Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf

Institut für Computational Neuroscience
Prof. Dr. Claus-Christian Hilgetag

Dissertation

zur Erlangung des Grades
eines Doktors der Medizin

Erstellung von Fallbeispielen für einen Virtual Reality Lumbalpunktionssimulator und Evaluation der Trainingseffekte

vorgelegt von

David Joseph Dalek
aus Schenefeld

13. Juli 2014

(wird von der Medizinischen Fakultät ausgefüllt)

Angenommen von der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg am: 02.04.2015

Veröffentlicht mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg.

Prüfungsausschuss, der/ die Vorsitzende: Prof. Dr. Heinz Handels

Prüfungsausschuss, zweite/r Gutachter/in: Prof. Dr. Christian Gerloff

Prüfungsausschuss, dritte/r Gutachter/in: Prof. Dr. Sigrid Harendza

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis **4**

Tabellenverzeichnis **5**

Abkürzungsverzeichnis **6**

1 Einleitung **7**
1.1 Einführung in die Thematik . . . 7
1.2 Lumbalpunktion . . . 8
1.2.1 Indikation . . . 8
1.2.2 Kontraindikationen . . . 9
1.2.3 Punktionsort . . . 9
1.2.4 Durchführung der Lumbalpunktion . . . 10
1.2.5 Komplikationen . . . 11
1.3 Training der Lumbalpunktion . . . 11
1.4 Problemstellung und Ziel der Arbeit . . . 12

2 Material und Methoden **14**
2.1 Hardware . . . 14
2.1.1 Computer . . . 14
2.1.2 Haptisches Ein- / Ausgabegerät . . . 14
2.2 Software . . . 16
2.2.1 MeVisLab . . . 16
2.3 Patientendatensätze . . . 16
2.3.1 Patient 1 / Visible Korean Human (VKH) . . . 17
2.3.2 Patient 2 . . . 18
2.3.3 Patient 3 . . . 18
2.3.4 Patient 4 . . . 18
2.3.5 Patient 5 / Visible Human (VH) . . . 18
2.4 Medizinische Bildverarbeitung . . . 19
2.4.1 Begriffserklärung . . . 24
2.4.2 Segmentierung und Segmentierungsverfahren . . . 24
Schwellwertverfahren . . . 25
Regionenorientierte Segmentierung . . . 25
Kantenorientierte Segmentierung . . . 27
Filter . . . 27
Glättungsfilter . . . 27
Kantenfilter . . . 28
Morphologische Filter . . . 29

2.4.3 Bearbeitung der Patientendatensätze 29
Segmentierung der Knochen 29
Segmentierung der Bänder 30
Segmentierung der Bandscheiben 31
Segmentierung des Spinalkanals 32
Segmentierung der Spinalnerven 32
Segmentierung der Leber 33
Segmentierung der Muskeln 34
Segmentierung der Haut 35
Segmentierung des Fettgewebes 35
Erstellung der Orientierungshilfen 36
2.4.4 3D-Visualisierung 38
2.5 Der Lumbalpunktionssimulator 39
2.5.1 Aufbau und Bestandteile 39
2.5.2 Benutzeroberfläche 40
2.5.3 Haptik und haptisches Rendering 43
2.5.4 Patientendaten 44
2.5.5 Das Bewertungssystem (Scoring) 46
Kriterien einer guten Lumbalpunktion 46
Die Punktionskriterien der virtuellen Lumbalpunktion . 46
2.5.6 Training am Simulator 49
Auswahl der Probanden 49
Ablauf des Trainings 50
Probandenevaluation 53
2.6 Studiendesign und Statistische Auswertung 53
2.6.1 Studiendesign 53
2.6.2 Testverfahren zur Auswertung der gesammlten Testdaten 54

3 Ergebnisse 55
3.1 Probanden 55
3.2 Ergebnisse aus den Trainingsdurchläufen 55
3.2.1 Ergebnisse der Gesamtpunktzahl und der Erfolgsrate . 57
3.2.2 Betrachtung jeweils nur der ersten drei Punktionen . . 60
3.2.3 Verlauf der Gesamtpunktzahl am Patienten während der einzelnen Sitzungen 62
3.3 Ergebnisse aus der Probandenevaluation zum Simulator 63

4 Diskussion 71
4.1 Scoringergebnisse und Trainingseffekt 71
4.2 Kritische Betrachtung der Ergebnisse 73
4.3 Auswertung des Evaluationsbogens 74

4.4 Verbesserungsvorschläge und Ausblick 75
4.5 Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur 76

5 Zusammenfassung **78**

6 Literatur **80**

7 Danksagung **84**

8 Lebenslauf **85**

9 Eidesstattliche Erklärung **86**

10 Anhang **87**
10.1 Lerneinheit Lumbalpunktion 87

Abbildungsverzeichnis

1 Phantompuppe zur Lumbalpunktion 12
2 Haptisches Ein- und Ausgabegerät 15
3 Benutzeroberfläche MeVisLab 1.6 17
4 Oberflächenmodell Patientendatensatz 1 20
5 Oberflächenmodell Patientendatensatz 2 21
6 Oberflächenmodell Patientendatensatz 4 22
7 Oberflächenmodell Patientendatensatz 5 23
8 Darstellung eines Regionenorientierten Segmentierungsverfahrens 26
9 Templates eines Mittelwert- (a) und eines Binomialfilters (b) . 28
10 Templates eines Binomial-Hochpass-Filters (a) und eines Sobelfilters mit Betonung der vertikalen Kanten (b). 28
11 Darstellung der Labeldaten 37
12 Modell der 3D-Visualisierung 39
13 Lumbalpunktionssimulator 40
14 Benutzeroberfläche(GUI) des Punktionssimulators 41
15 Schematische Darstellung des Referenzraumes 49
16 Bewertungsfenster 50
17 Oberflächenmodell des Testwürfels 51
18 Vergleich der Gesamtpunktzahl und der Trefferquote 59
19 Vergleich der jeweils ersten drei Punktionen 60

Tabellenverzeichnis

1 Leistungsmerkmale PC des Lumbalpunktionssimulators 14
2 Leistungsmerkmale der haptischen Ein- und Ausgabegeräte . . 16
3 Eigenschaften der verwendeten Originaldatensätze 19
4 Segmentierung der Knöchernen Strukturen 30
5 Segmentierung der Bänder 31
6 Segmentierung der Bandscheiben 32
7 Segmentierung des Spinalkanals 33
8 Segmentierung der Spinalnerven und des Myelon 33
9 Segmentierung der Leber 34
10 Segmentierung der Muskulatur 34
11 Segmentierung der Haut 35
12 Segmentierung des Fettgewebes 36
13 Labelwerte 37
14 Definition der Kräfte für die verschiedenen Strukturen 45
15 Übersicht des Trainingsablaufes 52
16 Aus der Wertung genommene Probanden mit Begründung . . 56
17 Durchschnittswerte der Gesamtpunktzahlen und Erfolgsraten in den Probandengruppen 61
18 Übersicht bei Bewertung nur der ersten drei Punktionen . . . 61
19 Ergebnisse aus dem Evaluationsbogen 66

Abkürzungsverzeichnis

3D	dreidimensional
Abb.	Abbildung
AG	Aktiengesellschaft
B	Breite
bzw.	beziehungsweise
cCT	Cranielle Computertomographie
CT	Computertomographie
d.h.	das heißt
DGN	Deutsche Gesellschaft für Neurologie
DOF	degrees of freedom
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GUI	graphical user interface
H	Höhe
HU	Houndsfield Units
Hz	Hertz
ID	Identifikation
L3	Lendenwirbelkörper 3
L4	Lendenwirbelkörper 4
L5	Lendenwirbelkörper 5
Lig.	Ligamentum
Ligg.	Ligamenta
LWK	Lendenwirbelkörper
MRT	Magnetresonanztomographie
N	Newton
Pat	Patient
PC	Personalcomputer
pdf	portable document format
PTC	percutane transhepatische Cholangiographie
RGB	Rot Grün Blau
T	Tiefe
UKE	Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
Vgl.	Vergleiche
VH	Visible Human
VKH	Visible Korean Human
VR	Virtual Reality
XML	extensible markup language
z.B.	zum Beispiel

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Thematik

Das Studium der Medizin beinhaltet neben dem Erwerb von theoretischem Wissen vor allem auch das Erlernen praktischer Fertigkeiten. Hierbei ist ein direkter Patientenkontakt obligat. Zahlreiche Untersuchungsmethoden, invasive und nicht invasive diagnostische Verfahren und auch Behandlungsmethoden sollen mit der Arztreife am Patienten eigenständig und sicher durchgeführt werden können [1]. Dies bedingt, dass sie vorher möglichst realistisch am Patienten erlernt werden müssen. Oftmals gibt es die Möglichkeit, die ersten Erfahrungen bestimmter Eingriffe mit Hilfe von Phamtompuppen oder plastischer Körperteilmodelle zu erlangen. Hier ist die Reanimation zu erwähnen, die mit Hilfe einer dafür entwickelten Puppe geübt und bewertet werden kann, wie beispielsweise mit einem Produkt der Firma SkillsMed Deutschland GmbH [2]. Auch können Blutentnahmen und das Legen eines peripher venösen Zuganges an künstlichen Armen mit möglichst real nachgebildeten Haut- und Venenverhältnissen simuliert werden. Viele Eingriffe müssen aber direkt am Patienten unter Supervision eines erfahrenen Arztes erlernt und geübt werden. Hierzu zählt auch die Lumbalpunktion. Sie dient der Diagnostik diverser Erkrankungen des Zentralnervensystems, wie beispielsweise der Meningoenzephalitis oder der Multiplen Sklerose. Eine Studie zeigte, dass in den Vereinigten Staaten von Amerika circa 73% der Medizinstudenten, die eine Lumbalpunktion während des Studiums durchgeführt haben, diese direkt am Patientenbett erlernten [3]. Direkt am Patienten Erfahrungen zu sammeln ist maximal realistisch und unverzichtbar, birgt aber Gefahren und Risiken, denn jeder Eingriff ist mit möglichen Komplikationen verbunden. Eine Alternative zu Übungspuppen und Körpermodellen bietet hierbei die Übung an Virtual-Reality-Simulatoren. Diese Simulatoren bieten ein möglichst realistisches Szenario, der eigentliche Eingriff wird aber an einem Computer simuliert. Mit Hilfe von speziellen haptischen Ein- und Ausgabegeräten kann der realistische Erfahrungseindruck noch gesteigert werden. Der virtuelle Patient kann im Vergleich zu seinem realen Vorbild keinerlei Schmerz empfinden. Komplikationen können verursacht werden, haben aber keine Relevanz für den Übungspatienten, sondern bieten lediglich einen zusätzlichen Gewinn an Erfahrung für den Punktierenden. Außerdem ist der Eingriff beliebig oft und kostengünstig wiederholbar. Im Rahmen dieser Arbeit sollen für einen Virtual-Reality-Lumbalpunktionssimulator verschiedenen Fallbeispielen entwickelt werden. Zweck des Simulators ist den Benutzern die Möglichkeit zu geben, erste theoretische und praktische Erfahrungen mit dem Eingriff zu sammeln, deren Punktionsversuche zu bewerten und einen möglichen Trai-

ningseffekt aufzeigen. Des Weitern wird in dieser Arbeit in Kapitel 1 zunächst auf die Lumbalpunktion im Allgemeinen eingegangen und die bisher üblichen Trainingsverfahren beschrieben. Kapitel 2 beinhaltet die Vorstellung der verwendeten Hardware und Software und des bereits existierenden Simulators. Außerdem wird ein Überblick über die verwendeten Verfahren der Bildbe- und -verarbeitung, sowie Herkunft der Patientendaten gegeben. Kapitel 3 zeigt dann die Auswahl der Probanden, den Ablauf der Trainingsdurchläufe und die aufgezeichneten Ergebnisse auf. Diese werden dann im Kapitel 4 kritisch diskutiert. Kapitel 5 gibt eine kurze Zusammenfassung der gesamten Arbeit.

1.2 Lumbalpunktion

Die Lumbalpunktion wurde 1891 durch Heinrich Irenaeus Quincke in Kiel eingeführt. Sie ist eine Untersuchungsmethode, bei der mit einer Hohlnadel im Lendenwirbelbereich der Subarachnoidalraum bzw. der Durasack des Rückenmarkkanals punktiert wird. Ziel ist die Gewinnung des Liquor cerebrospinalis zu diagnostischen Zwecken [4]. Des Weiteren kann der Liquordruck gemessen werden. Beides sind für die Diagnostik zahlreicher neurologischer oder auch infektiöser Krankheiten wichtige, zum Teil sogar unerlässliche Untersuchungen, beispielsweise bei der bakteriellen Meningitis [5] [6]. Außerdem können Medikamente durch eine Hohlnadel in den Subarachnoidalraum gegeben werden, wie z.B. bei der Spinalanästhesie. Das Einbringen von Lokalanästhetika erzeugt je nach Höhe der Punktion, Menge des Lökalanästhetikums und dessen Konzentration eine Ausschaltung von Motorik und Sensibilität in den entsprechenden Dermatomen. Bei der Durchführung sollte der Patient im Sitzen oder Liegen die Wirbelsäule maximal kyphosieren, also einen „Katzenbuckel“ machen, damit die Dornfortsätzen divergieren und ein möglichst großes Fenster für eine Punktion freigeben. Die Einstichstelle sollte zwischen den Dornfortsätzen des dritten und vierten oder des vierten und fünften Ledenwirbelkörper (LWK) liegen [6]. Da das untere Ende des Rückenmarks, der Conus medullaris, meist in Höhe des zweiten Lendenwirbelkörpers endet, besteht hier kaum die Gefahr einer Rückenmarksverletzung. Unter bestimmten Voraussetzungen, wie Verletzungen oder sklerotische Veränderungen im Wirbelbereiche, kann aber auch unter großer Vorsicht an anderen Stellen punktiert werden [7].

1.2.1 Indikation

Indiziert ist eine Lumbalpunktion zur Diagnostik vieler Erkrankungen, vor allem aber entzündlicher und maligner Erkrankungen des Zentralnervensys-

tems, unklarer komatöser Zustände oder zur Liquordruckmessung [7]. Therapeutisch werden Punktionen durchgeführt zur Liquorentnahme z.B. bei Normaldruckhydrozephalus oder zur Injektion von Medikamenten, wie beispielsweise Antibiotika oder Lokalanästhetika zur Anästhesie.

1.2.2 Kontraindikationen

Vor der Durchführung der Liquorentnahme durch die Lumbalpunktion sind sorgfältig die Kontraindikationen zu prüfen. Im Folgenden werden einige Kontraindikationen aufgelistet, die durch die Deutsche Gesellschaft für Neurologie (DGN) herausgegeben wurden [7]:

- Tiefe oder oberflächliche Entzündungen der Haut oder Muskulatur im Bereich der Einstichstelle
- Blutungsneigung mit einer Thrombozytenzahl von unter $50000/\mu$l stellen eine relative, Thrombozytenzahlen von unter $20000/\mu$l eine absolute Kontraindikation dar.
- Bei Verdacht des erhöhten Hirndruckes und Einklemmungsgefahr bei lumbaler Druckentlastung ist vor der Punktion ein cCT durchzuführen. Hierbei stellen folgende Befunde eine absolute Kontraindikation dar: Raumforderungen im Bereich der hinteren Schädelgrube, Zeichen der axialen Druckerhöhung mit Verschwinden suprachiasmaler oder zirkummesenzephaler Zisternen, Mittellinienverlagerung unter die Falx cerebri [8].

1.2.3 Punktionsort

Als Einstichstelle bieten sich die Bereiche zwischen den Dornfortsätzen der Lendenwirbelkörper 3 und 4 bzw. 4 und 5. Der Grund hierfür liegt in der Anatomie des Rückenmarkes, welches beim Erwachsenen etwa auf Höhe des ersten Lendenwirbelkörpers endet [9]. Im darunter liegenden Bereich befinden sich nur die aus dem Rückenmark ausgetretenen Nervenfasern (cauda equina), die leicht beweglich im Liquor liegen und als Spinalnerven bilateral aus dem Spinalkanal austreten. Durch die Berücksichtigung dieser anatomischen Gegebenheit ist das Risiko einer Verletzung des Rückenmarkes bei einer Lumbalpunktion äußerst gering. Aufzusuchen ist der Punktionsort anhand der Dornfortsätze und einer gedachten Verbindungslinie der obersten Punkte der Beckenschaufeln (Cristae iliacae). Diese Punkte sind beim Patienten vor Beginn der Punktion sorgfältig zu tasten und gegebenenfalls zu

markieren. Bei der Punktion werden dann nacheinander von außen nach innen folgende Strukturen durchstochen: Haut, Unterhautfettgewebe, Lig. supraspinale, Lig. interspinale, ggf. Ligg flava, Epiduralraum, Dura mater und Arachnoidea, Subarachnoidalraum [10]. In besonderen Fällen, wie sklerotischen Veränderungen der Wirbelsäule oder Haut- bzw. Unterhautveränderungen im Bereich der Einstichstellen, kann die Punktion des Liquors auch an anderen Lokationen durchgeführt werden, wie im Bereich zwischen Squama occipitalis und Processus spinosus des Axis im Nacken in Form einer Subokzipitalpunktion. Hierbei wird die Cisterna cerebellomedullaris punktiert, die eine Erweiterung des mit Liquor gefüllten Subarachnoidalraumes in Höhe des Hirnstammes darstellt. Diese Art der Punktion sollte aber aufgrund der Gefahr einer Verletzung der Medulla oblongata nur nach strenger Indikationsstellung erfolgen [11].

1.2.4 Durchführung der Lumbalpunktion

Die Lumbalpunktion ist eine ärztliche Maßnahme und durch einen erfahrenen Arzt oder zumindest unter Aufsicht eines erfahrenen Arztes durchzuführen. Hierbei gelten die gängigen Hygiene-Richtlinien (Robert Koch Institut 1997). Insbesondere ist darauf hinzuweisen, dass sterile Handschuhe getragen werden und die Einstichstelle in der Haut regelrecht mit mindestens einem vorgeschalteten Reinigungsschritt oberflächlich desinfiziert wird. Das Anreichen sollte unter sterilen Bedingungen stattfinden. Anschließend wird unter Umständen eine Lokalanästhesie der Punktionsstelle durchgeführt. Hierzu kann zum Beispiel eine 1-2% Lidocainlösung genutzt werden. Auch die Vorbereitung des Lokalanästhetikums sollte unter sterilen Bedingungen erfolgen [7]. Die Wahl der Punktionsnadel sollte zwei wesentliche Betrachtungen beinhalten: Zum einen steigt das Risiko postpunktioneller Komplikationen mit steigendem Kanülendurchmesser, zum anderen steigt mit geringerem Kanülendurchmesser die benötigte Punktionszeit. Punktionsnadeln mit einem mittleren Durchmesser scheinen daher einen sinnvollen Kompromiss darzustellen [12]. Beim Einstich der Nadel ist zu berücksichtigen, dass die Öffnung der Nadelspitze parallel zum Verlauf der Fasern in der Dura liegt. Die Fasern der Dura verlaufen axial, d.h. in cranial-caudaler Richtung, wodurch die Anschliffffläche der Nadelspitze beim Einstechen lateral zu halten ist. Dadurch kann die Verletzung der Dura auf ein Minimum beschränkt und die Wahrscheinlichkeit postpunktioneller Kopfschmerzen um bis zu 50% gesenkt werden [13] [14]. Des Weiteren gibt es Hinweise dafür, dass bei der Verwendung von atraumatischen Nadeln eine geringere Rate an postpunktionellen Kopfschmerzen zu erwarten ist [7] [6] [15]. Für die Entnahme des Liquors sollten mehrere Gefäße verwendet werden, um eventuelle Blutbeimengungen durch

die Punktion von denen, die pathologischer Weise im Liquor vorhanden sind, zu differenzieren. Die Entnahme sollte bei Raumtemperatur erfolgen und die Probe schnellstens bei möglichst $75°C$ in ein geeignetes Labor gebracht werden. Die Dauer zwischen Entnahme und Untersuchung sollte den Rahmen von zwei Stunden nicht überschreiten.

1.2.5 Komplikationen

Mögliche Komplikation können durch sorgfältiges Arbeiten, fundamentiertes Wissen über die Durchführung, aber vor allem auch durch Erfahrungen in der Ausübung des Eingriffs minimiert werden. Postpunktioneller Kopfschmerz, Infektionen lokal im Einstichbereich und zentral im Zielbereich, Blutungen, Weichteil- und Knochenverletzungen, Verletzung des Rückenmarkes, Ausfälle von Hirnnerven und akute Kreislaufdysregulation, Störung von Atem- und oder Kreislauffunktion seien hier als Komplikationsmöglichkeiten zu nennen.

1.3 Training der Lumbalpunktion

Die Lumbalpunktion erlernt der Arzt gelegentlich während, in der Regel erst nach dem Studium unter Anleitung und Supervision eines erfahrenen Arztes am Patienten. Das Training und die Vorbereitung auf die Punktion beschränkt sich häufig auf theoretisches Wissen und eventuell eine vorherige Demonstration. Im Hamburger Lernzielkatalog für die allgemeine Arztreife, dem die neue Approbationsordnung von 2002 zugrunde liegt, wird die Lumbalpunktion als Fertigkeit eingestuft, über die theoretisches Wissen vorhanden sein soll und die dem Studenten demonstriert worden sein soll. Als Demonstration ist auch ein Video ausreichend [16]. In der Weiterbildung zum Facharzt für Neurologie fordert die Ärztekammer Hamburg unter anderem 100 mal die Durchführung der Punktions- und Katheterisierungstechniken einschließlich der Gewinnung von Untersuchungsmaterial aus dem Liquorsystem [17]. Es gibt Phantommodelle, an denen die Lumbalpunktion geübt werden kann. Diese bilden den Lumbalbereich anatomisch sehr genau nach. Durch Einführen einer Nadel können dann die verschiedenen Widerstände der unterschiedlichen Strukturen gefühlt werden. Allerdings bieten diese Puppen nur einen geringen Einblick in die Anatomie, außerdem können sie auch nicht unterschiedliche Schwierigkeitsgrade oder patientenspezifische individuelle Unterschiede darstellen. Des Weiteren unterliegt das Material durch die Punktionen einem hohen Verschleiß, was mit hohen Folgekosten verbunden ist. Abbildung 1.3 zeigt ein Modell der Firma SkillsMed Deutschland GmbH. In der Praxis kommen daher nur sehr selten Phantommodelle zum Einsatz, weshalb die Punktion fast ausschließlich am Patienten direkt unter

Anleitung eines erfahrenen Arztes erlernt wird [3].

Abbildung 1: Phantompuppe zur Lumbalpunktion der Firma SkillsMed Deutschland GmbH [18]

1.4 Problemstellung und Ziel der Arbeit

Die Idee hinter der Entwicklung eines virtuellen Lumbalpunktionssimulators ist es eine einfache, günstige und patientenschonende Möglichkeit zu schaffen, sich mit der Anatomie des Lumbalbereichs dreidimensional auseinanderzusetzen und die Punktion inklusive realistischer Kraftrückgabe und Darstellung der Widerstände zu üben. Durch die computergestützte Virtual Reality Komponente ist es für den Nutzer möglich, nach eigenem Ermessen beliebig viele Punktionen durchzuführen, ohne dabei weitere Kosten zu verursachen und vor allem ohne reale Patienten zu verletzen. Es ist weiterhin möglich,

Bewertungssysteme zu integrieren, die jede Punktion objektiv bewerten und Verbesserungsvorschläge anbieten.

Aufgabe dieser Arbeit ist es, auf Grundlage von CT-Daten und MRT-Daten verschiedener Patienten fünf Fallbeispiele für den Simulator zu erstellen. Dabei soll durch die unterschiedliche Anatomie des Zielbereiches der Patienten auch eine Varianz des Schwierigkeitsgrades vorgegeben werden. Anschließend wird der Simulator von Probanden genutzt und evaluiert. Hierbei werden die Probanden randomisiert in zwei Gruppen eingeteilt. Beide Gruppen starten die Punktionen am Simulator nach dem Erarbeiten einer speziell entworfenen Lerneinheit, welche allen Teilnehmern den gleichen theoretischen Hintergrund über die Lumbalpunktion geben soll. Nach vordefinierten Bewertungskriterien wird jede Punktion der einzelnen Probanden bewertet und aufgezeichnet. In der Testgruppe soll hierbei ein Trainingseffekt verzeichnet werden, welcher sich möglichst signifikant von der Ergebnissen in der Kontrollgruppe unterscheidet. Folgende Fragen soll diese Arbeit beantworten:

1. Entsteht ein objektivierbarer Trainingseffekt durch die Virtual-Reality-Simulation der Lumbalpunktion?

2. Entsteht der Effekt durch eine Gewöhnung an das haptische Eingabegeät oder durch das Erlernen des Punktionseingriffes, also ist ein signifikanter Unterschied zwischen Test- und Kontrollgruppe feststellbar?

3. Wie beurteilen die Testnutzer das Simulationsprogramm und empfinden sie subjektiv durch die Simulation besser auf eine reale Punktion vorbereitet zu sein?

2 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden alle verwendeten Geräte vorgestellt. Es wird aufgezeigt, woher die Daten stammen, welche Software genutzt wurde und wie der bereits bestehende Punktionssimulator aufgebaut ist. Auch folgt ein kurzer Überblick über medizinische Bildverarbeitung und welche Methoden in dieser Arbeit zur Anwendung kommen.

2.1 Hardware

2.1.1 Computer

Die Simulatorsoftware wurde auf einen PC im Institut für Medizinische Informatik der Universitätsklinik Hamburg Eppendorf installiert. Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über das Leistungsspektrum des Computers.

Bezeichnung:	HP xw4600 Workstation
Prozessor:	Intel Core 2 Duo e8400 3,0 GHz
Arbeitsspeicher:	4,096 GB
Betriebssystem:	Windows XP Professional Version 2002 Service Pack 3

Tabelle 1: Leistungsmerkmale PC des Lumbalpunktionssimulators

2.1.2 Haptisches Ein- / Ausgabegerät

Bestandteil des Simulators ist das haptisches Eingabegerät (haptisches Device). Hierbei kamen im zeitlichen Verlauf zwei verschiedene kommerziell erhältliche Geräte der Firma SensAble zum Einsatz. Zu Beginn der Testreihe handelte es sich dabei um das Produkt Phantom Premium 1.5 /6DOF, welches über sechs Freiheitsgrade verfügt. Dabei dienen drei der Darstellung der Translation, also Veränderung der Position der Gerätespitze, drei weitere werden benötigt, um eine Rotation bzw. die Ausrichtung der Gerätespitze zuzulassen. Das Gerät kann weiterhin als Ausgabegerät genutzt werden und bietet in den sechs erwähnten Freiheitsgraden die Möglichkeit der Kraftrückgabe (force feedback). Mit diesem Gerät ist es im Vergleich zu herkömmlichen haptischen Geräten möglich, auch Drehmomente (Rotationswiderstände) wiederzugeben. Im zweiten Evaluationsdurchlauf, welcher ab Januar 2009 lief, konnte dann eine verbesserte high force Version des Gerätes verwendet werden. Die einzelnen Daten können Tabelle 2 entnommen werden.

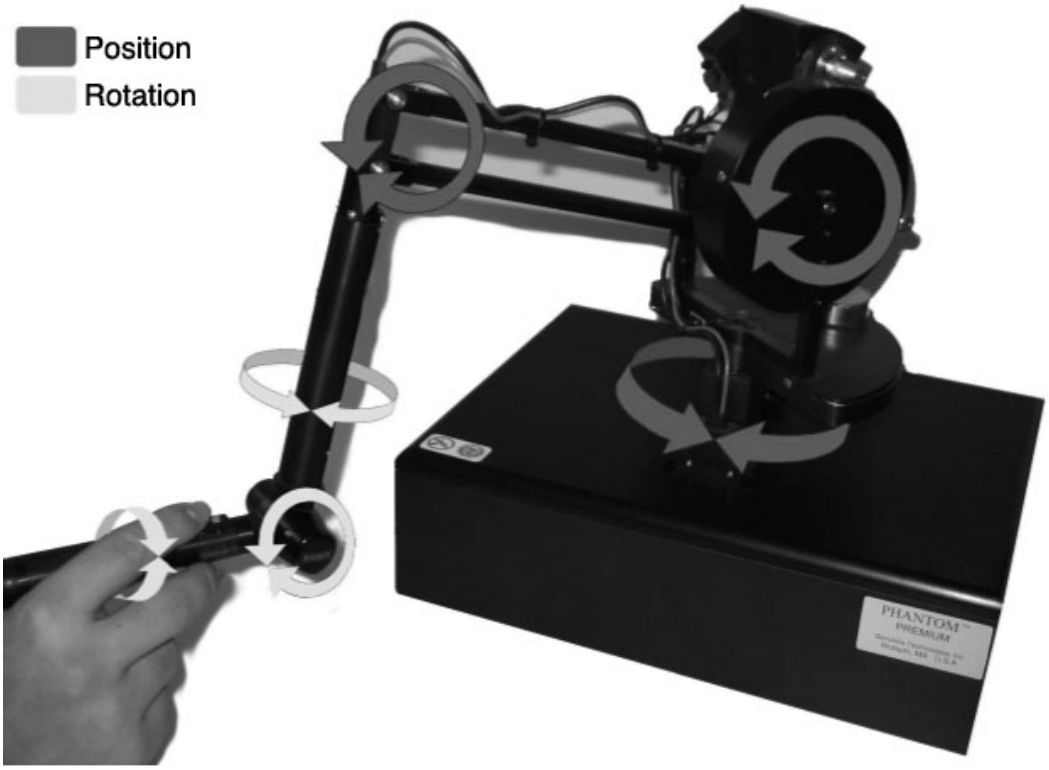


Abbildung 2: Haptisches Ein- und Ausgabegerät Phantom Premium 1.5 / 6DOF der Firma SensAble Technologies.

Diese Geräte sind nicht an eine Art von Verwendung gebunden, sondern können für eine Vielzahl von Programmen und Anwendungen genutzt werden, die mit haptischen Ein- und /oder Ausgaben arbeiten. In diesem Falle stellt der Endeffektor, also das zu bewegende stiftförmige Endglied am Simulatorarm, die Nadel der Lumbalpunktion dar. Hier erfährt der Benutzer sein Eingabe- und Ausgabegefühl und spürt die auftretenden Widerstände. Auf die Haptik und das haptische Rendering wird in 2.5.3 eingegangen.

	Phantom Premium 1.5 standard	**Phantom Premium 1.5 high force**
Freiheitsgrade:	6	6
Arbeitsraum:		
Translation (mm) (BxHxT)	381 x 267 x 191	381 x 267 x 191
Gierwinkel (°)	297	297
Nickwinkel (°)	260	260
Rollwinkel (°)	335	335
Kräfte:		
Max. Kraft (N):	8,5	37,5
Max. Kraft kontin. (N):	1,4	6,2
Steifigkeit (N/mm):	3,5	3,5
Mechanische Reibung (N):	0,04	0,2

Tabelle 2: Leistungsmerkmale der haptischen Ein- und Ausgabegeräte

2.2 Software

2.2.1 MeVisLab

Für die Segmentierung der Patientendatensätzen im Rahmen dieser Arbeit wurde mit dem Programm MeVisLab gearbeitet. Dieses Programm wurde von der Me Vis Medical Solutions AG entworfen und ist frei erhältlich. Es handelt sich dabei um ein Programm speziell für medizinische Bildverarbeitung, dessen Arbeitsoberfläche einen modularen Aufbau aufweist. Einzelne Algorithmen können in Form von Bausteinen geladen und in vielfacher Weise miteinander verbunden werden. Damit ist dieses Programm sehr flexibel und die Bedienung ist intuitiv. Genutzt wurde die Version 1.6 [19].

2.3 Patientendatensätze

Die im Rahmen dieser Arbeit erstellten Fallbeispiele basieren alle auf Schnittbilddaten realer menschlicher Körper. Vorwiegend wurden CT-Bilddaten verwendet, teilweise aber auch MRT-Daten oder im Rahmen von wissenschaftlichen Projekten gewonnene Kryotom-Schichtbilder. Im Folgenden werden

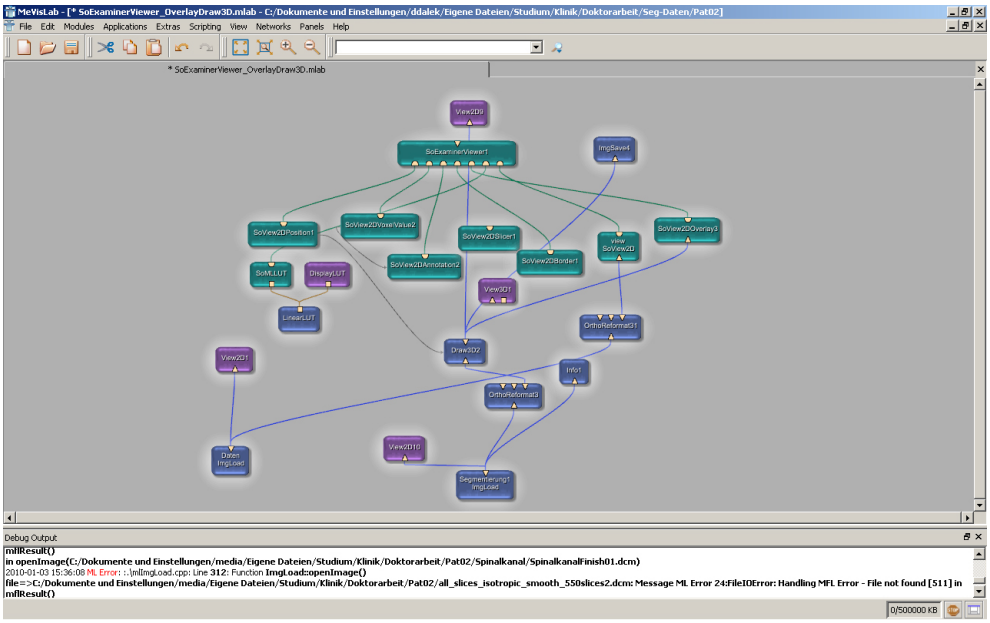


Abbildung 3: Benutzeroberfläche MeVisLab 1.6

Herkunft und Eigenschaften der Rohdaten für die Fallbeispiele einzeln erläutert. Die Datensätzen von Krankenhauspatienten wurden aus Datenschutzgründen anonymisiert.

2.3.1 Patient 1 / Visible Korean Human (VKH)

In Korea wurde 2005 im Rahmen einer Zusammenarbeit von KISTI (Korea Institute of Science and Technology Information) und Ajou University posthum CT, MRT und RGB-Bilddaten eines koreanischen Leukämie-Patienten erstellt. Dazu wurde der Körper in einer Holzbox immobilisiert. Während die Gewinnung der CT und MRT-Daten in herkömmlicher Weise geschehen konnte, musste für die Erzeugung von Kryotom-Schnittbildern der Körper bei -70 Grad Celsius tiefgefroren werden. Da es technisch nicht möglich war, den Körper in 0,2 mm dünne Scheiben zu zerschneiden, entschied man sich jeweils 0,2 mm vom Körper abzuhobeln und die neu entstandene Querschnittsoberfläche zu fotografieren, wodurch RGB-Bilddaten entstanden. Während sich jeweils 1718 Schichten mit einer Dicke vom 1 mm im CT und MRT ergaben (Auflösung 505 x 276 Pixel, bei 8 Bit Farbtiefe), handelt es sich bei den 0,2 mm dicken RGB-Fotodaten um 8590 Schichten. Die Auflösung beträgt hier 3040 x 2008 Pixel bei einer Farbtiefe von 24 Bit. Durch die Immobilisierung des Körpers konnte sichergestellt werden, dass sich CT, MRT und

RGB-Bilddaten komplett überdecken und so ein direkter Vergleich von Fotomaterial und CT-Daten pixelgenau anstellen lässt[20]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden allen für die Lumbalpunktion benötigten Organe und Strukturen dieses Datensatzes selbst segmentiert.

2.3.2 Patient 2

Die Rohdaten für den Patientendatensatz 2 stammen aus dem Universitätsklinikum Hamburg Eppendorf. Es handelt sich dabei um CT-Aufnahmen der Wirbelsäule von Brustwirbelkörper 8 bis inklusive dem oberen Drittel des Os sacrum. Die Auflösung beträgt 512 x 512 Pixel bei 550 Schichten. Die Voxel haben eine Kantenlänge von 0,418 mm x 0,418 mm x 1 mm (x;y;z). Das CT-Fenster erstreckt sich bei diesem Patienten allerdings nicht über den gesamten Rücken, im Bereich der rechten Flanke ist das Bild abgeschnitten. Der vertebrale und paravertebrale Bereich mit allen für die Lumbalpunktion relevanten Strukturen auf den Aufnahmen sind enthalten, sodass diese Daten verwendet werden können.

2.3.3 Patient 3

Grundlage des Patientendatensatzes 3 bieten ebenfalls CT-Aufnahmen aus der Radiologie des UKE. Diese Daten wurden bereits im Rahmen eines Projekts zur virtuellen Ascitespunktion genutzt [21]. Die Auflösung beträgt 512 x 512 Pixel bei 409 Schichten und einer Kantenlänge der Voxel von 0,77 mm x 0,77 mm x 1 mm (x;y;z). Der Ausschnitt zeigt das gesamte Abdomen von Brustwirbelkörper 9 bis zur Höhe des Trochanter minor. Alle für die jeweilige Arbeit benötigten Strukturen wurden selbst segmentiert.

2.3.4 Patient 4

Hierbei handelt es sich um einen Datensatz, der aus demselben Projekt wie Patient 3 stammt und für die Lumbalpunktion weiter segmentiert wurde. Grundlage bildet ein abdominelles CT aus der Radiologie des UKE. Der Ausschnitt zeigt den Bereich von Brustwirbelkörper 7 bis knapp unterhalb des Trochanter major. Die Auflösung beträgt auch hier 512 x 512 Pixel, bei 471 Schichten und einer Voxelgröße von 0,776 mm x 0,776 mm x 1 mm (x;y;z).

2.3.5 Patient 5 / Visible Human (VH)

Die Rohdaten stammen aus dem Visible Human Projekt der amerikanischen National Library of Medicine (NLM). Analog dem Visible Korean Human-Projekt jedoch chronologisch früher wurde der Körper eines Spenders post-

mortal eingefroren und scheibenweise abgehobelt. Dies geschah in Intervallen von 1 mm. Die gewonnen Cryotom-Bilddaten ergeben in einer Farbtiefe von 24 Bit und einer Auflösung von 2048x1216 Pixeln 1871 Schichten. Die CT-Daten sind ebenfalls in 1mm Intervallen entstanden, bieten eine Auflösung von 512 x 512 Pixel bei 12 Bit-Farbtiefe(Grau), während sich die MRT-Bilddaten auf eine Auflösung von 256 x 256 begrenzen und die Schichtdicke lediglich 4mm beträgt. Der Körper des hier verwendeten Datensatzes stammt von einem zum Tode verurteilten Straftäter aus Texas, der vor seiner Hinrichtung einer medizinischen Nutzung seines Körpers nach der Vollstreckung der Todesstrafe zustimmte [22]. Im Rahmen des VoxelMan wurde dieser Datensatz bereits zum Großteil segmentiert. Diese Daten wurden genutzt und durch einige noch nicht segmentierte Strukturen, wie beispielsweise die Ligamenta zwischen den Wirbelfortsätzen, erweitert und vervollständigt.

Datensatz:	Auflösung *(Pixel)*	Farbtiefe *(BIT)*	Anzahl der Schichten	Kantenlänge der Voxel*(mm)*(x;y;z)
Pat 1 (CT)	505 x 276	8 Bit	1718	1;1;1
Pat 1 (Cryotom)	3040 x 2008	24 Bit	8590	0,2;0,2;0,2
Pat 2	512 x 512	8 Bit	550	0,418;0,418;1
Pat 3	512 x 512	8 Bit	409	0,77;0,77;1
Pat 4	512 x 512	8 Bit	471	0,776;0,776;1
Pat 5 (CT)	512 x 512	12 Bit	1871	1;1;1
Pat 5 (Cryotom)	2048 x 1216	24 Bit	1871	0,33;0,33;1

Tabelle 3: Eigenschaften der verwendeten Originaldatensätze

2.4 Medizinische Bildverarbeitung

Die im Abschnitt 2.3 beschriebenen Patientendatensätze wurden größtenteils unverarbeitet entgegengenommen. Um die Daten für eine Lumbalpunktion im Simulator nutzbar zu machen, bedarf es mehrere Verarbeitungsschritte. Zunächst müssen die relevanten Strukturen unter Zuhilfenahme der in 2.2 beschriebenen Software segmentiert und daraus ein Labeldatensatz erstellt werden. Hierbei werden alle Voxel eines segmentierten Organs mit einer Identifikationsnummer gekennzeichnet (Tabelle 13). Danach müssen aus allen Organen dreidimensionale Oberflächenmodelle berechnet werden, welche dann zusammengesetzt den fertigen dreidimensionalen Patienten bilden. In den folgenden Kapiteln werden die in dieser Arbeit verwendeten Verfahren der medizinischen Bildverarbeitung vorgestellt. Außerdem wird ein kurzer Überblick über deren Funktionsweise gegeben.

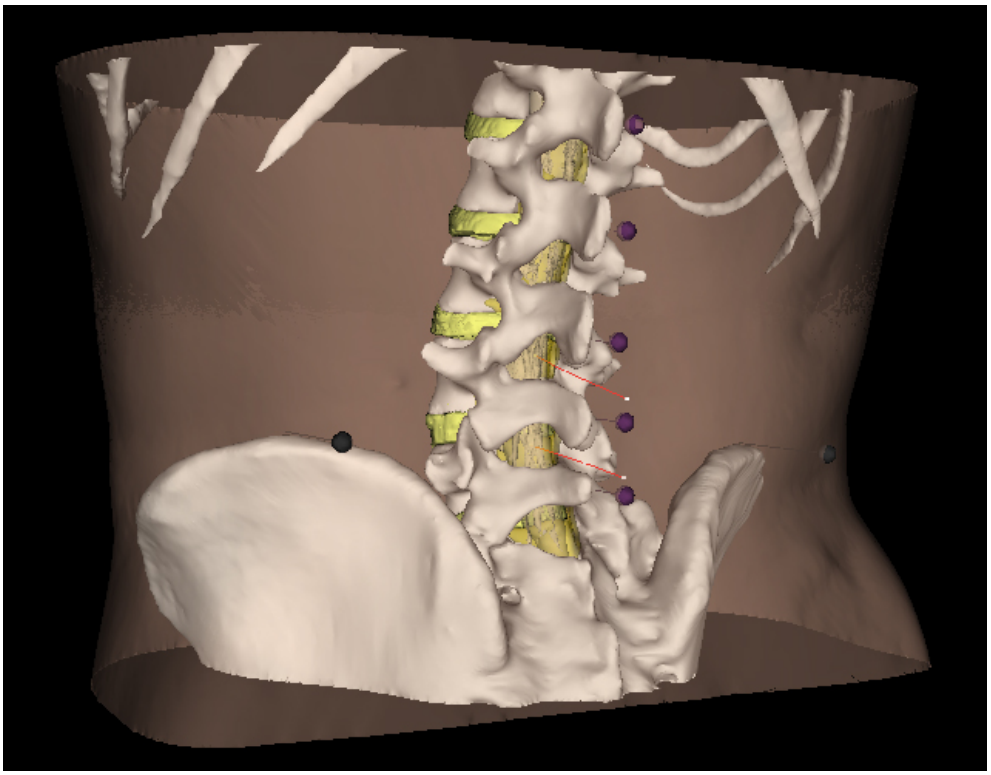


Abbildung 4: Oberflächenmodell Patientendatensatz 1

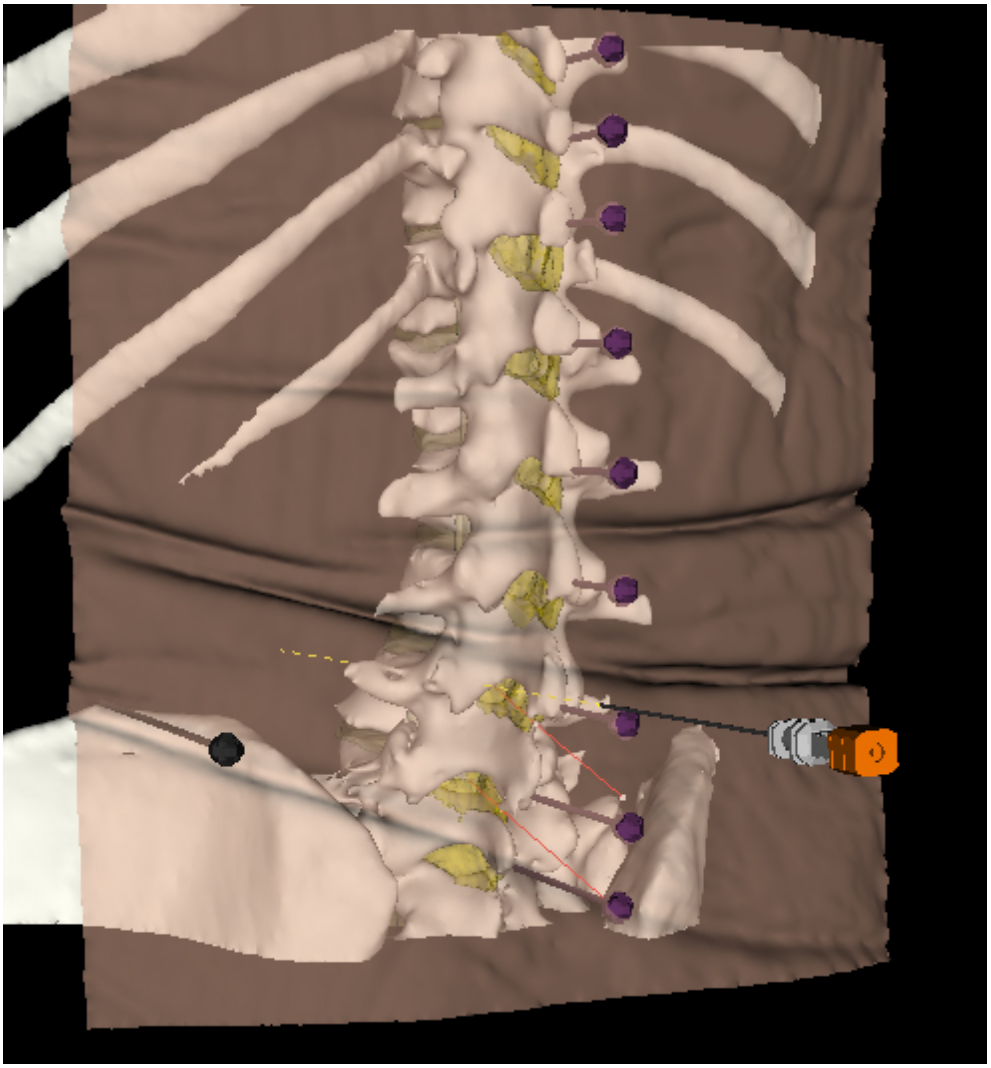


Abbildung 5: Oberflächenmodell Patientendatensatz 2

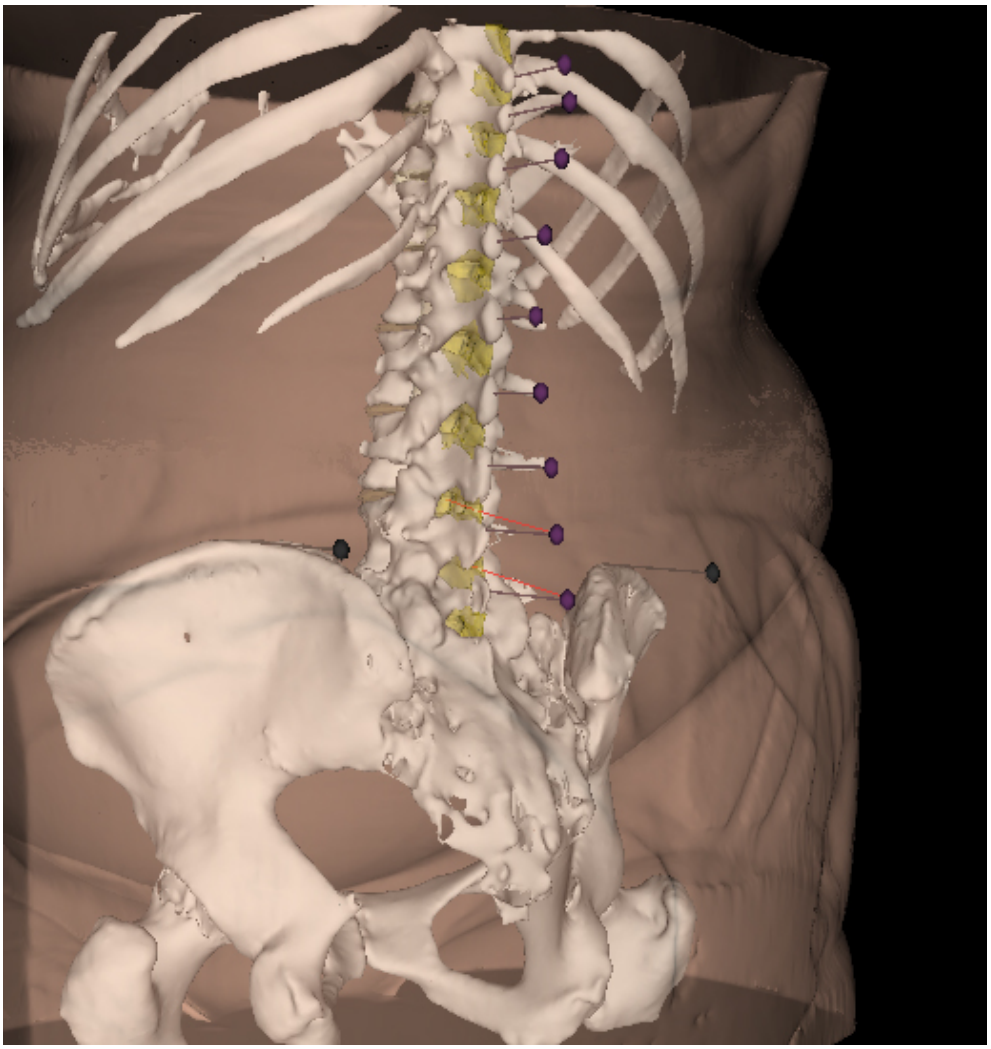


Abbildung 6: Oberflächenmodell Patientendatensatz 4

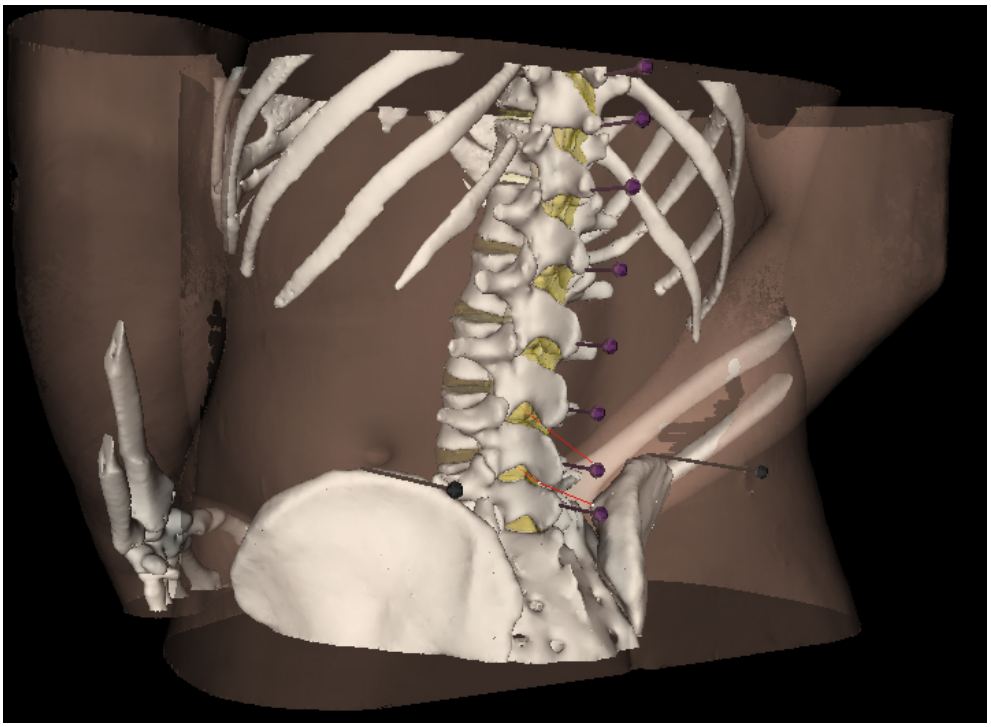


Abbildung 7: Oberflächenmodell Patientendatensatz 5

2.4.1 Begriffserklärung

Definitionsgemäß bedient man sich in der Bildbearbeitung Methoden und Algorithmen, welche ohne Vorwissen des Bildinhaltes angewandt werden können [23]. Hierzu zählen Grauwertmodifikation, Faltung und Filterung. Sie dienen der Bildvorverarbeitung, können aber auch in der Nachbearbeitung eingesetzt werden. Verfahren in der Bildverarbeitung hingegen beschäftigen sich mit Regionen, Strukturen und Objekten im Bild. Klassischerweise werden hier die Bereiche Bilderzeugung, Bildauswertung, Bilddarstellung und Bildspeicherung unterschieden. Ein Problem der computergestützten Verarbeitung medizinischer Bilddaten ist die sogenannte semantic gap. Sie entspricht der Diskrepanz zwischen der hochdifferenzierten Bildinterpretation durch menschliche Benutzer und den beschränkten voxelbasierten Bildmerkmalen, auf die automatische und halbautomatische Bildverarbeitungssysteme angewiesen sind. Folgende Gründe werden für die semantic gap angeführt:

- Bildrauschen
- Heterogenität des Bildmaterials: Alle biologischen Strukturen unterliegen interpersonellen Variationen, die einen vorher festgelegten Bildverarbeitungsablauf nahezu unmöglich machen. Außerdem kommen Veränderungen durch Atembewegungen oder Bewegungsartefakte während der Bildgenerierung dazu.
- Unscharfe Objektgrenzen: Bei der Computertomographie kommt es durch den hohen Wassergehalt des menschlichen Körpers zu einer sich teilweise nur im Promillebereich unterscheidenden Röntgenabschwächung insbesondere der parenchymatösen Organe. Daraus ergeben sich sehr ähnliche, bis sich teilweise überlappende Grau- bzw. Hounsfield-Werte. Dadurch, dass der Hintergrund der Organe meist durch Muskel- bzw. Fettgewebe gebildet wird, entsteht ein schlechter Kontrast, welcher die Strukturabgrenzung erschwert.

2.4.2 Segmentierung und Segmentierungsverfahren

Die Segmentierung ist ein Baustein in der medizinischen Bildverarbeitung. Hier kann es dem Hauptbereich der Bildauswertung zugeordnet werden und definiert sich dann als Einteilung des Bildes in örtlich zusammenhängende Bereiche [23]. Eine andere Definition richtet sich nach dem üblichen Gebrauch der Segmentierung im medizinischen Alltag und beschreibt die Segmentierung als Abgrenzung verschiedener diagnostisch oder therapeutisch relevanter Bildobjekte [24]. Die Segmentierung im medizinischen Bereich geschieht vorzugsweise zu anatomischen, funktionellen oder morphologischen

Einheiten. Ein großer Teil dieser Doktorarbeit befasste sich mit der Segmentierung von Organen nach streng anatomischen Gesichtspunkten. Prinzipiell stehen automatisierte Segmentierungsverfahren zur Verfügung, welche aber nur bedingt einsetzbar sind. Unverzichtbar war eine manuelle Kombination verschiedener Verfahren. Der Einsatz von Filtern konnte die Ergebnisse verbessern, denoch mussten aber stellenweise manuell einzelne Voxel an den segmentierten Objekten hinzugefügt oder entfernt werden. Dies wurde dann stets nach anatomischen Vorgaben aus gängigen Atlanten und Lehrbüchern vollzogen, damit ein möglichst realistisches Ergebnis erreicht werden konnte.

Im Folgenden soll auf die in dieser Arbeit eingesetzten Verfahren eingegangen, aber auch deren Grenzen beleuchtet werden, die die Notwendigkeit der manuellen Nachbearbeitung darlegen.

Schwellwertverfahren Bei diesem Verfahren wird lediglich der Grauwert des Pixels bzw. Voxels (da es sich im Rahmen dieser Arbeit ausschließlich um mehrschichtige Bildvorlagen handelt, wird in Zukunft wertungsfrei der Begriff Voxel verwendet) zur Segmentierung berücksichtigt. Hierbei wird jeder Voxel ohne Berücksichtigung seiner Umgebung betrachtet. Damit kann das Segmentierungsergebnis auch aus unzusammenhängenden Strukturen bzw. Einheiten bestehen, sodass sich ein Nachbearbeitungsbedarf ergibt. In der Regel basiert dieses Verfahren auf Schwellwerten (thresholds), die zu definieren sind. Dabei werden ein unterer (lower threshold, tunten) und ein oberer Schwellwert (upper threshold, toben) angegeben. Grauwerte können dabei genauso verwendet werden wie HU-Werte (Hounsfield Units). Alle Voxel die unterhalb des unteren oder über dem oberen Schwellenwert liegen, verlieren ihren ursprünglichen Grauwert und erhalten den Wert 0. Die im Intervall liegenden Voxel werden zum segmentierten Objekt gezählt und können als Binärbild ausgegeben werden (alle segmentierten Voxel erhalten den gleichen neuen Wert) oder als Grauwertbild (die im Intervall liegenden Voxel behalten ihren ursprünglichen Grauwert bei). Aus einer 3D-Bildfolge f wird damit eine Binärbildfolge B [24].

Regionenorientierte Segmentierung Hierbei handelt es sich um ein komplexes Segmentierungsverfahren, welches auch Eigenschaften von Nachbarvoxel mit berücksichtigt. Prinzipiell gibt es hier nur zusammenhängende Segmentierungsergebnisse, wodurch der Nachbearbeitungsbedarf reduziert werden kann [24] [23]. Als Beispiel dient hier das Region-Growing-Verfahren (oder im dreidimensionalen Raum das Volume-Growing-Verfahren). Auch hier werden Schwellenwerte angegeben, zusätzlich bedarf es aber dem Definieren eines oder mehrerer Saatpunkte (seed-point). Nun werden vom Saat-

punkt aus dessen Nachbarvoxel einzeln betrachtet. Liegen diese im Schwellenwertbereich, werden sie dem segmentierten Objekt zugefügt. Dann werden wiederum von diesen Bildpunkten die Nachbarn geprüft und so weiter. Die Kriterien der Nachbarschaft können ebenfalls definiert werden. So ist gewährleistet, dass nur zusammenhängende und gleichzeitig im Schwellenwertbereich liegende Voxel segmentiert werden. Das Ergebnis kann als Binärbild oder Grauwertmaske ausgegeben werden [24] [23]. Hierbei ist zu beachten, dass Organe, die aneinandergrenzen und deren Dichte und damit Grauwerte eng aneinander liegen, schwer allein mit diesem Verfahren zu trennen sind.

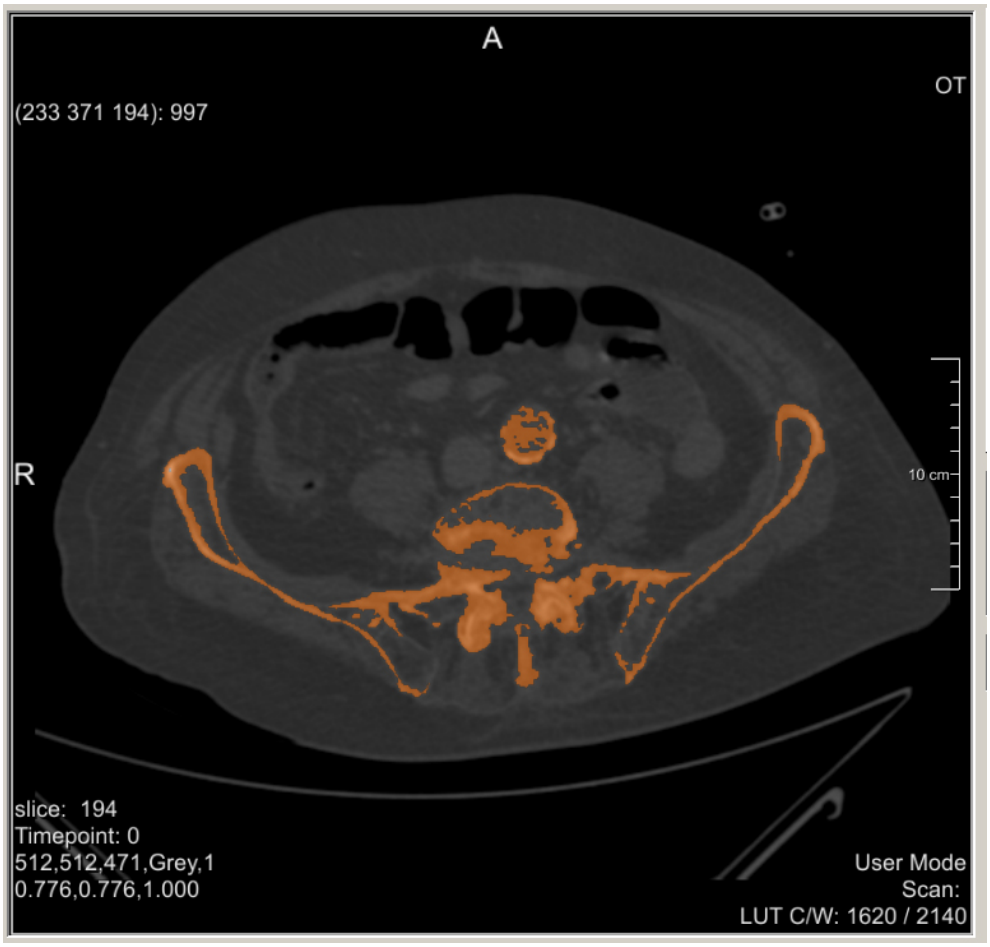


Abbildung 8: Darstellung eines Regionenorientierten Segmentierungsverfahrens

Kantenorientierte Segmentierung Die kantenorientierten Verfahren betrachten das abstraktere Merkmal Kante und nicht Voxel. Somit sind sie nur für Strukturen geeignet, die klar abgrenzbar sind, da sie versuchen, das Objekt aufgrund ihrer Umrandung zu erfassen [23]. Als Beispiel dient hier das Verfahren Live-Wire. Bei dieser halbautomatisierten, interaktiven Segmentierung muss der Benutzer immer wieder Saatpunkte auf der Kante des Objektes markieren. Die Software berechnet dann auf Grundlage von Gradientendaten den Pfad vom letzten Saatpunkt zur aktuellen Cursorposition, der auf der Kante des Objektes liegt. Bei erneutem Setzen eines Saatpunkts wird der angezeigte Kantenverlauf festgesetzt [23] [24]. Der Benutzer muss das Objekt vollständig umrunden, sodass am Ende die Fläche innerhalb des Kantenverlaufes segmentiert wird. Dieses Verfahren bedarf einer hohen Benutzerintervention, da viele Saatpunkte gesetzt werden müssen und das Segmentieren der Fläche bei Schichtbildern für jede Schicht einzeln wiederholt werden muss. Da das Verfahren unabhängig von den bislang segmentierten Schichten arbeitet, entsteht so bei dreidimensionaler Betrachtung leicht eine stufige Oberfläche.

Filter Filter gehören in den Bereich der Bildbearbeitung und zur Klasse der lokalen Operatoren. Hierbei wird eine auf seine Nachbarschaft beschränkte Transformation eines jeden Bildpunktes durchgeführt [24]. Bei linearen Filtern wird dies auch Faltung genannt. Jeder Pixel f(m,n) wird zusammen mit den Werten seiner direkten Umgebung f(m+k,n+l) mit k,l zu einem neuen Wert f' verknüpft. Dies kann mit einem Template verdeutlicht werden, welches eine kleine quadratische Maske mit ungerader Kantenlänge k,l darstellt (z.B. 3x3 oder 5x5). Die Punkte der Maske erhalten unterschiedliche Gewichtungsfaktoren. Die Maske wird auf einen Bildpunkt des Bildes positioniert. Alle Bildpunkte unter dieser Maske werden nun Kernel genannt. Die Werte der jeweils übereinander liegenden Pixel des Template und Kernel werden miteinander multipliziert, sowie anschließend addiert. Das Ergebnis repräsentiert den Wert des Maskenmittelpunktes im Ausgabebild. Dieses Template wird vertikal und horizontal durch das komplette Bild verschoben, bis alle Bildpunkte einmal erreicht wurden. Damit ist das Ausgabebild fertig berechnet [24] [23]. Das Ausgabebild ist abhängig von Größe des Templates und Gewichtung der einzelnen Pixel im Template, was wiederum die unterschiedlichen Filter ausmacht.

Glättungsfilter Um eine Glättung und ein reduziertes Rauschen im Ausgabebild zu erreichen, werden nur positive Werte im Template verwendet [23]. Sind alle Werte identisch, wird ein positiver Mittelwert der im Template be-

findlichen Werte ermittelt. Hierbei handelt es sich um einen Mittelwertfilter. Weiterhin kann man dieses Prinzip mit der Gaußschen Normalenverteilung kombinieren und erhält einen komplexeren Filter, da hier die Werte innerhalb der Maske anders gewichtet werden. Es entsteht ein Binomialfilter oder Gauß-Filter. In diesem Filter werden schließlich die Glättungseffekte zur Peripherie des Templates hin geringer, sodass die Kanten stärker erhalten bleiben und die Schärfe des Bildes weniger abnimmt.

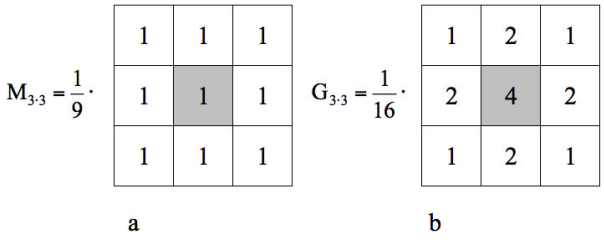


Abbildung 9: Templates eines Mittelwert- (a) und eines Binomialfilters (b)

Kantenfilter Der Kantenfilter benutzt neben positiven auch negative Werte im Template. So können nicht nur Kanten hervorgehoben, sondern auch Kontraste im Bild verstärkt werden. Damit können einzelne Strukturen besser dargestellt werden, dies aber nur durch Inkaufnahme eines stärkeren Bildrauschens. Ein Beispiel für einen solchen isotropen Kantenfilter ist der Binomial-Hochpass-Filter. Werden nun die Koeffizienten im Template auch noch asymmetrisch (anisotrop) angeordnet, lässt sich der Effekt in eine Richtung selektieren [23]. Hier ist der Sobel-Filter zu nennen. Es entsteht eine Vorzugsrichtung.

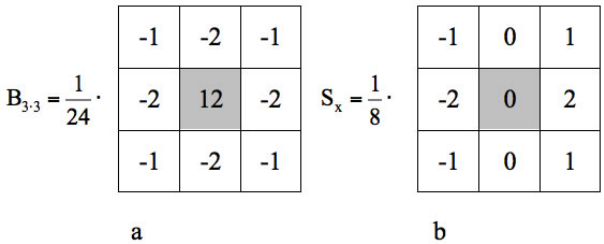


Abbildung 10: Templates eines Binomial-Hochpass-Filters (a) und eines Sobelfilters mit Betonung der vertikalen Kanten (b).

Morphologische Filter Morphologische Filter werden vorwiegend auf Binärbilder angewendet. Diese Filter bedienen sich der mathematisch-informatischen Operatoren AND und OR, wobei das Binärbild mit einem binären Template verbunden wird. Daher kommen sie häufig auch bei der Bildnachbearbeitung zum Einsatz. Während bei der Erosion Ausgangsbild und Template mit AND verknüpft werden, was zu einer Verkleinerung des Objekts führt, wird bei der Dilatation der Operator OR verwendet, was zu einer Vergrößerung des Objekts führt. Weiterhin können die beiden Funktionen direkt hintereinander geschaltet werden. Kleine Details, wie einzelne Pixel am Objektrand, können ohne wesentliche Veränderung des Gesamtobjekts durch das Opening entfernt werden. Hier wird direkt nach der Erosion eine Dilatation durchgeführt. Im Gegensatz dazu bewirkt das Closing (zunächst eine Dilatation, darauf folgend eine Erosion) ein Schließen kleinerer Löcher innerhalb des Objektes und eine mäßige Glättung des Außenrandes bei Beibehaltung der Gesamtgröße des Objekts [23].

2.4.3 Bearbeitung der Patientendatensätze

Die Segmentierung der für den Simulator relevanten Strukturen aus den Patientendatensätzen gestaltete sich als sehr aufwendig. Durch die bereits beschriebenen Probleme der halbautomatischen und automatischen Segmentierungsverfahren waren in den erstellten Binärdatensätzen der Strukturen kleinere Löcher zu finden oder die Kanten waren unregelmäßig bzw. nicht der realen Struktur entsprechend. Eine Berücksichtigung aller Kanten ergibt aber einen hohen Speicherbedarf der berechneten dreidimensionalen Oberflächenmodelle und damit verbunden eine Verlangsamung der Visualisierung im Simulationsprogramm. Eine manuelle Nachbearbeitung nach Durchlaufen verschiedener automatischer Bildbe- und Bildverarbeitungsverfahren war daher nötig. Im Folgenden werden die verwendeten Verfahren für die einzelnen anatomischen Strukturen dargestellt. Anzumerken ist hierbei, dass alle bearbeiteten CT-Datensätze aufgrund des Bildrauschens mit einem Gauß-Glättungsfilter vorbearbeitet wurden. Der Faltungskern betrug 3x3x1 Pixel.

Segmentierung der Knochen Die Wirbelsäule ist bei der Lumbalpunktion von entscheidender Bedeutung. Durch die Lokalisation und Konfiguration der einzelnen Wirbel wird die Punktion entscheidend bestimmt. Daher ist hier eine besonders genaue Segmentierung notwendig. Teilweise können schon einzelne zusätzliche Voxel an den knöchernen Strukturen im Raum zwischen den Dornfortsätzen eine Punktion erheblich erschweren. Aufgrund der hohen Hounsfield-Einheiten der Knochen im CT-Bild konnte aber mit einem Region-Growing-Verfahren relativ problemlos ein knöchernes Skelett

segmentiert werden. Lediglich einzelne artifizielle Anhänge an den Knochen, insbesondere im Bereich der Dornfortsätze und des Spinalkanals, mussten manuell entfernt werden. Des Weiteren musste die Binnenstruktur der Knochen, die substantia spongiosa, manuell aufgefüllt werden. Hierbei musste die Begrenzung der Knochen in allen drei Ebenen schichtweise auf Kontinuität geprüft und ggf. diese manuell hergestellt werden. Danach konnte problemlos ein zweites Region-Growing auf das bearbeitete Binärbild mit Saatpunkt außerhalb des Knochens angewendet und das Ergebnis invertiert werden. Die Segmentierung im Überblick und Angaben über die verwendeten Grenzwerte bei den einzelnen Datensätzen gibt die folgende Tabelle wieder. Der zeitliche Aufwand für die Segmentierung der Knochen betrug ca. 20 Arbeitsstunden pro Datensatz.

Knöcherne Strukturen:					
Angewendetes Verfahren:	Pat 1	Pat 2	Pat 3	Pat 4	Pat 5
Gauß-Filter	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1
Segmentierung	RG	RG	RG	RG	RG
lower threshold T_l (HU)	128	83	106	211	134
upper threshold T_u (HU)	2915	2869	2893	2898	2899
Nachbearbeitung:	man.	man.	man.	man.	man.

Tabelle 4: Segmentierung der knöchernen Strukturen. *Legende: RG = Region Growing, man. = manuell.*

Segmentierung der Bänder Die Bänder sind den Knochen nicht nur anatomisch nahe, sondern auch von ähnlich entscheidender Wichtigkeit für eine möglichst reale Simulation der Lumbalpunktion. Für den Simulator wurde nicht der gesamte Bandapparat segmentiert. Lediglich die für die Lumbalpunktion relevanten Bänder wurden erfasst. Dies sind die Ligamenta supraspinalia, Ligamenta interspinalia und die Ligamenta flava. Da diese Bänder ineinander übergehen und aus den CT-Daten als eine zusammenhängende Struktur segmentiert wurden, wird hier im weiteren Verlauf von den Ligamenta flava stellvertretend für diesen Bandapparat gesprochen. Diese Struktur wird bei der Punktion durchstochen und zeigt beim kompletten Durchdringen mit der Nadelspitze durch den typischen plötzlichen Widerstandsverlust dem Punktierenden an, dass sich die Nadelspitze im Spinalkanal befindet. Da diese Struktur komplett vom Wirbelbogen und Dornfortsatz eines Wirbels zum nächsten verläuft, ist es hier besonders wichtig, ebenfalls sowohl in den segmentierten Binärdaten, als auch in den späteren Oberflächenmodellen keine

Zwischenräume zwischen Knochen und Bändern entstehen zu lassen. Bänder sind im CT durch ihre ähnliche Dichte nur schwer vom umliegenden Fett- und Muskelgewebe abzugrenzen. Durch ein Region-Growing-Verfahren konnte zunächst ein noch sehr ungenaues Binärbild der Bänder segmentiert werden. In MeVisLab konnte dieses Binärbild teiltransparent und farblich angefärbt über das Orginalbild projizieren werden. Dadurch war es möglich das Binärbild manuell zu bearbeiten, während das Orginal-CT-Bild pixelgenau den Hintergrund bildete. Somit war es möglich jeden einzelnen Pixel der Struktur Band zuzuordnen oder aus der Struktur zu entfernen. Diese aufwendige manuelle Nachbearbeitung der Bänder forderte einen zeitlichen Aufwand von ungefähr sechs Stunden pro Patientendatensatz, obwohl die Bänder nur ein sehr geringes Volumen und eine geringe Voxelzahl aufweisen. Lediglich der Datensatz des ersten Patienten ermöglichte durch die Cryotom-Bilddaten ein genaueres Ergebnis des Region-Growing-Verfahrens, sodass hier der zeitliche Aufwand etwa bei vier Stunden lag.

Bänder:					
Angewendetes Verfahren:	Pat 1	Pat 2	Pat 3	Pat 4	Pat 5
Gauß-Filter	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1
Segmentierung	RG	RG	RG	RG	RG
lower threshold T_i (HU)	-90	-220	-121	-113	5
upper threshold T_u (HU)	110	-26	54	125	145
Nachbearbeitung:	man.	man.	man.	man.	man.

Tabelle 5: Segmentierung der Bänder. *Legende: RG = Region Growing, man. = manuell.*

Segmentierung der Bandscheiben Die Bandscheiben konnten auf die gleiche Weise wie die knöchernen Strukturen segmentiert werden. Durch das Region-Growing-Verfahren wurden sehr gute Ergebnisse erzielt. Eine manuelle Nachbearbeitung war aber trotzdem nötig, reduzierte sich aber aufgrund des geringen Volumens der einzelnen Bandscheiben auf einen geringen zusätzlichen Zeitaufwand. Insgesamt wurden pro Datensatz für die Bandscheiben drei bis vier Arbeitsstunden benötigt.

Bandscheiben:					
Angewendetes Verfahren:	Pat 1	Pat 2	Pat 3	Pat 4	Pat 5
Gauß-Filter	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1
Segmentierung	RG	RG	RG	RG	RG
lower threshold T_i (HU)	27	83	54	-65	38
upper threshold T_u (HU)	186	241	199	150	212
Nachbearbeitung:	man.	man.	man.	man.	man.

Tabelle 6: Segmentierung der Bandscheiben. *Legende: RG = Region Growing, man. = manuell.*

Segmentierung des Spinalkanals Die Segmentierung des Spinalkanals unterscheidet sich ein wenig von den bisher beschriebenen Verfahren. Im Spinalkanal liegen das Rückenmark und die daraus hervorgehenden Spinalnerven eingebettet im Liquor. Direkt am Spinalkanal liegt der Epi- oder Periduralraum, in dem Blutgefäße verlaufen und sich Fettgewebe befindet. Dieser ist nur circa 2mm breit. Mit den CT-Daten als Grundlage ist es aufgrund der engen räumlichen Beziehung der Strukturen, der ähnlichen Dichtewerte und der Auflösung der Bilder nicht möglich gewesen, alle Strukturen einzeln zu segmentieren, weshalb der Spinalkanal als Labeldatensatz alle diese Strukturen beinhaltet. Lediglich bei den Patientendatensätzen 1 und 5 gab es aufgrund der Croytom-Schnittbilder die Möglichkeit das Myelon und die Spinalnerven ansatzweise einzeln zu segmentieren. Der Spinalkanal wurde zunächst schichtweise mit dem Live-Wire-Verfahren segmentiert, welches in 2.4.2 beschrieben wurde. Hierbei wurde circa jede zehnte Schicht manuell segmentiert und die dazwischen liegenden Schichten computergestützt interpoliert. Dies führte aber nicht zu adäquaten Ergebnissen. Schließlich konnte durch Subtraktion der Voxel aus den bereits segmentierten Knochen-, Bandscheiben- und Bänder-Labeldaten vom CT-Datensatz ein recht exaktes Ergebnis des Spinalkanals erzielt werden. Lediglich am Austritt der Spinalnerven musste manuell nachbearbeitet werden.

Segmentierung der Spinalnerven Die Spinalnerven konnten nur bei Patientendatensatz 1 und 5 segmentiert werden. Diese Datensätze beinhalteten Cryotom-Schichtbilder, auf denen im Gegensatz zu den CT-Daten das Myelon und die Spinalnerven überhaupt eindeutig erkannt, abgegrenzt und segmentiert werden konnten. Hierbei kam die gleiche Verfahrensweise wie bei den Bändern zum Einsatz (siehe 2.4.3). Der zeitliche Aufwand war enorm, da die feinen Nerven die komplette Wirbelsäule entlang aus dem Spinalkanal

austreten und somit die manuelle Nachbearbeitung viel Zeit benötigte. Etwa sieben Stunden pro Datensatz wurden benötigt.

Spinalkanal:					
Angewendetes Verfahren:	Pat 1	Pat 2	Pat 3	Pat 4	Pat 5
Gauß-Filter	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1
Segmentierung	RG	RG	RG	RG	RG
lower threshold T_i (HU)	-235	-318	-144	-103	-114
upper threshold T_u (HU)	136	150	89	105	53
Nachbearbeitung:	man.	man.	man.	man.	man.

Tabelle 7: Segmentierung des Spinalkanals. *Legende: RG = Region Growing, man. = manuell.*

Spinalnerven und Myelon:		
Angewendetes Verfahren:	Pat 1	Pat 5
Gauß-Filter	3x3x1	3x3x1
Segmentierung	RG	RG
lower threshold T_i (HU)	-51	-28
upper threshold T_u (HU)	72	63
Nachbearbeitung:	man.	man.

Tabelle 8: Segmentierung der Spinalnerven und des Myelon. *Legende: RG = Region Growing, man. = manuell.*

Segmentierung der Leber Die Notwendigkeit zur Segmentierung der Leber ist weniger aus unmittelbarer Nähe zum Punktionsort entstanden. Vielmehr konnte durch die asymmetrische Lage der Leber stets im entstandenen Datensatz eine Rechts- Links-Diskriminierung stattfinden. Auch für dieses Organ wurde nach zunächst Anwendung eines Gauß-Filters auf die Rohdaten, ein Region-Growing-Verfahren angewendet. Da beispielsweise die Milz und die Nieren ähnliche Dichteeigenschaften und damit auch HU-Werte hatten, musste manuell die Leber von den anderen Organen, welche dann nicht mehr benötigt und außer Acht gelassen wurden, isoliert werden. Der Aufwand für die Segmentierung der Leber betrug ungefähr drei Stunden pro Patientendatensatz.

Leber:					
Angewendetes Verfahren:	Pat 1	Pat 2	Pat 3	Pat 4	Pat 5
Gauß-Filter	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1
Segmentierung	RG	RG	RG	RG	RG
lower threshold T_i (HU)	8	10	33	48	-59
upper threshold T_u (HU)	105	93	116	130	111
Nachbearbeitung:	man.	man.	man.	man.	man.

Tabelle 9: Segmentierung der Leber. *Legende: RG = Region Growing, man. = manuell.*

Segmentierung der Muskeln Die Segmentierung der Muskeln gestaltete sich aufgrund der Größe der Struktur als etwas komplizierter. Zunächst wurde der Gauß-Filter angewendet. Da die Anwendung eines Bearbeitungsverfahrens für den gesamten Datensatz aufgrund der Größe nicht möglich war, wurde dieser im nächsten Schritt manuell in verschiedene ca. 100 Bildschichten große Datensätze aufgeteilt. Ein Region-Growing-Verfahren konnte dann problemlos die Muskulatur darstellen. Viele kleinere weitere Strukturen, wie beispielsweise Gefäße oder Teile des Gastrointestinaltraktes, wurden hier unvollständig mitsegmentiert. Nach manueller Entfernung nicht-muskulärer Strukturen aus dem entstandenen Binärdatensatz in jeder fünften bis zehnten Schicht und erneuter Anwendung eines Region-Growing-Verfahren konnte die Muskulatur gut dargestellt werden. Die einzelnen kleineren Datensätze mussten nun zum Gesamtdatensatz zusammengesetzt werden. An den Grenzschichten der ehemaligen kleinen Datensätze zueinander war ein sehr guter Übergang zu erkennen, sodass keine manuelle Nachbearbeitung notwendig war. Pro Patientendatensatz wurden für die Segmentierung der Muskulatur 14 bis 15 Arbeitsstunden benötigt.

Muskulatur:					
Angewendetes Verfahren:	Pat 1	Pat 2	Pat 3	Pat 4	Pat 5
Gauß-Filter	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1
Segmentierung	RG	RG	RG	RG	RG
lower threshold T_i (HU)	2	-26	-1	-35	-9
upper threshold T_u (HU)	149	130	155	121	151
Nachbearbeitung:	man.l	man.	man.	man.	man.

Tabelle 10: Segmentierung der Muskulatur. *Legende: RG = Region Growing, man. = manuell.*

Segmentierung der Haut Die Segmentierung der Haut war vergleichsweise einfach. Das Region-Growing Verfahren konnte sehr gute Ergebnisse erzielen. Lediglich beim Pat 2 mussten manuell Extrakorporale Strukturen, wie Kleidung und Kabel entfernt werden. Entstandene Lücken in der Hautoberfläche wurden mittels Dilatation (3x3x1-Voxel-Kernel) entfernt. Abschließend wurde das komplette Körpervolumen mit dem Grauwert der Haut ausgefüllt, um ein geschlossenes Oberflächenmodell der Haut erhalten zu können. Bei Patientendatensatz 3 wurde zunächst ein Sobel-Kantenfilter eingesetzt und auf das daraus entstandene Kantenbild ein Region-Growing-Verfahren angewendet. Der zeitliche Aufwand betrug circa vier Stunden pro Datensatz.

Haut:			
Angewendetes Verfahren:	Pat 1	Pat 2	Pat 3
Gauß-Filter	3x3x1	3x3x1	3x3x1
Segmentierung	RG	RG	Sobel
lower threshold T_i (HU)	-999	-999	k.A.
upper threshold T_u (HU)	-510	-590	k.A.
1.Nachbearbeitung:	man.	man.	man.
2.Nachbearbeitung:	Dil. Kernel 1x1x1	Dil. Kernel 1x1x1	Dil. Kernel 1x1x1
Angewendetes Verfahren:	Pat 4	Pat 5	
Gauß-Filter	3x3x1	3x3x1	
Segmentierung	RG	RG	
lower threshold T_i (HU)	-186	-484	
upper threshold T_u (HU)	223	254	
1.Nachbearbeitung:	man.	man.	
2.Nachbearbeitung:	Dil. Kernel 1x1x1	Dil. Kernel 1x1x1	

Tabelle 11: Segmentierung der Haut. *Legende: RG = Region Growing, man. = manuell, Dil. = Dilatation.*

Segmentierung des Fettgewebes In den erstellten Patientendatensätzen entspricht das segmentierte Fettgewebe nicht dem anatomischen Vorbild der realen Patienten. Das Fettgewebe wurde nicht wie die zuvor beschriebenen Strukturen segmentiert, vielmehr entspricht das Fettgewebe hier einer „Füllmasse“ für die alle Räume zwischen den wichtigen und bereits segmentierten Strukturen. In dem für die Lumbalpunktion entscheidenden Bereich, also dem unteren Rücken kommt die Verteilung des segmentierten Fettgewebes der Verteilung des Fettgewebes im realen Menschen sehr nahe. Da die

Notwendigkeit zur Segmentierung von Herz, Lungen, Bauchorganen mit Ausnahme der Leber und der Gefäße für dieses Projekt nicht gegeben war, wurde hier in den Labeldatensätzen stellvertretend Fettgewebe erstellt. Durch Zusammensetzen eines nicht ausgefüllten Hautdatensatzes mit allen anderen segmentierten Organen und Strukturen konnten die übrig gebliebenen Zwischenräume durch Region-Growing leicht segmentiert und der Struktur Fettgewebe zugeordnet werden. Der Arbeitsaufwand betrug circa fünf bis sechs Stunden.

Fettgewebe:					
Angewendetes Verfahren:	Pat 1	Pat 2	Pat 3	Pat 4	Pat 5
Gauß-Filter	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1	3x3x1
Segmentierung	RG	RG	RG	RG	RG
lower threshold T_i (gv)	0	0	0	0	0
upper threshold T_u (gv)	254	254	254	254	254

Tabelle 12: Segmentierung des Fettgewebes. *Legende: RG = Region Growing, gv = Grauwert.*

Erstellung der Orientierungshilfen Bei der realen Lumbalpunktion ertastet der Punktierende zur Orientierung verschiedene Knochenpunkte (vgl. Kapitel 1.2.3). Dies ist bei der virtuellen Lumbalpunktion nicht möglich, sodass die Orientierung visuell ersetzt werden muss. Dazu wurden Markierungen erstellt, welche die Stellen auf der Haut kennzeichnen, wo bei einer realen Punktion die Beckenkämme und die Dornfortsätze der Wirbel manuell zu ertasten wären. In den axialen Schichten wurde jeweils dort eine kugelförmige Struktur tangential auf die Haut projiziert, wo sich der cranialste Anteil des Beckenkammes befand. Dies ergab die Markierung Beckenkämme. Ähnlich konnte die Markierung Dornfortsätze erstellt werden. Hierbei wurde ebenfalls in den axialen Schichten dort eine kugelförmige Struktur auf die Haut projiziert, in denen jeweils die Dornfortsätze der einzelnen Wirbel ihre dorsalsten Anteile aufzeigten.

Labelwerte:					
Organ/Struktur:	Pat 1	Pat 2	Pat 3	Pat 4	Pat 5
Knochen	255	255	255	255	248-255
Bänder	120	120	120	120	120
Spinalkanal	30	30	30.	30	30
Spinalnerven und Myelon	50	n.s.	n.s.	n.s.	50
Bandscheiben	70	70	70	70	70
Fett	20	20	20	20	20
Muskulatur	150	150	150	150	150
Haut	127	127	125	127	127
Leber	40	40	170	40	40
Markierung Dornfortsätze	195	195	195	195	195
Markierung Dornfortsätze	200	200	200	200	200

Tabelle 13: Labelwerte in den Patientendatensätzen. *Legende: n.s. = nicht segmentiert.*

Abbildung 11: Darstellung der Labeldaten

2.4.4 3D-Visualisierung

Für den Simulator werden alle relevanten Organe und Strukturen als dreidimensionale Oberflächenmodelle benötigt. Zumeist dreieckig geformte Polygone bilden approximativ die Oberfläche der Organe nach und stellen in dieser Form ein Drahtgittermodell dar [24]. Zur Berechnung der Körpermodelle beim Lumbalpunktionssimulator kommt der Marching-Cubes-Algorithmus zum Einsatz. Bei diesem Algorithmus, der zum Standardverfahren für die Erzeugung von Oberflächenmodellen aus medizinischen Bilddaten zählt, wird ein Voxel nicht als Quader, sondern als Bildpunkt betrachtet. Jedem Bildpunkt ist ein Bildfunktionswert f zugeordnet, z.B. ein Grauwert. Damit besteht der gesamte Bilddatensatz aus einem Punktgitter. Nach Bestimmung eines beliebigen Schwellenwertes t, wird ein Punkt zum Objektvoxel oder zu einem Nicht-Objektvoxel und es entsteht ein Binärbild:

Betrachtet man nun acht benachbarte Bildpunkte, bei denen je vier aus einer Bildschicht bestehen, erhält man einen Quader bzw. je nach Abstand einen Würfel. Die theoretischen 2^8=256 möglichen Konfigurationen des Quaders werden durch Symetrieeigenschaften auf 15 reduziert [24]. Je nach Konfiguration durchschneidet die Polygonoberfläche nun den Quader, wobei jeweils die Objektvoxel von den Nicht-Objektvoxeln getrennt sein müssen. Des Weiteren kann die hohe Zahl an Polygonen durch mathematische Ausdünnungsfaktoren reduziert werden und es entsteht schließlich das fertige Oberflächenmodell. Benötigt werden hierfür zumindest die bei der Segmentierung des Organs entstandenen Label-Daten, aber auch soweit möglich die zugrunde liegenden CT-Daten. Berücksichtigt man bei der Erzeugung die CT-Daten, werden die Oberflächen glatter, da hier das Verfahren im Subpixelbereich interpolieren kann, falls die Strukturgrenze in einem schwellenwertbasiertem Verfahren segmentiert wurde (Vgl. 2.4.2) [25].

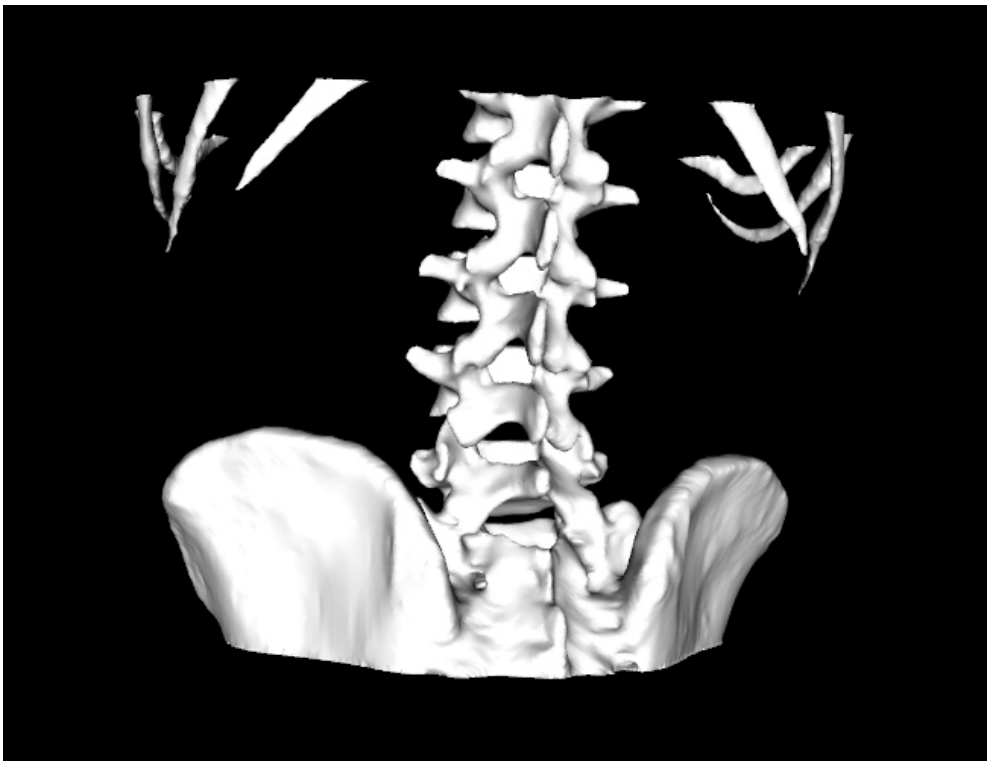


Abbildung 12: Modell der 3D-Visualisierung

2.5 Der Lumbalpunktionssimulator

Im kommenden Kapitel soll darauf eingegangen werden, wie der Punktionssimulator aufgebaut ist, wie eine virtuelle Lumbalpunktion abläuft, nach welchen Kriterien sie bewertet wird und welche Möglichkeiten der Simulator dem Benutzer bietet.

2.5.1 Aufbau und Bestandteile

Der Lumbalpunktionssimulator wurde im Institut für Medizinische Informatik des Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf entwickelt. Er besteht aus einem zentralen Rechner mit einer Software, die den Patienten, die Punktion und das Szenario simuliert, die auftretenden Kräfte berechnet und die Punktion aufzeichnen und bewerten kann. Als Eingabegerät steht das bereits vorgestellte Force-Feedback-Eingabegerät der Firma Sensable mit 6 Freiheitsgraden zur Verfügung. Dieses simuliert die Punktionskanüle. Es dient weiterhin als Ausgabegerät, indem es die auftretenden Kräfte simuliert und dem Benutzer spürbar macht. Technische Daten zu dem Gerät werden in Tabelle

2.2 dargestellt. Zusätzlich werden über einen Bildschirm die optischen Komponenten dem Benutzer wiedergegeben. Im ersten Evaluationsblock wurde ein Computer-Bildschirm verwendet, der mit einer Bildfrequenz von 100 Hz arbeitet. In diesem Versuchsaufbau stand das haptische Eingabegerät direkt vor dem Monitor. Ein erweitertes Setting ergab sich dann im zweiten Evaluationsblock, der im Januar 2009 startete. Hier hängt der Monitor in einer Vorrichtung über dem Eingabegerät. Das Bild wird spiegelbildlich erzeugt und in einen über dem haptischen Eingabegerät horizontal positionierten Spiegel projiziert. Beim Blick des Benutzers von oben in den Spiegel, hat er somit das Gefühl, dass die reale Position seiner Hand am haptischen Eingabegerät mit der virtuell erzeugten Position der Nadel während der Punktion übereinstimmt, womit ein erhöhter Realismusgrad erreicht wird [24].

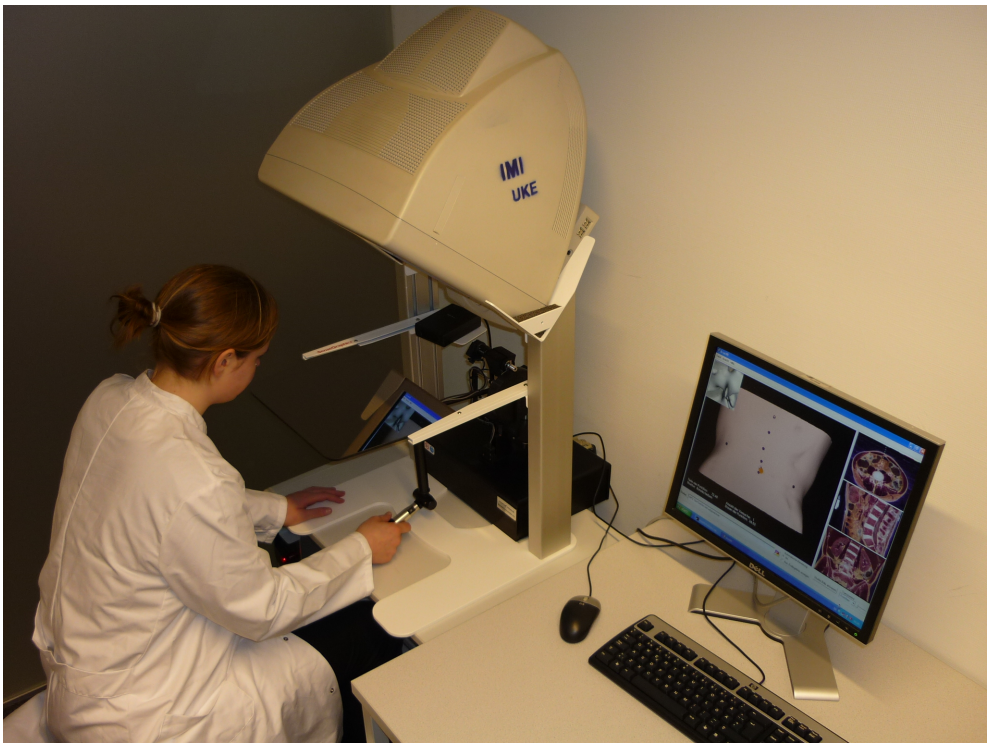


Abbildung 13: Lumbalpunktionssimulator

2.5.2 Benutzeroberfläche

Startet der Benutzer den Simulator, findet er sich in der graphischen Benutzeroberfläche (GUI = graphical user interface) wieder. Verschiedene Fenster ermöglichen hier unterschiedliche Ansichten der Punktion.

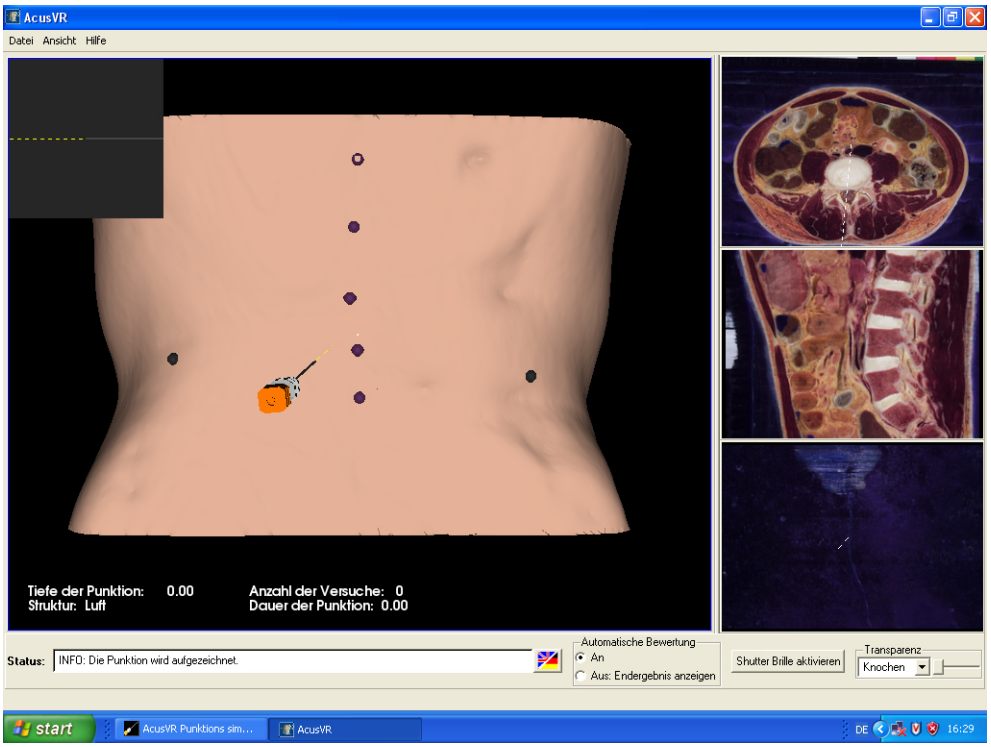


Abbildung 14: Benutzeroberfläche(GUI) des Punktionssimulators

Das Hauptfenster bietet die Standardsicht einer realen Punktion, also den direkten Blick auf den Rücken des Patienten, mit der Punktionsnadel im Vordergrund. Der virtuelle Körper des Patienten kann durch einfache Bedienung beliebig gedreht und verschoben werden, sodass theoretisch eine Punktion an jeder Körperstelle möglich ist. Durch Reposition der Nadel befindet sich diese nach jeder Körperbewegung wieder in Ausgangsposition direkt in der Bildschirmmitte. Der Patient erscheint in Form der Oberflächenmodelle der einzelnen Patientendaten. Hier kann auch die Transparenz der einzeln segmentierten Organe bzw. Strukturen verändert werden, sodass auch Strukturen unter der Haut sichtbar werden und die Möglichkeit gegeben wird, die Anatomie des gesamten Lumbalbereichs dreidimensional zu erkunden. Daneben gibt es am rechten Bildschirmrand untereinander geordnet drei Schichtansichten. Hier wird die Punktion in zweidimensionalen Schichtbildern wiedergegeben. Es handelt sich hierbei jeweils um eine Ansicht in sagittaler, horizontaler und koronarer Schnittführung. Die Schichtbilder werden jeweils durch die originalen CT-Bilder dargestellt und wechseln bei Bewegung der Nadel. Damit sind jeweils die drei Schichtebenen dargestellt, in denen sich

die Nadel aktuell befindet. Die Nadel wird außerdem in Form einer gelben Linie in jedem Schnittbild angezeigt. Zur besseren Orientierung ist mit einer gestrichelten gelben Linie die Verlängerung der Nadelachse in der jeweiligen Ebene dargestellt. Im unteren Bildbereich ist ein Textfeld integriert, welches anzeigt, in welcher Struktur sich die Nadelspitze derzeit befindet. Trifft die Nadelspitze auf ein vorher als Risikostruktur definiertes Organ (standardmäßig Knochen oder Nerven), so leuchtet der Bildschirmhintergrund des Hauptfensters als Warnung rot auf. Bei Erreichen des Zielgebietes, des Spinalkanals, leuchtet der Bildschirmhintergrund blau auf und symbolisiert damit den Gewinn des Liquor cerebrospinalis. In der linken oberen Ecke wird das Bild der Nadelspitze angezeigt. Hierbei handelt es sich um eine virtuelle Kamera, die stets rechtwinklig zur Nadelachse von links die Nadelspitze darstellt. Hier lässt sich unter anderem sehr gut der aktuelle Abstand der Nadelspitze zu den Strukturen des Körpers, wie beispielsweise der Haut, einschätzen. Eine weitere Darstellungsmöglichkeit bildet die Integration der CT-Schichtdaten in das Hauptfenster. Analog zu den Schichtansichten am rechten Bildrand können orthogonale Schichtbilder direkt in das Oberflächenmodel des Hauptfensters eingeblendet werden. Diese sind abhängig von der Nadelposition und zeigen ebenfalls die drei Schnittebenen an, in der sich die Nadelspitze befindet. Prinzipiell gibt es beim Simulator zwei Möglichkeiten der Stereoskopie. Hierbei kann entweder durch eine Rot-Grün-Brille oder eine Shutter-Brille für den Probanden ein dreidimensionales Bild erzeugt werden. Dazu werden bei Verwendung der Rot-Grün-Brille auf dem Bildschirm zwei leicht versetzte Bilder übereinander projiziert, wobei eines im roten eines im grünen Frequenzbereich liegt. Die Filterung der Frequenzbereiche durch jeweils ein rotes und ein grünes Brillenglas, erscheint das Bild dreidimensional. Bei der Shutter-Brille werden ebenfalls zwei leicht versetzte Bilder dargestellt. Diese wechseln sich aber schnell ab. Durch Verdunkelung abwechselnd jeweils eines Auges in gleicher Frequenz entsteht auch hier ein dreidimensionaler Bildeindruck [26]. Alle Ansichten können im Menü manuell ein- bzw. ausgeschaltet werden. Des Weiteren wurden drei Benutzergruppen festgelegt: Anfänger, fortgeschrittene und professionelle Benutzer. Jede Gruppe besitzt eine voreingestellten Kombination von verfügbaren Ansichten. Durch Verwendung von festgelegten Benutzergruppen können Punktionen von verschiedenen Probanden besser miteinander verglichen werden, da für jeden Probanden innerhalb einer Benutzergruppe die gleichen Grundvoraussetzungen bezüglich der Ansichten bestehen.

2.5.3 Haptik und haptisches Rendering

Die Haptik ist die Lehre von der haptischen Wahrnehmung. Diese leitet sich von dem griechischen Wort haptos = fühlbar ab und beschreibt das aktive Erfühlen von Größe, Form, Oberfläche und Beschaffenheit von Objekten. Im Simulator wird dem Benutzer über das haptische Ausgabegerät spürbar gemacht, welche Kräfte er aufbringen muss, um verschiedene Strukturen mit der Nadel zu durchstoßen. Die Berechnung dieser Kräfte und deren Rückkopplung an den Benutzer durch das Ausgabegerät wird als haptisches Rendering bezeichnet [24]. An das haptische Rendering werden hohe Ansprüche gestellt. Während beim visuellen Rendering bereits 25 Frames pro Sekunde reichen um dem Benutzer eine flüssige Darstellung zu präsentieren, wird hier eine Rate von mindestens 1000 Frames pro Sekunde benötigt. Grund hierfür ist die deutlich schnellere Wahrnehmung von Verzögerungen bei haptischen als bei visuellen Prozessen. Geringere Frameraten können zu Vibrationseffekten am haptischen Gerät und zu Immersionsverlusten führen. Die Grundlage zur Berechnung der Kräfte bildet das Proxy-basierte haptische Oberflächenrendering. Zentrales Element ist hier die Definition eines so genannten Proxy. Der Proxy xp ist ein virtueller Stellvertreter für die Position des haptischen Gerätes, während xtip die reale Position der Spitze des haptischen Gerätes repräsentiert. Bei Bewegung außerhalb von Objekten sind die Positionen identisch [24]. Während die reale Position der Gerätespitze uneingeschränkt beweglich ist, ist der Proxy in seiner Position eingeschränkt. Beim Eindringen der Gerätespitze in ein Objekt kann der Proxy nicht folgen und bleibt zunächst an der Oberfläche hängen. Die nun auftretende Kraft zwischen Proxy und der Position des haptischen Gerätes basiert auf einem Sprungfedermodell und wird nach dem Hook'schen Gesetz berechnet [24] [27] [28]:

$$F = -k(\mathrm{x}_{tip}\text{-}\mathrm{x}_p)$$

Hier steht k für eine Federkonstante und repräsentiert den Härtegrad der Oberfläche. Je kleiner k ist, desto geringer ist die Kraft, die der Benutzer aufbringen muss und desto weicher wirkt sie Struktur. Dahingegen definiert xtip- xp die Federdehnung, die umso größer ist, je tiefer die Nadel in die Struktur eingedrückt wird.

Eine Erweiterung dieses Verfahrens ist das Haptische Volume-Rendering. Hierbei kann der Proxy in das Objekt eindringen. Es müssen im gesamten Objektvolumen Kräfte berechnet werden. Es wird ein Distanzvektor zwischen virtuellem Proxy und realer Gerätespitze berechnet. Dieses Verfahren ist auch in vorher nicht-segmentierten Bilddaten anwendbar [27]. Mit Hilfe von Bildgradienten können virtuelle Objektoberflächenpunkte an den Stel-

len angenommen werden, die einen hohen Gradientenwert besitzen [24]. Die komplexen Algorithmen und eine genauere Darstellung der Verfahren sind gut beschrieben in den Werken von Lundin [27] und Handels [24]. Beim Lumbalpunktionssimulator wird die Spitze des haptischen Gerätes virtuell durch eine Nadel repräsentiert. Insgesamt wirken verschiedene Kräfte auf die Nadelspitze und die Nadel, welche bei der Rückkopplung an den Benutzer von diesem gespürt werden. Definiert wurden für den Simulator die folgenden needle tip forces, also Kräfte, die auf die Nadelspitze wirken. Zunächst die Durchdringbarkeit der Oberfläche eines Organs, welche angibt, wie viel Kraft aufgebracht werden muss, um die Oberfläche eines Organs zu durchstechen. Die Oberflächenreibung beschreibt das Streichen der Nadel über die Oberfläche des Gewebes. Auch die Viskosität ist eine unverzichtbare Kraftkomponente. Sie beschreibt, welche Kraft der Benutzer beim Durchdringen des Organs konstant benötigt. Diese ist bei dichten Geweben wie Knochen sehr hoch, bei Fettgewebe niedrig. Weiterhin wurden auch auf den Nadelkörper wirkende Kräfte definiert. Es muss berücksichtigt werden, dass keine Parallelverschiebung im Gewebe stattfinden kann, also dass die Nadel das Gewebe nicht durchschneidet. Innerhalb des Körpers wird auch die Rotation der Nadel eingeschränkt. Zur Aufrechterhaltung des Punktionspfades und zum Verhindern von Parallelverschiebungen werden die Einstichstelle und die Vektoren beim Durchstechen der Haut gespeichert. Bei der Berechnung dient ebenfalls ein Sprungfedermodell als Grundlage [28]. Weiterhin kann ein Verbiegen der Nadel simuliert werden und es muss gewährleistet sein, dass die Nadel im Körper ihre Position hält, wenn der Benutzer diese loslässt, diese also stecken bleibt. Die Definition der Kräfte beruht größtenteils auf dem subjektivem Empfinden verschiedener Testkandidaten und Bildung eines daraus resultierenden Durchschnitts. Aus der Literatur sind nur wenige Informationen zu den aufzubringenden Kräften beim Durchstechen verschiedener Gewebearten zu finden [29]. Eine Arbeitsgruppe konnte bei der Durchführung von Spinalanästhesien die auftretenden Kräfte messen, wobei Werte bis neun Newton auftraten [30]. Folgende Tabelle gibt die Definition der Kräfte für alle Strukturen an.

2.5.4 Patientendaten

Die Daten für die Fallbeispiele, also die Patientendaten der virtuellen Patienten, müssen geordnet dem Simulator zugeführt werden. Jeder Patientendatensatz enthält in einem Ordner folgende Dateien:

- CT-Schichtdaten, alternativ MRT-Bilddaten
- die erzeugten Labeldaten

- zu den segmentierten Organen erzeugte 3D-Oberflächenmodelle
- Modelle für die Nadel
- eine entsprechnde XML-Datei

Die XML-Datei (extensible markup language) ist eine Textdatei, die dem Austausch von Computerdaten in einem internationalen Standard dient. Ihr Aufbau ist streng vorgegeben. Sie enthält den Namen und die Größe der CT-Datensätze und der Labeldatensätze. Zusätzlich werden alle benötigten Oberflächenmodelle aufgelistet, wobei jeder Struktur die erforderlichen Werte für die needle tip forces und needle body forces zugeordnet werden. Auch die Werte für die Transparenz der einzelnen Organe sind voreingestellt, d.h. wie die Organe zu Beginn der Punktion dargestellt werden. Des Weiteren wird das Setting bestimmt: Welche Strukturen sind Zielstrukturen, welche Risikostrukturen, wie ist der Zeitrahmen, die initiale Kameraposition und die Position des Patienten. Die XML-Datei beinhaltet letztlich noch die Koordinaten des Referenzpfades, der zur Bewertung der Punktion nötig ist (Kapitel 2.5.5.2) und ob Rotationskräfte zugelassen sind oder nicht, was darüber entscheidet, ob eine Nadelverbiegung möglich ist [28].

Organ/Struktur:	surface friction force	viscositiy	surface resisting force	stiffness
Knochen	0,4	3,0	8,0	1,5
Muskeln	0,3	0,5	1,0	1,0
Haut	0,5	0,5	1,5	0,8
Bänder	0,2	1,0	4,5	1,0
Bandscheiben	0,5	1,0	4,0	1,0
Myelon	0,0	0,0	0,1	1,0
Leber	0,3	0,5	1,0	1,0
Spinalkanal	0,5	0,1	0,0	1,0
Fett	0,3	0,5	0,5	1,0
Luft	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabelle 14: Definition der Kräfte für die verschiedenen Strukturen (in Newton): *surface friction force: Maß für das Gleiten bzw. verrutschen der Nadel über die Oberfläche der Struktur; viscosity: Maß für die Viskosität der Struktur; surface resisting force: Maß für die Kraft, die zum Durchstechen der Oberfläche benötigt wird; stiffness: ein Maß für die Kraft, welche aufgebracht werden muss um die Nadel weiter in die Struktur vorzuschieben.*

2.5.5 Das Bewertungssystem (Scoring)

Jede Punktion wird aufgezeichnet, bewertet und gibt dem Probanden eine Rückmeldung über die durchgeführte Leistung. Die Rückmeldung besteht zum einen aus einem Scoring-Wert zwischen 0 und 100, wobei 100 die maximal erreichbare Punktzahl darstellt, und zum anderen bei nicht optimalen Punktionen zusätzlich aus Verbesserungsvorschlägen, wie eine erneute Punktion besser durchzuführen ist. Dieses System bzw. die erreichte Punktzahl soll dann Aufschluss über individuelle Lernerfolge geben und auch einen Vergleich zwischen verschiedenen Probanden-Gruppen ermöglichen. Zum Verständnis des Bewertungssystems wird zunächst darauf eingegangen, was eine gute Punktion ausmacht.

Kriterien einer guten Lumbalpunktion In die Bewertung einer Lumbalpunktion fließen mehrere Kriterien ein. Als invasiver medizinischer Eingriff ist dieser primär für den Patienten mit einer unangenehmen Situation, unvorteilhafter Körperhaltung, Angst vor Komplikationen aber vor allem mit möglichen Schmerzen verbunden. Daher wird eine sicher durchgeführte Punktion mit möglichst wenig Einstichversuchen als angenehmer empfunden, womit die Anzahl der Versuche ein Kriterium ergibt. Ein weiteres Kriterium ist die Dauer der Punktion. Zwar ist sie kein valides Kriterium für eine gute oder schlechte Punktion, jedoch gibt es Hinweise auf die Routine und Erfahrung des Arztes. Weiterhin können bei einer Punktion Knochen berührt werden. Dieses löst ein unangenehmes bis schmerzhaftes Gefühl beim Patienten aus und sollte vermieden werden. Auch das Berühren der Cauda equina mit der Nadel kann zu Schmerzen führen. Das Hauptkriterium ist aber die erfolgreiche Punktion des Subarachnoidalraumes mit der Gewinnung von Liquor.

Die Punktionskriterien der virtuellen Lumbalpunktion Die Bewertung des Scoringsystems beinhaltet acht definierte Kriterien, welche nach Rücksprache mit erfahrenen Neurologen für wichtig und aussagekräftig befunden wurden.

1. Punktionsdauer
2. Anzahl der Versuche
3. Zielstruktur erreicht
4. Risikostrukturen berührt
5. Abweichung vom Referenzraum

6. Einstichposition
7. Einstichwinkel
8. Tiefe der Punktion

1. Punktionsdauer
Es wird die Zeit t = t2-t1 vom Zeitpunkt des Durchstechens der Haut (t1) bis zum Herausziehen der Nadel aus dem Körper (t2) gemessen. Bei jeder Punktion, unabhängig davon ob die Zielregion erreicht wird oder nicht, wird die Zeit erneut gemessen. Eine reale Lumbalpunktion unter oben beschriebenem Ablauf dauert je nach Anatomie des Patienten, Erfahrung des Arztes und Vorbereitung einige Minuten. Da in der Simulation wesentliche Teile nicht berücksichtigt werden, wie z.B. Desinfektion der Haut oder das Austropfen lassen des Liquors, und nur der eigentliche Einstichvorgang geübt wird, gilt pauschal, dass eine Punktion zwischen 10 und 15 Sekunden mit der maximalen Punktzahl bewertet wird. Längere und kürzere Punktionen erhalten einen Punktabzug.

2. Anzahl der Versuche
Auch die Anzahl der Punktionsversuche wird gewertet. Sobald die Nadel in den Körper eindringt, ist unabhängig davon, ob der Spinalkanal erreicht wurde oder nicht, ein Versuch vollzogen worden. Wird die Nadel entfernt und erneut die Haut durchstochen, beginnt der zweite Versuch. Je mehr Versuche benötigt werden, desto mehr Punkte werden in der Bewertung abgezogen. Die Versuchsanzahl wird dann wieder auf null zurückgesetzt, wenn der Benutzer durch Aktivieren der Schaltfläche eine Bewertung seiner Punktionsversuche durch den Computer anfordert. Weiteres Punktieren ohne zwischenzeitliche Bewertungsanforderung lässt die Anzahl der Punktionen folglich weiter steigen.

3. Zielstruktur erreicht
Gelangt die Nadelspitze in den Spinalkanal, ist das Ziel erreicht und die Punktion wird als erfolgreich bewertet. Im Gegensatz zur realen Punktion muss hier nicht gewartet werden, bis der Liquor aus der Hohlnadel tropft, da lediglich die Einstichtechnik geübt werden soll. Es ist unerheblich an welcher Stelle der Spinalkanal punktiert wird und wie tief die Nadel in den Spinalkanal eingeführt wird. Für Einstiche an untypischen Stellen erfolgen Abzüge bei den Kriterien fünf und sechs. Das Erreichen der Zielstruktur wird pauschal mit einem festen Punktwert bewertet.

4. Berühren von Risikostrukturen
Als Risikostrukturen werden hier primär die Knochen und die Cauda equina bzw. das Rückenmark angegeben. Es ist davon auszugehen, dass die Probanden nur an den für eine Lumbalpunktion üblichen Stellen punktieren, sodass

Strukturen wie beispielsweise Leber, Nieren oder Aorta, welche auch anatomisch weit entfernt liegen, nicht berücksichtigt werden. Das Berühren von Knochen oder der Cauda equina, sofern diese im Datensatz vorhanden ist, kann von dem Patienten als unangenehm empfunden werden und führt zu Abzügen im Scoring. Hier wird vorerst keine Rücksicht darauf genommen, wie oft oder wie viele Risikostrukturen berührt werden. Es wird lediglich bewertet, ob Risikostrukturen getroffen wurden oder nicht.

5. Abweichung vom Referenzraum

Um bei der Punktion die Position und Führung der Nadel zu bewerten, musste zunächst ein Referenzpfad beschrieben werden, der einen optimalen Pfad darstellt. Grundlage ist eine Linie aus manuell gesetzten Punkten. Diese verlaufen von der optimalen Einstichstelle der Haut durch den Mittelpunkt zwischen den Dornfortsätzen und endet im Spinalkanal. Der Pfad verläuft nahezu axial, ist im Lendenwirbelbereich aber typischerweise einige Grad nach dorsocaudal abgekippt. Dieser Pfad ist rein theoretischer Natur. Nun wird nicht bei jeder Punktion genau der Mittelpunkt getroffen und dieses ist auch gar nicht nötig, da andere Pfade ohne Berührung der Knochen auch ins Ziel führen. Trotzdem soll der gewählte Stichkanal nicht allzu weit entfernt liegen, um so Punktionen an untypischen Stellen und in anderen Zwischenwirbelräumen herauszufiltern. Schließlich wurde der Pfad zu einem doppelkegel-förmigen Referenzraum erweitert (siehe Abbildung 2.16). Die engste Stelle des Kanals liegt zwischen den Dornfortsätzen und der Durchmesser des Kanals wird zu beiden Seiten größer. Der Referenzraum wurde im Rahmen dieser Arbeit für jeden Patienten individuell erstellt und jeweils für den Zwischenwirbelraum L3/L4 und L4/L5 generiert. Die Erstellung jedes Referenzraumes benötigte circa eine Arbeitsstunde. Bei der Bewertung der Punktion wird errechnet, wie viele bei einer Punktion durchstochene Bildpunkte außerhalb und innerhalb dieses Raumes liegen. So lässt sich eine Aussage über die Lage und Position des Stichkanals im Körper tätigen.

6. Einstichposition

In Anlehnung an den oben genannten Referenzraum gibt es einen bestimmten vordefinierten Bereich auf der Hautoberfläche, der zum Erreichen eines guten Punktionspfades als Einstichstelle genutzt werden sollte. Entfernt sich die tatsächliche Einstichstelle zu stark von der vordefinierten Einstichstelle, führt dies zu Punktabzug und der Benutzer erhält eine Rückmeldung, wie sich seine Einstichposition von der optimalen Position unterscheidet.

7. Einstichwinkel

Analog zur Einstichposition wird auch ein optimaler Einstichwinkel für jeden Patienten und jeden Zwischenraum zwischen den Dornfortsätzen vordefiniert. Ein zu starkes Abweichen führt auch hier zu Punktabzug und der Benutzer erhält einen Verbesserungsvorschlag für die nächste Punktion.

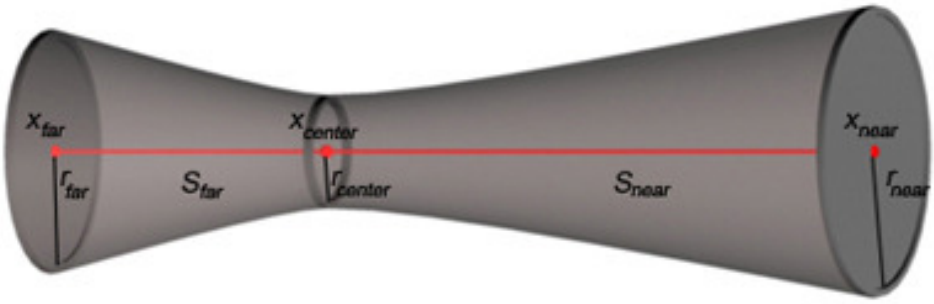


Abbildung 15: Schematische Darstellung des Referenzraumes

8. Punktionstiefe
Die Tiefe der Punktion ist ein weiteres Kriterium zur Bewertung. Dieses ist kein hartes Kriterium, da das Erreichen der richtigen Punktionstiefe nicht automatisch mit Erreichen der Zielstruktur verbunden sein muss. Trotzdem kann es vor allem bei einer ungenügend tiefen Punktion dem Benutzer den Hinweis geben, bei der nächsten Punktion tiefer einzustechen und so das Ziel zu erreichen und dient somit eher als guter Parameter bei der Erstellung von Verbesserungsvorschlägen. Eine genauere Beschreibung zur Errechnung der einzelnen Punktwerte und den dazu gehörigen Algorithmen ist nachzulesen bei Färber [25].

Die Punktionen können jederzeit aufgezeichnet und bewertet werden. Die Ausgabe der Punktzahl, die einzelnen Bewertungskriterien und eventuelle Verbesserungsvorschläge werden dem Benutzer nach der Punktion in einem Fenster ausgegeben.

2.5.6 Training am Simulator

Ein Ziel dieser Arbeit ist es, Probanden in zwei Gruppen aufzuteilen und anhand eines festen Planes Punktionen durchführen zu lassen. Diese sollen bewertet und aufgezeichnet werden, um mit Hilfe der so gewonnen Daten einen Trainingseffekt darzustellen. Im Folgenden soll der Ablauf dieses Trainings beschrieben werden.

Auswahl der Probanden Für den Nachweis eines Trainingseffektes sollen mindestens 50 Probanden (n=50) an dem Training teilnehmen. Einschlusskriterium ist hierbei ein Studium der Medizin mit erfolgreichem Absolvieren der ersten ärztlichen Prüfung, eine Approbation ist nicht zwingend erforderlich. Geworben wurden Probanden am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf

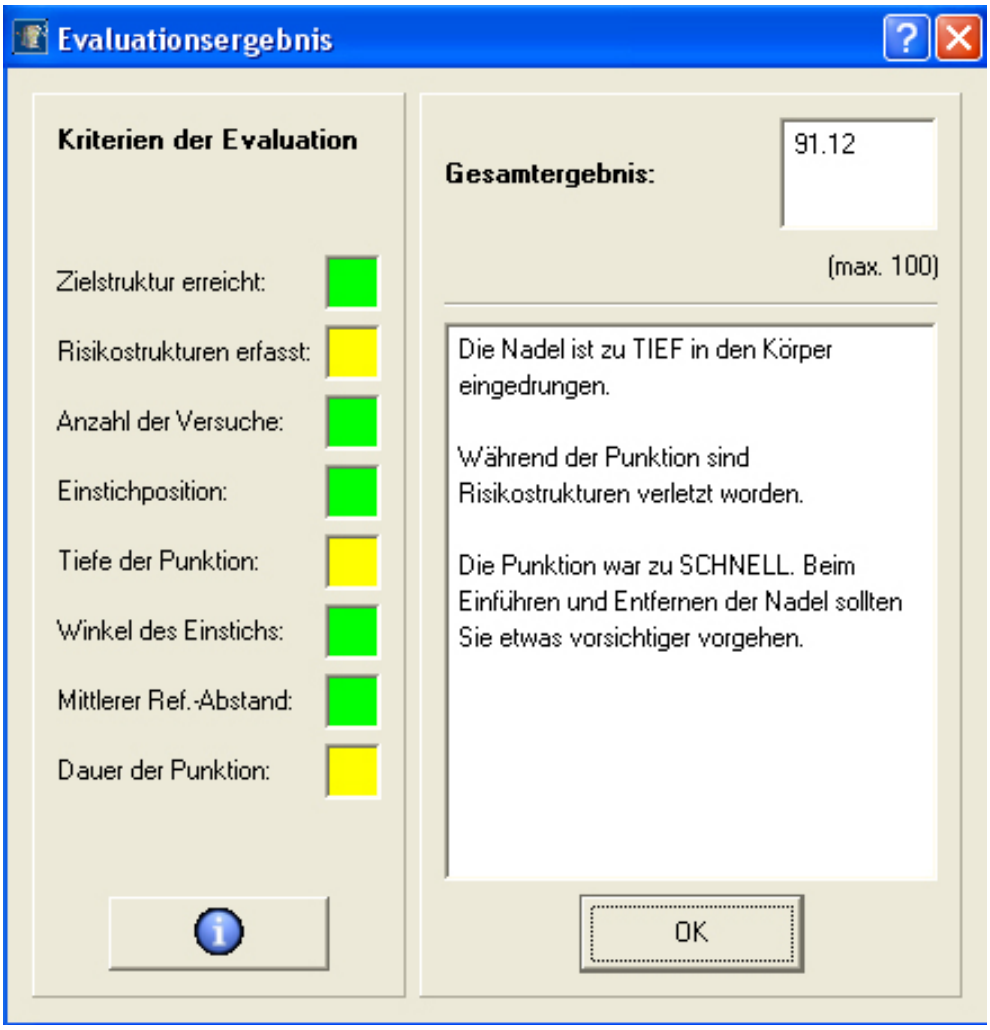


Abbildung 16: Bewertungsfenster

durch Flyer in Unterrichtsveranstaltungen und über die Internet-Plattform moodle des UKE. Die Probanden wurden zufällig in zwei Gruppen eingeteilt, wobei Gruppe 1 als Testgruppe, Gruppe 2 als Kontrollgruppe diente.

Ablauf des Trainings Das Training besteht aus zwei Sitzungen an zwei unterschiedlichen Tagen, wobei diese mindestens einen Tag, höchstens eine Woche auseinander liegen dürfen. Jede Sitzung dauert in der Regel 30 min. Die Probanden werden zufällig in zwei Gruppen eingeteilt, wobei jede Gruppe einer vorgegebenen festen Reihefolge von Patientendatensätzen nachkommen soll.

Gruppe 1 bildet die Testgruppe. Zu Beginn lesen sich die Probanden die Lerneinheit Lumbalpunktion und die Lerneinheit Ascitespunktion durch. Diese Lerneinheiten bieten auf 16 bzw. 29 Folien im pdf-Format einen kleinen Überblick über die jeweilige Punktion. Es wird darin auf Indikationen, Kontraindikationen, Durchführung und Risiken der Eingriffe eingegangen und dieses durch Bilder verdeutlicht. Damit soll gewährleistet werden, dass alle Probanden über den gleichen theoretischen Hintergrund in Bezug auf den Ablauf einer Punktion verfügen. Im Anschluss wurde ca. fünf Minuten das Handling des haptischen Eingabegerätes geübt. Dafür wurde ein Testwürfel ähnlich der Patientendatensätze erstellt. Er verfügt über verschiedene Strukturen mit unterschiedlichen Kraft-Widerständen und diversen Öffnungen unterschiedlicher Größe. Hiermit konnten sich die Probanden Eindruck über die Steuerbarkeit des Eingabegerätes und Form und Gefühl der Kraftwiedergabe (force feedback) verschaffen.

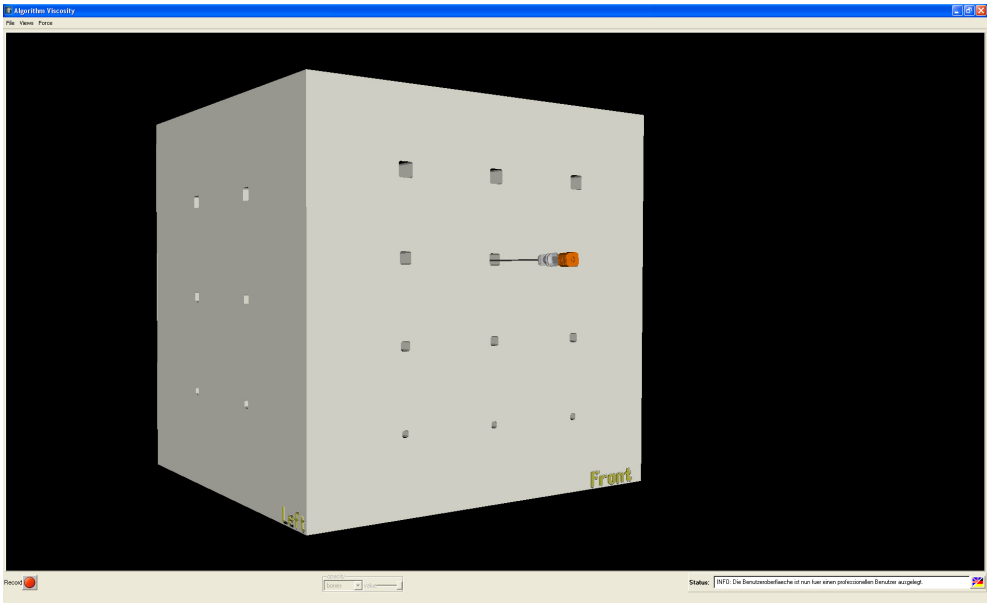


Abbildung 17: Oberflächenmodell des Testwürfels

Im weiteren Verlauf wurden dann Patienten in einer festgelegten Reihenfolge virtuell punktiert. Die Reihenfolge ist in Abb. 2.9 dargestellt. Am Ende der zweiten Sitzung wurde an zwei Patienten eine Aszitespunktion geübt, wodurch diese Daten einer anderen Arbeit [21] als Kontrollgruppe zur Verfügung standen.

Gruppe 2 durchlief ebenso die Erarbeitung der Lerneinheiten Lumbalpunktion und Ascitespunktion und die Gewöhnung mit Hilfe des Würfels.

Die erste Sitzung diente lediglich der Durchführung von Aszitespunktionen, in der zweiten Sitzung wurde dann letztlich an denselben Patienten eine Lumbalpunktion geübt, die auch der ersten Gruppe in der zweiten Sitzung zur Verfügung standen. Die Rahmenbedingungen waren identisch. Nach den ersten 30 Probanden wurde die Reihenfolge der zu punktierenden Patienten vertauscht, sodass sich zwei Evaluationsdurchläufe mit unterschiedlichen festen Punktionsreihenfolgen ergaben. Dies geschah mit der Absicht einen systemischen Fehler durch unterschiedliche Schwierigkeitsgrade zu unterdrücken. Die festen Reihenfolgen der jeweiligen Evaluationsdurchläufe können aus der folgenden Tabelle entnommen werden.

Evaluationsdurchlauf 1			
		Testgruppe	Kontrollgruppe
Tag 1:	1.	Würfel	Würfel
	2.	Pat 5	Ascitespunktion
	3.	Pat 1	Ascitespunktion
Tag 2:	1.	Pat 1	Ascitespunktion
	2.	Pat 3	Ascitespunktion
	3.	Ascitespunktion	Pat 1
	4.	Ascitespunktion	Pat 3
Evaluationsdurchlauf 2			
		Testgruppe	Kontrollgruppe
Tag 1:	1.	Würfel	Würfel
	2.	Pat 3	Ascitespunktion
	3.	Pat 1	Ascitespunktion
Tag 2:	1.	Pat 1	Ascitespunktion
	2.	Pat 5	Ascitespunktion
	3.	Ascitespunktion	Pat 1
	4.	Ascitespunktion	Pat 5

Tabelle 15: Übersicht des Trainingsablaufes

Während der ersten Sitzung der Gruppen befand sich der Simulator in der Benutzergruppe Anfänger, was den Trainingsmodus repräsentiert. Hierbei hatte der Proband in der Benutzeroberfläche alle Ansichten zur Unterstützung. Die zweite Sitzung wurde direkt ohne vorherige Gewöhnung an das Eingabegerät begonnen. Hierbei wurden alle Probanden in die Benutzergruppe Professionelle Benutzer gestuft. Dadurch ergab sich der Examinationsmodus, in dessen Benutzeroberfläche lediglich die dreidimensionale Ansicht auf den Rücken des Patienten ohne weitere Hilfsansichten. Durch Zuteilung ei-

ner ID-Nummer für jeden Probanden und deren Eingabe vor Beginn der Sitzungen, konnten die Punktionsleistungen der einzelnen Probanden direkt im Verlauf dargestellt und untereinander verglichen werden, die Probanden selber blieben aber anonym.

Den Probanden wurde außerhalb der Wertung noch die Möglichkeit gegeben, im 3D-Modus Punktionen durchzuführen. Dabei waren unter Nutzung der Rot-Grün-Brille oder der Shutter-Brille Punktionen unter realistischer dreidimensionaler Darstellung durchzuführen.

Probandenevaluation Jeder Proband füllte im Anschluss an die zweite Sitzung einen Evaluationsbogen aus, in dem er den Simulator, das Training und die Lerneinheit bewerten sollte. Der Bogen bestand aus 30 Fragen. Der komplette Bogen und die Ergebnisse der Evaluation sind in Kapitel 3.3 dargestellt.

2.6 Studiendesign und Statistische Auswertung

2.6.1 Studiendesign

Für den Nachweis eines Trainingseffektes bei den Probanden am Lumbalpunktionssimulator könnte man die erreichten Punktzahlen in den einzelnen Sitzungen vergleichen um eine Steigerung festzustellen. Doch um zu zeigen, ob diese lediglich durch die Gewöhnung an das haptische Gerät oder tatsächlich durch ein Erlernen und Verstehen des Punktionseingriffes bedingt ist, wurde hier eine Test- und eine Kontrollgruppe in die Studie einbezogen. Beide Gruppen erhalten vorweg eine theoretische Einweisung und haben die Möglichkeit sich anhand eines virtuellen Modells an die Handhabung zu gewöhnen. So starten beide Gruppen mit den gleichen Voraussetzungen. Während in der Testgruppe mehrfach an Patienten eine Lumbalpunktion durchgeführt wird, wird in der Kontrollgruppe lediglich nach mehrfachen Ascitespunktion zum Abschluss des zweiten Tages die Lumbalpunktion an denselben Patienten durchgeführt, die auch die Testgruppe punktierte. Ist hier ein signifikanter Unterschied in den Gruppen festzustellen, lässt sich dieser darauf zurückführen, dass die Testgruppe durch das Üben der Lumbalpunktion ihre Fähigkeiten verbesserte und nicht lediglich durch eine Gewöhnung an das haptische Gerät, da die Kontrollgruppe eine ebenso lange Zeit mit dem Gerät übte.

2.6.2 Testverfahren zur Auswertung der gesammlten Testdaten

Zur Ermittlung ob sich die Ergebnisse in der Testgruppe und der Kontrollgruppe signifikant voneinander unterscheiden, wurde in dieser Arbeit ein Differenztest zum Vergleich zweier Mittelwerte verwendet. Beim Differenztest wird getestet ob ein Unterschied zwischen den Mittelwerten μ_1 und μ_2 zweier Grundgesamtheiten besteht, bzw. ob die Differenz der Mittelwerte von Null abweicht. Die Nullhypothese lautet in diesem Fall $\mu_1 - \mu_2 = 0$. Eine Voraussetzung für den Test ist hierbei, dass die Grundgesamtheiten normalverteilt sind oder der Stichprobenumfang größer als 30 ist, da somit näherungsweise eine Normalverteilung vorliegt. Man zieht aus jeder Grundgesamtheit, mit unbekannten Mittelwerten, unabhängig voneinander eine Stichprobe vom Umfang n_1 und n_2. Die Grundgesamtheiten in der vorliegenden Arbeit sind zum einen die Testgruppe, also Personen, die am Simulator Lumbalpunktion trainiert haben, und die Kontrollgruppe, sprich Personen, die noch keine Lumbalpunktion vorweg an einem haptischen Gerät geübt haben. Die Stichproben entsprechen hier der Größe der jeweiligen Gruppe. Nach Berechnung der Realisierung der Stichprobenfunktionen $\overline{X}_1$ und $\overline{X}_2$ wird die Stichprobenfunktion D=$\overline{X}_1$-$\overline{X}_2$ mit dem Erwartungswert E(D)= μ_1-μ_2 als Prüfgröße verwendet. Bei bekannter Stichprobenstandardabweichung gilt dann: $\sigma_D = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1 - 1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2 - 1}}$. Für die Annahmekennzahl ergibt sich $c_{u/o} = \pm z\sigma_D$, wobei z bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$ mit 1,96 bei einer zweiseitigen Fragestellung angegeben wird [31].

3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse des Trainingsversuches am Simulator vorgestellt. Zunächst wird auf die Probanden, das Auswahlverfahren und die Einteilung in Test- und Kontrollgruppe eingegangen. Im Weiteren erfolgt dann eine Vorstellung der Daten, die während des Trainings erhoben wurden und der Ergebnisse der Evaluation nach den Trainingsdurchläufen.

3.1 Probanden

Die Probanden wurden am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf durch Werbung im Kurs Medizinische Informatik des Regelstudiums und im e-learning Portal moodle akquiriert. Getestet wurde der Simulator in einem Zeitraum zwischen Juli 2008 und März 2009, wobei ab Januar 2009 der zweite Evaluationsdurchlauf gestartet wurde.
Im ersten Evaluationsdurchlauf nahmen von insgesamt 45 Probanden lediglich 39 am Folgetermin teil. Des Weiteren mussten 11 Probanden aufgrund von fehlerhafter Aufzeichnung oder zu geringer Punktionsversuche aus der Wertung genommen werden, sodass nur 28 Teilnehmer in die endgültige Bewertung eingingen. Dies entspricht 62,2 %.
Im zweiten Evaluationsdurchlauf betrug der Anteil derer, die in die Bewertung eingingen 60 %. Hier kamen 25 der 41 Teilnehmer auch zum Folgetermin. Ein Proband musste jedoch aus der Wertung genommen werden, da er bereits im ersten Evaluationsblock teilgenommen hatte. Es wurde nur der erste Teilnahmetermin gewertet. Es gingen folglich 24 Teilnehmer in die endgültige Bewertung ein. Tabelle 3.1 gibt Aufschluss über alle Probanden, die aus der Wertung genommenen wurden, mit Angabe der Gründe. Die Stichprobe von den insgesamt 53 in die Bewertung eingehenden Probanden teilt sich wie folgt auf: Die Testgruppe zählte 27 Teilnehmer, die Kontrollgruppe 25 Teilnehmer. 56,6% waren weiblich, 43,4% männlich. Das Alter lag zwischen 20 und 35 Jahren, wobei sich ein Proband im praktischen Jahr befand, alle anderen im klinischen Abschnitt des Studiums vor Beginn des praktischen Jahres.

3.2 Ergebnisse aus den Trainingsdurchläufen

Während der Durchführung der Trainingsdurchläufe wurden verschiedene Daten aufgezeichnet. Die in 2.5.5 dargestellten Bestandteile des Bewertungssystems wurden für jeden einzelnen Punktionsversuch aufgezeichnet. Somit war eine Möglichkeit gegeben, die Daten objektiv zu vergleichen und nachzuvollziehen. Als eine der Hauptaufgaben dieser Arbeit galt es, wie in 1.4

Probanden:				
ID	Block	Gruppe	Grund des Ausscheidens	Eval. ausgefüllt
1	1	TG	komplett fehlende DA	ja
2	1	KG	komplett fehlende DA	ja
3	1	TG	komplett fehlende DA	ja
4	1	KG	komplett fehlende DA	ja
5	1	TG	komplett fehlende DA	nein
6	1	KG	komplett fehlende DA	ja
9	1	TG	nur 2 Punktionen bei Pat01	ja
10	1	KG	nur 2 Punktionen bei Pat01	ja
11	1	TG	fehlende DA für Pat03	ja
14	1	KG	nur einmal erschienen	nein
16	1	TG	nur 3 Punktionen bei Pat01	ja
18	1	TG	fehlende DA für Pat03	ja
34	1	TG	nur einmal erschienen	nein
39	1	TG	nur einmal erschienen	nein
41	1	TG	nur einmal erschienen	nein
43	1	TG	nur einmal erschienen	nein
46	1	KG	nur einmal erschienen	nein
53	2	KG	nur einmal erschienen	nein
54	2	TG	nur einmal erschienen	nein
55	2	KG	nur einmal erschienen	nein
56	2	TG	nur einmal erschienen	nein
57	2	KG	nur einmal erschienen	nein
64	2	TG	nur einmal erschienen	nein
65	2	KG	nur einmal erschienen	nein
66	2	TG	nur einmal erschienen	nein
76	2	TG	nur einmal erschienen	nein
78	2	TG	nur einmal erschienen	nein
79	2	KG	nur einmal erschienen	nein
84	2	TG	nur einmal erschienen	nein
86	2	TG	nur einmal erschienen	nein
88	2	TG	nur einmal erschienen	nein
89	2	TG	zweimal als Proband teilgenommen	ja
91	2	KG	nur einmal erschienen	nein
92	2	KG	nur einmal erschienen	nein

Tabelle 16: Aus der Wertung genommene Probanden mit Begründung. *Legende: DA = Datenaufzeichnung, Eval. = Evaluationsbogen, KG = Kontroll-Gruppe, TG = Test-Gruppe.*

beschrieben, herauszufinden, ob es einen objektivierbaren Trainingseffekt bei der Verwendung des Simulators gibt. Hierzu sollen verschiedene Aspekte beobachtet und verglichen werden. Dabei erscheint zum einen die erreichte Gesamtpunktzahl der beiden Gruppen, zum anderen die Erfolgsrate beim Punktieren als sinnvoller Betrachtungsaspekt. Bei der Erfolgsrate wird die Anzahl der erfolgreichen Punktionen der Zielregion (Spinalkanal) ins Verhältnis zur Gesamtanzahl der Punktionen gesetzt.
Beim Auswerten soll auf eine eventuelle Steigerung der Testgruppe in der Gesamtpunktzahl und der Erfolgsrate im zeitlichen Verlauf geachtet werden. Ein Vergleich zur Kontrollgruppe in den jeweiligen Aspekten soll dann die Betrachtung komplettieren.

3.2.1 Ergebnisse der Gesamtpunktzahl und der Erfolgsrate

Die einfachste Möglichkeit, einen möglichen Trainingseffekt darzustellen, ist wie erwähnt die Betrachtung der Gesamtpunktzahl. Durch die geänderte Patientenreihenfolge in den beiden Evaluationsdurchläufen, müssen diese einzeln untersucht und im Folgenden dann mit den Werten der Kontrollgruppe verglichen werden.
Bei der Gesamtpunktzahl wurde zunächst aus allen Punktzahlen eines Probanden pro Patient der Mittelwert gebildet. Daraufhin wurde der Mittelwert aller Probandenmittelwerte für einen Patienten errechnet und in der Tabelle dargestellt. Auch die Erfolgsrate wurde zunächst für jeden einzelnen Probanden pro Patientendatensatz gemittelt und daraufhin der Mittelwert dieser Mittelwerte gebildet. Die errechneten Werte werden in Tabelle 17 dargestellt.

Im Fokus steht Patient 1, welcher von der Testgruppe an beiden Tagen und der Kontrollgruppe am zweiten Termin punktiert wird. Die Patienten 3 und 5 werden je nach Evaluationsblock an Tag 1 zu Beginn punktiert und dienen jeweils als Vorbereitung. Es fällt auf, dass sich die Ergebnisse in den Evaluationsblöcken unterscheiden.
Im ersten Block steigt die Gesamtpunktzahl sowohl innerhalb des ersten Trainingstages von 45,86 auf 54,94 als auch zum zweiten Trainingstag hin an, wo im Durchschnitt 61,02 Punkte erreicht werden. Im Abschluss mit dem letzten Patienten ist dann aber ein Rückgang der Punktzahl auf 38,27 zu verzeichnen. Die Kontrollgruppe, welche identische Patienten wie die Testgruppe am zweiten Termin punktierte, ist aber mit 43,64 (Pat 1) bzw. 13,72 (Pat 3) Punkten deutlich unter den Werten der Testgruppe. Dieser Verlauf ist ebenfalls bei der Erfolgsrate (der prozentuale Anteil der erfolgreichen Punktionen an den Gesamtpunktionen) zu erkennen. Die Testgruppe zeigt zu Beginn eine Erfolgsrate von 26 % auf, steigert sich über 41,48 % auf 53,25 % (Pat 1), fällt

dann aber auf 26,2 % beim Abschlusspatienten zurück. Die Kontrollgruppe liegt auch hier mit 43,65 % und 13,72 % hinter den Ergebnissen der Testgruppe.
Der zweite Evaluationsblock hingegen zeigt einen etwas anderen Verlauf. Während auch hier innerhalb des ersten Tages die Gesamtpunktzahl 40,27 auf 67,55 steigt, fällt sie bereits zu Beginn des zweiten Termins auf 62,66 und im Anschluss 46,85 ab. Die Kontrollgruppe liegt hier wieder mit 56,84 und 41,92 Punkten jeweils unter den Werten der Testgruppe. Die Erfolgsrate folgt äquivalent. Von 40,27 % über 67,55 % fallen die Werte auf 57,92 % und 38,02 % am zweiten Tag. Die Kontrollgruppe liegt wieder mit 51,98 % und 28,43 % unter den Werten der Testgruppe.
Die Mittelung der Werte aus beiden Evaluationsblöcken ist nur für Patient 1 möglich, weil nur dieser Patient sowohl von der Testgruppe als auch von Kontrollgruppe an gleicher Stelle in der zeitlichen Reihenfolge punktiert wurde. Zieht man beide Blöcke zusammen, zeigt sich eine marginale Steigerung der Gesamtpunktzahl bei der Testgruppe für Pat 1 vom ersten zum zweiten Tag von 59,5 auf 62,98, die Erfolgsrate steigt von 53,12 % auf 55,33 %. Die Kontrollgruppe erreichte nur 56,3 Punkte und eine Erfolgsrate von 47,64 %. Verwendet man das in 2.6.2 vorgestellte Testverfahren ergibt sich leider kein signifikanter Unterschied zwischen Test- und Kontrollgruppe bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,05$.
Die Rechnung für den Vergleich der erreichten Gesamtpunktzahl basiert auf den gemessenen Daten mit:

$\overline{x}_1$=62,98, s_1=14,2, $\overline{x}_2$=56,3,s_2=14,2, n_1=27 und n_2=25

Eingesetzt in folgende Gleichung:

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{\sigma_1^2}{n_1 - 1} + \frac{\sigma_2^2}{n_2 - 1}}$$

ergibt das:

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{14{,}2^2}{26} + \frac{14{,}2^2}{24}} = 4{,}02$$

und

$$c_{u/o} = \pm\ 1{,}96 * 4{,}02 = 7{,}88$$

Die Testgröße hat den Wert: d=$\overline{x}_1$-$\overline{x}_2$=6,68

Wegen d=6,68<7,88=c_o ist die Nullhypothese anzunehmen und bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ statistisch nicht nachzuweisen, dass ein Unterschied zwischen den Größen besteht.

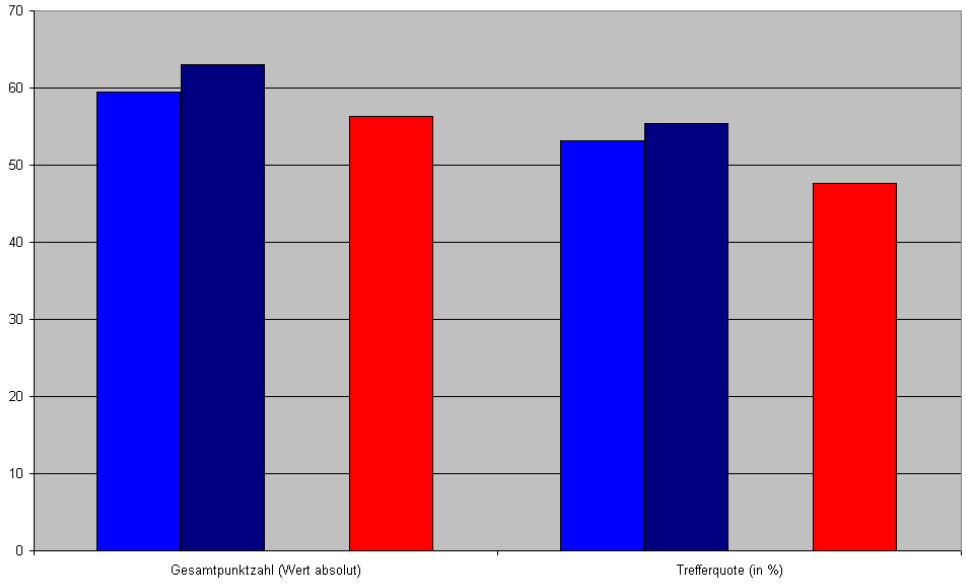


Abbildung 18: Vergleich der Gesamtpunktzahl und der Trefferquote
hellblau: Testgruppe Tag 1, dunkelblau: Testgruppe Tag 2, rot: Kontrollgruppe Tag 2

3.2.2 Betrachtung jeweils nur der ersten drei Punktionen

Eine weitere Betrachtung ergibt sich aus der Tatsache, dass vor Beginn des Trainings nicht festgelegt wurde, wie oft ein Proband maximal einen Patienten punktieren darf. Der zeitliche Rahmen war zwar stets annähernd gleich, aber durch interpersonelle Unterschiede im Punktionsverhalten, vor allem in Bezug auf Dauer der einzelnen Punktionen und Pausen zwischen den Punktionen, streute die Anzahl der Punktionen pro Proband ernorm. Die Werte liegen zwischen vier und 75 im ersten Evaluationsblock. Für den zweiten Block wurde dann versucht die Streuung zu reduzieren. Hier liegt die Anzahl der Punktionen pro Patient zwischen vier und 46. Ein Versuch, die Ergebnisse im Nachhinein trotzdem zu vereinheitlichen, ergibt sich aus einer Betrachtung lediglich der jeweils ersten drei Punktionsversuche der Probanden. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 dargestellt.

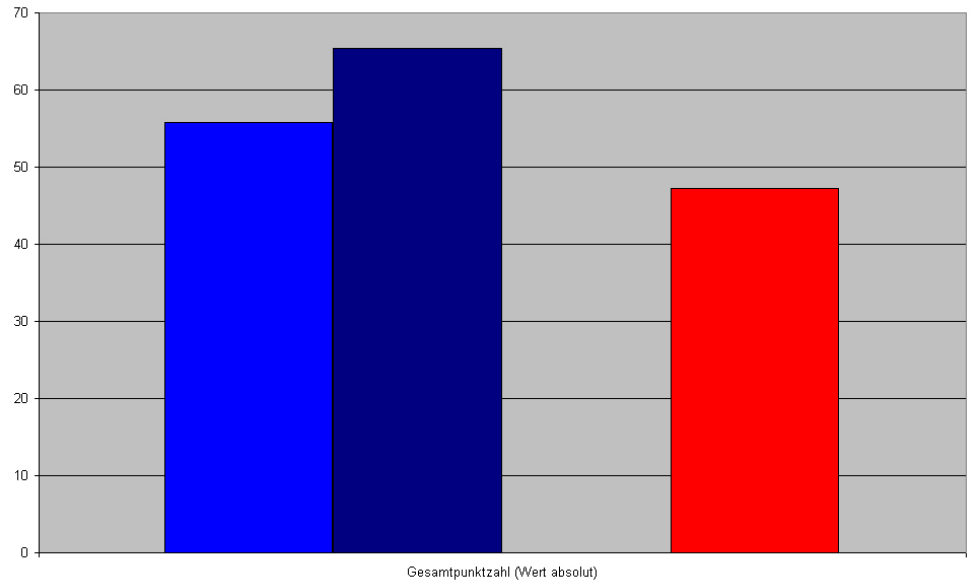


Abbildung 19: Vergleich der jeweils ersten drei Punktionen
hellblau: Testgruppe Tag 1, dunkelblau: Testgruppe Tag 2, rot: Kontrollgruppe Tag 2

Bei dieser Betrachtungsweise kann man einen parallelen Verlauf in beiden Evaluationsblöcken beobachten. Sowohl innerhalb des ersten Termins erkennt man eine Steigerung, als auch analog dazu eine starke Erhöhung der Punktzahl beim Patienten 1 zwischen den beiden Trainingstagen. Dann jeweils wieder ein Abfall der Gesamtpunktzahl bei der Punktion des am zweiten

	Testgruppe				**Kontrollgruppe**	
	Tag 1		**Tag 2**		**Tag 2**	
Evaluationsblock 1						
Patienten:	Pat 5	Pat 1	Pat 1	Pat 3	Pat 1	Pat 3
Gesamtpunktzahl:	45,86	54,94	61,02	38,27	57,25	32,85
Erfolgsrate (in %):	26	41,48	53,25	26,2	43,64	13,72
Evaluationsblock 2						
Patienten:	Pat 3	Pat 1	Pat 1	Pat 5	Pat 1	Pat 5
Gesamtpunktzahl:	46,12	65,19	62,66	46,85	56,84	41,92
Erfolgsrate (in %):	40,27	67,55	57,92	38,02	51,98	28,43
Gesamt/Mittel:						
Patienten:		Pat 1	Pat 1		Pat 1	
Gesamtpunktzahl:		59,5	62,98		56,3	
Erfolgsrate (in %):		53,12	55,33		47,64	

Tabelle 17: Durchschnittswerte der Gesamtpunktzahlen und Erfolgsraten in den Probandengruppen

	Testgruppe				**Kontrollgruppe**	
	Tag 1		**Tag 2**		**Tag 2**	
Evaluationsblock 1						
Patienten:	Pat 5	Pat 1	Pat 1	Pat 3	Pat 1	Pat 3
Durchschnitt F 3:	45,85	55,76	67,44	37,74	42,12	31,8
Evaluationsblock 2						
Patienten:	Pat 3	Pat 1	Pat 1	Pat 5	Pat 1	Pat 5
Durchschnitt F 3:	33,21	55,75	64,32	34,13	52,86	42,5
Gesamt/Mittel:						
Patienten:		Pat 1	Pat 1		Pat 1	
Durchschnitt F 3:		55,76	65,37		47,27	

Tabelle 18: Übersicht bei Bewertung nur der ersten drei Punktionen

Tage neu zu punktierenden Patienten. Die Kontrollgruppen liegen in beiden Blöcken jeweils unterhalb der Testgruppe. In der Testgruppe ist bei Patient 1 eine Steigerung von fast zehn Punkten also circa 18 % des Ausgangswertes erkennbar. Die Kontrollgruppe liegt mit ihrer Punktzahl nicht nur unterhalb der Punktzahl der Testgruppe an Tag 2, sondern auch deutlich unter den Werten der Testgruppe bei Punktion von Patient 1 am Tag 1. Setzt man hier analog zu der in 3.2.2 dargestellten Rechnung die hierbei ermittelten Mittelwerte und Standardabweichungen ein, ergibt das folgendes Bild:

$\overline{x}_1$=65, 37, s_1=24, 35, $\overline{x}_2$=47,27,s_2=26, 25, n_1=27 und n_2=25

$$\sigma_D = \sqrt{\frac{24{,}35^2}{26} + \frac{26{,}25^2}{24}} = 7{,}18$$

und

$$c_{u/o} = \pm\ 1{,}96 * 7{,}18 = 14{,}07$$

Die Testgröße hat den Wert: d=$\overline{x}_1$-$\overline{x}_2$=18,01

Wegen d=18,01>14,07=c_o ist die Nullhypothese abzulehnen und bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0{,}05$ ist statistisch nachgewiesen, dass ein Unterschied zwischen den Größen besteht.

3.2.3 Verlauf der Gesamtpunktzahl am Patienten während der einzelnen Sitzungen

Eine weitere mögliche Betrachtungsweise ist der Verlauf der individuellen Punktzahlen der Probanden während der einzelnen Sitzungen. Die Betrachtung jedes einzelnen Punktionsversuches im Verlauf erscheint wenig sinnvoll, da er von zu vielen Faktoren bestimmt wird und eine maximale Streuung der Werte im Verlauf aufzeigen würde. Eine Möglichkeit hingegen wäre jeweils ein Mittelwert beispielsweise der ersten und der letzten drei Punktionsversuche pro Proband und Patient zu bilden (vgl. 3.2.2). Aber auch dieser Ansatz birgt vor allem zwei Probleme und sollte daher nicht verfolgt werden. Zum einen haben einige Probanden weniger als sechsmal pro Patient punktiert, sodass sich die ersten und die letzten drei Punktionsversuche überschneiden. Nehme man diese Probanden aus der Bewertung heraus, wird der Umfang der Stichprobe noch kleiner. Zum anderen ist es auffällig, dass viele Probanden zum nächsten Patienten wechselten, nachdem sie eine erfolgreiche Punktion absolviert haben, um mit einem Erfolgserlebnis abzuschließen. Damit wird der Durchschnitt der letzten drei Punktionen künstlich verzehrt. Von insge-

samt 158 letzten Punktionen waren 131 erfolgreiche Punktionen (83%) und insgesamt 89 Punktionen zeigten einen Wert von über 90 Punkten (56%).

3.3 Ergebnisse aus der Probandenevaluation zum Simulator

Nachdem die Probanden beide Trainingstage erfolgreich beendet hatten, waren sie dazu aufgefordert, einen Evaluationsbogen auszufüllen. Sowohl die Testgruppe als auch die Kontrollgruppe erhielten den gleichen Bogen. Dieser wurde online im elearning Portal ausgefüllt und abgespeichert. Insgesamt konnten 55 Bögen ausgewertet werden. Es besteht eine quantitative Differenz zur Anzahl der Probanden, die in die Wertung eingehen (vgl. 3.2). Ein Grund ist die Tatsache, dass Probanden, die nach Tabelle 16 nicht in die Auswertung kamen, trotzdem den Simulator regelrecht genutzt haben und somit auch völlig gleichwertig diesen evaluieren konnten. Des Weiteren scheinen nicht alle Probanden den Testbogen online ausgefüllt oder abgespeichert zu haben. Die Ergebnisse werden im folgenden aufgeführt und nicht in Testgruppe und Kontrollgruppe getrennt. Im Fragebogen wurden 23 Thesen aufgestellt, die mit einer Ziffer zwischen 1 und 6 im Sinne einer sechs-stufigen Likert-Skala zu bewerten waren. Die Ziffer 1 steht dabei für ‚Ja, ich stimme voll zu' bzw. ‚Trifft zu', die Ziffer 6 für ‚Nein, ich stimme nicht zu' oder ‚Trifft nicht zu'. Die Ziffern dazwischen sollen eine lineare Abstufung darstellen. Des Weiteren gibt es die Möglichkeit zu Freitextantworten für zwei Fragen und Fragen mit quantitativen Antwortmöglichkeiten, die vorgegeben und anzukreuzen waren. Die Ergebnisse sind in Tabelle 19 dargestellt.

Vorerfahrung:								
	Nein	**Ja**						
Ich habe bereits eine reale Lumbalpunktion durchgeführt.	50	5						
	1-5	**5-10**	**11-20**	**>20**				
Wenn ja, wie viele?	5	0	0	0				
	(1)	**(2)**	**(3)**	**(4)**	**(5)**	**(6)**	**M**	**SD**
Eine Lumbalpunktion hätte ich mir auch vor dem Training zugetraut.	7	8	10	11	8	11	3,69	1,68
Lerneinheit:								

Das Absolvieren einer Lerneinheit vor der virtuellen Punktion halte ich generell für sinnvoll.	41	11	2	1	0	0	1,33	0,64
Die Inhalte der Lerneinheit sind sinnvoll ausgewählt.	28	20	7	0	0	0	1,62	0,71
Den Umfang der Lerneinheit halte ich für angemessen.	28	18	6	2	1	0	1,73	0,93
Durch die Lerneinheit wurde ich besser auf die Lumbalpunktion vorbereitet.	24	16	12	2	1	0	1,91	0,99
Kraftrückgabe:								
Die Kraftrückgabe erscheint mir realistisch.	5	25	16	5	4	0	2,60	1,03
Ich konnte Unterschiede in der Kraftrückgabe an verschiedenen Strukturen spüren.	34	16	3	1	1	0	1,53	0,84
Die Steuerung der virtuellen Nadel mit dem haptischen Gerät war intuitiv.	17	16	12	7	2	1	2,35	1,25
An das Eingabegerät konnte ich mich durch das vorherige Training mit dem Würfelmodell gewöhnen.	24	9	14	2	3	3	2,27	1,47
Hat die Simulation von Rotationskräften (Nadelverbiegung) bei dem Punktionseingriff geholfen?	9	18	18	5	3	2	2,65	1,24
Visualisierung:								

Die Darstellung der Körpermodelle erscheint mir realistisch.	23	15	9	5	3	0	2,09	1,21
Die unterschiedlichen Visualisierungen helfen die Anatomie des Lumbalbereichs zu verstehen.	31	16	7	0	0	1	1,64	0,93
Die stereoskopischen 3D Darstellungen (Brille bzw. rot/grün) vereinfachen das Training.	19	14	8	8	4	2	2,45	1,46
Auswertung/Scoring:								
Die Korrekturvorschläge des Systems waren hilfreich.	8	11	14	14	4	4	3,13	1,41
Die Beurteilung der Punktion durch das Auswertungssystem ist aussagekräftig.	5	13	19	14	4	0	2,98	1,08
Simulator allgemein:								
Das Training mit dem Simulator ist sinnvoll.	33	16	5	0	0	1	1,56	0,90
Nach Absolvierung des Trainingsprogramms würde ich mir eine reale Lumbalpunktion eher zutrauen als zuvor.	22	20	9	1	1	2	2,00	1,19
Der Simulator ist für die Vorbereitung auf eine (erste) reale Punktion gut geeignet.	26	16	10	1	1	1	1,87	1,09
Durch das Training kann ich mir die anatomischen Strukturen des Lumbalbereichs besser vorstellen.	30	14	6	3	1	1	1,80	1,15

Die Auswahl der Patientendatensätze erscheint mir sinnvoll.	24	21	6	3	1	0	1,84	0,96
Die technische Umsetzung des Simulators ist gut gelungen.	11	28	13	1	1	1	2,20	0,97

Tabelle 19: Ergebnisse aus dem Evaluationsbogen *Legende: M = Mittelwert, SD = Standardabweichung.*

Die gesamte Probandengruppe ist recht heterogen. 36 Probanden sind zwischen 20 und 25 Jahre alt (65,5%), 14 zwischen 26 und 30 Jahre (25,5%) und fünf Probanden über 30 Jahre (9%). Ein Proband befand sich bereits im Praktischen Jahr, alle anderen im Klinischen Abschnitt des Medizinstudiums. Auch die Anzahl der bereits abgeleisteten Famulaturen als ein möglicher Indikator für erworbene Praxiserfahrung liegt zwischen 1 (bei 20%) und 4 (bei 25% der Probanden). Zusätzlich ist zu erwähnen, dass lediglich fünf der Probanden schon einmal eine reale Lumbalpunktion durchgeführt haben, sodass die Probandengruppe als eher unerfahren bewertet werden kann. Die Frage danach, ob sich die Probanden eine reale Lumbalpunktion auch ohne Training zugetraut hätten, wurde im Mittelwert mit 3,69 ($\pm 1,68$) beantwortet. Nach Beendigung des Trainings wird die Frage im Mittel mit 2,0 ($\pm 1,19$) beantwortet und zeigt damit eine deutlich höhere Zustimmung zur These. Generell wurde die vor Beginn des Trainings zu durchlaufende Lerneinheit sowohl in Länge, Inhalt als auch Zweckmäßigkeit stets als positiv bewertet mit Punkten zwischen 1,33 bis 1,91.
Die Kraftrückgabe steht mit der Bewertung ein wenig dahinter. Zwar scheinen die Probanden die Unterscheidung der verschiedenen Strukturen als eindeutig und spürbar erfahren zu haben (1,53), der Realismus der Kraftrückgabe, die Steuerung und die Simulation der Rotationskräfte werden aber nur mit 2,6 und 2,65 bewertet. Die Gewöhnung an das Gerät mittels Übungswürfel vor der ersten Punktion wird als hilfreich angegeben (2,27).
Die Probanden empfinden die Visualisierung als realistisch (2,09) und als Hilfe zum Verständnis der Anatomie des Lumbalbereiches (1,64). Lediglich die Stereoskopie schneidet mit größerer Streuung und höherem Mittelwert schlechter ab. Das Auswertungssystem liegt im Mittelfeld der Bewertungsskala. Im Allgemeinen wird der Simulator aber sehr positiv bewertet, vor allem die Frage ob das Training am Simulator sinnvoll sei, wurde mit 1,56 und nur einer Wertung schlechter als 3 bewertet. Auch subjektiv fühlen sich die Probanden durch das Training besser vorbereitet und bejahen einen ei-

genen Trainingseffekt (2,0).
In den folgenden Freitextantworten werden lediglich unnötige Satzzeichen und Leerzeilen gestrichen. Inhaltlich und grammatikalisch bleiben die Angaben unverändert und zunächst unbewertet.

Frage 25: Was fanden sie besonders gut/schlecht?

- Man sollte eine Nadel anstelle eines Sticks in der Hand halten, und mit den Fingern am Model die Spinalfortsätze selber ertasten an statt sie vorgegeben zu bekommen.
- gut: 3D-Brille; viel realistischer als nur auf Monitor schlecht: Würfelmodell nicht so gut zum Üben geeignet
- Die unterschiedlichen Widerstände (Fett, Knochen, Ligg. Flava) sind sehr gut gelungen.
- Die Bedienung empfand ich als sehr gelungen. Die Patienten sollten aber noch genauer dargestellt werden.
- Simulation, Widerstände waren gut.
- Hat alles Spaß gemacht, allerdings Kräfte der Widerstände fraglich
- Lumbalpunktion
- Zu Frage 13: kein sitzender Patient mit gespreizten Dornfortsätzen
- Gut: die 3D-Darstellung, wenn auch nicht unbedingt notwendig
- Die Punktion in Kombination mit der 3D-Brille fand ich besonders gut.
- Gut fand ich im Übungsmodus die zusätzliche Bildgebungsdarstellung, die das Aufsuchen der richtigen Stelle erleichterten. Gut war die einfache Bedienung des haptischen Gerätes, den Übungswürfel fand ich viel schwieriger als den Rest, optisch nicht so gut zu erfassen.
- Nach eigenen Erfahrungen ist der Widerstand des Lig. flavum zu gering gewählt. Erinnere LP mit mehr Druck.
- Besonders gut: Veranschaulichung der WS beim Training durch die Kamera oben links in der Ecke; Kurze Theorie-Einheit der Technik; 3D-Einstellung mit der Brille; Technische Umsetzung der Widerstände; Nicht so gut: Die Körpermodelle haben einen geraden Rücken.

- Gut fand ich, dass man beide Simulatoren ausprobieren konnte, sowie das Training der Lumbalpunktion unter CT-Kontrolle.
- Etwas unrealistisch ist die Tatsache, dass die Pat. sich nicht nach vorne beugen und dadurch die Dornfortsätze nicht maximal voneinander entfernt sind.
- Nicht so gut war das haptische Empfinden, mir schien der Widerstand zu stark. Gut war die Visualisierung. Ich konnte mir gut vorstellen, wo ich gerade reinsteche.
- Man kann keine liegende Person im CT lumbalpunktieren.
- Nach dem Lernen am ersten Modell waren die anderen beiden Test-Patienten völlig anders. Wie soll man dabei sinnvoll das Erlernte Umsetzen? Nachdem das erlernte Verfahren nicht funktioniert hat, habe ich dann nur noch im Dunkeln herumgestochert.
- Gut, dass man die verschiedenen Strukturen gespürt hat, schlecht, dass man die Wirbelkörper nicht tasten kann.
- Den Punktionsverlauf auf versch. Ebenen nachvollziehen zu können.
- Das „Handteil“ sollte in irgendeiner Form einer Nadel entsprechen, mit der man dann tatsächlich punktieren, sprich aspirieren könnte.
- Ausführliche Erklärungen. Dass man so lange probieren konnte, wie man wollte.
- Schwierig ist die Nadel in die richtige Position zu bekommen, und den Winkel richtig einzuschätzen.
- Die virtuelle Nadel war schlecht zu steuern.
- 3D Darstellung ohne Haut zur Visualisierung der Strukturen
- Es macht wirklich Spaß.
- Irritierend waren die Blitze auf der 3-D Brille. Gute Anleitung durch den Studenten.

Frage 26: Verbesserungsvorschläge/Kommentare:

- Man müsste die Simulation an eine Puppe koppeln, da es am PC doch eine ganz andere Situation ist.
- Lieber optisch Dornfortsätze darstellen als mit Punkten. Noch realistischer.
- Die kurze Anleitung im Internet und kurze inhaltliche Angaben waren sehr hilfreich und gaben die wichtigsten Infos.
- Den Übungswürfel würde ich weglassen. Bei der Aszitespunktion fehlt ein Ultraschallbild begleitend, so sticht man ggf. ins Leere.
- Die Änderung des Stichwinkels innerhalb des Fettgewebes sollte möglich gemacht werden. Es sollten unterschiedliche Penetrationswiderstände am Ligg. Flava angelegt werden können, die die in der Realität vorkommende Bandbreite bei unterschiedlichen Patienten widerspiegelt. Bei Verletzung von Risikostrukturen sollte erläutert werden, was genau verletzt wurde.
- Das Gerät ist mir ein bisschen zu schwer in Vergleich zum wirklichen Punktionsnadeln.
- Wie auch beim Aszites fand ich die Handhabung der Nadel etwas unrealistisch. Im realen Leben hätte ich eine andere Handposition gehabt usw...
- Die 3D Brille rutscht mir ständig von der Nase; verbesserungsfähig.
- Widerstände des Eingabegerätes etwas realistischer gestalten. Mit den Datensätzen könnte man ja auch Leistenpunktionen bzw. Anlage Katheter/ZVK üben.
- Verbesserung der Nadelführung im Körper, realistischeres/nadelähnlicheres Punktionsgerät
- Die Korrekturvorschläge sollten genauer sein.
- Hautwiderstand bei einigen Patienten erhöhen, haptischen Teil wie eine Punktionsnadel formen (evtl. ein Aufsatz?) (Luxusforderung)
- Verbale Rückmeldung/ Anleitung durch den Simulator.
- S.o.

- Der Griff sollte wie eine Nadel geformt sein.
- Man sollte eine Nadel anstelle eines Sticks in der Hand halten, und mit den Fingern am Model die Spinalfortsätze selber ertasten an statt sie vorgegeben zu bekommen.
- Größere Pat.-Zahl, verschiedene Lagen
- mittel schwerer Patient... bitte!
- Die Handhabung des Gerätes wurde häufig durch den Tisch bzw. den Block unter dem Gerät behindert. Das Halten der „Nadel“ ist häufig unnatürlich bzw. der Proband muss sich stärker an das Gerät anpassen als es das Gerät tut.
- Mehr Bilder/sek, schnelleres System
- Sound

4 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse diskutiert und kritisch betrachtet. Mögliche Ursachen für die zustande gekommenen Werte und Mängel bei der Erhebung sollen erwähnt, sowie Verbesserungsvorschläge für zukünftige ähnliche Verfahren gegeben werden.

4.1 Scoringergebnisse und Trainingseffekt

Um einen möglichen Trainingseffekt darzustellen, wurde in der Punktionsreihenfolge sowohl am ersten als auch am zweiten Termin der Patient 1 punktiert. Die hier aufgezeichneten Werte der erreichten Gesamtpunktzahlen und der Erfolgsraten sollten möglichst eine Steigerung innerhalb der Testgruppe aufweisen. Die Kontrollgruppe, welche ebenfalls diesen Patienten punktierte, konnte den direkten Vergleich zur Testgruppe ermöglichen. Das Vertauschen der übrigen Patienten an den Punktionstagen, sollte einen systemischen Fehler unterdrücken.
Bereits im Kapitel 3.2.1 wurde erwähnt, dass sich der Verlauf der Werte für die Gesamtpunktzahlen in den beiden Evaluationsblöcken nicht deckt. Im ersten Evaluationsblock kann eine Steigerung bei der Testgruppe um annähernd 10% also von 54,94 auf durchschnittlich 61,02 Punkte beobachtet werden. Dies könnte isoliert betrachtet für einen Trainingseffekt sprechen. Zum Abschätzen, ob dieser lediglich durch eine Gewöhnung an das haptische Gerät erfolgt, muss man sich die Kontrollgruppe ansehen. Diese hatte genau wie die Testgruppe am ersten Trainingstag schon mit denselben Geräten, also einem identischen Versuchsaufbau, gearbeitet, aber keine Lumbalpunktion durchgeführt, sondern lediglich Aszitespunktionen. Erkennbar ist hier, dass die Kontrollgruppe mit 57,25 über den Werten der Testgruppe am ersten Tag liegt. Dies spricht für eine verbesserte Handhabung des Gerätes, also eine Gewöhnung an das Gerät durch mehr Training. Jedoch liegt sie wiederum unterhalb der Testgruppe am zweiten Tag, was den eigentlich beabsichtigten Vergleich darstellt. Zu diesem Zeitpunkt haben beide Benutzergruppen die nahezu identische Zeit mit dem Gerät gearbeitet und somit eine gleiche Gewöhnung an das haptische Eingabegerät und das Setting erfahren. Die Testgruppe hatte zuvor aber bereits Lumbalpunktionen durchgeführt und scheinbar dadurch höhere Durchschnittswerte erreicht. Der gleiche, tendenziell noch deutlichere Verlauf, ist bei der Erfolgsrate zu erkennen. Hier sehen wir eine Rate von 53,25% an erfolgreichen Punktionen der Testgruppe am zweiten Trainingstag, also 12 Prozentpunkte mehr als am ersten. Die Kontrollgruppe erreicht lediglich 43,64%. Die Punktion des Patienten 3 am zweiten Trainingstag zeigt ebenfalls eine fast um 10% höhere Gesamtpunktzahl

und fast doppelt so hohe Erfolgsrate der Testgruppe auf. Diesen Patienten haben beide Gruppen am Tag 2 zum ersten und einzigen Male punktiert, was ebenfalls einen direkten Vergleich der Fertigkeiten der beiden Benutzergruppen zulässt.
Im Evaluationsblock 2 hingegen gab es deutlich andere Werte. Während die Gesamtpunktzahl vom ersten zum zweiten Tag in der Testgruppe beim Patienten 1 stagnierte, eher sogar zurückging, zeigte die Erfolgsrate eine Regression von zehn Prozentpunkten. Die Werte liegen aber trotzdem noch über denen der Kontrollgruppe und dies sowohl in Bezug auf Gesamtpunktzahl, als auch in Bezug auf die Erfolgsrate. Gleiches gilt auch für den Patienten 5, der von beiden Gruppen am zweiten Trainingstag punktiert wurde. Auffällig ist aber, dass sich die Werte der Testgruppe am zweiten Trainingstag der beiden Blöcke sehr ähneln (61,02 und 62,66). Auch die Werte der Kontrollgruppe in den beiden Evaluationsblöcken liegen sehr nah aneinander. Lediglich die Werte des Patienten 1 am ersten Tag des Evaluationsblockes 2 weichen deutlich nach oben ab, wodurch der unerwartete Verlauf der Gesamtpunktzahl zustande kommt. Die Ursache hierfür kann nicht eruiert werden. Möglich wäre die vertauschte Patientenreihenfolge der beiden Blöcke. Bei der Mittelung der Werte wurde aufgrund der unterschiedlichen Teilnehmerzahlen in den Evaluationsblöcken nicht der Mittelwert der einzelnen Blöcke genommen, sondern ein Durchschnitt durch alle Probanden der Test- und Kontrollgruppe berechnet. Hier relativieren sich die bisherigen Beobachtungen. Die hohen Werte am ersten Tag des Evaluationsblockes 2 ziehen die Gesamtpunktzahl bei Patient 1 auf 59,5 im Mittel hoch. Zwar ist eine Steigerung zum Folgetag zu erkennen, diese beläuft sich aber lediglich auf 3,48 Punkte. Die Kontrollgruppe liegt aber erheblich darunter. Auch bei der Erfolgsquote kann man eine marginale Erhöhung von 53,12% auf 55,33% erkennen. Auch hier liegt die Kontrollgruppe mit fast acht Prozentpunkten dahinter.
Wenn man nun die in 3.2.2 erklärte Betrachtungsweise anwendet, um die Verzerrung durch die unterschiedliche Anzahl der Punktionsversuche der Probanden auszuschalten, gibt es eindeutigere Werte. In beiden Evaluationsblöcken haben wir einen identischen Verlauf. Stets sieht man in der Kontrollgruppe eine Steigerung, im Mittel sogar von zehn Punkten, also circa 18%. Die Kontrollgruppe liegt mit fast 20 Punkten sehr deutlich dahinter. Hier sieht man aber, dass beim Patient 5 im Evaluationsblock 2 die Kontrollgruppe sogar vor der Testgruppe liegt, was den hier vermuteten Lernerfolg wieder in Frage stellt. Diese Betrachtungsweise war vorher nicht festgelegt und ist daher nicht objektiv haltbar. Sie könnte trotzdem einen Hinweis darauf geben, dass es tatsächlich einen Trainingseffekt durch die Lumbalpunktion und nicht allein durch die Gewöhnung an das Gerät gibt. Dies bietet einen Ansatz für eine mögliche zweite größere Folgeevaluation.

Die erhoffte Steigerung in der Testgruppe ist nur sehr gering, wenn überhaupt, vorhanden. Allerdings ist stets deutlich der Unterschied zur Kontrollgruppe erkennbar. Hierbei von einem Lerneffekt zu sprechen ist sehr gewagt, zumal die Unterschiede in den Gruppen, wie in 3.2.1 dargelegt, nicht signifikant sind.

4.2 Kritische Betrachtung der Ergebnisse

Deutlich unterscheiden sich die einzelnen Evaluationsblöcke voneinander. Der Trend, der im ersten Block erkennbar ist, lässt einen Trainingseffekt vermuten. Die Ergebnisse aus dem zweiten Block sind aber teilweise konträr, sodass die Gesamtauswertung keinen objektivierbaren Trainingseffekt zeigen kann. Alle Betrachtungsweisen zeigen keinen statistisch signifikanten Effekt. Viele mögliche Ursachen können dafür verantwortlich sein.
Als eine mögliche Ursache sei hierbei der wenig standardisierte Trainingsablauf erwähnt. Zwar war die Gesamtzeit, die ein Proband für einen Punktionstag zur Verfügung hatte, vorgegeben, jedoch variierte die Anzahl der Punktionen pro Proband stark. Es war keine Zeit für den einzelnen Patienten oder fixe Anzahl an Versuchen pro Patient definiert worden. Eine feste vordefinierte Zahl an Punktionen pro Proband und Patient könnte den ganzen Ablauf vereinheitlichen. Aber auch die geänderte Patientenreihenfolge, die einen systemischen Fehler beseitigen sollte, bleibt nicht ohne einen möglichen Einfluss auf das Ergebnis. Hierbei ist vor allem darauf zu verweisen, dass die Patienten durch ihre individuelle Anatomie unterschiedliche Schwierigkeitsgrade repräsentieren, welche aber objektiv nicht fassbar sind.
Gruppendynamische Prozesse können ebenfalls einen Einfluss auf die schlechteren Ergebnisse im zweiten Evaluationsblock gehabt haben. Dieser Eindruck entsteht vor allem durch subjektive Einschätzung des Betreuungspersonals, das die Teilnehmer des zweiten Blockes im Vergleich zu den Teilnehmern des ersten Blockes als weniger vorbereitet, unkonzentrierter und weniger erfolgsorientiert erlebte. Am wahrscheinlichsten ist aber der geringe Umfang der Stichprobe. Da sich lediglich 27 Probanden in der Testgruppe und 25 in der Kontrollgruppe befanden, können die Werte naturgemäß noch stark streuen. Eine größere Stichprobengruppe bringe deutlichere Werte und vor allem könnten in diesem Fall auch signifikante Unterschiede ausgemacht werden.
Ein objektivierbarer Lernerfolg kann somit noch nicht statistsich signifikant nachgewiesen werden. Außerdem kann auch die zweite Eingangsfrage, ob dieser Effekt auf einer Gewöhnung an das haptische Gerät beruht, nicht beantwortet werden. Zwar deuten die Daten an, dass die Kontrollgruppe durchweg schlechter abschneidet als die Testgruppe, aber auch diese Daten sind statistisch nicht objektivierbar.

4.3 Auswertung des Evaluationsbogens

Die Ergebnisse aus dem Evaluationsbogen hingegen sind recht eindeutig. Der Simulator wird mit einer Ausnahme von allen Probanden als sinnvoll betrachtet. Die Probanden trauen sich tendenziell nach einer Trainingssitzung am Simulator eine reale Punktion eher zu und auch die technische Umsetzung wird durchweg positiv bewertet. Man kann daher annehmen, dass der Simulator von den Probanden gut angenommen wurde, und dass das Projekt als Trainingseinrichtung potentiell Zukunft hat. Bewährt hat sich vor allem die Lerneinheit zu Beginn der Sitzung. Hiermit wurde bewirkt, dass alle Probanden möglichst den gleichen theoretischen Hintergrund haben. Die Lerneinheit wurde inhaltlich, vom Umfang und von der Intention durchweg als positiv bewertet und sollte somit beibehalten werden.
Die Visualisierung konnte die Probanden nicht vollständig überzeugen. Sie wurde als realistisch eingestuft und vor allem die Bewertung der verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten und Blickwinkel waren gut ($1,64 \pm 0,93$). Die Stereoskopie teilte dann aber die Meinungen der Probanden. Die Bewertung war mittelmäßig mit großer Streuung der Einzelwerte. In den Freitextantworten wurde Lob und Kritik geäußert. Die Kritik gab es vor allem an der Haltung des Patienten. Die Position im CT bei Entstehung der Rohdaten für die 3D-Modelle bedingt, dass der Rücken gerade, die Haut flach und die Haltung des Patienten maximal aufgerichtet ist. Dies gab vielfach Anlass zur Kritik. Eine Verbesserung ist aber sehr schwierig, da zum einen die Position des Patienten im CT nicht beliebig verändert werden kann, außerdem wurden die Daten ohnehin nicht explizit für dieses Projekt erhoben, sondern folgten einer anderen Fragestellung.
Die Kraftrückgabe ist ein Punkt mit kontroversen Bewertungen. Bei dem Punkt, dass die Probanden die unterschiedlichen Strukturen durch die verschiedenen Kraftrückgaben erfühlen konnten, kam es zu klarer Zustimmung mit geringer Standardabweichung. Die übrigen Bewertungspunkte wurden sehr differenziert und unterschiedlich bewertet. Dies zeigt sich in der hohen Standardabweichung und darin, dass es in den Freitextangaben sowohl mehrere positive wie negative Feedbacks zu diesem Oberpunkt gab. Ein häufig genannter Verbesserungsvorschlag ist, das haptische Eingabegerät so zu verändern, dass es die Form einer echten Punktionsnadel erhält. Die technische Machbarkeit ist dahingehend zu überprüfen. Am schlechtesten schloss das Bewertungssystem ab. Die Hilfe durch die Korrekturvorschläge sahen die Probanden eher im Mittelfeld der Bewertungsskala. Konkrete Verbesserungsvorschläge gab es nicht, eventuell sollte man die Rückmeldungen des Scoringsystems anschaulicher machen.
Die dritte Eingangsfrage ist leichter zu beantworten. Die Probanden trauen

sich durchweg nach einer Trainingseinheit am Virtual-Reality-Simulator eher eine reale Lumbalpunktion zu als vor dem Training. Auch die Umsetzung wird größtenteils als gut bewertet.

4.4 Verbesserungsvorschläge und Ausblick

Um einen Trainingseffekt darzustellen und dafür signifikante Daten mit einem p-Wert $<0{,}05$ zu erhalten, muss die durchgeführte Testreihe wesentlich mehr Probanden aufweisen. Eine solche Untersuchung könnte bei ähnlichem Versuchsaufbau aber noch strikteren Rahmenbedingungen, unter anderem zur Anzahl der Punktionen pro Patient, einen Trainingseffekt nachweisen. Dieser ist hier stark zu vermuten, aber nicht belegbar. Außerdem wäre es denkbar, die Untersuchung zu erweitern und eine reale Punktion folgen zu lassen. Hierbei würde dann nicht nur ein Trainingseffekt bei einer virtuellen Punktion im Vergleich zu einer Kontrollgruppe betrachtet werden. Vielmehr könnte versucht werden nachzuweisen, ob die Testgruppen dann auch signifikant mehr Erfolg in ihrer ersten realen Punktion haben und der Simulator auch objektiv seinen Zweck erfüllt. Eine solche Studie wäre aber mit erheblich mehr Aufwand durch die zeitgerechte Akquirierung realer Patienten verbunden.
Da der Simulator einen hohen Zuspruch durch die Probanden erhielt, sollte dieses Projekt oder ähnliche weiterhin fester Bestandteil der zukünftigen klinischen Ausbildung werden. Die technischen Grundlagen für schnelle und hochwertige Datenverarbeitung entwickeln sich immer weiter, sodass auch die Möglichkeiten des Simulators ständig wachsen. Die 3D-Darstellung wurde von vielen gut angenommen und befürwortet. Hier liegt die Stärke des Simulators. Weitere Entwicklungen werden einen noch realistischeren Eindruck des Settings vermitteln und somit die Vorbereitung auf eine reale Punktion erleichtern. Das Eingabegerät in einer der echten Nadel entsprechenden Form zu gestalten, wird dies sicherlich unterstützen können. Außerdem geben solche VR-Simulatoren die Möglichkeit, auch andere Punktionen oder praktische Tätigkeiten, wie beispielsweise eine percutane transhepatische Cholangiographie PTC, auf demselben Gerät durchzuführen. Die Einsatzbreite des Gerätes ist groß, Eingriffe können kostengünstig und vor allem ohne Gefährdung oder Verletzung eines realen Patienten geübt werden. Ob nun ein Lerneffekt nachgewiesen ist oder nicht, ändert nichts an der Tatsache, dass die Probanden durch ihr Training erste realitätsnahen Erfahrungen sammeln konnten und sich zumindest subjektiv besser auf den ersten realen Eingriff vorbereitet fühlen.

4.5 Vergleich der Ergebnisse mit der Literatur

Die Ergebnisse der Auswertung decken sich mit denen, die man in bereits veröffentlichten Arbeiten findet. Die Verwendung eines Virtual Reality Simulators öffnet viele Möglichkeiten [32]. Beim Vergleich mit der Literatur gibt es eine Divergenz zwischen häufiger Erwähnung von VR-Simulatoren als wichtige und zukunftsträchtige Trainingsmethode [33] [34] und sehr wenigen Beiträgen zu bewerteten Trainingsdurchläufen bzw. Vergleichen zwischen Untersuchungs- und Kontrollgruppe. Wie in Kapitel 4.3 beschrieben wird der Lumbalpunktionssimulator als sinnvoll und das Training damit als gut empfunden. Eine Arbeitsgruppe um Lemole hat einen VR-Simulator mit sehr ähnlichem Aufbau für neurochirurgische Eingriffe entwickelt und ebenfalls von Studenten und Mitarbeitern testen lassen. Der Simulator wurde von den Probanden als gut und vor allem realistisch empfunden [35]. Sehr großes Potential für die VR-Simulatoren liegt nach Aussage einer Arbeitsgruppe um Maschuw vor allem im Training von laparoskopische Eingriffen in der Chirurgie und sollte daher sogar in das Curriculum aufgenommen werden [36]. Sie untersuchte die Auswirkung des Trainings von laparoskopischen Eingriffen mit VR-Simulatoren auf den realen operativen Eingriff bei chirurgischen Neulingen. Hierbei konnten sie einen signifikanten Anstieg der Fähigkeiten der Operateure im realen Umfeld feststellen. Auch eine Arbeit von Aggarwal et al. zeigt bei der Nutzung von VR-Simulatoren bei laparoskopischen Eingriffen signifikante Trainingseffekte [37] [38]. Ein signifikanter Unterschied zwischen Test- und Kontrollgruppe konnte in dieser Arbeit nicht festgestellt werden. Zu einem ähnlichen Ergebnis ist die Arbeitsgruppe um Wijn gekommen. Sie untersuchte das Outcome beim Training der laparoskopischen Nephrektomie mit einem VR-Simulator. Hierbei bestand die Testgruppe aus 22 unerfahrenen, 32 mittelgradig erfahrenen und 10 sehr erfahrenen Urologen. Die Gruppe konnte keinen signifikanten Trainingserfolg nachweisen und damit keine Empfehlung für ein Einbinden des Simulators in ein urologisches Trainingsprogramm geben [39]. Bajka et al. führten eine Studie durch, in der sie die Konstruktvalidität eines VR-Simulators für diagnostiche Hysteroskopien durch ein multimetrisches Bewertungssystem bestimmen und eine Lernkurve bei den Probanden nachweisen wollten. Ähnlich zu dem hier beschrieben Lumbalpunktionssimulator wurden hierbei verschiedene Bewertungskriterien aufgestellt, nach denen der Simulator eigenständig die Durchführungen der Probanden aufnimmt und bewertet, sodass ein Vergleich zwischen Benutzergruppen möglich ist. Bei Bajka et al. gab es zwei Probandengruppen, 24 Medizinstudenten und 12 erfahrenen Gynäkologen, die ebenfalls an zwei Untersuchungstagen am VR-Simulator standardisierte Aufgaben ableisteten. Die Ergebnisse zeigten, dass sich bei der Gesamtpunktzahl eine positive

Lernkurve ergab. Die Konstruktvalidität, die durch den Vergleich zwischen Studenten und erfahrenen Ärzten gezeigt werden sollte, war nur dann gegeben, wenn ein Modul bei den Bewertungskriterien vernachlässigt wurde [40]. Abschließend lässt sich sagen, dass sich die hier gewonnen Ergebnisse mit denen in der Literatur decken. Der Simulator wurde gut angenommen und von den Probanden als sinnvoll erachtet. Lernerfolge konnten in vielen Fällen angenommen, aber nur in einigen signifikant nachgewiesen werden. Trotzdem macht die Entwicklung und Weiterentwicklung von VR-Simulatoren für medizinische Eingriffe in vielen Bereichen der Medizin durchaus Sinn.

5 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es zunächst auf Grundlage von Schnittbildern des menschlichen Körpers dreidimensionale Körpermodelle zu erstellen, welche dann als Fallbeispiele für einen bereits bestehenden Virtual Reality Lumbalpunktionssimulator dienen. Danach sollte eine randomisierte, prospektive Untersuchung mit Probanden durchgeführt und Trainingseffekte evaluiert werden.
Die vorhandenen Patientendaten in Form von CT- und MRT-Bilddaten, sowie die RGB-Bilddaten des VKH- und VH-Projektes wurden auf Verwendbarkeit geprüft. Es sollten aus den Datensätzen Patientenfälle erstellt werden, wozu durchschnittlich acht verschiedenen Organe bzw. Organsysteme pro Fall segmentiert wurden. Hierbei kamen zwar standardisierte Filter und Segmentierungsverfahren zum Einsatz, aber die Mehrheit der Struktur musste komplett oder teilweise manuell segmentiert und nachbearbeitet werden. Aus den segmentierten Daten konnten dann dreidimensionale Strukturen gebildet werden und durch Zusammensetzen dieser und das Einfügen der Schichtbilder in den Simulator sind die Fallbeispiele (Patienten) entstanden. Initial sollten fünf Fallbeispiele für den Simulator zur Verfügung stehen. Die Segmentierung der Strukturen und das Implementieren in den Simulator benötigte ca. 70 Arbeitsstunden pro Patient. Am Simulator bestand nun die Möglichkeit mittels eines haptischen Ein- und Ausgabegerätes eine Lumbalpunktion durchzuführen und durch unterschiedliche Kraftrückgabe einzelne Strukturen realistisch zu erfühlen. Für die Strukturen passende Widerstandskräfte konnten in keiner Literatur klar definiert gefunden werden. So musste durch bereits geübtes ärztliches Personal eine möglichst realistische Einschätzung der Kräfte stattfinden.
Die folgende Untersuchung mit 52 Probanden, welche sich alle in der klinischen Ausbildung des Medizinstudiums befanden, sollte nun einen möglichen Trainingseffekt nachweisen. Randomisiert wurde eine Untersuchungsgruppe mit 27 und eine Kontrollgruppe mit 25 Probanden erstellt, welche in zwei Trainingseinheiten an unterschiedlichen Tagen Patienten in einer definierten Reihenfolge punktieren sollten. Um einen systematischen Fehler zu verringern, wurde die Reihenfolge nach circa der Hälfte des Zeitraumes vertauscht. Die Untersuchung fand zwischen Juli 2008 und März 2009 statt. Ein speziell entwickeltes Scoringsystem bewertete unter Berücksichtigung verschiedener vordefinierter Kriterien die Punktion und zeichnete die Daten auf. Dadurch war es möglich Punktionen im Nachhinein objektiv miteinander zu vergleichen. Nach der Trainingseinheit sollten die Probanden einen Evaluationsbogen ausfüllen, in dem sie den Simulator bewerten konnten. Nach Auswertung der Daten kann man einen Trainingseffekt sehr stark annehmen, da die Un-

tersuchungsgruppe am zweiten Sitzungstag im Mittel um 5,8% höhere Punktzahlen erreichte als am ersten Tag und auch deutlich über den Durchschnittswerten der Kontrollgruppe lag. Allerdings ist die Differenz nicht signifikant und somit der Trainingseffekt nicht nachweisbar. Betrachtet man nachträglich jeweils nur die ersten drei Punktionsversuche eines jeden Probanden pro Patient, ist ein signifikanter Unterschied im Vergleich zur Kontrollgruppe nachweisbar. Die Datenlage lässt einen eindeutigen Trend erkennen, sodass eine ähnliche Studie mit deutlich mehr Probanden und vorher klar festgelegter Punktionsanzahl diesen Effekt statistisch signifikant aufzeigen könnte.
Die Evaluation des Simulators durch die Probanden war durchweg positiv. Die Probanden sahen die virtuelle Punktion als sinnvoll an und die Mehrheit fühlte sich nach dem Training besser auf eine reale Punktion vorbereitet. Während vor allem die verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten der Anatomie des Zielgebietes gelobt wurden, gab es die meiste Kritik im Zusammenhang mit der Realitätsnähe der Kraftrückgabe.
Ein VR-Simulator gibt die Möglichkeit patientenschonend, risikofrei und kostengünstig praktische Erfahrungen zu sammeln. Hierbei ist die Hardware flexibel einsetzbar und kann unterschiedlichsten Projekten, wie zum Beispiel dem Parallelprojekt der Ascitespunktion, zur Verfügung stehen. Der Simulator könnte so einen sinnvollen Beitrag in der praktischen Ausbildung der Studierenden leisten.

6 Literatur

Literatur

[1] U Schmidt. Approbationsordnung für Ärzte vom 27. Juni 2002, 2002.

[2] internetquelle. http://www.skills-med.de/producten/2388/fat-old-fred-cpr-manikin, 30.01.2010.

[3] M Cartwright, P Reynolds, Z Rodriguez, W Breyer, and J Cruz. Lumbar puncture experience among medical school graduates: the need for formal procedural skills training. *Medical Education*, (39):436–437, 2005.

[4] W Pschyrembel. Klinisches Wörterbuch. page 943, 1998.

[5] P Berlit. *Klinische Neurologie*. Springer, 143-178, 3 edition, 2012.

[6] K Poeck and W Hacke. *Neurologie*. Springer-Verlag, 120-121, 12 edition, 2006.

[7] D Woitolla, R Bühler, F Fazekas, S Stuckrad-Barre, and M Otto. Diagnostische Liquorpunktion Leitlinien der DGN 2008, 2008.

[8] D Gower, A Baker, W Bell, and M Ball. Contraindications to lumbar puncture as defined by computed cranial tomography. *Neurology Neurosurgery Psychiatry*, 1071-4(50), 1987.

[9] M Schünke, E Schulte, and U Schumacher. *Prometheus Lernatlas, Kopf und Neuroanatomie*. Thieme, 266, 1 edition, 2006.

[10] T Schiebler. *Anatomie*. Springer-Verlag, 189-210, 9 edition, 2005.

[11] H Delank and W Gehlen. *Neurologie*. Thieme-Verlag, 78, 11 edition, 2006.

[12] D Carson and M Serpell. Choosing the Best Needle for Diagnostic Lumbar Puncture. *Neurology*, 47:33–37, 1996.

[13] H Lybecker, J Moller, O May, and H Nielsen. Incidence and prediction of postdural puncture headache. a prospective study of 1021 spinal anesthesias. *Anesth. Analg.*, (70):389–394, 1990.

[14] H Flatten, T Thorsen, and B Askeland. Puncture technique and postural postdural puncture headache. a randomized, double-blind study comparing transverse and parallel puncture. *Acta Anaesthesiology Scand.*, (42):1209–1214, 1998.

[15] M Strupp, O Schueler, S Stuckrad-Barre, and T Brandt. Atraumatic sprotte needle reduces the incidence of post-lumbar puncture headaches. *Neurology*, 12(57):2310–2312, 2001.

[16] Medizinische Fakultät der Universität Hamburg Prodekanat für Lehre. Hamburger lernzielkatalog, Oktober 2006.

[17] Ärztekammer Hamburg. Weiterbildungsordnung der hamburger ärzte und ärztinnen, 3. satzung, September 2008.

[18] internetquelle. http://www.skills-med.de/uploads/products/large/kk-m43.jpg, 30.01.2010.

[19] internetquelle. http://www.mevislab.de, 01.05.2009.

[20] J Park, M Chung, S Hwang, B Shin, and H Park. Visible korean human: Its techniques and applications. *Clinical Anatomy*, 18:216–224, April 2006.

[21] C Schöps. Erstellung virtueller Körpermodelle für die Virtual Reality-Simulation der Aszitespunktion und Evaluation des Simulator-Prototypen. Med. Dissertation, 2009.

[22] V Spitzer, M Ackerman, A Scherzinger, and D Whitlock. The Visible Human Male: A Technical Report. *Journal of American Medical Informatics Association*, 3(2):118–130, March 1996.

[23] T Lehmann, J Hiltner, and H Handels. *Handbuch der Medizinischen Informatik*. Carl Hanser Verlag, 2 edition, 2004.

[24] H Handels. *Medizinische Bildverarbeitung: Bildanalyse, Mustererkennung und Visualisierung für die computergestützte ärztliche Diagnostik und Therapie*. Vieweg und Teubner, 2 edition, 2009.

[25] M Färber. Entwicklung eines Virtual-Reality-Frameworks zur Simulation von Punktionseingriffen. Dissertation, 2009.

[26] E Hoeborn. Entwicklung eines Trainingssimulators für die Lumbalpunktion. Diplomarbeit, 2007.

[27] K Lundin, A Ynnerman, and B Gudmundsson. Proxy-based haptic feedback from volumetric density data. *Proceedings of the Eurohaptic Conference*, United Kingdom(University of Edinburgh):104–109, 2002.

[28] M Färber, F Hummel, C Gerloff, and H Handels. Virtual reality simulator for the training of lumbar punctures. *Methods of information in medicine*, (48):493–501.

[29] S DiMaio and S Salcudean. Interactive simulation of needle insertion models. *IEEE Trans Biomed Eng*, 7(52):1167–1179, Juli 2005.

[30] J Magill, B Anderson, G Anderson, P Hess, and S Pratt. Multi-axis mechanical simulator for epidural needle insertion. *Lecture Notes in Computer Science*, Medical Simulation(3078):267–276, 2004.

[31] J Schwarze. *Grundlagen der Statistik Band 2.* nwb, 185-187, 9 edition, 2009.

[32] M Färber, E Hoeborn, D Dalek, F Hummel, C Gerloff, C Bohn, and H Handels. Training and evaluation of lumbar punctures in a VR-environment using a 6dof haptic device. *Studies in Health Technology and Informatics*, (132):112–114, 2008.

[33] W Mueller-Wittig. Medizintechnik-Verfahren-Systeme-Informationsverarbeitung. chapter Virtuelle Realität in der Medizin, pages 791–802. Springer-Verlag, 3 edition, 2007.

[34] G Rust, S Marketsmueller, and N Lindlbauer. *Medizintechnik-Verfahren-Systeme-Informationsverarbeitung, Kapitel 3D-Postprocessing für die virtuelle Endoskopie.* Springer-Verlag, 3 edition, 2007.

[35] G Lemole, P Banerjee, C Luciano, S Neckrysh, and F Charbel. Virtual reality in neurosurgical education:part-task ventriculostomy simulation with dynamic visual and haptic feedback. *Neurosurgery*, 61(1):142–149, July 2007.

[36] K Maschuw, I Hassan, and D Bartsch. Surgical training using simulator. virtual reality. *Der Chirurg*, 81(1):19–24, Januar 2010.

[37] R Aggarwal, J Ward, I Balasundaram, P Sains, T Athanasiou, and A Darzi. Proving the Effectiveness of Virtual Reality Simulation for Training in Laparoscopic Surgery. *Annals of Surgery*, 246(5):771–779, November 2007.

[38] R Aggarwal, P Crochet, A Dias, A Misra, P Ziprin, and A Darzi. Development of a virtual reality training curriculum for laparoscopic cholecystectomy. *British Journal of Surgery*, 96(9):1086–1093, September 2009.

[39] R Wijn, M Persoon, B Schout, E Martens, A Scherpbier, and A Hendrikx. Virtual reality laparoscopic nephrectomy simulator is lacking in construct validity. *Journal of Endourology*, 24(1):117–122, Januar 2010.

[40] M Bajka, S Tuchschmid, D Fink, G Szekely, and M Harders. Establishing construct validity of a virtual-reality simulator for hysteroscopy via a multimetric scoring system. *Surgical Endoscopy*, 24(1):79–88, Juni 2009.

7 Danksagung

Diese Arbeit wäre ohne die Unterstützung verschiedener Menschen nicht zu Stande gekommen.
Ich danke vor allem Herrn Heinz Handels der mir als Doktorvater stets zur Seite stand und mich durch die lange Zeit begleitet hat. Zudem möchte ich auch Herrn Matthias Färber meinen Dank aussprechen, der mich während der Segmentierungsarbeiten und der Evaluation am Simulator mit Rat und Tat unterstützt hat.
Das gesamte Team hat in meinen Augen eine hervorragende Arbeit geleistet. Vielen Dank an das Institut für medizinische Informatik am UKE, meinen Mitdoktoranden Christian Schöps, sowie an Erik Hoeborn und Thorsten Dahmke, die mit ihren Diplomarbeiten die Weiterentwicklung des Simulators beeinflusst haben.
Nicht zu vergessen sind meine Freunde und Familie, die mich mit Motivation, Gesprächen und dem häufigen Korrekturlesen unterstützt haben. Hier sind vor allem Sabrina Strauß und Jan Töwe zu nennen. Ganz besonders möchte ich auch meinem Bruder Daniel Liem für seine stete und schnelle Hilfe beim Arbeiten mit LaTeX und meinen Eltern Roswitha und Jerzy Dalek für ihren Glauben und ihr Vertrauen danken.

Hamburg, 2013

8 Lebenslauf

Persönliche Informationen:

Name:	David Dalek
Adresse:	Blockhorner Weiden 18 22869 Schenefeld
Geburtstag:	01.01.1983 in Hamburg

Schulische Ausbildung:

08/1989 - 07/1993	Grundschule Gorch-Fock-Schule Schenefeld
08/1993 - 06/2002	Wolfgang-Borchert-Gymnasium Halstenbek, abgeschlssen mit der Allgemeinen Hochschulreife
02/2004 - 05/2004	Ausbildung zum Rettungssanitäter DRK Rettungsdienstschule Goslar
10/2004 - 12/2010	Studium der Humanmedizin an der Universität Hamburg Erlangung der Approbation 12/2010

Beruflicher Werdegang:

11/2002 - 09/2003	Zivildienst im Rettungsdienst DRK Lüchow- Dannenberg
05/2004 - 10/2004	Rettungssanitäter im Rettungsdienst DRK Lüchow-Dannenberg
01/2011 - 03/2014	Assitenzarzt in der Weiterbildung Klinik für Anästhesie und Intensivmedizin am Klinikum Pinneberg
04/2014 - heute	Assitenzarzt in der Weiterbildung Klinik für Anästhesiologie Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf

9 Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe. Ferner versichere ich, dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe. Ich erkläre mich einverstanden, dass meine Dissertation vom Dekanat der Medizinischen Fakultät mit einer gängigen Software zur Erkennung Plagiaten überprüft werden kann.

Unterschrift: .....

10 Anhang

10.1 Lerneinheit Lumbalpunktion

Lumbalpunktion

Anleitung und Hilfestellungen für die Benutzung des virtuellen Lumbalpunktionssimulators

Kontakt für Fragen oder Anregungen:

David.Dalek@stud.uke.uni-hamburg.de

Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
Zentrum für Experimentelle Medizin
Institut für Medizinische Informatik

Lumbalpunktion

Die Lumbalpunktion ist eine diagnostische teils auch therapeutische Methode, bei der mittels einer speziellen Hohlnadel der Subarachnoidalraum punktiert wird.

Der häufigster Zugang liegt im Lendenwirbelbereich, möglich ist die Punktion aber auch subokzipital in Höhe des Hirnstammes oder rein theoretisch entlang der gesamten Wirbelsäule.

Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
Zentrum für Experimentelle Medizin
Institut für Medizinische Informatik

Indikationen

- Liquordiagnostik bei neurologischen und Infektionskrankheiten (z.B. auf Zellen, Stoffwechselprodukte, Blut, Proteine, AK)
- Liquordruckmessung
- Applikation von Medikamenten (z.B. Antibiotika, Lokalanästhetika bei Spinalanästhesie)
- Entlastung bei hohem Hirndruck (z.B. Hydrocephalus)

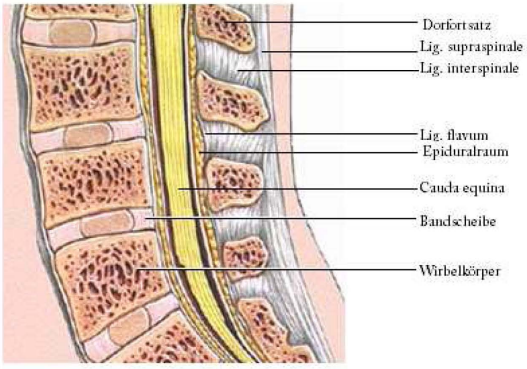
Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
Zentrum für Experimentelle Medizin
Institut für Medizinische Informatik

Kontraindikationen

- Entzündungen der Haut oder Muskulatur im Bereich der Einstichstelle
- Blutungsneigung
  (relativ: Thrombozyten < 50.000/µl; absolut: <20.000/µl)
- Vorsicht bei erhöhtem Hirndruck besteht Einklemmungsgefahr bei lumbaler Druckentlastung!
- Sklerotische oder destruierende Prozeße der Wirbelsäule im Punktionsbereich

Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
Zentrum für Experimentelle Medizin
Institut für Medizinische Informatik

Anatomie



Quelle: [1]

Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
Zentrum für Experimentelle Medizin
Institut für Medizinische Informatik

Vorbereitung zur Punktion

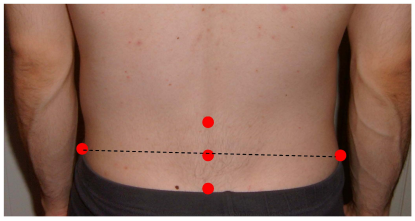
1. Auffinden der Punktionsstellung

Die Lumbalpunktion wird unter normalen Umständen zwischen dem 3. und 4. Lendenwirbelkörper (LWK) durchgeführt. Alternativ kann auch der Raum zwischen LWK 4 und LWK 5 punktiert werden. Der Grund der tiefen Punktion liegt darin, dass bei 94% der Menschen das Rückenmark mit dem Conus medullaris in Höhe LWK 1 und 2 endet. In den tieferen Bereichen liegen lediglich die austretenden Nerven (Cauda equina), sodass bei einer tiefen Punktion die Gefahr einer Rückenmarksverletzung minimiert wird.

Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
Zentrum für Experimentelle Medizin
Institut für Medizinische Informatik

Vorbereitung zur Punktion

1. Auffinden der Punktionsstellung



Die Verbindungslinie zwischen den Christae iliacae markiert die Höhe des 4. LWK. Anhand der Dornfortsätze kann man nun die Zwischenräume LWK 3/4 und LWK 4/5 identifizieren.

Vorbereitung zur Punktion

2. Desinfektion und sterile Bedingungen

Der gesamte Vorgang sollte mit Mundschutz und sterilen Handschuhen durchgeführt werden.

Zunächst wird die Hautstellen regelrecht möglichst mit farbigem Desinfektionsmittel desinfiziert.

Anschließend ein steriles Lochtuch um die Punktionsstelle geklebt und im Bereich ggf. eine Lokalanästhesie (Beispielsweise mit Lidocain 1-2%) durchgeführt.

Das Anreichen und die Bereitung der Lokalanästhesie soll auch unter sterilen Bedingungen stattfinden.

Punktion

3. Technik

Nun wird die Nadel, die einen speziellen atraumatischen Schliff besitzt, in den Spinalkanal eingeführt.

Typischerweise startet man am Oberrand des unteren Dornfortsatzes und punktiert in einem Winkeln von ca. 30-45° nach kr anial, um so parallel zu den dachziegelartig angeordneten Dornfortsätzen vorzuschieben.

Nacheinander werden nun nach Haut und Subcutis, das Ligamentum supraspinale, das Ligamentum interspinale und das Ligamentum flavum durchstochen.

Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf | Zentrum für Experimentelle Medizin Institut für Medizinische Informatik

Punktion

4. Verifizierung

Nach dem Durchstechen des Ligamentum flavum kommt es zu einem spürbaren Verlust an Widerstand (LOR = Loss of resistance). Danach befindet sich die Nadelspitze im Epidural- bzw. Periduralraum. Nach weiteren 3-6mm und Durchdringen der Dura mater und Arachnoidea befindet sich die Nadelspitze im Spinalkanal.

Anatomisch kann man nun kaum falsch liegen. Bei korrekter Lage wird nun langsam klarer Liquor aus der Nadel tropfen. Dies kann unter Umständen auf Grund des geringen Kanülenlumens sehr langsam tröpfeln.

Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf | Zentrum für Experimentelle Medizin Institut für Medizinische Informatik

Punktion

Nadelspitze im Spinalkanal

Nacheinander wurden durchstochen:
Haut, Subcutis, Lig. Supraspinale, Lig. Interspinale, Lig. Flavum, Epiduralraum, Dura mater/Arachnoidea

Diagnostik/Therapie

Sowohl die Liquorentnahme sowie die Injektion von Medikamenten muss unter sterilen Bedingungen durchgeführt werden.

Zur Diagnostik entnommener Liquor muss warm gehalten und schnellstmöglich ins Labor gebracht werden.

Bei Injektion von Medikamenten muss z.B. durch Aspirationsversuche sichergestellt werden, dass intrathekal und nicht versehentlich intravasal injiziert wird.

Nachbereitung

Nach erfolgreicher oder auch nicht erfolgreicher Punktion muss die Einstichstelle mit einem Pflaster versehen werden. Außerdem sollte in den nächsten Tage die Stelle oberflächlich mit Desinfektionsmittel behandelt werden und der Verband gewechselt werden, um Infektionen zu vermeiden.

Rötungen, Schmerzen, Quaddeln an der Einstichstelle können auf eine mögliche Infektion hinweisen.

Komplikationen

Auch dieser Eingriff ist mit eventuell auftretenden Komplikationen verbunden. (Die Reihenfolge spiegelt nicht die Häufigkeit wider.)

- Verletzung von Weichteilen oder Knochen
- Infektionen (lokal an der Haut, aber auch Meningitis, Sepsis)
- Verletzung der Nerven/Rückenmark mit folgenden reversiblen oder irreversiblen sensiblen oder motorsichen Ausfällen bis hin zum Querschnitt
- Blutungen und Hämatome (u.a. auch intrathekal)
- Ausfälle von Hirnnerven, mit eventuell Seh- oder Hörverlust
- Kreislaufdysregulation, Hypotension, Bewußtlosigkeit
- Störung der Atem- oder Kreislauffunktion bei Einklemmung des Hirnstammes
- Postpunktioneller Kopfschmerz

Komplikationen

Speziell bei Spinalanästhesie und therapeutischer Medikamenteninjektion:

- starke Hypotension / starke Bradykardie
- totale Spinalanästhesie mit Atem- und/oder Kreislaufstillstand
- Übelkeit/Erbrechen
- zu starke/schwache Anästhesie
- spezielle Nebenwirkungen der Antibiotika bzw. injizierten Medikamente

Quellen

- D. Woitolla et al., *Diagnostische Liquorpunktion, 2004*
- Klaus Poeck, Werner Hacke. *Neurologie.* Springer-Verlag, 12. Auflage 2006. S.120-121
- Jochen Schulte am Esch et. Al. *Anästhesie, Intensivmedizin, Nofallmedizin, Schmerztherapie.* Thieme Verlag, 3. Auflage 2007, S.234-239
- Institut für Klinische Chemie, UKE Hamburg, 2007
- Bilder:
  [1] frei nach apps.uwhealth.org