	92 cm	3 cm	30 cm
75°	0°	92 cm	3 cm	30 cm
60°	20°	92 cm	3 cm	30 cm

Abk.1: THZ: Tablet-Halterungs-Zentrum; ist das Zentrum der Halterung auf der Rückseite des Tablet

Abk.2: BML: Bildschirmmittellinie; entspricht der Tischmittellinie und teilt diesen mittig.

Tabelle 26: Übersicht der im zweiten Versuch benötigten Materialien.

Material	Genauere Erläuterung
Windows-Rechner Novint Falcon ® 3D-Grafikprogramm Monitor Eingabestift telemedizinischer Eingabebereich OP-Hocker	Windows 8 (Microsoft®) Treiber: F-Gen Manager z.B. Cre8 (Novint®) 24 Zoll Bilddiagonale mit elektronischem Taster (oder alternative Aufhängung) in Höhe verstellbar

Tabelle 27: Übersicht der Einstellungsoptionen des Eingabebereiches.

Bauteil	Z-Achse Höhe	X-Achse nach lateral	Y-Achse nach frontal	Drehpunkte Anzahl	Neigung möglich?
Displayzentrum	82-176 cm	fest zentral	fest zentral	0	Nein, fest um 30° nach Dorsal.
Armauflage	65-150 cm	48-72 cm	68-84 cm	2	Nein, fest in Horizontalebene.
Eingabeausleger	85-163 cm	26-49 cm	41-62 cm	3	Ja, in 2 Ebenen 360° rotierbar.

9.2. Fragebogen

Fragebogen

1. Bewerten Sie die **Ergonomie** des jeweiligen Aufbaus auf einer Skala von 0 bis 10:

	sehr unbequem sehr angenehm	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
OP-Position sitzend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
60°20° Position sitzend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
OP-Position stehend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
60°20° Position stehend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

2. Bewerten Sie die **Erreichbarkeit** der Bildpunkte je nach Aufbau auf einer Skala von 0 bis 10:

	sehr schlechte Erreichbarkeit sehr gute Erreichbarkeit	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
OP-Position sitzend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
60°20° Position sitzend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
OP-Position stehend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
60°20° Position stehend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

3. Bewerten Sie die **Intuitivität** der Auge-Hand-Koordination je Aufbau auf einer Skala von 0 bis 10:

	nicht intuitiv sehr intuitiv	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
OP-Position sitzend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
60°20° Position sitzend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
OP-Position stehend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
60°20° Position stehend	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		

4. Welche Positionierung würden Sie in Anbetracht einer längeren Nutzungsdauer und damit verbundener Ermüdungsneigung vorziehen? (Bitte nur **ein** Kreuz setzen.)

OP-Position **sitzend**

60°20° Position **sitzend**

OP-Position **stehend**

60°20° Position **stehend**

Allgemeine Daten des Probanden:

Namenskürzel:

Alter in Jahren:

Geschlecht (M/W):

Rechts-/Linkshänder (R/L):

Erfahrung im Umgang mit Computern (0 = „keine“ bis 10 = „sehr viel / täglich“):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Videospielerfahrung (0 = „keine“ bis 10 = „sehr viel / täglich“):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

3D Eingabeerfahrung (z.B. *Kinect*, *Wii*, *PS Move*) (0 = „keine“ bis 10 = „sehr viel / täglich“):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Laparoskopie-Erfahrung (0 = „keine“ bis 10 = „sehr viel / täglich“):

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Anmerkungen:

10. ERKLÄRUNG ZUM EIGENANTEIL

Die Konzeption der Studie und die Planung der Versuche erfolgten in Zusammenarbeit mit Betreuer Pirmin Storz und Wolfgang Kunert. Die Versuche wurden von mir im Anschluss selbstständig durchgeführt.

Die statistische Auswertung wurde nach Einarbeitung von Pirmin Storz und Peter Wilhelm sowie in Rücksprache mit PD Dr. med. Andreas Kirschniak von mir eigenständig durchgeführt.

Ich erkläre hiermit, dass ich die der medizinischen Fakultät der Eberhard Karls Universität zur Promotion eingereichte Arbeit mit dem Titel: „Entwicklung eines telemedizinischen Eingabebereiches zur Steuerung eines parallelkinematischen Operationsroboters und Evaluation verschiedener Eingabehaltungen“ selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel genutzt habe.

Alle wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen habe ich als solche gekennzeichnet.

Ich versichere die Richtlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Arbeit und zum Umgang mit wissenschaftlichem Fehlverhalten an der Eberhard Karls Universität Tübingen beachtet zu haben.

Ich erkläre außerdem, dass die hier vorgelegte Dissertation nur in diesem und in keinem anderen Promotionsverfahren eingereicht wurde und dass diesem Promotionsverfahren keine gescheiterten Promotionsverfahren vorausgegangen sind.

Tübingen, den 24.07.2017

Andreas Dörflinger

11. DANKSAGUNG

Ich möchte mich hiermit bei meinem Doktorvater Herrn PD Dr. med. Andreas Kirschniak für die Überlassung des Themas und die Betreuung bedanken.

Ebenfalls möchte ich mich bei meinen Betreuern Pirmin Storz und Peter Wilhelm für die Zusammenarbeit und Unterstützung bedanken.

Meinem Vater möchte ich für die feintechnische Unterstützung beim Bau des telemedizinischen Eingabebereiches danken.

Mein Dank gilt auch Wolfgang Kunert, der mir in technischen und organisatorischen Fragen immer gerne zur Seite stand.

Den Mitarbeitern des Instituts für Elektromechanische Kopplung der Technischen Universität Darmstadt möchte ich für die Überlassung des verwendeten Bildmaterials danken.

Spezieller Dank gilt den freiwilligen Probanden, ohne die die Durchführung der Versuche nicht möglich gewesen wäre.

Zudem möchte ich Cornelia W., Anna S. und Rebekka R. sehr herzlich für ihre Korrekturen an dieser Dissertationsschrift danken.