

Aus dem Institut für Anatomie II – Experimentelle Morphologie

des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf

(Direktor: Prof. Dr. U. Schumacher)

Simulation des transrektalen Ultraschalls in einem virtuellen Körpermodell des Beckens

Dissertation

Zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

dem Fachbereich der Medizin vorgelegt von

Christine Prosch

geboren in Hamburg

Hamburg, 2008

Angenommen von der Medizinischen Fakultät

der Universität Hamburg am: 17.12.2008

Veröffentlicht mit Genehmigung der Medizinischen

Fakultät der Universität Hamburg

Prüfungsausschuss, der/die Vorsitzende: Prof. Dr. U. Schumacher

Prüfungsausschuss: 2. Gutachter/in: Prof. Dr. K.-H. Höhne

Prüfungsausschuss: 3. Gutachter/in: PD Dr. Ch. Busch

Aufgabenstellung

Der transrektale Ultraschall (TRUS) stellt in der Gastroenterologie eine wichtige diagnostische Methode zur Erkennung von Kolon- und Rektumkarzinomen dar. Daneben hat der TRUS in den letzten Jahren auch in anderen Bereichen erheblich an Bedeutung gewonnen und wird z. B. auch zur Diagnostik von Prostatakarzinomen verwendet.

Um allerdings den TRUS zu erlernen, sind gute Kenntnisse der Normalanatomie und die Übertragung dieses Wissens auf die intraluminale Ansicht unabdingbar. Dieses Erlernen findet hauptsächlich am Patienten oder am Probanden statt, wobei die Möglichkeiten aufgrund der verfügbaren Fälle und auch aufgrund psychologischer Barrieren begrenzt sind.

Simulatoren können diese Lernphase am Patienten oder Probanden erheblich verringern und das Lernen ohne Zeit- oder psychologischen Druck ermöglichen. In Anlehnung an das bereits erfolgreich in die Praxis eingeführte Programm „EUS meets Voxel-Man“ soll deshalb ein Modell für das selbstständige Erlernen des transrektalen Ultraschalls am PC entwickelt werden.

Hierfür stehen die hochaufgelösten Schnittbilddatensätze des „Visible Human Female und Male“ zur Verfügung. In diesen Datensätzen sollen die anatomischen Strukturen des Beckens von der ano-kutanen Grenzlinie bis zum Erscheinen des Hüftkopfes segmentiert, d. h. in ihrer dreidimensionalen Gestalt identifiziert und markiert, werden. Insbesondere sollen hierbei die für den Ultraschall besonders wichtigen Strukturen wie z. B. die Schichtung des Darmes segmentiert werden.

Neben der Segmentierung der einzelnen Strukturen soll eine Wissensbasis erstellt werden, welche die Strukturen mit ihren anatomischen Bezeichnungen in verschiedenen Sprachen beschreibt und ihre *TeilVon*-Beziehungen untereinander definiert.

Als letzter Schritt sollen die segmentierten Daten in simulierte Ultraschalldaten überführt werden, so dass ein Modell entsteht, in dem die anatomischen und die Ultraschallbilder gegenübergestellt werden können und die Wissensbasis per Mausklick abgefragt werden kann. Dieses Modell kann von dem Lernenden am PC immer wieder aufgerufen werden, so dass es die ideale Möglichkeit darstellt, um die Normalanatomie des TRUS zu erlernen und somit die Lehrzeit am Patienten oder Probanden zu verringern.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	3
1.1.	Geschichte des endoskopischen Ultraschalls	3
1.2.	Methoden zur Vermittlung des Wissens	6
1.2.1	Anatomieatlanten und –bücher.....	7
1.2.2	Computergestützte Anatomieatlanten	9
1.2.3	Lehrbücher über den endoskopischen Ultraschall.....	12
1.2.4	Vermittlung des anatomischen Wissens durch die Simulation des endoskopischen Ultraschalls	14
1.3.	Zielsetzung	16
2	Material und Methoden.....	18
2.1.	Die Datensätze.....	18
2.1.1	Der Hintergrund der Daten.....	18
2.1.2	Die technischen Daten.....	20
2.1.3	Besondere Eigenschaften der Daten.....	22
2.2.	Der Arbeitsplatz	23
2.3.	Die Segmentierung	24
2.3.1	Die Segmentierung mit Hilfe von Ellipsoiden	24
2.3.2	Die Segmentierung mit Hilfe von Schwellenwerten	26
2.3.3	Analyse auf verbundene Komponenten.....	28
2.3.4	Morphologische Operationen	28
2.3.5	Manuelle Trennung	29
2.3.6	Die 3D-Visualisierung.....	30
2.4	Die Benennung der segmentierten Objekte.....	30
2.5	Erzeugung von simulierten Ultraschallbildern.....	31
2.6	Intelligente Filme	33
3	Ergebnisse.....	34
3.1	Visible Human Male	34
3.1.1	Die Skelettmuskulatur	34
3.1.2	Prostata	36

3.1.3	Samenblase und Ductus ejaculatorius	36
3.1.4	Ureter, Harnblase, Urethra	38
3.1.5	Rectum.....	40
3.1.6	Der Knochen.....	41
3.2	Visible Human Female.....	43
3.2.1	Die Skelettmuskulatur	43
3.2.2	Uterus, Lig. teres uteri, Lig. cardinale.....	43
3.2.3	Die Vagina.....	45
3.2.4	Harnblase, Ureteren und Urethra.....	46
3.2.5	Gefäße.....	47
3.2.6	Rectum.....	47
3.2.7	Knochen.....	49
3.2.8	Weitere segmentierte Strukturen	50
3.3	Die Ultraschallbilder	52
4	Anwendung.....	56
5	Diskussion	60
5.1	Probleme der dreidimensionalen Visualisierung.....	60
5.2	Trennung der Skelettmuskulatur	60
5.3	Die weiblichen Geschlechtsorgane	62
5.4	Schichtung der Darmwand	63
5.5	Schlussfolgerung	67
6	Zusammenfassung.....	68
A	Literatur	69
B	Danksagung	74
C	Lebenslauf.....	75
D	Eidesstattliche Versicherung.....	76

1 Einleitung

Der endoskopische Ultraschall, zu dem sowohl der gastrointestinale endoskopische Ultraschall als auch der transrektale Ultraschall (TRUS) gehören, hat in den letzten Jahren vor allem in der Gastroenterologie erheblich an Bedeutung gewonnen, da er die Vorteile des Ultraschalls mit denen der Endoskopie verbindet. Hierdurch kann der TRUS im Gegensatz zum konventionellen Ultraschall, welcher nur äußerlich angewendet werden kann, auch die Körperhöhlen darstellen. Ein Einblick in die Eingeweide wird somit ohne größeren Aufwand ermöglicht.

Hierdurch dient der endoskopische Ultraschall der Diagnostik von vielen verschiedenen Krankheiten. Zum Hauptindikationsgebiet des TRUS zählen das Rektum- und das Analkarzinom (Abb. 1). Weitere Indikationen sind z. B. unter der Schleimhaut oder außerhalb der Wand gelegene Tumoren, Abszesse, Fisteln und die Abklärung von analer Inkontinenz.

1.1. Geschichte des endoskopischen Ultraschalls

Auch wenn sich der endoskopische Ultraschall heutzutage bei der Diagnostik der oben benannten Krankheiten etabliert hat, gehört er zu den vergleichsweise neuen diagnostischen Methoden und wird nur von wenigen Ärzten beherrscht. Dies liegt daran, dass sich das Erlernen des TRUS aufgrund der intraluminalen Sicht und dem Mangel an Übungsmöglichkeiten an Patienten und Probanden als schwierig und langwierig gestaltet.

Der endoskopische Ultraschall wurde erstmalig von Eugene DiMagno 1980 an einem Patienten durchgeführt [DiMagno et al., 1980]. Mit dieser Untersuchung wollte DiMagno die Vorteile des transkutanen Ultraschalls mit denen der Endoskopie verknüpfen und somit eine neue präzise Diagnosemöglichkeit schaffen.

Auch wenn die Hoffnungen, die in den endoskopischen Ultraschall gesetzt worden waren, berechtigt erschienen, schritt die Entwicklung nur langsam voran. Zum einen lag dies an den damals üblichen endoskopischen Ultraschallgeräten, welche bis in die

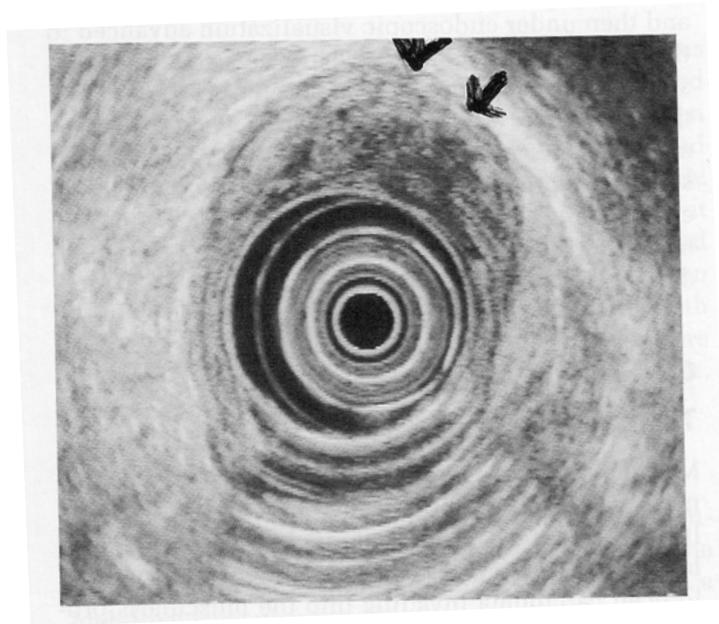


Abb. 1: Die Pfeile zeigen auf ein im transrektalen Ultraschall entdecktes Rektumkarzinom [Bhutani MS, 2002], welches von einem Anfänger leicht übersehen werden kann und dessen Einstufung nach der Tumorgröße ohne das Wissen um das Aussehen der Darmschichtung unmöglich ist. In diesem Fall handelt es sich um einen T2-Tumor, der dadurch gekennzeichnet ist, dass er bis in die Tunica muscularis propria vordringt, diese jedoch nicht durchdringt.

frühen 90er Jahre lediglich aus unhandlichen Prototypen bestanden, wodurch sich die Untersuchung als schwierig, kostspielig und unangenehm gestaltete (Abb. 2).

Zum anderen bestand ein Hindernis in den anatomischen Kenntnissen. Zum ersten Mal bestand die Möglichkeit, den Körper von intraluminal zu betrachten. Die Erfahrungen aus der Diagnostik des transkutanen Ultraschalls und der Endoskopie brachten nicht genügend Erkenntnisse, um die Anatomie des endoskopischen Ultraschalls zu erschließen. So konnte z. B. bis in das Jahr 1989 kein Konsens über die Darstellung der Darmschichtung gefunden werden [Kimmey et al., 1989].

In den frühen 90er Jahren wurden durch den technischen Fortschritt endoskopische Ultraschallgeräte in Serie produziert. Zur gleichen Zeit waren auch genügend Erfahrungen über den endoskopischen Ultraschall zusammengetragen worden, so dass anhand von mehr als 3000 physiologischen und pathologischen Untersuchungen die Anatomie geklärt werden konnte.

Seit diesem Zeitpunkt entwickelte sich der endoskopische Ultraschall stetig weiter und ist zu einer bedeutenden diagnostischen Methode in der Gastroenterologie geworden.

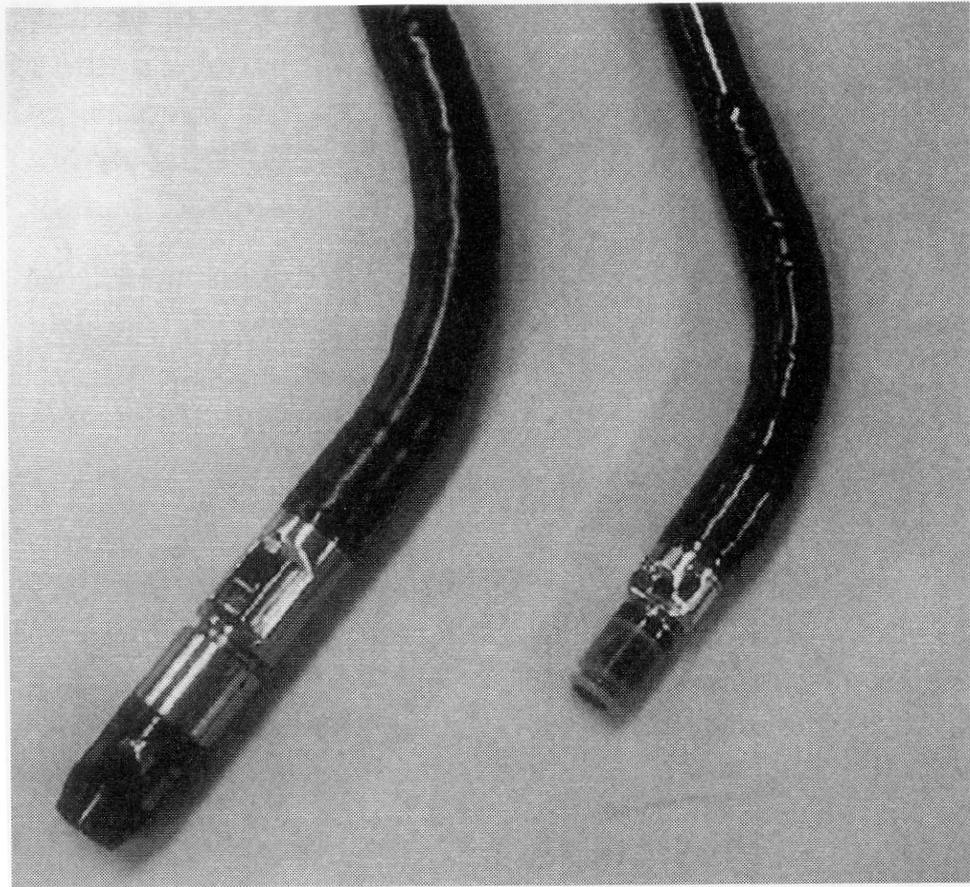


Abb. 2: Gegenüberstellung des ersten endoskopischen Ultraschallgerätes in Form eines Prototypen (links) mit einem aktuellen Olympus GF-UMP230 Endoskop (rechts) [Bhattacharya I, 2002]. Hieran lässt sich der technische Fortschritt, der vor allem in der geringeren Größe zu sehen ist, sehr gut ablesen. Es ist verständlich, dass hierdurch eine patientenfreundlichere Untersuchung möglich wurde.

Allerdings stellen sich auch heute noch ähnliche Probleme wie in den 80er Jahren, denn, obwohl die Anatomie geklärt ist, ist es für den Untersucher ungewohnt, den Körper von intraluminal zu betrachten und somit die im Ultraschall zu sehenden Strukturen richtig zuzuordnen.

Hieraus ergeben sich zwei grundsätzliche Probleme beim Erlernen des TRUS. Das erste Problem stellt das Erlernen der Anatomie des Beckens dar. Die einzelnen Strukturen des Beckens gehen ineinander über und bilden einen Trichter, so dass das Verständnis der Lage der einzelnen Strukturen zueinander und die dreidimensionale Vorstellung des Beckens oft Probleme bereitet. Das zweite Problem stellt die Übertragung der erlernten anatomischen Kenntnisse auf die im TRUS zu sehenden Ultraschallbilder dar, da die

Bilder aus der intraluminalen Perspektive entstehen und zahlreiche ultraschalltypische Artefakte aufweisen (Abb. 3).

Aus diesen Gründen ist es besonders wichtig, dass der Lernende, bevor er die Technik des TRUS am Patienten übt, die Anatomie des menschlichen Beckens verstanden hat. Hierdurch können die im Ultraschall zu sehenden Strukturen besser und schneller zugeordnet werden, wodurch dem Lernenden die Orientierung in dieser ungewohnten Situation leichter fällt und die Lernzeit am Patienten verringert werden kann.

1.2. Methoden zur Vermittlung des Wissens

Um diese spezielle Sicht der Anatomie des Beckens zu erlernen, eröffnen sich dem Lernenden verschiedene Möglichkeiten, die unterschiedlich gut an die Materie heranführen. Wie oben erwähnt, gestaltet sich das Erlernen der Anatomie des Beckens und somit auch das Erlernen des TRUS als besonders schwierig. Aus diesem Grund soll

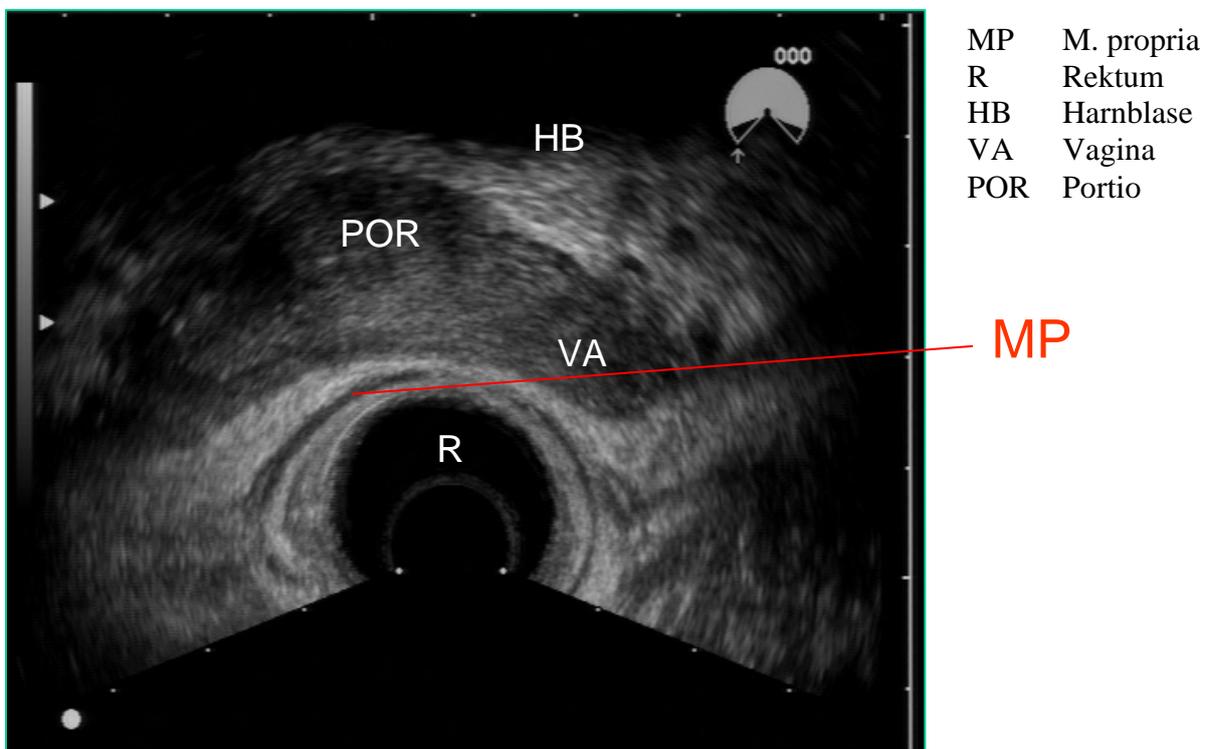


Abb. 3: Die Ultraschallbilder im TRUS werden aus der intraluminalen Sicht betrachtet [Burmester, 2006]. Hierdurch wird es dem Lernenden erschwert die zu sehenden Objekte richtig zuzuordnen und sie in ein dreidimensionales Bild einzuordnen.

in dieser Arbeit ein Modell für das Erlernen des TRUS erstellt werden. Um die Vorteile des Modells besser verdeutlichen zu können, werden im folgenden Teil die bereits vorhandenen Möglichkeiten zum Erlernen der Anatomie des Beckens näher erläutert.

1.2.1 Anatomieatlanten und –bücher

Die neben der Präparation am häufigsten verwendete Art Anatomie zu erlernen, besteht darin, sich die Region, die von Interesse ist, in einem Anatomieatlas oder auch in einem Anatomielehrbuch genauer zu betrachten. Die Anatomiebücher, wie z. B. *Anatomie* [Schiebler et. al, 2003] berichten ausführlich über die Anatomie des Beckens. Allerdings haben sie zur Veranschaulichung des im Buch Gelesenen aber häufig nur wenige Schemazeichnungen. Diese helfen nur bedingt das Gelesene auf die Anatomie des Menschen zu übertragen und die Verhältnisse im Becken zu visualisieren. Hieraus folgt, dass eine Übertragung auf den transrektalen Ultraschall fast unmöglich ist.

Auch der *Taschenatlas der Anatomie, Band 2: Innere Organe* [Fritsch et. al, 2003], stellt zwar die Anatomie des Beckens durch eine Gegenüberstellung von Bildern und Text übersichtlich dar, kann aber trotzdem im Gegensatz zu einem Atlanten nur wenige bildliche Eindrücke vermitteln.

Die Atlanten widmen dem Becken meist viele Bilder, so dass eine ungefähre Vorstellung der großen und wichtigen Organe des Beckens durch den Atlanten gewährleistet wird. Eine dreidimensionale Darstellung der Organe ist aber nicht möglich. Der *Sobotta, Band 2* [Putz und Pabst, 2006] versucht dieses Problem zu lösen, indem er verschiedene Schnitte kombiniert, doch führt dies nicht zu einem besseren Verständnis und einer besseren Vorstellung, sondern eher zu Verwirrung (Abb. 4).

Eine Verknüpfung der verschiedenen Schnitte fällt dem Lernenden oft schwer, da die Schnitte meist auf ganz verschiedenen Seiten lokalisiert sind und nicht nebeneinander betrachtet werden können. Auch der *Atlas der Anatomie des Menschen* [Netter, 1999] kann im Bereich des Beckens nicht überzeugen (Abb. 5). Zwar fällt hier das Blättern und Suchen etwas leichter, da das Becken nicht wie im *Sobotta* zusammen mit dem Retroperitoneum abgehandelt wird, es sind aber zu wenig unterschiedliche Bilder vorhanden, um ein klares dreidimensionales Bild vor dem inneren Auge entstehen zu lassen.

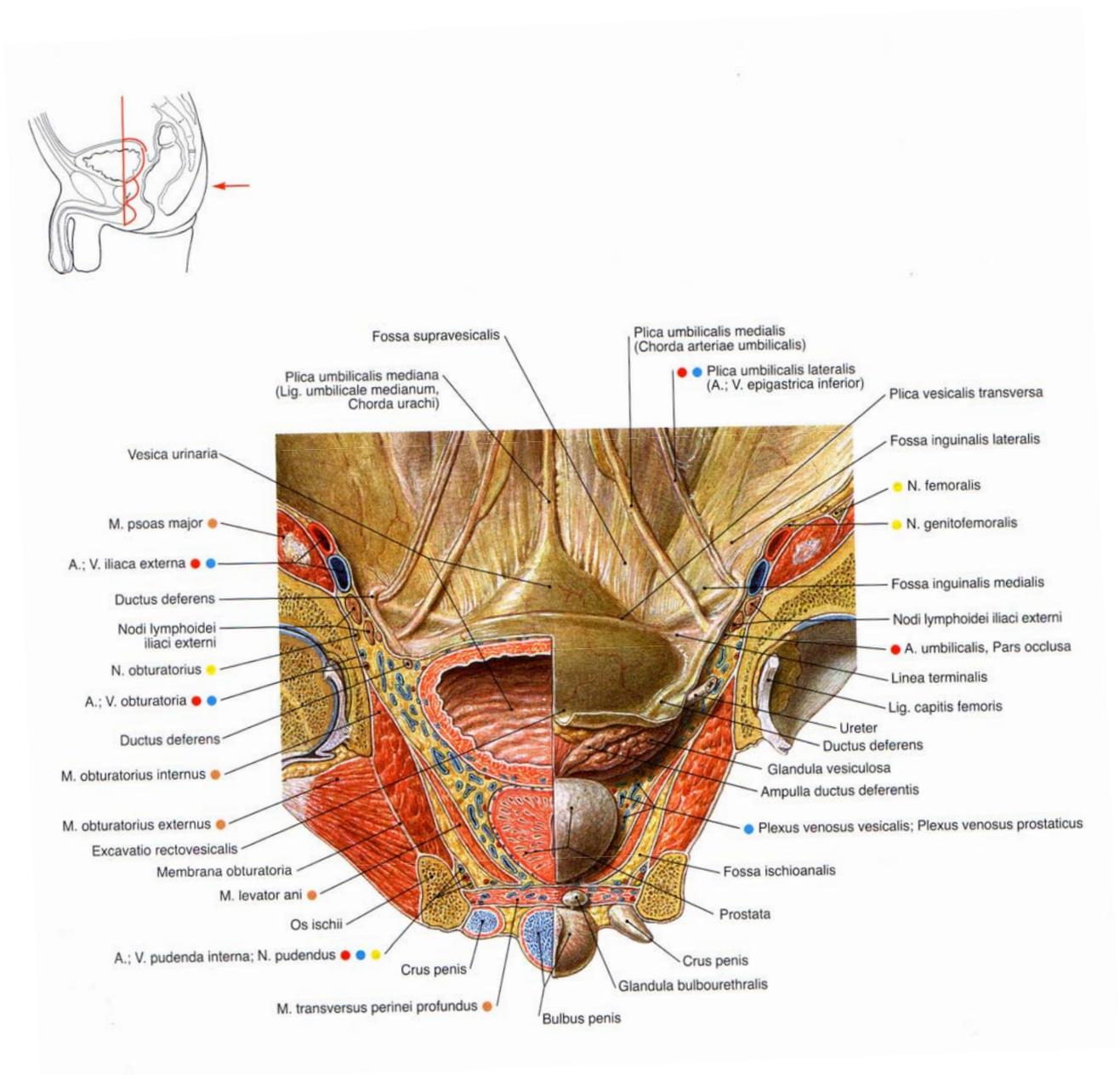


Abb. 4: Diese Abbildung aus dem Sobotta [Putz und Pabst, 2006] versucht einen dreidimensionalen Eindruck durch die Kombination eines Frontalschnittes auf der linken Seite mit einem Medianschnitt zu erzeugen. Der Betrachter blickt von dorsal auf diese Schnitte. Diese Kombination der Schnitte stellt den Lernenden vor eine komplizierte Abbildung, die schwierig zu verstehen ist.

1.2.2 Computergestützte Anatomieatlanten

Da die Begrenzung der Anzahl der Bilder und Schnitte in Atlanten ein oft geäußerter Schwachpunkt ist, wurden computergestützte Atlanten entwickelt.

Durch diese neue Art der Atlanten besteht die Möglichkeit, mehr Bilder und Schnitte als in herkömmlichen Atlanten zu präsentieren.

Natürlich gibt es auch in dieser Art der Präsentation der Anatomie große Unterschiede, wobei alle im Folgenden genannten Atlanten auf den *Visible Human Daten* der *National Library of Medicine* (NLM) beruhen. Zum einen gibt es die so genannten Web-basierten Atlanten, welche im Internet frei zugänglich sind und somit von Studierenden oder auch von Laien betrachtet werden können.

Ein Beispiel hierfür wäre der frei verfügbare *Homo sapiens dissecatus* [Jastrow et. al, 2002] (Abb. 6). Dieser Atlas ist über die Seite der Fachschaft Medizin der Universität Mainz frei zugänglich und kann in den Sprachen Deutsch, Englisch, Spanisch und Französisch angeschaut werden. Allerdings bietet er keine Benennung der einzelnen Strukturen, so dass der Student mit dem Anatomieatlanten neben dem Computer sitzen muss, um sich die Namen der Strukturen zu erschließen. Ein Vorteil des Atlases besteht darin, dass er aus transversalen, frontalen und horizontalen Schichten besteht und der Schichtabstand sehr gering ist, so dass ein großer Informationsgehalt vermittelt wird. Insgesamt wirkt der Atlas aber etwas unübersichtlich und der Student benötigt viel Zeit und Geduld, um alle Strukturen richtig zuzuordnen und die anatomischen Gegebenheiten zu verstehen und zu erlernen. Falls ihm diese Herausforderung dennoch gelingen sollte, bleibt immer noch die Frage, ob der Lernende diese Schnittbilder zu einem dreidimensionalen Bild zusammenfügen kann und dieses dann auf den transrektalen Ultraschall zu übertragen vermag.

Im Gegensatz zu dem *Homo sapiens dissecatus* ist das System *Web-based Three-dimensional Virtual Body Structures (W3D-VBS)* [Temkin et al., 2002] nicht für jeden frei im Internet verfügbar. Dafür bietet er aber auch die Extrahierung und Benennung von einzelnen Strukturen und wirkt übersichtlicher und benutzerfreundlicher. Allerdings erfolgte die Isolierung der einzelnen Strukturen mittels Polygonen, welche nur die Oberfläche beschreiben, so dass das Innere hohl bleibt. Dieser Nachteil wurde versucht zu minimieren, indem die innerhalb eines Organs liegenden Strukturen zusätzlich isoliert wurden.

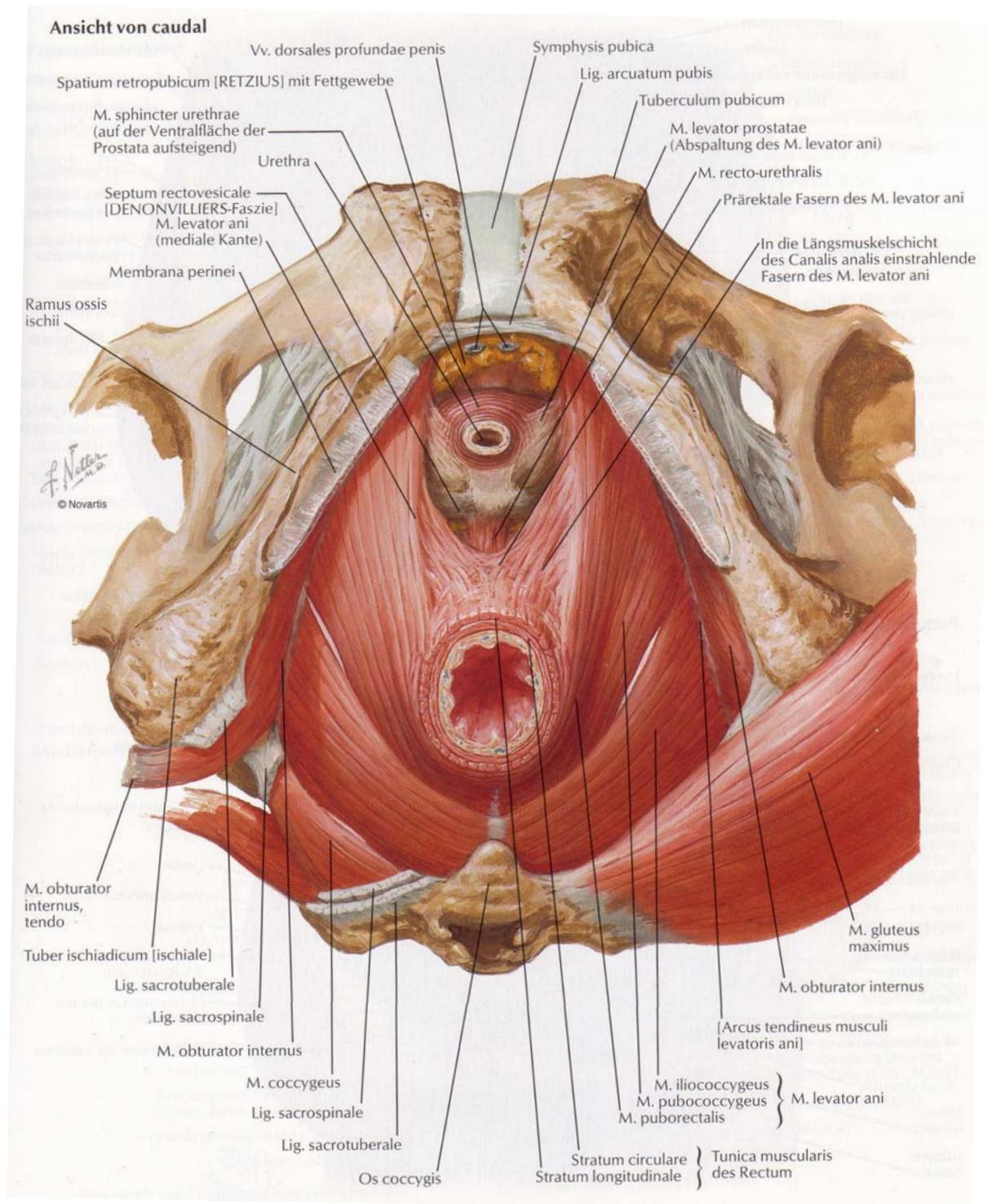


Abb. 5: Eine Ansicht von caudal auf das Diaphragma Pelvis des Mannes [Netter, 1999]. Ein großes Problem bei dieser Art der Darstellung stellt die unzureichende Vermittlung der Tiefenausdehnung dar. Daher bereitet die Übertragung dieser Art von Bildern auf den intraluminalen Ultraschall dem Lernenden häufig Schwierigkeiten.

Von den Möglichkeiten, die dieser Atlas bietet, kommt er den auf CD erhältlichen computergestützten Atlanten nahe. Hiermit sind nicht die zu den Buchatlanten passenden CDs gemeint, die meist nur das Buch in elektronischer Form wiedergeben, sondern die Atlanten, die ebenfalls auf den *Visible Human Daten* der NLM basieren. Hierzu gehört z. B. der *Voxel-Man Atlas* [Schubert et al., 1997] (Abb. 7). Dieser Atlas ermöglicht es dem Lernenden, sich einzelne Strukturen darstellen zu lassen, sie zu drehen und die in der Umgebung liegenden Strukturen zu ergänzen. Diese Art des Lernens ist im Bereich des Beckens aber noch nicht möglich, da für diesen Bereich noch kein entsprechendes Programm existiert.

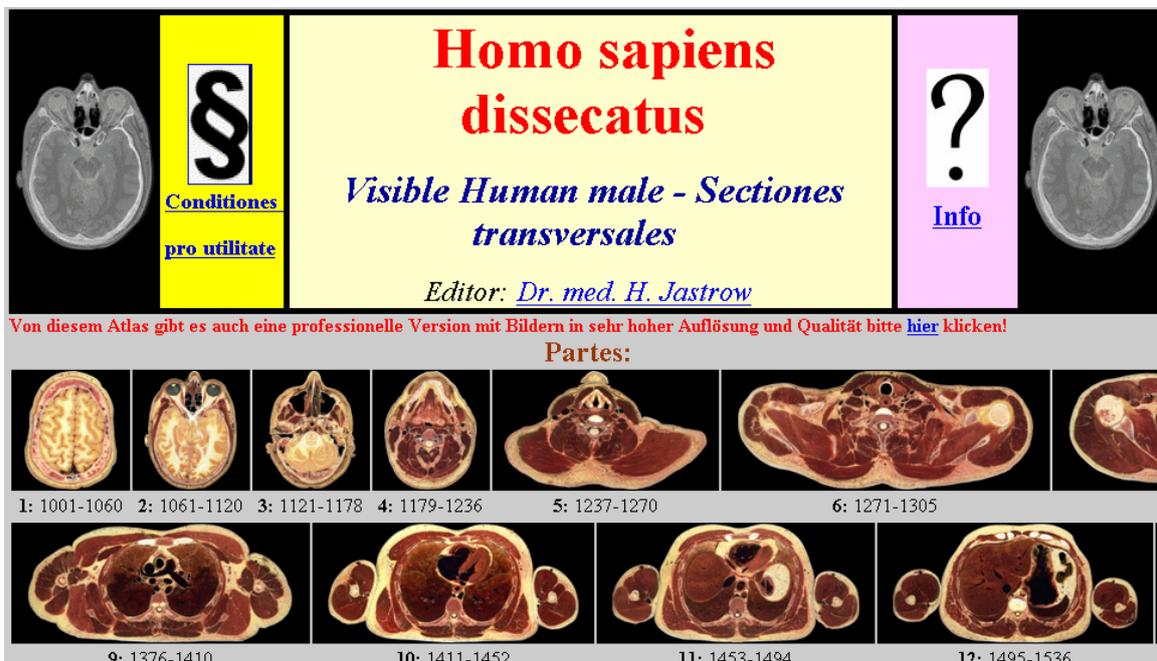


Abb. 6: Dieser im Internet frei zugängliche Atlas „Homo sapiens dissecatus“ [Jastrow et al., 2002] bietet zwar viele verschiedene Schnitte, benennt aber die einzelnen Strukturen nicht, so dass er zum Lernen der anatomischen Strukturen nur sinnvoll ist, wenn ein solides Grundwissen vorhanden ist und der Blick in den Atlas nur die Vorstellung der Strukturen verbessern soll.

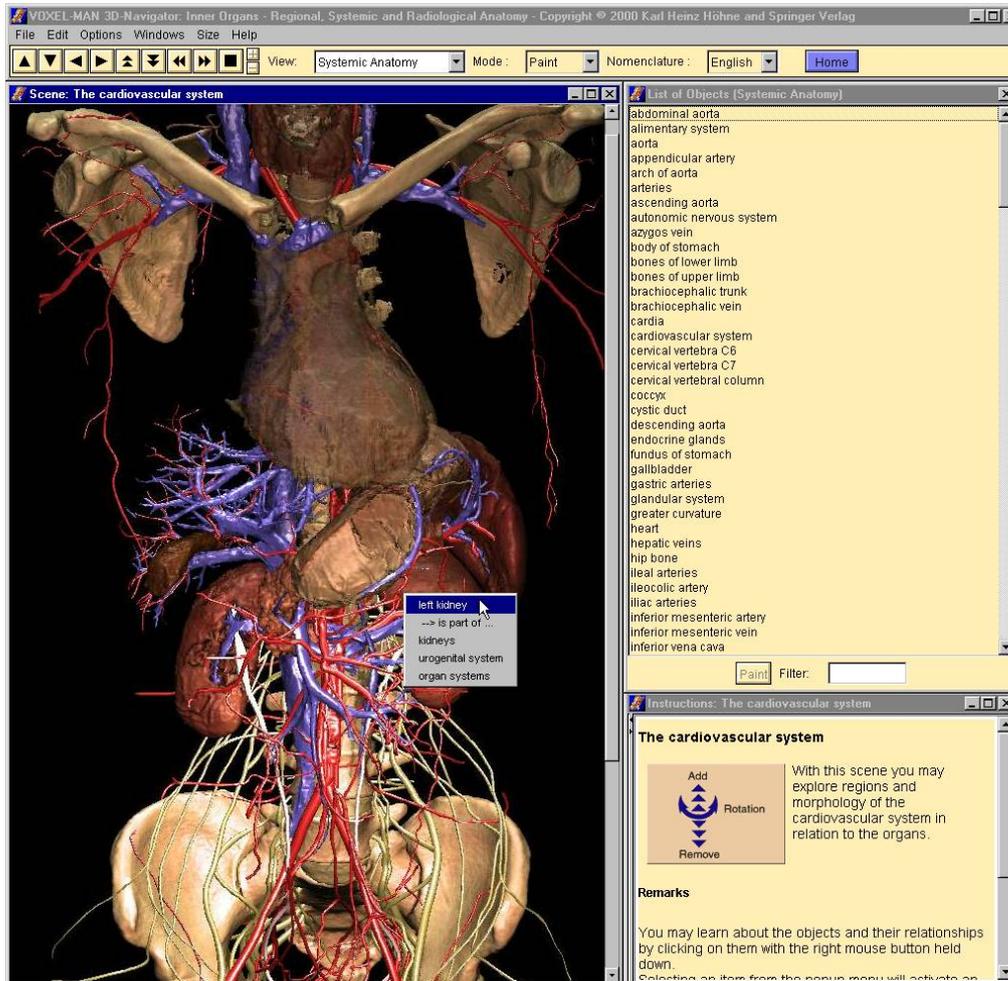


Abb. 7: Diese Abbildung zeigt den wesentlich besser strukturierten „Voxel-Man Atlas“ [Höhne et al., 2000]. Das Bild im linken Fenster kann rotiert werden und per Mausklick können die Namen der einzelnen Strukturen abgefragt werden, was den Atlas zum Lernen der anatomischen Strukturen geeignet erscheinen lässt.

1.2.3 Lehrbücher über den endoskopischen Ultraschall

Doch selbst wenn der perfekte Atlas für das Becken erhältlich wäre, stellt sich die Frage, ob der Lernende dies alles in dem transrektalen Ultraschall anwenden und sein Wissen auf die intraluminalen Sicht transferieren kann. Da vielen Lernenden dies unter anderem durch die Schwarz/Weiß-Darstellung des Ultraschalls und die Variabilität der Ultraschallsonde sehr schwer fällt, wurden Bücher zur Erlernung des endoskopischen Ultraschalls entwickelt.

Allerdings ist die Auswahl der Bücher über den endoskopischen Ultraschall gering. Findet man dann ein Buch, welches dieses Thema beinhaltet, wird ein großes Vorwissen über den Ultraschall vorausgesetzt und anatomische Bilder sind oft gar nicht vorhanden. So ist z. B. in dem Buch *Endoscopic Ultrasonography* [Gress und Bhattacharya, 2000] der endoskopische Ultraschall zwar gut erklärt, doch finden sich keine physiologischen Bilder des transrektalen Ultraschalls, sondern nur pathologische Ultraschallbilder. Dabei ist es für den Lernenden besonders wichtig, erst einmal die normalen Verhältnisse im endoskopischen Ultraschall zu erfassen, da er nur so die Möglichkeit hat Pathologisches von Physiologischem zu unterscheiden.

Das Ultraschallehrbuch *Surgical Management of anorectal and colon diseases* [Marti und Givel, 2001] zeigt zwar auch ein paar physiologische Bilder, doch wird in diesem Fall nur ein sehr kleiner Ausschnitt des TRUS gezeigt, so dass der Lernende nur die Schichtung der Darmwand kennen lernt und die anderen Strukturen mit Hilfe anderer Lehrmittel ergänzen muss. Zumindest Skizzen zu den sonographischen Bildern liefert das Buch *Endosonography in Gastroenterology* [Dancygier et al., 1999] (Abb. 8). Allerdings verzichtet dieses Buch weitestgehend auf Erklärungen, so dass die Bilder für sich sprechen müssen.

Allen Büchern ist gemeinsam, dass auch sie nur eine begrenzte Anzahl von Bildern aufweisen können und dass der Lernende somit nur einen kleinen Ausschnitt der vielen möglichen Perspektiven des transrektalen Ultraschalls kennen lernt. Außerdem geht aus den Bildern nicht hervor, auf welcher Höhe sich der Schallkopf bei der Entstehung des Bildes befindet und in welchem Winkel das Becken angeschnitten wird. Gerade dieses Wissen wäre für die Interpretation des Bildes aber von großer Bedeutung.

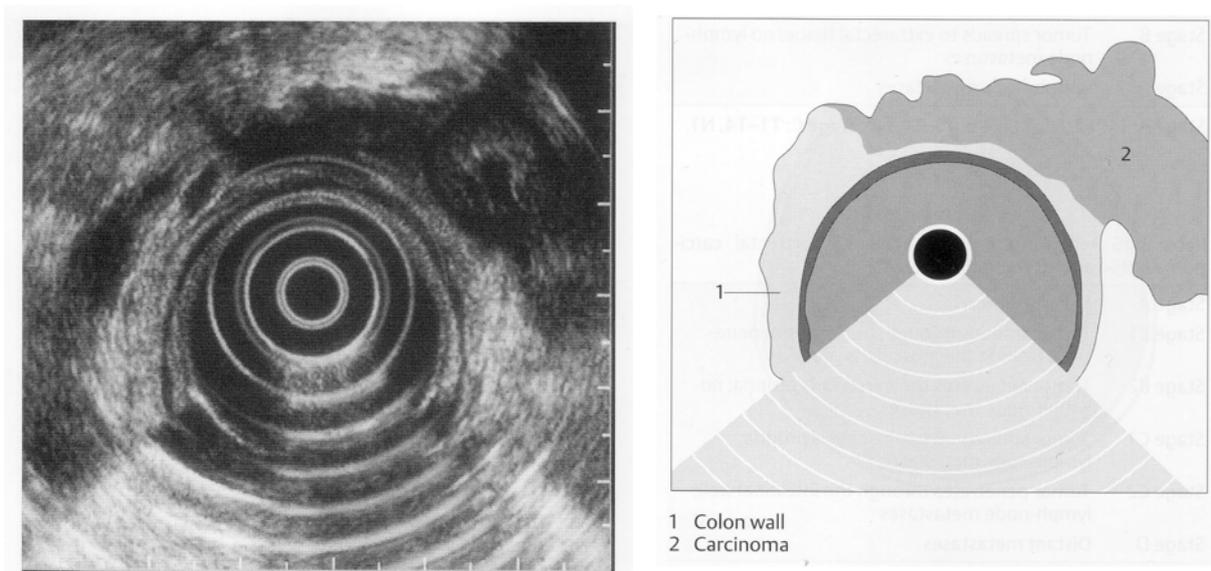


Abb. 8: Ein typisches Beispiel aus einem Lehrbuch für den transrektalen Ultraschall [Dancygier et al. 1999]. In diesem Beispiel wird ein ultrasonographisches Bild des kolorektalen Karzinoms gezeigt. Zur Erklärung des Bildes wurde in diesem Fall eine Schemazeichnung verwendet, welche die Lage der Rektumwand und des Rektumkarzinoms veranschaulicht. Dennoch bleibt das Verständnis der dargestellten Abbildung schwierig.

1.2.4 Vermittlung des anatomischen Wissens durch die Simulation des endoskopischen Ultraschalls

Um die beschriebenen Nachteile zu minimieren und das Erlernen des endoskopischen Ultraschalls zu vereinfachen, wurde 2004 eine Ultraschallsimulation unter dem Namen *EUS meets VOXEL-MAN* des oberen Gastrointestinaltraktes entwickelt [Burmester et al., 2004] (Abb. 9). In diesem Lernprogramm wurden den anatomischen Schnitten des *Visible Human Datensatzes* klinische Ultraschallbilder so zugeordnet, dass eine möglichst große Übereinstimmung erreicht werden konnte. Außerdem kann der Lernende Filmsequenzen auswählen, und somit einen Ultraschall in Bewegung betrachten. Auch diesen Filmen sind parallel laufende anatomische Filme zugeordnet, so dass der Lerneffekt optimiert werden konnte.

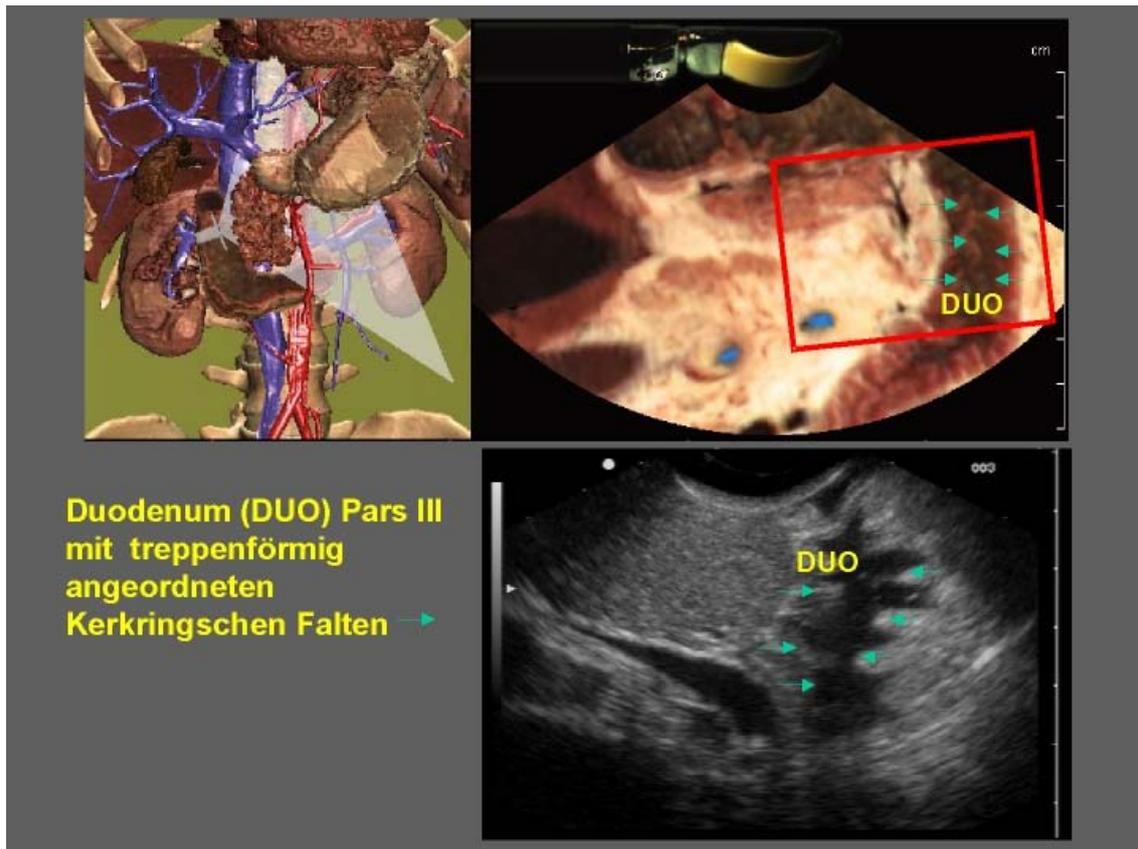


Abb. 9: Ein Beispiel aus einer Ultraschallsimulation des oberen Gastrointestinaltraktes [Burmester et al., 2004]. Es wird deutlich, dass die anatomischen Schnitte des Visible Human nicht hundertprozentig mit den Ultraschallbildern des Patienten übereinstimmen. Dennoch vermittelt diese Simulation vor allem durch das Übersichtsbild oben links, in welchem die Lage der Sonde veranschaulicht wird, eine gute Vorstellung des Blickwinkels und der dabei angetroffenen anatomischen Strukturen des gastrointestinalen Ultraschalls.

Um dem Lernenden die Zuordnung der einzelnen Strukturen zu erleichtern, wurden alle wichtigen Objekte des oberen Gastrointestinaltraktes isoliert. Hierdurch kann der Lernende die einzelnen Strukturen per Mausklick aus der Wissensbasis abfragen.

Ein weiterer großer Vorteil dieser Simulation gegenüber den Ultraschalllehrbüchern besteht in der Darstellung der Lage der Sonde. Die Darstellung der Lage der Sonde wird dem Lernenden durch ein zusätzliches dreidimensionales Bild des menschlichen Körpers näher gebracht. In dieser Abbildung sind die wichtigsten Organe des oberen Gastrointestinaltraktes und die Position und Strahlrichtung der Sonde in Relation hierzu

abgebildet. Hierdurch besteht die Möglichkeit, die Ultraschallbilder mit den anatomischen Bildern und der Lage der Sonde in Übereinstimmung zu bringen.

Obwohl dieses Programm erfolgreich in die Praxis eingeführt worden ist, gibt es kein entsprechendes Programm für den Beckenbereich.

Eine Ultraschallsimulation des Beckens findet sich lediglich als eine vaginale Ultraschallsimulation [Einenkel et al., 2005] (Abb.10). Auch diese Simulation beruht wie die oben erwähnte Ultraschallsimulation des oberen Gastrointestinaltraktes auf der Gegenüberstellung von an Patienten gewonnenen Ultraschalldaten mit den Daten des *Visible Human*. Allerdings wurden in diesem Fall die einzelnen Strukturen nicht isoliert, so dass der Lernende die Strukturen selber zuordnen muss und auch für die Lage der Sonde lediglich eine Skizze herangezogen werden kann (Abb.10).

Es ist ersichtlich, dass diese Art der Simulation in beiden Fällen den Nachteil birgt, dass die Ultraschallbilder nicht ganz genau mit den anatomischen Bildern übereinstimmen.

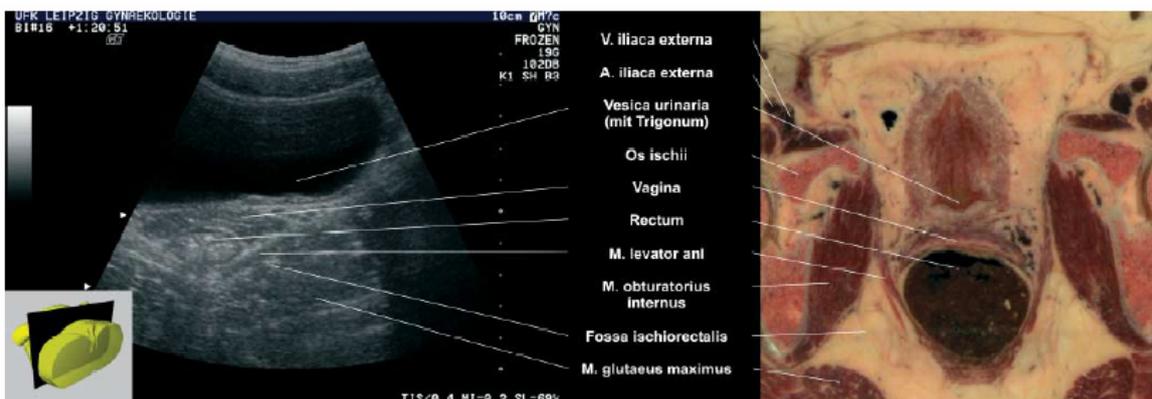


Abb. 10: Bei diesem Bild einer transvaginalen Ultraschallsimulation von [Einenkel et al., 2005] wird deutlich, dass bei dem Versuch die Daten des *Visible Human Female* mit echten Ultraschalldaten in Übereinstimmung zu bringen die Bilder nicht exakt übereinstimmen und somit keine idealen Lernvoraussetzungen geschaffen werden können.

1.3. Zielsetzung

Es wird deutlich, dass die Ultraschallsimulation gegenüber den oben genannten Methoden zur Vermittlung anatomischen Wissens viele Vorteile besitzt. Daher soll in

dieser Arbeit ein Modell in Anlehnung an das Programm *EUS meets Voxel-Man* für den transrektalen Ultraschalls entwickelt werden.

Allerdings sollen in dieser Arbeit den anatomischen Bildern keine Ultraschallbilder aus klinischen Untersuchungen gegenübergestellt werden, sondern es sollen aus den einzelnen isolierten Strukturen Ultraschallbilder erzeugt werden. Für die Erzeugung dieser Ultraschallbilder wird ein bereits vorhandener Algorithmus verwendet [Bommersheim et al., 2004]. Dies bietet gegenüber den bisherigen Ultraschallsimulationen den großen Vorteil, dass eine hundertprozentige Übereinstimmung von den anatomischen und den Ultraschallbildern erreicht werden kann.

Um dies zu erreichen, sollen die einzelnen Strukturen des Beckens segmentiert, d. h. in ihrer dreidimensionalen Struktur identifiziert und markiert werden. Natürlich ist dies nicht das erste Mal, dass sich jemand mit der Segmentierung des Beckens näher auseinandersetzt. So wurden z. B. für die Urologie einzelne Strukturen des Beckens isoliert und benannt [Brooks et al., 1997]. Allerdings wurden hier nur die für die urologische Chirurgie notwendigen Strukturen mit Adobe Photoshop extrahiert, so dass viele für den transrektalen Ultraschall notwendige Objekte, wie z. B. die Schichtung der Darmwand, fehlen.

Eine Isolierung der einzelnen Teile des Beckens nahmen sich auch [Bajka et al. 2004] vor. Sie isolierten insgesamt über 300 Objekte im Bauchraum und im Becken. Allerdings beschränkten auch sie sich auf den weiblichen Datensatz und setzten ihren Schwerpunkt im Becken auf die weiblichen Geschlechtsorgane, so dass auch in diesem Fall viele für den TRUS wichtige Strukturen nicht segmentiert wurden.

Folglich müssen die für den TRUS benötigten Strukturen neu segmentiert werden, so dass ein virtuelles Körpermodell des Beckens entsteht, in dem der Ultraschall simuliert und die Sonde zur besseren Orientierung positioniert werden kann.

Damit soll das Ziel erreicht werden, sich die typischen Bilder und Einstellungen des transrektalen Ultraschalls genau einzuprägen. Da das Programm auf dem Computer läuft, besteht der weitere Vorteil für den Benutzer, dass er sich die Ultraschallsimulation beliebig oft und ohne großen Aufwand vergegenwärtigen kann.

2 Material und Methoden

Wie oben erwähnt, müssen, um das Ziel der Simulation des TRUS erreichen zu können, die anatomischen Strukturen des Beckens segmentiert werden. Dies bedeutet, dass jedes Pixel auf dem Schnitt einem Objekt oder einer Struktur zugeordnet wird. Durch diese Segmentierung werden die einzelnen Organe isoliert und bekommen einen Namen, so dass sie für den Lernenden durch Anklicken mit der Maustaste abrufbar sind.

Hieraus ergibt sich, dass ein Datensatz benötigt wird, in dem die für den TRUS benötigten Objekte und Strukturen möglichst gut sichtbar dargestellt sind. Hierfür sind die hochauflösten Datensätze des *Visible Human* am besten geeignet, da in diesen viele der für den TRUS benötigten Strukturen wieder gefunden werden können.

2.1. Die Datensätze

Die Datensätze des *Visible Human Male und Female* stammen aus der National Library of Medicine (NLM) und bieten auch im Beckenbereich hochauflöste anatomische Schnittbilder. Der Vorteil von anatomischen Bildern besteht im Becken darin, dass die einzelnen Strukturen gut erkennbar und voneinander abzugrenzen sind, so dass sie mit Hilfe von Ellipsoiden, auf welche später noch näher eingegangen wird, isoliert werden können.

2.1.1 Der Hintergrund der Daten

Die Idee für das Visible Human Projekt stammt aus dem Jahre 1987, als die NLM beschloss, eine gründliche und systematische Forschung bezüglich der Durchführbarkeit und der technischen Ansprüche von anatomischen Bilddateien durchzuführen [Spitzer et al, 1996]. Allerdings nahm das Projekt erst 1991 Gestalt an, als die *University of Colorado School of Medicine* die Ausschreibung der NLM gewann und somit die

Auswahl einer geeigneten Leiche anvertraut bekam. Durch diese Selektion sollte die Auswahl einer möglichst normalen Leiche gewährleistet werden. So sollte die Leiche z. B. möglichst keine Anomalien aufweisen, frei von metastasierenden Krankheiten sein und es sollten keine Operationen stattgefunden haben. Um dies zu verifizieren, wurden eine Krankheitsgeschichte und der körperliche Zustand der Leiche erhoben. Zusätzlich wurden CT- und MRT-Bilder angefertigt und hinsichtlich der oben beschriebenen Kriterien begutachtet. Aufgrund dieser hohen Anforderungen dauerte es einige Zeit bis eine geeignete Leiche gefunden wurden.

Eine männliche Leiche konnte dann im Jahr 1993 ausgewählt werden. Es handelte sich hierbei um einen 39jährigen Mann, der seinen Körper der medizinischen Forschung zur Verfügung gestellt hatte, bevor an ihm die Todesstrafe mit Hilfe einer Giftinjektion vollstreckt wurde [Ackermann, 1991]. Die weibliche Leiche folgte ein Jahr später. Diesmal handelte es sich um eine 59jährige Frau, die aufgrund eines Herzversagens gestorben war.

Bis die Datensätze aber der Öffentlichkeit zugänglich gemacht wurden, dauerte es einige Zeit, da die Leichen verschiedenen Prozeduren unterworfen wurden. Nachdem die Eignung der Leiche festgestellt worden war, wurden CT- und MRT-Datensätze angefertigt. Vor der Anfertigung dieser Datensätze wurde die Leiche jedoch in eine Box gelegt, welche mit einer doppelten Schicht aus Plastik ausgelegt war [Spitzer et al., 1996]. Zwischen die beiden Plastikschichten wurde dann der Stabilisator Alpha Cradle gegossen, welcher innerhalb von 15 Minuten expandierte und die Leiche umschloss. So war gewährleistet, dass die Körperteile für jeden Datensatz in derselben Position lagen. Nachdem die CT- und MRT-Datensätze angefertigt worden waren, wurde die Leiche eingefroren. Von der gefrorenen Leiche wurde ebenfalls ein CT-Datensatz angefertigt. Außerdem wurde die Leiche nun mittels eines Kryotoms in Scheiben geschnitten, welche dann fotografiert wurden, wodurch ein anatomischer Datensatz entstand. Als Ergebnis wurden die Datensätze des *Visible Human Male* im Jahr 1994 und die des *Visible Human Female* im Jahr 1995 mit fast identischen technischen Merkmalen veröffentlicht (Übersicht Tab. 1).

2.1.2 Die technischen Daten

Unter anderem unterscheiden sich die beiden Datensätze in der Bildgröße, welche durch die Pixelanzahl beschrieben wird. Das Wort Pixel ist ein Wort, welches sich aus den Abkürzungen der beiden englischen Wörter Picture und Element zusammensetzt und die Anzahl von Bildpunkten beschreibt aus der ein Bild besteht.

In Ergänzung dazu stellt das Voxel die dreidimensionale Version des Pixels dar. Es setzt sich aus den Wörtern Volume und Element zusammen und erweitert somit das Pixel um die Dimension der Tiefe.

Die CT-Datensätze im ungefrorenen Zustand haben einen unterschiedlichen Schichtabstand. Im Kopf- und Halsbereich beträgt die transversale Auflösung 1 mm, im

		Ungefrorene CT- Datensätze	Gefrorene CT- Datensätze	MRT- Datensätze	Anatomischer Datensatz	
					weiblich	männlich
Bildgröße (Pixel)		512 × 512	512 × 512	256 × 256	2084 × 1216	2084 × 1216
Auflösung in der Bildebene		1 mm	1 mm	2 mm	0,33 mm	0,33 mm
Transversale Auflösung	Hals- und Kopfbereich	1 mm	1 mm	4 mm	0,33 mm	1 mm
	Thorax, Abdomen, Becken	3 mm				
	Untere Extremität	5 mm				
Besondere Eignung		Knochen-segmentierung	Knochen-segmentierung der unteren Extremität	Segmentierung der Weichteile anhand von Schwellwerten	Segmentierung der Weichteile mit Hilfe von Ellipsoiden	Segmentierung der Weichteile mit Hilfe von Ellipsoiden

Tab. 1: Diese Tabelle gibt einen Überblick über die Datensätze des Visible Human Male und Female. Eine genauere Beschreibung findet sich im Text.

Thorax, Abdomen und Becken 3 mm und in den unteren Extremitäten 5 mm. Die Auflösung für die Grauwerte beträgt 12 bit. Diese CT-Datensätze sind besonders gut für die Knochensegmentierung geeignet, da sich der röntgendichte Knochen hier besonders gut abbilden lässt.

Die CT-Daten bieten beide eine Größe von 512×512 Pixeln, doch ist der Weichteilkontrast in den gefrorenen CT-Daten besser dargestellt. Außerdem ist der Schichtabstand beim gefrorenen Datensatz mit 1 mm im ganzen Körper um einiges geringer als der der unteren Extremitäten und des Thorax, Abdomens und Beckens der nicht gefrorenen Daten.

Die MRT-Daten der ungefrorenen Leiche haben eine Bildgröße von 256×256 Pixeln und die Grauwerte werden ebenfalls mit 12 bit dargestellt. Der Schichtabstand dieses Datensatzes beträgt 4 mm. Der Vorteil der MRT-Daten gegenüber den CT-Daten besteht in der besseren Unterscheidung der verschiedenen Weichteile. Dennoch ist die räumliche Auflösung nicht hoch genug, um hieraus die kleinen Strukturen des Beckens, wie z. B. die Samenblase oder die Rektumwand zu segmentieren.

Die anatomischen Schichten haben eine Bildgröße von 2084×1216 Pixeln und sind somit in der Auflösung in der Bildebene den anderen Datensätzen weit überlegen. Die Farben sind mit 24 bit kodiert. Insgesamt hat der weibliche Datensatz aber eine größere Datenmenge, da hier der Schichtabstand 0,33 mm beträgt, während beim *Visible Human Male* ein Schichtabstand von 1,00 mm gewählt wurde. Hieraus ergeben sich für den *Visible Human Female* insgesamt 5189 Schichten, die 40 GB benötigen und für den *Visible Human Male* 1871 Schichten, die 15 GB benötigen. Da mit dieser großen Masse von Daten ein interaktives Arbeiten kaum möglich ist, wurden die Daten auf den für den transrektalen Ultraschall notwendigen Teil beschnitten.

Dies bedeutet, dass lediglich die Schichten genommen werden, die kaudal von dem Beginn des Hüftkopfes liegen und kranial der letzten Ausläufe des *M. sphinkter ani externus*. Bei den Daten des *Visible Human Female* wird außerdem nur jede dritte Schicht ausgewählt, so dass die Schichtanzahl für beide Geschlechter identisch ist. Außerdem wird lediglich ein Bildausschnitt gewählt. Da der Ultraschall den Knochen nicht durchdringen kann, sind die Daten lateral der Beckenschaukeln unnötig und können somit weggeschnitten werden. Es bleibt ein 800×840 Pixel großer Ausschnitt (Abb. 11), der mit den heute üblichen Rechnern gut zu handhaben ist.

2.1.3 Besondere Eigenschaften der Daten

Vor der Segmentierung mit dem Rechner fallen schon bei der bloßen Betrachtung der Datensätze einige besondere Eigenschaften ins Auge.

So wird z. B. schnell klar, dass eine Dreischichtung im Datensatz des *Visible Human Female* nicht zu erkennen sein würde, da der Darm so stark gebläht ist, dass die Darmwand sich sehr dünn darstellt. Hierdurch werden die einzelnen Schichten so dünn, dass sie bei der gegebenen Auflösung nicht mehr sichtbar sind.

Außerdem fällt bei diesem Datensatz an der dorsalen Seite des linken Os coxae ein Knochensporn ins Auge, welcher bis an die Blase heranreicht.

Des Weiteren sind in beiden Datensätzen die kleinen Gefäße nicht besonders gut auszumachen, da viele dieser Gefäße postmortal kollabiert sind.

Diese besonderen Eigenschaften stellen aber nur geringe Normabweichungen dar, die der Segmentierung des Beckens nicht im Wege stehen.

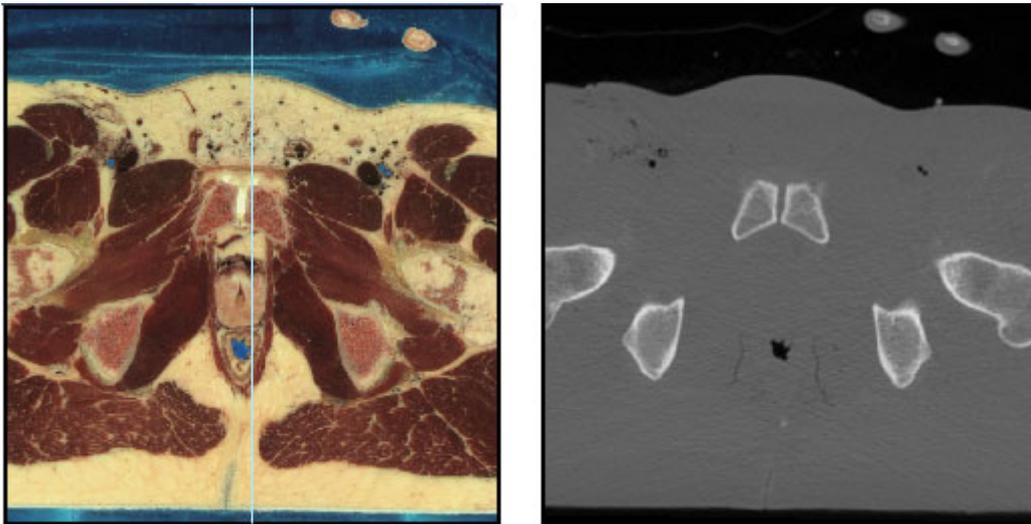


Abb. 11: Diese Abbildung zeigt den Ausschnitt, der aus dem ungefrorenen CT- und dem anatomischen Datensatz verwendet wurde und stellt die beiden Datensätze gegenüber.

2.2. *Der Arbeitsplatz*

Um die anatomischen Schnitte zu segmentieren, wird das Programm *Voxel-Man Autorensystem* (Abb. 12), welches am Institut für Medizinische Informatik entwickelt worden ist, verwendet [Höhne et al., 1990, Höhne et al., 1995]. Dieses Programm bietet eine benutzerfreundliche Oberfläche und ermöglicht die Darstellung der anatomischen Schnittbilder der Visible Human Datensätze. Die Darstellung dieser Bilder kann sowohl dreidimensional als auch zweidimensional erfolgen, wobei bei der zweidimensionalen Variante ein Begutachten der transversalen, sagittalen und coronaren Schichten möglich ist. Durch diese Möglichkeit des parallelen Begutachtens der Schichten können die einzelnen Strukturen gut verfolgt werden und die Segmentierung der Objekte wird vereinfacht.

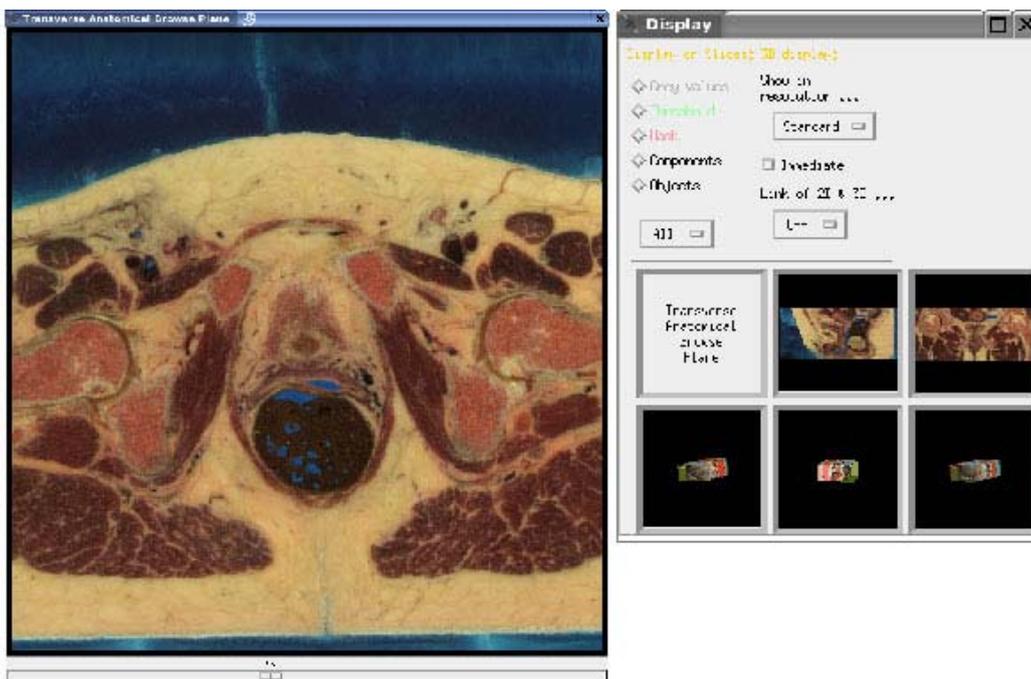


Abb. 12: Startbildschirm des *Voxel-Man-Autorensystems* [Höhne et al., 1990; Höhne et al., 1995] mit den in dieser Arbeit verwendeten Daten des *Visible Human Male*. Diese Benutzeroberfläche stellt den Ausgangspunkt für die Segmentierung dar.

2.3. Die Segmentierung

Die Segmentierung umfasst ein weites Feld, da sie mit unterschiedlichen Hilfsmitteln von Statten gehen kann. Für die Isolierung von einzelnen Strukturen aus CT- und anatomischen Daten sind verschiedene Formen der Segmentierung erforderlich.

2.3.1 Die Segmentierung mit Hilfe von Ellipsoiden

Die Segmentierung mit Hilfe von Ellipsoiden wird für die anatomischen Schnitte verwendet. Ein Ellipsoid ist ein Farbraum, der ein eiförmiges Gebilde in einem dreidimensionalen Raum darstellt. Der dreidimensionale Raum ist der RGB- Farbraum, welcher durch eine rote z-Achse, eine blaue y-Achse und eine grüne x-Achse dargestellt wird [Schiemann et al., 1996].

Jedes Voxel auf den anatomischen Schnitten wird durch einen Anteil an rot, grün und blau dargestellt, so dass jedem Voxel ein Punkt in dem Farbraum zugeteilt werden kann. Um Voxel auf den Schnitten markieren zu können, wird aus diesem Farbraum ein bestimmtes Volumen, das Ellipsoid ausgewählt (Abb. 13). Das Ellipsoid hat sich als die Form erwiesen, welche den Farbraum eines zu segmentierenden Objektes am genauesten umfassen kann [Schiemann et al., 1996]. In diesem Ellipsoid liegen viele Punkte mit verschiedenen RGB-Anteilen. Alle Voxel auf den anatomischen Schnitten, welche dieselben Eigenschaften wie die von einem Punkt in dem Ellipsoid besitzen, werden im dreidimensionalen Raum markiert.

Um ein Ellipsoid zu erlangen, müssen im Datensatz typische Punkte markiert werden. Mindestens vier Punkte sind nötig, um das Ellipsoid zu erhalten [Pommert et al., 2001], da einer den Mittelpunkt und die anderen drei Achsen des Ellipsoids beschreiben und dieses erst hierdurch eindeutig definiert wird. Auch wenn ein Ellipsoid durch vier Punkte eindeutig definiert werden kann, werden am Anfang meist viel mehr Punkte, eine Linie oder Ähnliches gesetzt, um ein Ellipsoid zu erstellen. Hierdurch kann das Organ besser erfasst werden. Es können beliebig viele typische Punkte hinzugefügt werden. Das Ellipsoid wird dann unter Berücksichtigung der vorher gesetzten Punkte neu berechnet und es werden mehr, weniger oder andere Voxel angefärbt.

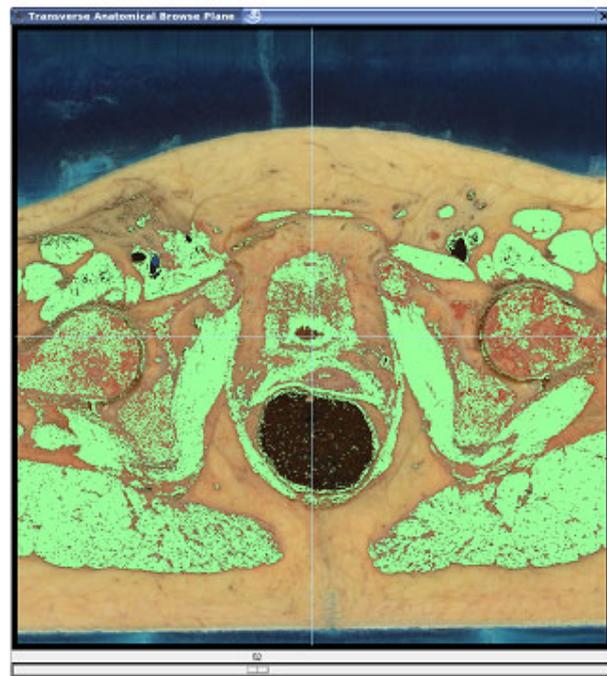
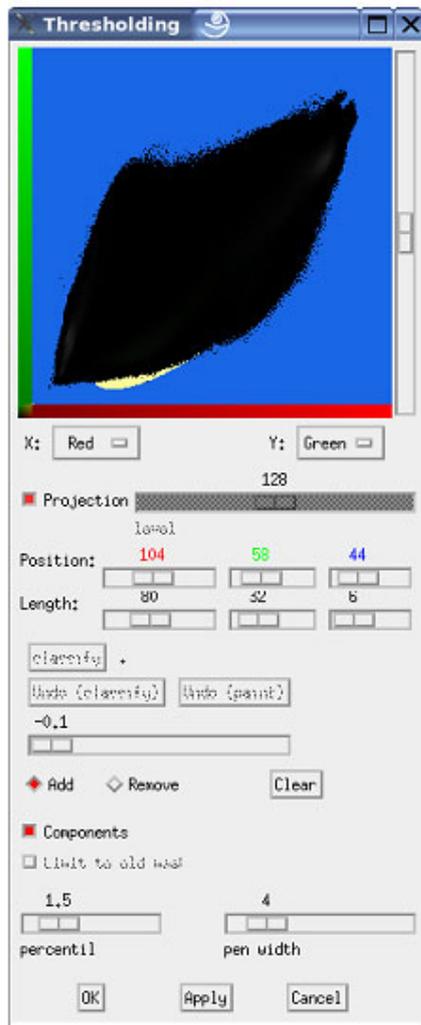


Abb. 13: Die linke Abbildung zeigt, welches Ellipsoid dargestellt wird und ermöglicht das Setzen von Orientierungspunkten in das zu segmentierende Objekt. Auf der rechten Seite ist das Beispiel für die Markierung der Muskulatur mit Hilfe eines Ellipsoides dargestellt.

Diese Prozedur wird so lange oder so oft durchgeführt, bis das Organ so optimal wie möglich markiert ist. Hierbei heißt optimal, dass auf der einen Seite möglichst das komplette Objekt angefärbt ist und keine Löcher oder Ränder mehr sichtbar sind. Auf der anderen Seite heißt optimal auch, dass möglichst wenig andere Strukturen mit markiert werden.

Bei manchen Organen wie z. B. dem Darm oder der Harnblase ist eine optimale Segmentierung mit Hilfe von nur einem Ellipsoid nicht möglich, da die Farben zu sehr von einander abweichen. In diesem Fall werden verschiedene Ellipsoide gewählt. Für das erste Ellipsoid werden z. B. nur in den rot aussehenden Anteil Orientierungspunkte

gesetzt. Erst nach dessen Segmentierung werden auch die blauen Anteile mit Hilfe eines zweiten Ellipsoids segmentiert (Abb. 14).

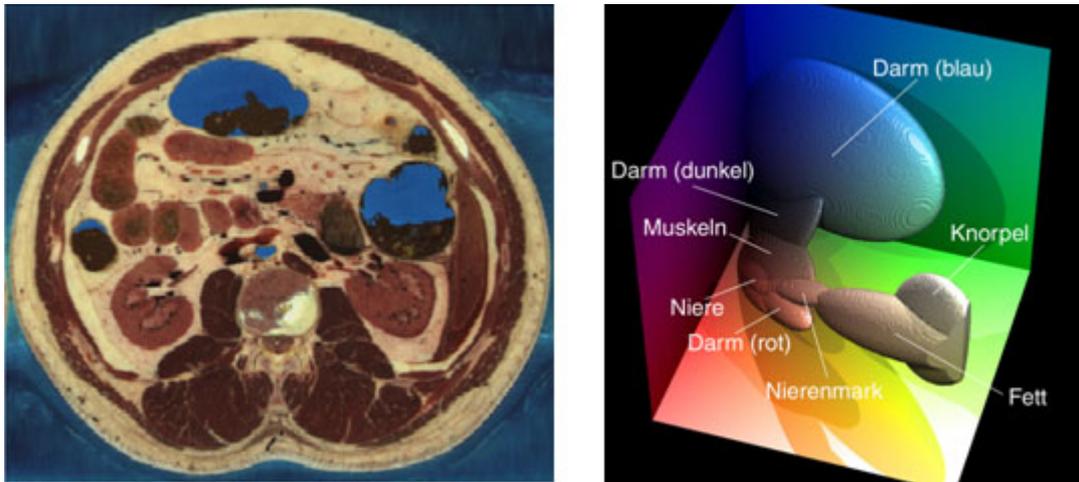


Abb. 14: Gegenüberstellung eines anatomischen Schnittbildes und der dazu passenden Ellipsoide im RGB-Farbraum [Pommert et. al, 2001]. An den Ellipsoiden wird deutlich, dass manchmal nicht ein Ellipsoid wie bei der Muskulatur ausreicht, um ein Organ zu segmentieren, sondern dass mehrere Ellipsoide wie beim Darm benötigt werden, um das Organ im RGB-Farbraum ausreichend zu beschreiben.

2.3.2 Die Segmentierung mit Hilfe von Schwellenwerten

Obwohl mit dieser Art und Weise einige Strukturen gut zu segmentieren sind, ist es schwierig, so den Knochen zu segmentieren. Dieser besitzt sehr unterschiedliche Farben und sieht auf den anatomischen Schnitten dem Fett sehr ähnlich, so dass sich eine Abgrenzung als sehr schwierig erweist. Aus diesem Grund werden die Knochen, wie in der Einleitung erwähnt, aus den ungefrorenen CT-Datensätzen segmentiert. Da in diesen Daten die Voxel nicht aus RGB-Daten bestehen, sondern aus Grauwerten, werden die Knochen mit Hilfe eines Schwellenwertes (Schwellenwertsegmentierung) segmentiert [Höhne und Hanson, 1992, Schiemann et al. 1992].

Auch diese Funktion ist im *Voxel-Man Autorensystem* enthalten. Allerdings muss hier berücksichtigt werden, dass eine gleichzeitige Segmentierung von den CT-Daten und den anatomischen Schnittbildern nicht möglich ist. Dies stellt jedoch kein

schwerwiegendes Hindernis dar, da die bereits segmentierten Objekte in beiden Fällen sichtbar gemacht werden können und auch die anatomischen Schnittbilder, wenn die CT-Daten geladen sind, zu sehen sind. Lediglich eine Segmentierung auf den anatomischen Bildern ist nicht möglich, wenn der CT-Datensatz geladen ist und ebenso ist keine Segmentierung der CT-Daten möglich, wenn der anatomische Datensatz geladen ist.

Die Segmentierung der CT-Daten erfolgt also nach dem Laden der Daten ebenfalls im *Voxel-Man Autorensystem* (Abb. 15), wo sich ein Fenster für die Segmentierung öffnen lässt. In diesem Fenster erscheint ein Histogramm, welches mit Hilfe eines Flächendiagramms die Anzahl der Punkte (y-Achse) mit dem entsprechenden Grauwert (x-Achse) wiedergibt. Auf der Leiste unter dem Histogramm befinden sich zwei Regler, die sich verschieben lassen. Die Grauwerte, welche sich zwischen den beiden Reglern befinden, werden in dem Histogramm und auf den Datensätzen markiert. Der große Vorteil an dem zusätzlich vorhandenem Histogramm besteht darin, dass man bei einer Verschiebung des Reglers weiß, wie viele weitere Strukturen markiert werden würden. Hierdurch kann man einschätzen, ob der Grauwertbereich ohne Bedenken noch ein wenig vergrößert werden könnte, oder ob zu viele weitere Strukturen erfasst werden würden.

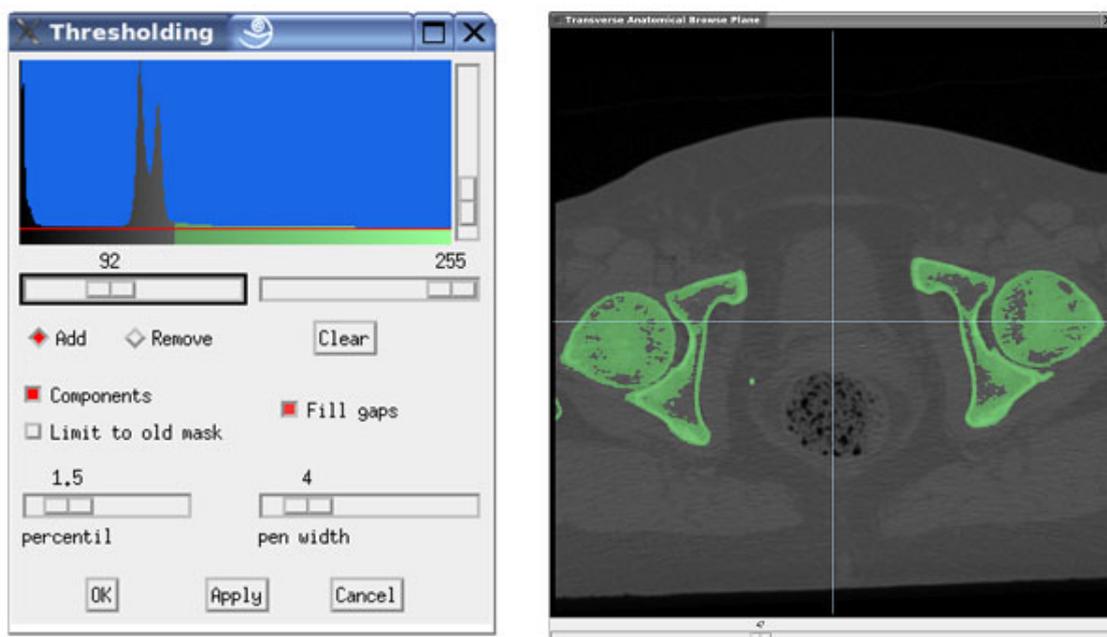


Abb. 15: In der linken Abbildung ist das Menü für die Einstellung des Schwellenwertes zu sehen, während rechts zu sehen ist, welche Strukturen sich bei dem eingestellten Schwellenwertbereich anfärben.

2.3.3 Analyse auf verbundene Komponenten

Obwohl mit Hilfe der beiden Methoden die gewünschten Objekte oft gut markiert werden können, ist es fast unumgänglich, dass andere Strukturen ebenfalls mit markiert werden.

Diese ebenfalls markierten Strukturen können entweder mit dem Objekt, das segmentiert werden soll, im dreidimensionalen Raum zusammenhängen oder von diesem getrennt markiert werden. Ist Letzteres der Fall, ist es einfach, die zu segmentierende Komponente mit Hilfe der Analyse auf verbundene Komponenten von den anderen Strukturen zu isolieren.

Dies ist ein Befehl, der direkt nach der Segmentierung mit Hilfe eines Schwellenwertes oder mit Hilfe eines Ellipsoids durchgeführt werden kann. Das Programm berechnet auf diesen Befehl hin, ob die markierten Komponenten im dreidimensionalen Raum miteinander verbunden sind. Sind sie nicht miteinander verbunden, bekommen die Komponenten unterschiedliche Farben zugeteilt, so dass dann das zu segmentierende Objekt durch die Komponentenauswahl isoliert werden kann.

Häufig ist es aber der Fall, dass mit der Analyse auf verbundene Komponenten zwar nicht erwünschte Objekte abgetrennt werden können, das zu segmentierende Objekt aber noch nicht vollständig isoliert werden kann. Ist dies der Fall, gibt es zwei prinzipielle Möglichkeiten, um das zu segmentierende Objekt von den anderen Objekten zu lösen: Zum einen die morphologischen Operationen und zum anderen die manuelle Trennung.

2.3.4 Morphologische Operationen

Bei den morphologischen Operationen stellt das System die Erosion und die Dilatation zur Verfügung, welche bei der Segmentierung zum Einsatz kommen können [Höhne und Hanson, 1992]. Zuerst werden hierbei die markierten Strukturen erodiert, d. h. die Oberfläche wird abgeschält. Dadurch verlieren nicht nur die Strukturen an sich an Größe, sondern auch die Brücken, welche die Strukturen untereinander verbinden, verschwinden. Hierdurch besteht die Möglichkeit, dass vorher verbundene Objekte getrennt werden.

Da die Objekte nicht im verkleinerten Zustand als segmentiert gelten können, folgt auf die Erosion die Dilatation, welche die Objekte auf die vorherige Größe vergrößert. Brücken die vorher vorhanden sind, aber durch die Erosion verschwinden, werden nicht wieder hergestellt, da Nichts nicht vergrößert werden kann. Somit sind die Komponenten getrennt und nach einer Analyse auf verbundene Komponenten kann das zu segmentierende Objekt isoliert werden.

Ein Nachteil dieser Operationen ist, dass eventuell auch das zu segmentierende Objekt selber nur über kleine Brücken verbunden ist und somit auch Teile von diesem Objekt mit der Erosion verloren gehen können. Es zeigt sich also, dass diese Operationen bei filigranen Objekten, wie z. B. der Samenblase, nicht verwendet werden können. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahren besteht darin, dass Strukturen, die über große Brücken miteinander verbunden sind, wie z. B. die Skelettmuskulatur, nicht ohne erhebliche Verluste am zu segmentierenden Objekt mittels Erosion getrennt werden können. In beiden Fällen bleibt dann nur noch die manuelle Trennung.

2.3.5 Manuelle Trennung

Die manuelle Trennung erfolgt mittels eines virtuellen Pinsels, dessen Größe und Ausdehnung auf den Schichten bestimmt werden kann. Für die Trennung von Objekten kommt nur der zweidimensionale virtuelle Pinsel in Frage, da die Trennungslinie auf jeder Schicht meist etwas anders verläuft. Hieraus folgt, dass die Trennung auf jeder einzelnen Schicht manuell durchgeführt werden muss.

Ein Nachteil dieser Methode besteht darin, dass die manuelle Trennung immer auch auf dem Empfinden des Segmentierenden beruht, welches sich von Schicht zu Schicht etwas ändern kann und wodurch die Trennung nicht unbedingt gleichmäßig von statten geht. Dieser Nachteil macht sich vor allem in der dreidimensionalen Rekonstruktion der Objekte bemerkbar, woraus folgt, dass die manuelle Segmentierung nur angewendet werden sollte, wenn eine Segmentierung mit Hilfe eines Ellipsoids oder eines Schwellenwertes unmöglich ist.

Trotz dieses Nachteils, ist die manuelle Trennung im Beckenbereich oft unvermeidbar, da die Objekte über sehr große Brücken miteinander verbunden sind, wie z. B. die Muskulatur oder zu filigran sind, um sie trennen zu können wie das z. B. bei der oben erwähnten Samenblase der Fall ist.

2.3.6 Die 3D-Visualisierung

Die mit Hilfe von Ellipsoiden, Schwellenwerten oder von Hand segmentierten Objekte können durch ein im *Voxel-Man Autorensystem* enthaltenen Algorithmus dreidimensional dargestellt werden. Zu diesem Zweck existiert eine *Camera*, welche das Objekt in der von dem Benutzer eingestellten Perspektive darstellt.

Zuerst wird die Struktur jedoch in einer von dem System festgelegten Ausgangsposition dargestellt, die für alle Strukturen gleich ist. Das Objekt, welches in der *Camera* dargestellt werden soll, wird von dem Benutzer per Mausklick auf den Schnittbildern ausgewählt.

Nun besteht die Möglichkeit das Objekt zu drehen und zu vergrößern. Auf diese Weise werden Probleme wie Stufen und Absätze zwischen den einzelnen Schichten, welche auf den Schnittbildern nicht zu erkennen sind, deutlich, so dass die Notwendigkeit einer manuellen Nachbearbeitung sichtbar wird. Dies ist besonders bei den von Hand segmentierten Objekten der Fall.

Außerdem hat der Benutzer die Möglichkeit zu entscheiden, ob alle auf den Schnitten zu einem Objekt zugehörigen markierten Pixel dargestellt werden sollen oder nur die Pixel, deren Farbwerte in dem zu dem Objekt gehörigem Ellipsoid liegen. Dass diese beiden Mengen nicht unbedingt immer übereinstimmen, liegt daran, dass dem bei der Segmentierung mit einem Ellipsoid markierten Objekt oft noch einzelne Pixel manuell oder durch die transversale Füllung, welche in *Abschnitt 3.2.7* näher erläutert wird, hinzugefügt werden müssen.

Hierbei sollte aber noch einmal erwähnt werden, dass der Übergang zwischen den einzelnen Schichten mit Verwendung eines Ellipsoides gleichmäßiger ist als die Darstellung ohne Ellipsoid. Folglich wird möglichst mit der Hilfe von Ellipsoiden segmentiert, welche dann bei der dreidimensionalen Darstellung verwendet werden können, um dem Ziel eines Objektes mit einer glatten Oberfläche möglichst nahe zu kommen.

2.4 Die Benennung der segmentierten Objekte

Nachdem die für den transrektalen Ultraschall notwendigen Strukturen segmentiert und für die dreidimensionale Visualisierung optimiert worden sind, müssen die Objekte

noch benannt werden und Zuordnungen der einzelnen Strukturen zu übergeordneten Systemen getroffen werden.

Sowohl die Benennung der Strukturen als auch die Erstellung eines Hierarchiesystems erfolgt nicht im *Voxel-Man Autorensystem* selbst, sondern in einer zu den jeweils aktuell segmentierten Datensätzen zugehörigen Wissensbasis (Abb. 16), welche die Informationen über die segmentierten Objekte speichert [Pommert et al., 1994, Schubert et al., 1993]. Dies bietet den großen Vorteil, dass den Objekten verschiedene Namen zugeordnet werden können. Somit besteht die Möglichkeit, einen englischen, deutschen und lateinischen Namen für die jeweils segmentierte Struktur zu definieren. Der Benutzer kann dadurch beim Aufruf des *Voxel-Man* Programms zwischen den einzelnen Sprachen wählen. Durch das Klicken mit der rechten Maustaste auf das entsprechende Objekt wird der Name sichtbar [Höhne et al., 1996].

Ferner besteht für den Benutzer die Möglichkeit, die Zugehörigkeiten des ausgewählten Objektes zu den übergeordneten Systemen zu betrachten, sofern diese festgelegt sind. Der Benutzer muss hierfür nur die rechte Maustaste gedrückt halten und den Pfeil der Maustaste auf den Pfeil, welcher sich auf dem Namensbutton der angewählten Struktur befindet, bewegen, damit die Beziehungen sichtbar werden.

Für die Benennung der einzelnen Objekte wird auf die *Terminologica Anatomica* (Federative Committee on Anatomical Terminology, 1998) zurückgegriffen, welche weltweit als Referenzmaßstab dient.

2.5 Erzeugung von simulierten Ultraschallbildern

Da nun alle für den transrektalen Ultraschall benötigten Objekte segmentiert, definiert und übergeordneten Systemen zugeordnet sind, kann die Erzeugung der Ultraschallbilder aus den segmentierten Daten beginnen.

Der für die Erzeugung der Ultraschallbilder vorhandene Algorithmus [Bommersheim, 2004] ist in das *Voxel-Man Autorensystem* mit eingebaut, so dass der Aufruf dieser Funktion in dem Programm genügt, um Ultraschallbilder zu erhalten. Allerdings muss hierbei berücksichtigt werden, dass die Helligkeitswerte für die einzelnen Strukturen richtig definiert werden müssen, damit sich ein realitätsgetreues Bild ergibt. Für die meisten Strukturen des Beckens, wie z. B. den Uterus oder die Darmschichtung, sind noch keine Helligkeitswerte vorhanden, so dass in diesen Fällen die Einstellung der

Ultraschallparameter in Zusammenarbeit mit einem im TRUS erfahrenen Gastroenterologen erfolgen muss.

Stimmen nun die Helligkeitswerte mit der Realität überein, können Ultraschallbilder erzeugt werden. Zu diesem Zweck kann man in dem Ultraschallprogramm des *Voxel – Man Autorensystems* die Sonde beliebig platzieren. Es ist selbstverständlich, dass für die Simulation des transrektalen Ultraschalls die Sonde im Darm platziert wird. Nun besteht die Möglichkeit den Ausstrahlwinkel der Sonde zu vergrößern oder zu verkleinern. Für den transrektalen Ultraschall wird ein 360° Grad Winkel eingestellt. Zusätzlich kann die Sonde sowohl in der Längsausrichtung als auch in der Querausrichtung bewegt werden.

Define Generic "Coccyx"	Define Relationship
Abstraction=Special	Type=PartOf
German	Domain="Systemic Anatomy"
Name="Steißbein"	("Pubococcygeus",
Latin	"Iliococcygeus left",
Name="Os coccygis"	"Iliococcygeus right",
End	"Puboprostaticus",
	"Pubovaginalis",
	"Puborectalis")
	"Levator ani"
	End

Abb. 16: Die linke Abbildung zeigt, wie in der Wissensbasis die Objekte mit einem englischen, einem deutschen und einem lateinischen Namen definiert werden, während die rechte Abbildung zeigt wie einzelne Objekte, in diesem Fall die Anteile des *M. levator anis*, einem übergeordnetem Objekt zugeordnet werden können.

2.6 *Intelligente Filme*

Nimmt man die auf diese Art und Weise entstehenden Bilder auf und reiht sie chronologisch aufeinander folgend aneinander, entsteht ein intelligenter Film, welcher beliebig oft abgespielt werden kann. Durch diese Methode erhält man einen Film, der den transrektalen Ultraschall sehr gut simulieren kann.

Der intelligente Film beruht auf der QuickTime VR-Technologie (Apple Computer, Cupertino, CA), welche eine interaktive Exploration dieser vorher erstellten Szene mit zwei Freiheitsgraden gestattet [Pommert et al., 2007]. Diese zwei Freiheitsgrade ermöglichen es dem Benutzer mit der Maus durch den Film zu navigieren.

3 Ergebnisse

Die oben genannten Methoden der Segmentierung haben eine Isolierung der meisten für den transrektalen Ultraschall erforderlichen Strukturen ermöglicht. Nicht segmentiert werden konnten lediglich die Strukturen, die in den Datensätzen nicht zu lokalisieren waren, wie z. B. der Plexus venosus rectalis. Insgesamt waren die Daten des *Visible Human Male* etwas besser zu segmentieren als die des *Visible Human Female*, da zu den Objekten, durch die unterschiedlicheren Farben bedingt, leichter Ellipsoide gefunden werden konnten.

3.1 *Visible Human Male*

Die meisten Strukturen des *Visible Human Male* ließen sich mit Hilfe der Ellipsoide und der manuellen Trennung segmentieren. Die segmentierten Objekte werden im Folgenden näher erläutert.

3.1.1 Die Skelettmuskulatur

Die Skelettmuskulatur spielt in der transrektalen Sonographie eine wichtige Rolle, so dass hier folgende Skelettmuskeln segmentiert werden sollten: *M. sphincter ani internus*, *M. sphincter ani externus*, *M. ischiocavernosus*, *M. transversus perinei profundus* und *superficialis*, *M. obturatorius internus*, *M. obturatorius externus*, *M. gluteus maximus* und der *M. levator ani* mit seinen Anteilen, und zwar dem *M. pubococcygeus*, dem *M. levator prostatae*, dem *M. puborectalis* und dem *M. iliococcygeus*.

Für die Segmentierung der Skelettmuskulatur im niedrig aufgelösten anatomischen Datensatz war bereits ein Ellipsoid vorhanden, welches für die Segmentierung der Skelettmuskulatur für den *VOXEL-MAN 3D-Navigator: Inner Organs* [Höhne et al., 2003] verwendet wurde. Dieses konnte für den hoch aufgelösten anatomischen

Datensatz aus dem Becken übernommen werden, da es optimal passte. Die Skelettmuskeln waren häufig miteinander verbunden, so dass durch die Analyse auf verbundene Komponenten kein einziger Skelettmuskel isoliert werden konnte.

Als relativ einfach gestaltete sich die Trennung des *M. gluteus maximus* von den anderen Skelettmuskeln auf den Schnittbildern, da dieser nur an wenigen Stellen mit anderen Objekten verbunden war. Auch die Segmentierung des *M. iliococcygeus* gestaltete sich als recht einfach, da dieser Skelettmuskel sich gut gegen die anderen abzeichnete und eine Trennung zu den anderen Anteilen des *M. levator ani* (Abb. 17) gut zu erkennen war. Der *M. obturatorius internus* hingegen ließ sich nicht so einfach isolieren, da die dreidimensionalen Verbindungen, die ihn mit den anderen Skelettmuskeln verbanden, oft nur schwer auszumachen waren.

Bei den übrigen Skelettmuskeln erwies es sich als schwierig, diese zu identifizieren und eine Grenze zwischen diesem und dem nächsten festzulegen. Besonders schwer fiel die Abgrenzung des *M. puborectalis* vom *M. sphincter ani externus*, da sich der Übergang in den Daten als fließend darstellte und dieser somit aufgrund von anatomischen Kenntnissen rekonstruiert und mit Hilfe der manuellen Trennung isoliert werden musste. Die *M. transversi perinei profundi* und *superficialis* stellten sich als sehr

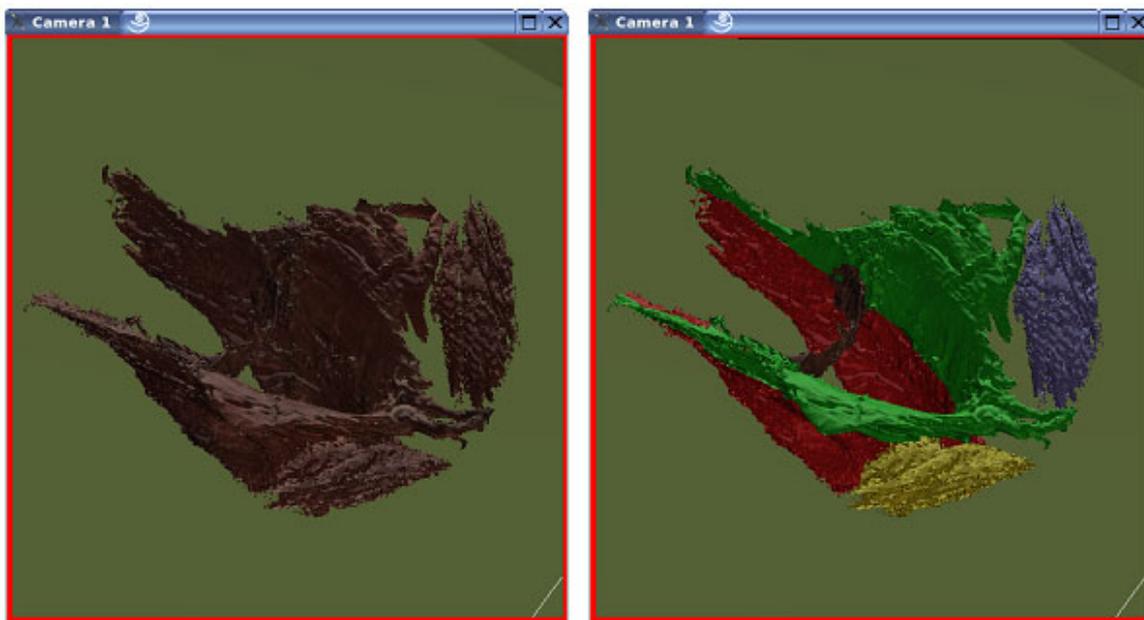


Abb. 17: Die dreidimensionale Darstellung des *M. levator ani*. Die räumliche Vorstellung fällt durch diese Darstellung sehr viel leichter und auch die Unterteilung in die vier Anteile (rot: *M. puborectalis*, grün: *M. pubococcygeus*, braun: *M. puboprostaticus* und violett bzw. gelb: *M. iliococcygeus*) lässt sich durch Färbung leicht erkennbar machen.

schwierig zu identifizierende Objekte heraus. Sucht man diese Skelettmuskeln in einem Atlas, so sind sie immer fein säuberlich durch die *Membrana perinei* getrennt, welche in den Daten des *Visible Human Male* allerdings nicht auszumachen war. Nur im coronaren Schnittbild ließ sich schließlich einer der beiden Skelettmuskeln, der *M. perinei profundus* finden. Somit konnten schließlich alle wesentlichen Skelettmuskeln für den transrektalen Ultraschall segmentiert werden. Allerdings erscheinen diese genau wie im Atlas idealisiert, da im erwachsenen Körper keine Grenzen zwischen den Muskeln definiert sind, bzw. sich die Übergänge zwischen den Muskeln zum Teil sogar überschneiden [Fritsch et al., 2004].

Die dreidimensionale Darstellung fast aller Skelettmuskeln war ohne weiteres möglich, da das Ellipsoid hierfür verwendet wurde und somit ein wirklichkeitsgetreues Bild erzeugt werden konnte. Nur die Sphinkteren waren schwer zu rekonstruieren, da sie sich in den anatomischen Schnittbildern als sehr feine Skelettmuskeln darstellten, die in der dreidimensionalen Visualisierung viele Löcher aufwiesen. Hier konnte trotz Ausbesserung der Löcher keine von Löchern freie dreidimensionale Visualisierung erreicht werden.

3.1.2 Prostata

Auch die *Prostata* stellt ein wichtiges Organ im transrektalen Ultraschall dar, da sie in diesem gut zu beurteilen ist und deshalb der Ultraschall für die geführte Nadelbiopsie der *Prostata* verwendet werden kann [Halpern et al., 2002]. Die *Prostata* war sehr gut durch ein Ellipsoid, welches durch verschiedene typische Punkte, wie in *Abschnitt 3.1.1* beschrieben, auf den Schnittbildern erzeugt wurde, zu markieren. Sie musste nur an wenigen Stellen von dem umgebenden Gewebe getrennt werden, so dass auch hier die dreidimensionale Rekonstruktion ohne große Probleme möglich war (Abb. 18).

3.1.3 Samenblase und Ductus ejaculatorius

In der *Prostata* blieben die *Urethra* und der *Ductus ejaculatorius* von der Markierung durch das Ellipsoid der *Prostata* unberührt. So ließ sich der *Ductus ejaculatorius* durch

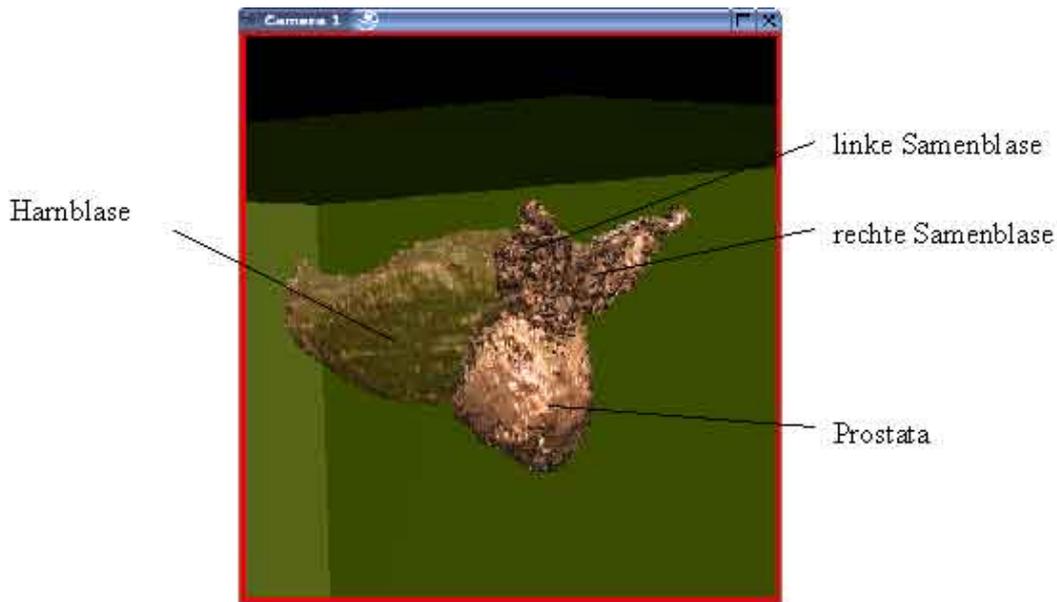


Abb.18: Die dreidimensionale Darstellung der Samenblase und der Prostata im Voxel-Man Autorensystem. Zur Veranschaulichung der Lage im Körper ist auch noch die Harnblase mit dargestellt. Ansicht von schräg dorsal.

ein für ihn spezifisches Ellipsoid und die Analyse auf verbundene Komponenten leicht segmentieren.

Nicht ganz so einfach stellte sich die Segmentierung der *Samenblase* dar, die in den *Ductus ejaculatorius* mündet, da sie, wie man auf den Schnittbildern gut erkennen kann, aus hellen und dunklen Farbanteilen (Abb. 19) bestand. Hieraus folgte, dass zwei Ellipsoide notwendig waren, um die *Samenblase* zu segmentieren. Aufgrund ähnlicher Farbanteile des Fettes und der hellen Anteile der *Samenblase* war es schwierig, ein Ellipsoid zu finden, welches die *Samenblase* mit ihren hellen Anteilen isolierte und nicht das Fett markierte. Die einzige Möglichkeit, diese Anteile zu segmentieren, bestand darin, ein kleines Ellipsoid zu wählen, welches den hellen Anteil nicht vollständig ausfüllte, so dass auf den Schnittbildern zwischen den beiden segmentierten Strukturen der *Samenblase* manchmal noch unsegmentierte Strukturen zu sehen waren. Da dies mit den anatomischen Gegebenheiten nicht übereinstimmte und in den Ultraschallbildern unrealistische Signale geben würde, wurden diese Zwischenräume manuell ausgefüllt.

Weil die Oberfläche der *Samenblase* zum größten Teil durch die hellen Anteile gestaltet wurde, reichte für die dreidimensionale Rekonstruktion dieses Ellipsoid aus. Hierdurch

wurde zwar eine realistische Darstellung möglich, doch werden die dunklen Anteile der Samenblase, welche auf den Schnittbildern markiert wurden, nicht mit dargestellt.

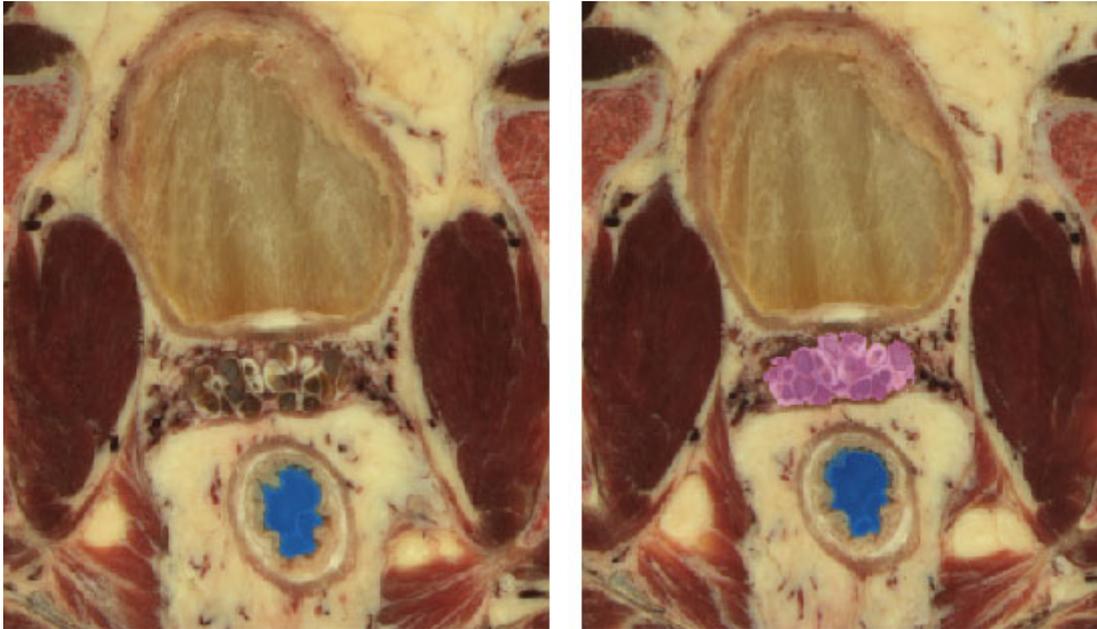


Abb. 19: Die hellen und dunklen Anteile der Samenblase sind in der linken Abbildung sehr deutlich zu erkennen. Um eine Markierung der Samenblase als Ganzes zu erlangen, wie rechts zu sehen ist, mussten die hellen und dunklen Anteile separat segmentiert werden.

3.1.4 Ureter, Harnblase, Urethra

Die *Urethra* war auf den Schnittbildern innerhalb der *Prostata* durch ein eigenes Ellipsoid, wie oben angedeutet, einfach zu segmentieren, da sie keine Verbindung zu anderen Komponenten besaß. Allerdings war das Ellipsoid, welches für den Anteil der *Urethra* innerhalb der *Prostata* verwendet wurde, nicht für die übrige *Urethra* geeignet, da hier zu wenig von der *Urethra* markiert und zu viele umgebende Strukturen mit angefärbt wurden, was an den unterschiedlichen Farbanteilen der beiden Abschnitte der *Urethra* lag.

Das umliegende Gewebe der *Urethra* stellte sich aber unterhalb der *Prostata* für die Segmentierung insgesamt als ungünstig heraus, da es der *Urethra* farblich recht ähnlich war und die *Urethra* somit an vielen Stellen manuell von diesem getrennt werden musste.

Auch bei der *Harnblase* lagen viele Verbindungen zum umliegenden Gewebe vor, die vor allem aus Blutgefäßen, aber auch aus in der Nähe liegender Skelettmuskulatur resultierten. Diese Probleme konnten mit zwei verschiedenen Ellipsoiden minimiert und die Brücken zu den umliegenden Geweben sicher unterbrochen werden, so dass sich die *Harnblase* im Endeffekt relativ gut segmentieren ließ.

Die *Ureteren* stellten sich in dem Datensatz besonders gut dar, so dass eine Segmentierung möglich war, auch wenn diese in Teilen mehr manuell als mit Ellipsoiden erfolgte, da der Farbverlauf der *Ureteren* sehr unterschiedlich war und somit kein Ellipsoid gefunden werden konnte.

Die *Urethra*, die *Harnblase* und die *Ureteren* konnten somit zwar vollständig segmentiert werden (Abb. 20), ließen sich aber durch Verwendung der Ellipsoide in der dreidimensionalen Visualisierung nur als Punktwolken rekonstruieren, so dass in diesem Fall eine Darstellung ohne Ellipsoide bessere Ergebnisse liefert als eine Darstellung mit Ellipsoiden.

Insgesamt lässt sich dieses System nun darstellen, wirkt aber nicht ganz so realistisch wie die Muskulatur oder die *Samenblase*.

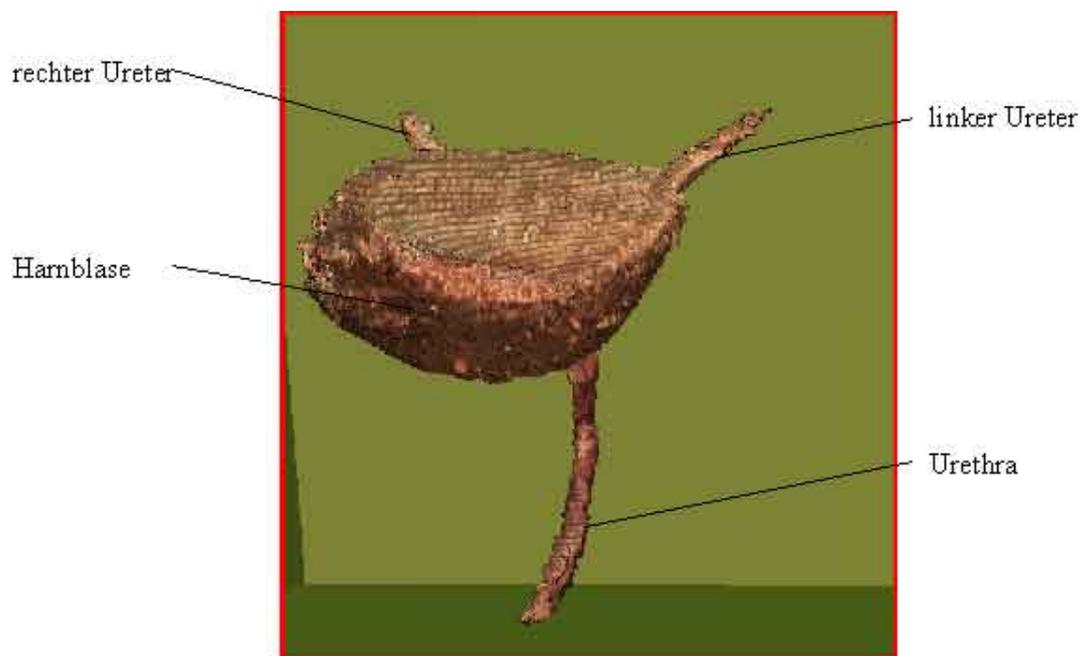


Abb. 20: Die Ureteren, die Harnblase und die Urethra bereitet in der Isolierung auf den Schnittbildern Schwierigkeiten, da eine große Ähnlichkeit zum umgebenden Gewebe bestand. Dies wird vor allem in der dreidimensionalen Darstellung an der Urethra in Form von Absätzen und Stufen deutlich. Ansicht von schräg ventral

3.1.5 Rectum

Eine Struktur, die in jedem transrektalen Ultraschall von großer Bedeutung ist, ist die Darmwandschichtung, da Veränderungen in der Schichtstruktur auf einen malignen Tumor hinweisen können. Von daher ist es von zentraler Bedeutung, dass diese Schichtung segmentiert wird und in der transrektalen Ultraschallsimulation wiedergegeben werden kann. In dem transrektalen Ultraschall stellt sich die Rektumwand in fünf Schichten dar. Diese fünf Schichten sind nur im Ultraschall sichtbar, da sie durch die Interaktionen der vier Darmschichten, also der *Tunica mucosa*, der *Tela submucosa*, der *Tunica muscularis* und der *Tunica serosa* mit der Umgebung zu Stande kommen. Hieraus folgt, dass diese fünf Schichten nicht in den anatomischen Schnitten nachweisbar sind, so dass man sich hier auf die Dreischichtung des Darms, welche im Datensatz des *Visible Human Male* zu sehen ist, beschränken musste (Abb. 21). Die vierte Darmschicht, die *Tunica serosa*, war in den anatomischen Schnitten aufgrund ihrer Ähnlichkeit zum Fett nicht auszumachen.

Sowohl die *Tunica mucosa* als auch die *Tunica muscularis* ließen sich auf den Schnittbildern gut durch mehrere Ellipsoide erfassen und mussten nur an wenigen Stellen ausgebessert oder abgetrennt werden. Eine Ausbesserung war an den Stellen notwendig, an denen kein vollständiger Ring von den Schichten um das *Rektum* gebildet wurde. Nachdem diese beiden Schichten segmentiert worden waren, war es einfach, die *Tela submucosa* mittels Subtraktion zu segmentieren. Zu diesem Zweck wurde alles markiert, um hiervon die *Tunica mukosa* und die *Tunica muscularis* zu subtrahieren.

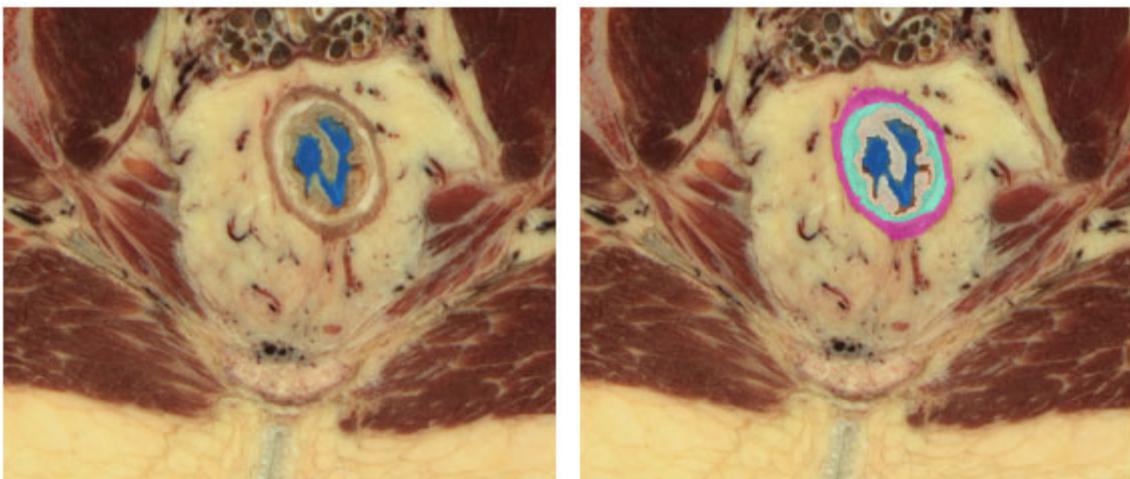


Abb. 21: Die Dreischichtung des Darms in *Tunica mucosa*, *Tela submucosa* und *Tunica muscularis* war bei dem männlichen Datensatz sehr gut zu erkennen (links) und ließ sich folglich auch gut segmentieren (rechts).

Folglich blieb ein Ring, der die *Tela submucosa* darstellte, übrig. Die restlichen Markierungen konnten schnell manuell entfernt werden.

Ähnlich einfach wie die *Tela submucosa* konnte auch das Darmlumen segmentiert werden. Hier wurde die vollständige Darmwand subtrahiert, so dass schon durch die Analyse auf verbundene Komponenten das Darmlumen isoliert werden konnte.

In der dreidimensionalen Visualisierung (Abb. 22) ließ sich eine sehr realistische Darstellung der drei Darmwandschichtungen und des Rektums rekonstruieren, so dass diese Objekte nicht manuell nachbearbeitet werden mussten.



Abb. 22: Die dreidimensionale Darstellung des Darms ist sehr realistisch. Es ließen sich drei durchgehende Schichten segmentieren, welche auch in der dreidimensionalen Darstellung ohne größere Absätze oder Stufen rekonstruiert werden konnten. Hier ist als Beispiel die Darstellung der *Tunica muscularis* des Rektums gewählt.

3.1.6 Der Knochen

Als letzte wichtige Struktur des *Visible Human* Datensatzes wurde der Knochen segmentiert, welcher für den Ultraschall ein besonders wichtiges Organ darstellt, da dieser für den Ultraschall eine natürliche Grenze bildet.

Da sich die Segmentierung aus dem anatomischen Datensatz, wie oben erwähnt, aufgrund der Ähnlichkeit zum umgebenden Fettgewebe und der verschiedenen Farben als besonders schwer und aufwendig erwies, wurden die Knochen aus den CT-Daten mit Hilfe eines Schwellenwertes segmentiert. Auf diese Art und Weise konnten die *Os*

coxae und die beiden *Femora* leicht isoliert werden. Nur an wenigen Stellen stimmte die Lage der CT-Daten nicht vollständig mit der der anatomischen Schnittbilder überein, so dass hier manuell ergänzt oder verkleinert werden musste.

Eine Ausnahme stellten das *Os coccygis* und das *Os sacrum* dar. In beiden Fällen waren die Knochen in den anatomischen und radiologischen Datensätzen stark zueinander verschoben, so dass eine Segmentierung von den CT-Daten nicht möglich war. Die Knochen mussten mit mehreren Ellipsoiden in den anatomischen Datensätzen beschrieben und manuell nachgebessert werden.

Trotz der Probleme lohnte sich die Segmentierung aus den CT-Daten, da auf diese Art zumindest eine realitätsgetreue dreidimensionale Darstellung der *Os coxae* und der *Femora* möglich war (Abb. 23).

Die dreidimensionale Darstellung des *Os coccygis* und des *Os sacrum* hingegen bereitete einige Schwierigkeiten, da in diesen Fällen kein Ellipsoid oder Schwellenwert gefunden werden konnte und somit einige Absätze und Stufen, welche bei der Segmentierung auf den Schnittbildern nicht auffielen, offenbar wurden und nachgebessert werden mussten.



Abb. 23: Der Knochen ließ sich aus den CT-Daten sehr gut isolieren und stellt sich dadurch im dreidimensionalen Bild sehr realistisch dar.

3.2 *Visible Human Female*

Obwohl bei dem *Visible Human Female* die entsprechenden Objekte segmentiert werden sollten, gestaltete sich diese Segmentierung schwerer. Besonders das weibliche Genitalsystem war durch die farblich kaum zu erkennenden Unterschiede z. B. des *Uterus* zu den umgebenden Bändern schwer zu segmentieren.

3.2.1 Die Skelettmuskulatur

Auch beim Datensatz des *Visible Human Female* konnte das vorliegende Ellipsoid für die Skelettmuskulatur genutzt werden. Die Skelettmuskulatur wurde im Ganzen durch dieses Ellipsoid gut angefärbt. Doch tauchte auch hier das Problem auf, dass keiner von den für den transrektalen Ultraschall benötigten Skelettmuskeln isoliert dargestellt war. Weil die Skelettmuskeln über große Brücken miteinander verbunden waren, war auch keine Isolierung mit Hilfe der Dilatation oder der Erosion möglich, so dass diese Skelettmuskeln manuell getrennt werden mussten.

Insgesamt ist die Darstellung der Skelettmuskulatur von daher mit der Darstellung der Skelettmuskulatur des *Visible Human Male* vergleichbar. Der größte Unterschied liegt darin, dass die Skelettmuskulatur des *Visible Human Female* schwächer ausgeprägt zu sein schien. Außerdem war der *M. pubovaginalis*, welcher einen Anteil des *M. levator ani* darstellt, nicht von den anderen Anteilen abzugrenzen, so dass die Segmentierung von diesem Skelettmuskel nicht möglich war. Der vergleichbare Skelettmuskel beim Mann, der *M. puboprostaticus*, konnte hingegen wie in *Abschnitt 3.1.1* beschrieben segmentiert werden.

3.2.2 Uterus, Lig. teres uteri, Lig. cardinale

Der *Uterus*, das *Lig. teres uteri* und das *Lig. cardinale* ließen sich im Gegensatz zu der Muskulatur nicht so einfach durch ein Ellipsoid auf den Schnittbildern beschreiben (Abb. 24). Dies lag zu einem großen Teil daran, dass die drei Strukturen sich in der Farbgebung zu ähnlich waren, um durch ein Ellipsoid getrennt zu werden. Erschwerend

kamen beim *Uterus* noch eine relativ dunkle Außenzone und eine recht helle Innenzone hinzu.

Hieraus folgte, dass zuerst das wichtigste Organ, der *Uterus*, segmentiert wurde. Er wurde mit Hilfe von zwei Ellipsoiden gut markiert, wobei wie oben schon angedeutet vor allem bei dem dunklen Ellipsoid Anteile des *Lig. teres uteri* und des *Lig. cardinale* mit eingefärbt wurden. Die Trennung von diesen Strukturen musste auf den Schnittbildern manuell nach anatomischen Gesichtspunkten erfolgen.

Nachdem der *Uterus* segmentiert worden war, fiel es leichter das *Lig. teres uteri* und das *Lig. cardinale* zu segmentieren. Als ein passendes Ellipsoid für die Strukturen gefunden worden war, wurde der Uterus einfach subtrahiert, so dass nur die Strukturen übrig blieben, die man isolieren wollte.

Nur an wenigen Stellen musste das *Lig. teres uteri* vom Darm oder vom *Lig. cardinale* getrennt werden. Das *Lig. cardinale* seinerseits musste z.T. von der *Vagina* getrennt werden.

Die dreidimensionale Visualisierung zeigte ohne Verwendung der Ellipsoide Kanten, so dass eine Ausbesserung der Strukturen notwendig war. Eine Verwendung der Ellipsoide hätte zu einer unvollständigen Darstellung geführt. Nach der Ausbesserung können die Objekte dem Betrachter eine Vorstellung der Lage und der Form der Organe geben (Abb. 25).

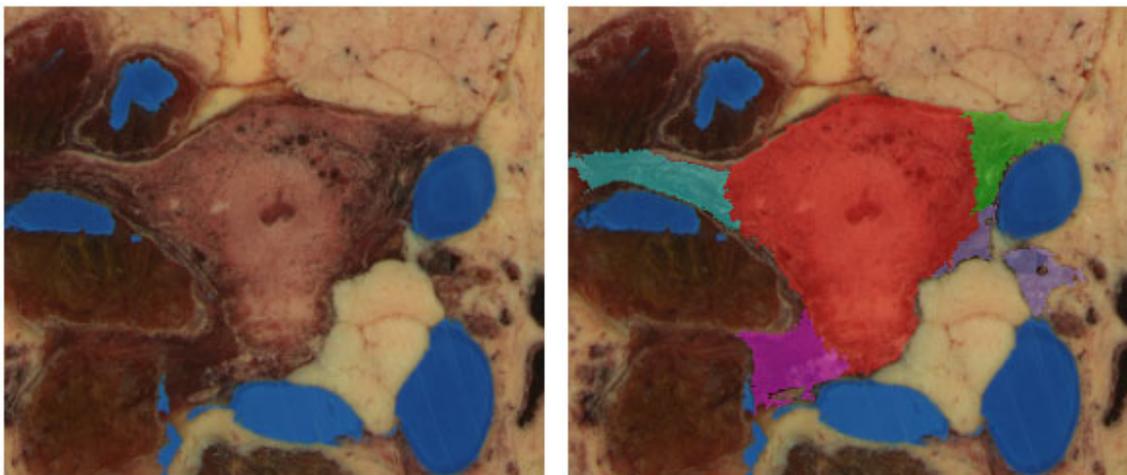


Abb. 24: Die linke Abbildung zeigt den *Uterus* und die ihn befestigenden Bänder. Es wird deutlich, dass eine Trennung dieser Strukturen lediglich nach anatomischen Gesichtspunkten erfolgen kann. Das Ergebnis dieser manuellen Trennung zeigt die Abbildung rechts.

3.2.3 Die Vagina

Die Segmentierung der *Vagina* stellte, ähnlich wie die des *Uterus*, aufgrund der ähnlichen Farbgebung zur Umgebung eine besondere Herausforderung dar. Im oberen Abschnitt war die *Vagina* mittels eines Ellipsoids auf den Schnittbildern nicht vom *Uterus* zu trennen, so dass diese manuell auf den einzelnen Schnitten getrennt werden mussten. Ähnliches lässt sich zum unteren Abschnitt der *Vagina* sagen.

Das umgebende Gewebe auf den Schnittbildern hat soviel Ähnlichkeit mit der *Vagina*, dass es selbst dem Betrachter schwer fiel zu entscheiden, wo das umliegende Gewebe anfängt und die *Vagina* aufhört. Aufgrund dieser Problematik war der untere Teil der *Vagina* nicht mit Hilfe eines Ellipsoids zu segmentieren, so dass in diesem Fall von der manuellen Segmentierung Gebrauch gemacht wurde.

Lediglich der mittlere Teil der *Vagina* ließ sich ausreichend gut durch ein Ellipsoid beschreiben, so dass nur wenige Trennungen vom benachbarten Gewebe notwendig waren.

Dementsprechend gestaltete sich die dreidimensionale Rekonstruktion als schwierig. Ein Ellipsoid konnte für die dreidimensionale Darstellung nicht verwendet werden, so dass es in der Betrachtung einige Stufen und Absätze gab. Um diese zu entfernen waren manuelle Ausbesserungen notwendig. Doch auch diese schafften es nicht vollständig das Objekt zu glätten (Abb. 25).

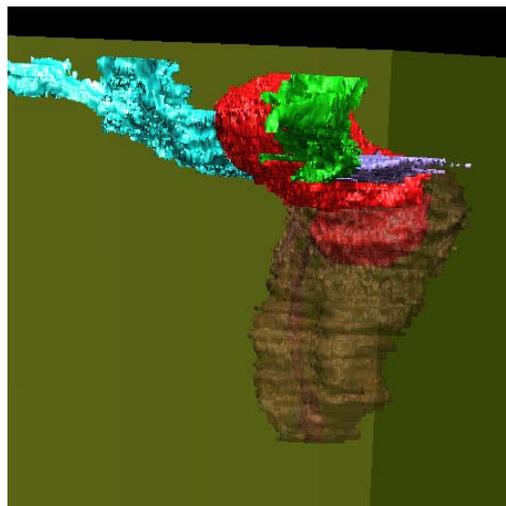


Abb. 25: Diese Abbildung zeigt das weibliche Geschlechtssystem inkl. des *Lig. teres uteri* (grün bzw. türkis) und des *Lig. cardinale* (violett). Trotz der im Text beschriebenen Schwierigkeiten kann diese drehbare Darstellung es erleichtern sich die Organe und Bänder im dreidimensionalen Zusammenhang vorzustellen.

3.2.4 Harnblase, Ureteren und Urethra

Ähnliches galt für die *Urethra*, welche ebenfalls in der unteren Hälfte mittels eines Ellipsoids auf den Schnittbildern nicht ausreichend dargestellt werden konnte, so dass diese manuell segmentiert werden musste. Auch hier war die Ähnlichkeit zum umgebenden Gewebe zu groß und auch hier war die Abgrenzung zu diesem für den Betrachter schwer.

Die obere Hälfte der *Urethra* konnte hingegen durch ein Ellipsoid auf den einzelnen Schichten markiert und leicht von den umgebenden Strukturen isoliert werden.

Die *Harnblase*, welche sich in die *Urethra* fortsetzt, konnte durch ein Ellipsoid im zweidimensionalen Raum gut beschrieben werden und es bestanden bis auf zur *Urethra* und zu den *Ureteren* keine Verbindungen zu umliegenden Strukturen. So konnte die *Harnblase* leicht isoliert werden. Die *Ureteren* waren in dem anatomischen Datensatz gut zu erkennen und zu segmentieren. Streckenweise konnten die *Ureteren* durch ein Ellipsoid sehr gut auf den Schnitten markiert werden, teilweise musste aber auch noch manuell etwas ergänzt bzw. abgetrennt werden. Eine Trennung zu umliegenden Strukturen musste nur zu den Gefäßen hin stattfinden, die im oberen Bereich eine ähnliche Farbgebung hatten. Insgesamt ließen sich die *Ureteren* aber inklusive des Übergangs zur *Harnblase*, der durch manuelle Segmentierung erfolgte, gut segmentieren.

Die Ureteren, die Harnblase und die Urethra mussten trotz der Schwierigkeiten, die die Segmentierung bereitete, in der dreidimensionalen Visualisierung kaum manuell verbessert werden und ließen sich gut darstellen (Abb. 26).

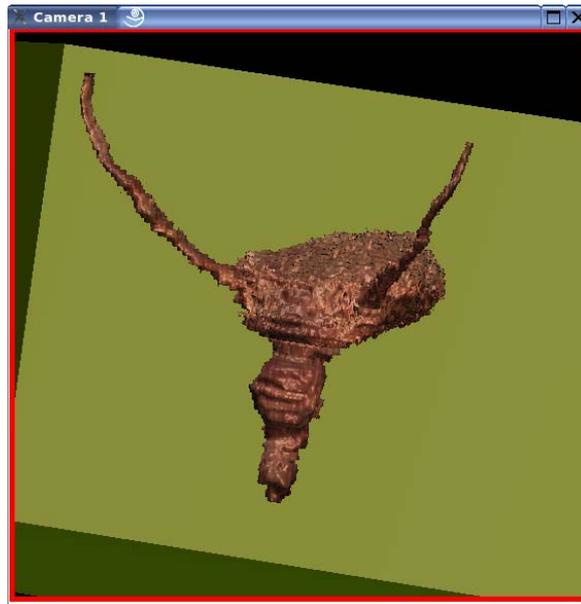


Abb. 26: Die Ureteren, die Harnblase und die Urethra ließen sich dreidimensional realistisch darstellen. Vor allem die Darstellung der Ureteren gelang gut.

3.2.5 Gefäße

Auch wenn gerade im oberen Teil des Beckens in der Nähe der *Ureteren* Gefäße sichtbar waren, so konnten auch in diesem Datensatz, die für den transrektalen Ultraschall wichtigen Gefäße nicht ausfindig gemacht werden, so dass auch in diesem Fall die Gefäße nicht segmentiert werden konnten.

3.2.6 Rectum

Ähnliches gilt auch für die Rectumwand, deren Schichtung im *Visible Human Female* aufgrund einer sehr starken Dehnung des Rectums und einer somit extrem dünnen Rektumwand nicht erkennbar war (Abb. 27).

Da die Schichtung der Darmwand aber zu einem der wichtigsten Punkte in der Darstellung der transrektalen Sonographie gehört, musste diese, obwohl sie nicht sichtbar vorhanden war, realisiert werden.

Die Segmentierung erfolgte, indem zuerst das Darmlumen isoliert wurde. Dies gestaltete sich als relativ einfach, da das Darmlumen sich von den umgebenden

Strukturen in den Schnittbildern gut abzeichnete. Nachdem das Darmlumen segmentiert worden war, wurde es zweifach dilatiert, um dann von dem dilatierten Darmlumen das normale Darmlumen zu subtrahieren. Hierdurch bekam man einen Kreis, der das Darmlumen umschloss und durchgängig war, so wie die Schichten der Darmwand. Eine weitere zweifache Dilatation dieser Wand für die *Tela submukosa* und *Tunica muscularis* führte dazu, dass die äußerste Wand über die im anatomischen Schnitt sichtbare Grenze hinausragte, so dass auch der Versuch einer einfachen Dilatation unternommen wurde. Dies führte dazu, dass die Darmschichten an manchen Stellen nicht durchgängig waren, was den anatomischen Gegebenheiten widerspricht.

Im Endeffekt musste daher die zuerst erhaltene Schicht zweifach dilatiert werden, um dann die zuerst erhaltene Schicht wieder zu subtrahieren. Hierdurch entstanden drei Schichten: Die erste Schicht, die mit Hilfe der Dilatation zur *Tela submucosa* wurde, und die zweite und dritte Schicht, die durch Dilatation der *Tela submucosa* innen zur *Tunica mucosa* und außen zur *Tunica muscularis* wurden.

Die dreidimensionale Visualisierung stellte trotz der nicht vorhandenen Ellipsoide keine Schwierigkeit dar, da die Dilatation im dreidimensionalen Raum geschieht und dadurch eine glatte Oberfläche entstand.

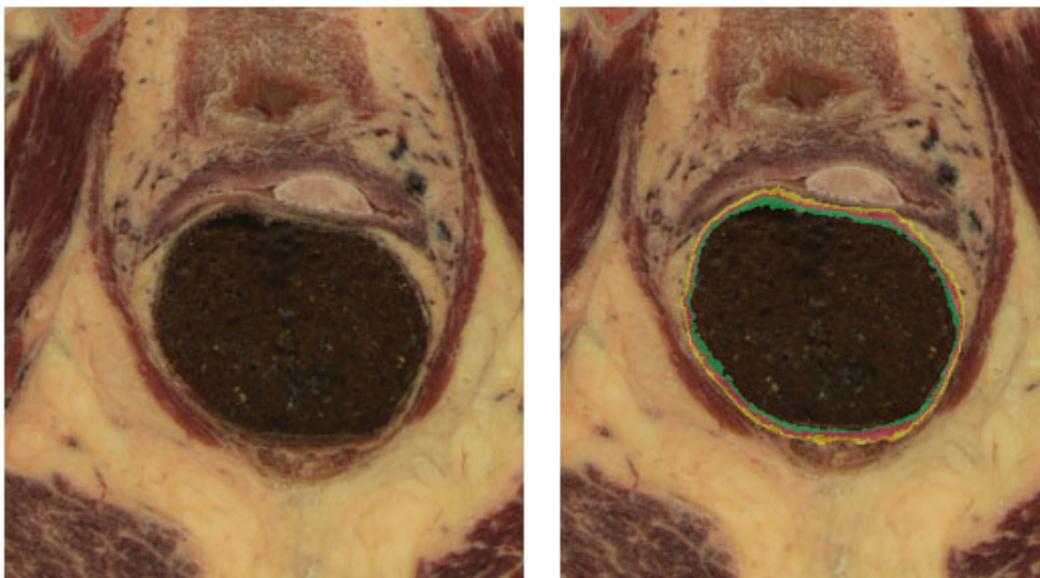


Abb. 27: Die linke Abbildung zeigt den stark aufgeblähten Darm des weiblichen Datensatzes. Aufgrund der starken Blähung ist keine Darmschichtung auszumachen, so dass diese mit Hilfe der Operationen Erosion und Dilatation erzeugt worden ist. Das Ergebnis zeigt die rechte Abbildung.

3.2.7 Knochen

Der Knochen wurde genau wie beim *Visible Human Male* von den CT-Daten der ungefrorenen Leiche segmentiert. Auch in diesem Fall konnten die *Os coxae* und die *Femora* ohne weiteres segmentiert werden und in der dreidimensionalen Visualisierung realitätsgetreu rekonstruiert werden. Allerdings konnte an der Innenseite des linken *Os coxae* ein Knochensporn, der bis an die Blasenwand heranragt, ausgemacht werden. Dieser Knochensporn wurde auch an anderer Stelle schon beschrieben [Bajka et al., 2004].

Das *Os coccygis* und das *Os sacrum* hingegen wiesen leichte Abweichungen in der Lage auf, was in den Schnittbildern gut zu erkennen war. Diese waren allerdings nicht ganz so ausgeprägt wie beim *Visible Human Male* Datensatz, so dass die CT-Daten als Grundlage genutzt werden konnten. Eine dreidimensionale Darstellung mit Verwendung des Schwellenwertes führte jedoch nicht zu befriedigenden Ergebnissen, so dass kein Schwellenwert oder Ellipsoid verwendet werden konnte. Ohne Verwendung eines Ellipsoids oder Schwellenwertes führt die Segmentierung zu einer Darstellung, die nach manueller Ausbesserung einigermaßen realitätsgetreu anmutet (Abb. 28).



Abb. 28: Diese Abbildung zeigt, dass die Segmentierung der Knochen auch beim weiblichen Datensatz von den CT-Daten sehr realistisch wirkt.

3.2.8 Weitere segmentierte Strukturen

Um auch in der dreidimensionalen Darstellung eine reale Außenansicht darstellen zu können, wurde in beiden Datensätzen auf den Schnittbildern die Haut isoliert. Hierfür wurde der ganze Körper markiert und die schon definierten Objekte subtrahiert. Um nur die Haut zu erfassen, wurde eine Analyse auf verbundene Komponenten durchgeführt. Danach konnte die Haut problemlos isoliert werden.

Des Weiteren gab es für beide Datensätze Grundsätze, die in der Segmentierung für den transrektalen Ultraschall zu berücksichtigen waren. Besonders wichtig war es, dass jedes Pixel auf den Schnittbildern, der später im simulierten transrektalen Ultraschall dargestellt werden soll, definiert wurde. Hierfür musste zum einen jedes segmentierte Objekt, sofern es in seinem Inneren noch Löcher aufwies, durch eine Operation transversal gefüllt werden und zum anderen musste jedes Pixel, welches durch die vorherige Segmentierung keinem Objekt zugeordnet worden war, einem Objekt zugeordnet werden. In der Regel wurden diese Pixel dem Fett zugerechnet. Das Fett wurde in beiden Datensätzen mit als Letztes segmentiert, indem ein Ellipsoid für das Fett bestimmt wurde und dieses transversal gefüllt wurde. Von dem sich ergebenden Objekt wurden die vorhandenen Objekte subtrahiert.

Um wirklich jedes Pixel zu definieren, wurden zum Abschluss zur Kontrolle noch einmal alle definierten Objekte ausgewählt und von diesen das Komplement markiert. Hierdurch wurde deutlich, wo noch nicht definierte Pixel lagen. Diese wurden, da sie augenscheinlich nicht zum Fett gehören, einem unklassifizierten Objekt zugeordnet.

Eine Zusammenfassung über alle segmentierten Objekte gibt Tab. 2.

<u>Segmentierte Strukturen des Visible Human Male und Female</u>		
Terminologica anatomica	Englisch	Deutsch
Bulbus penis	Bulb of penis	
Bulbus vestibule dextrum	Bulb of vestibule right	
Bulbus vestibule sinistrum	Bulb of vestibule left	
Corpus cavernosum penis dextrum	Corpus cavernosum penis right	
Corpus cavernosum penis sinistrum	Corpus cavernosum penis left	

Ductus ejaculatorius	Ejaculatory duct	
Endometrium	Endometrium	
Femur dextrum	Femur right	Oberschenkelknochen rechts
Femur sinistrum	Femur left	Oberschenkelknochen links
Glandula seminalis	Seminal gland	Samenblase
Ileum	Ileum	Krummdarm
Lig. teres uteri dextrum	Round ligament of uterus right	
Lig. teres uteri sinistrum	Round ligament of uterus left	
Lig. cardinale dextrum	Lig. cardinale right	
Lig. cardinale sinistrum	Lig. cardinale left	
Lumen	Lumen	
Lumen der Vagina	Lumen der Vagina	
M. bulbospongiosus	Bulbospongiosus	
M. gluteus maximus dextrum	Gluteus maximus right	
M. gluteus maximus sinistrum	Gluteus maximus left	
M. gluteus medius dextrum	Gluteus medius right	
M. gluteus medius sinistrum	Gluteus medius left	
M. iliococcygeus dextrum	Iliococcygeus right	
M. iliococcygeus sinistrum	Iliococcygeus left	
M. ischiocavernosus dextrum	Ischiocavernosus right	
M. ischiocavernosus sinistrum	Ischiocavernosus left	
M. obturatorius externus dextrum	Obturator externus right	
M. obturatorius externus sinistrum	Obturator externus left	
M. obturatorius internus dextrum	Obturator internus right	
M. obturatorius internus sinistrum	Obturator internus left	
M. pubococcygeus	Pubococcygeus	
M. puboprostaticus	Puboprostaticus	
M. puborectalis	Puborectalis	
M. rectus abdominis	Rectus abdominis	
M. transversus perinei dextrum (profundus et superficialis)	Transversus perinei right (deep and superficial)	
M. transversus perinei sinistrum (profundus et superficialis)	Transversus perinei left (deep and superficial)	
M. spincter ani externus	External anal spincter	
M. spincter ani internus	Internal anal spincter	
Os coccygis	Coccyx	Steißbein

Os coxae dextrum	Hip bone right	Beckenschaufel rechts
Os coxae sinistrum	Hip bone left	Beckenschaufel links
Os sacrum	Sacrum	Kreuzbein
Plexus prostaticus	Prostatic plexus	
Prostata	Prostate	Vorstehdrüse
Skin	Skin	Haut
Symphysis pubica	Pubic symphyses	Symphyse
Tela submucosa	Submucosa	
Tunica mucosa	Mucosa	
Tunica muscularis	Muscular layer	
Ureter dextrum	Ureter right	Harnleiter rechts
Ureter sinistrum	Ureter left	Harnleiter links
Urethra masculina	Male urethra	Harnröhre
Urethra feminina	Female urethra	Harnröhre
Uterus	Uterus	Gebärmutter
Vagina	Vagina	Vagina
Vesica urinaria	Urinary bladder	Harnblase
Visceral fat	Visceral fat	Eingeweidefett

Tab. 2: Ein Überblick über alle segmentierten Strukturen in den Datensätzen des Visible Human Male und Female.

3.3 Die Ultraschallbilder

Den in Tab. 2 genannten segmentierten Strukturen wurden Ultraschallparameter zugeordnet. Es gibt vier Parameter, die das Aussehen der Strukturen im simulierten Ultraschall charakterisieren. Hierzu gehören die Dichte, die Helligkeit, der Dämpfungskoeffizient und die Geschwindigkeit, mit der der Ultraschall auf das Objekt trifft (Tab. 3). Mit Hilfe dieser drei Parameter gelang es die Strukturen in der Ultraschallsimulation optimal darzustellen (Abb. 29) und somit z. B. auch die Auslöschung des Ultraschalls durch den Knochen zu verdeutlichen.

Ein weiterer Vorteil war, dass die vorher erwähnten Absätze und Sprünge, die bei der dreidimensionalen Visualisierung aufgetreten waren, in der Ultraschallsimulation nicht zu sehen waren, da es sich um transversale Schnittbilder handelte.

<u>Die Ultraschallparameter am Beispiel der segmentierten Strukturen des Mannes</u>				
	phase velocity	mass density	damping coefficient	brightness
Bulbus penis	1476	0.928	0.5	0.8

Corpus cavernosum penis dextrum	1480	1.058	2	0.8
Corpus cavernosum penis sinistrum				
Ductus ejaculatorius	1540	1.081	0.00005	0
Femur dextrum	20	10	50	2
Femur sinistrum				
Glandula seminalis	1568	0.958	0.75	0.4
Ileum	1570	0.9921	0.5	0.78
Lumen	1540	0.928	0	0
Musculi	1570	0.9921	0.5	0.5
M. spincter ani externus masculinus	1570	0.9921	0.5	0.7
M. spincter ani internus masculinus	1570	0.9921	0.5	0.3
Os coccygis	1569	0.9982	0.8	0.5
Os coxae dextrum	20	10	50	2
Os coxae sinistrum				
Os sacrum	1500	3	15	1.3
Plexus prostaticus	1500	1.302	0.45	0.55
Prostata	1500	1.052	0.2	0.7
Skin	1569	1.0562	0.8	0.75
Symphysis pubica	1569	0.9982	0.8	0.5
Tela submucosa	1576	0.8	0	1.0
Tunica mucosa	1568	1.058	0	0.1
Tunica muscularis	1570	0.9921	0.5	0.1
Ureter dextrum	1568	1.058	2	0.2
Ureter sinistrum				
Urethra masculina	1568	1.058	2	0.2
Vesica urinaria	3000	0	0.5	0
Visceral fat	1000	5.928	0.5	0.9

Tab. 3: Beispiele der Einstellungen der Ultraschallparameter anhand des männlichen Datensatzes.

Nicht ganz so realitätsgetreu mutete die scharfe Abgrenzung der einzelnen Strukturen gegenüber der Umgebung an, da kein Ultraschallgerät eine so scharfe Abgrenzung ermöglicht (Abb. 30). Dies mag für den geübten Ultraschalluntersucher vielleicht ein Nachteil sein, ist für den Ungeübten jedoch von Vorteil, da er hierdurch eine präzisere Vorstellung der einzelnen Strukturen erhalten und diese später in die oft nicht ganz so scharf begrenzten Umrisse des reales Ultraschallbild übertragen kann.

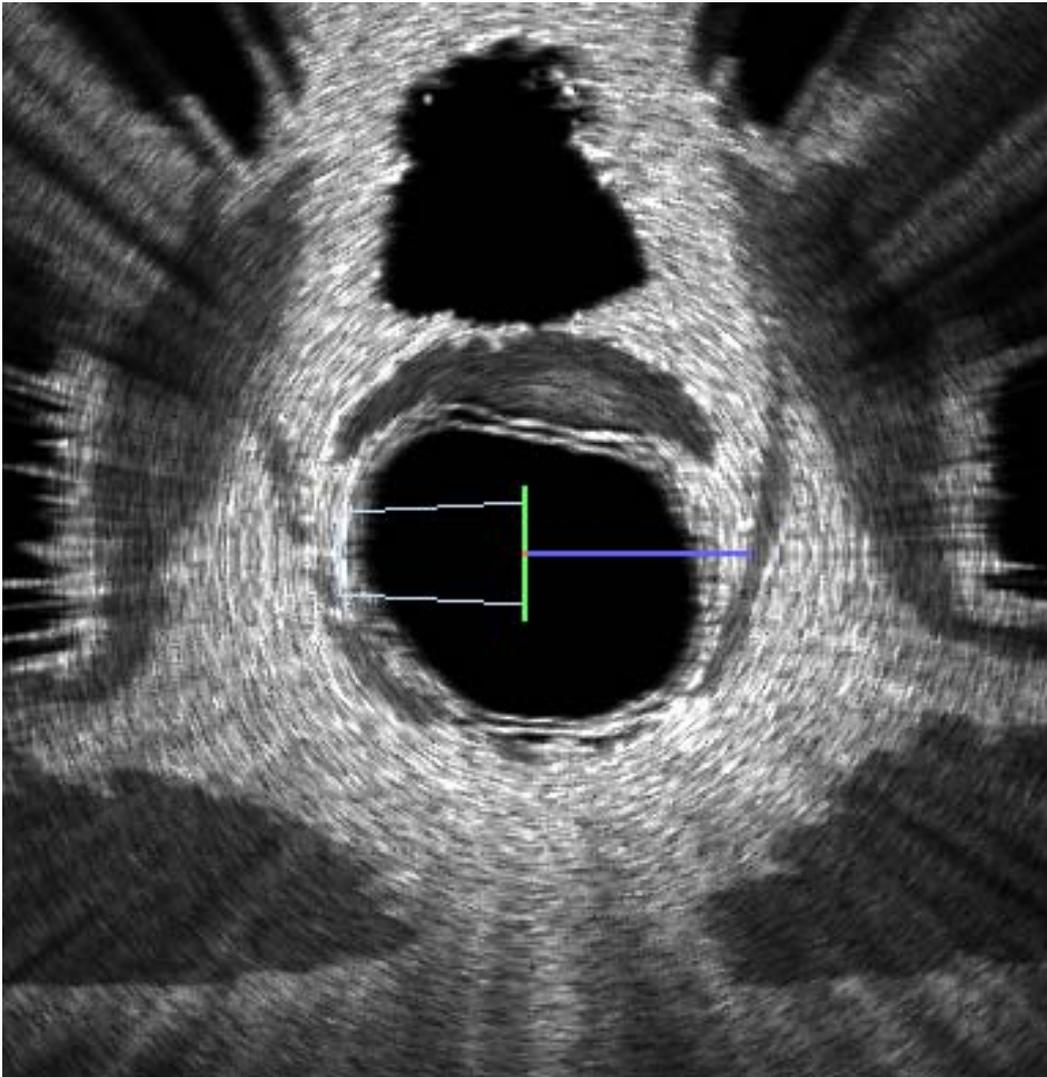


Abb. 29: Diese Abbildung zeigt ein simuliertes Ultraschallbild aus dem Becken der Frau. Die Helligkeitswerte der einzelnen Strukturen entsprechen denen der Objekte beim realen Ultraschall. In der Mitte sieht man den Ultraschallkopf, mit dessen Hilfe der Blickwinkel und die Position eingestellt werden kann

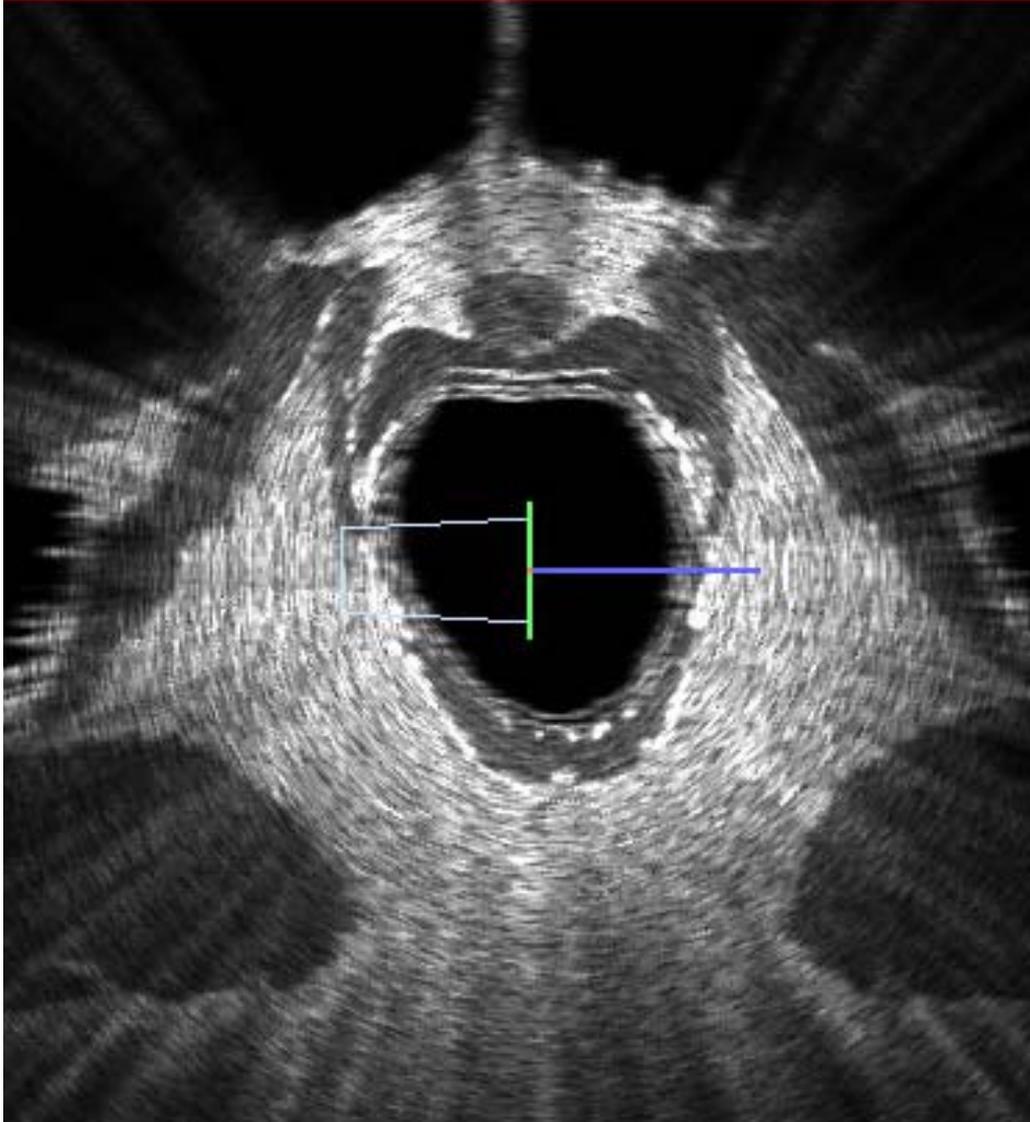


Abb. 30: Die Abgrenzung der einzelnen Strukturen wirkt sehr scharf und ist in dieser Deutlichkeit nicht im realen TRUS zu sehen. Allerdings wird dem Ungeübten hierdurch das Erlernen der Lage und die Abgrenzung gegenüber den anderen Organen erleichtert.

4 Anwendung

Für den Lernenden ergeben sich durch diese in *Abschnitt 3.3* beschriebenen Ultraschallbilder des Beckens viele Vorteile. So hat er die Möglichkeit, sich diese Bilder am Computer immer wieder zu vergegenwärtigen und sich hierdurch die Ultraschalleigenschaften der einzelnen Objekte und Strukturen einzuprägen.

Ein besonderer Vorteil ist dadurch gegeben, dass die einzelnen Bezeichnungen der Strukturen per Mausklick abrufbar sind und somit eine falsche Zuordnung unmöglich wird (Abb. 31). Also bietet sich auch die Möglichkeit, das anatomische Wissen an diesen Ultraschallbildern zu überprüfen.

Um den Bezug zur Schnittbildanatomie herzustellen und um das Verständnis für die Lage der Sonde sicherzustellen, besteht die Möglichkeit sich die Ultraschallbilder parallel mit den anatomischen Schnittbildern anzuschauen und diese miteinander zu vergleichen (Abb. 32). Der Vergleich gestaltet sich in diesem Fall als besonders einfach, da die Ultraschallbilder aus den anatomischen Schnittbildern gewonnen wurden und somit eine hundertprozentige Übereinstimmung gewährleistet ist.

Diese Ultraschallsimulation ermöglicht somit zum Einen das Erkennen der großen Strukturen, wie z. B. der Harnblase oder des Knochens; zum Andern werden aber auch die kleineren Strukturen, wie die Samenblase oder die Darmschichtung in den Ultraschallbildern sehr deutlich dargestellt und geben dem Lernenden hierdurch ein Gefühl für die Größe und Lage dieser Objekte.

Für den Lernenden bedeutet dies, dass er die in der Simulation erlernte Anatomie und die Helligkeitswerte der Strukturen leicht auf die echten Ultraschalldaten übertragen kann und somit ein Erkennen der einzelnen Strukturen erleichtert wird (Abb. 33).

Diese Ultraschallbilder sind allerdings für den Lernenden in der Handhabung noch etwas schwierig, da das Betrachten der einzelnen Bilder den Umgang mit dem *Voxel-Man Autorensystem* voraussetzt. Doch selbst wenn der Umgang mit diesem Programm vertraut ist, ist es von vielen Computern aus nicht nutzbar, da es auf dem Betriebssystem Linux läuft und nur die wenigsten Computer dieses Betriebssystem nutzen. Ferner handelt es sich nur um Standbilder, die noch nicht die eigentliche Simulation des transrektalen Ultraschalls darstellen, auch wenn sie sehr gute Einblicke in diesen ermöglichen.

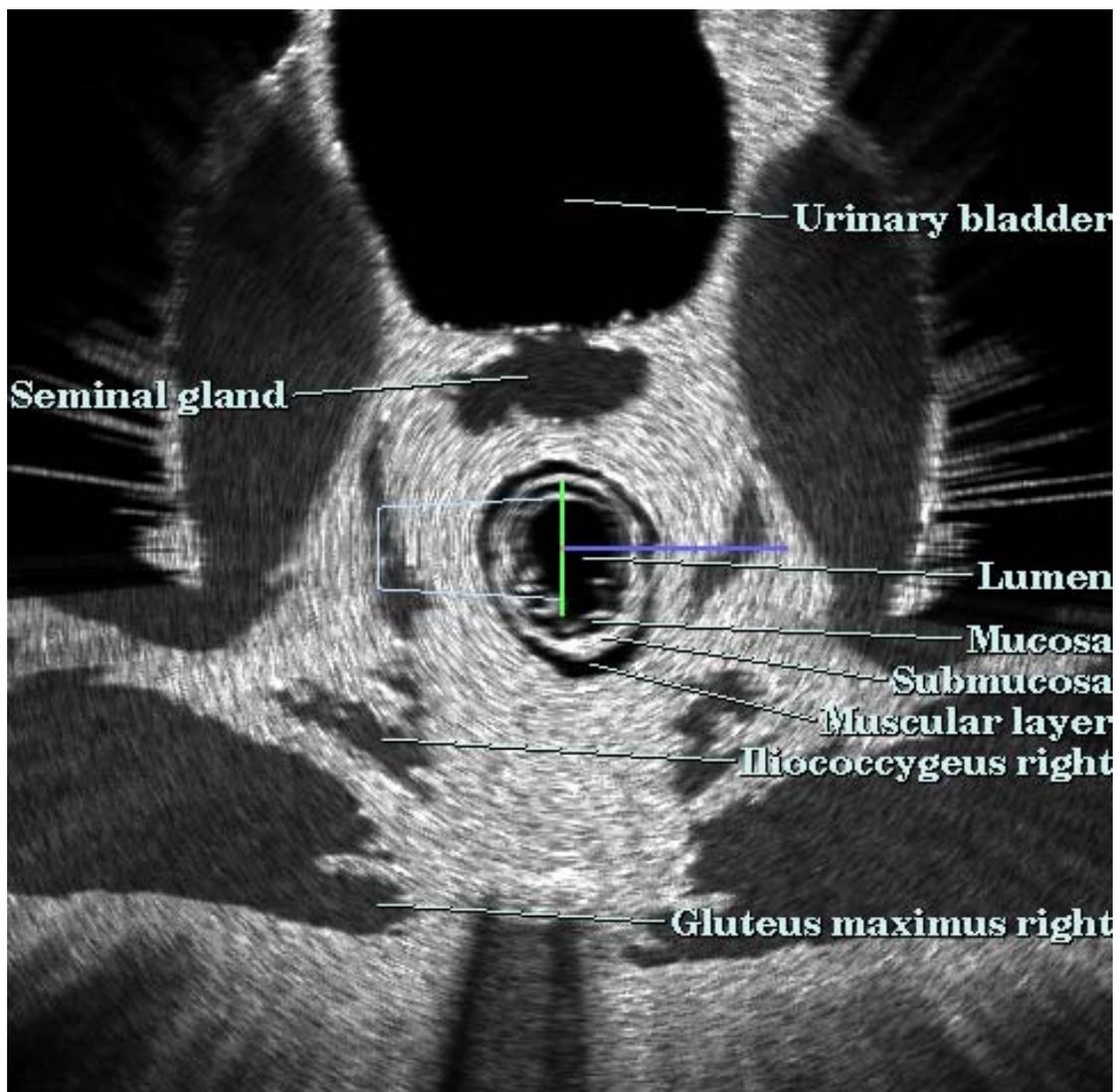


Abb. 31: Zwei große Vorteile der Ultraschallsimulation werden an diesem Bild sichtbar: Erstens sind nicht nur die großen Objekte wie die Harnblase zu sehen, sondern auch die kleineren Strukturen wie z. B. die Samenblase sind gut zu erkennen. Zweitens verdeutlicht es die Möglichkeit der automatischen Beschriftung der einzelnen Strukturen per Mausklick, wodurch eine falsche Zuordnung unmöglich wird.

Aus diesen Gründen sollen die Ergebnisse dieser Arbeit in Anlehnung an das Programm *EUS meets Voxel-Man* [Burmester et al. 2004] zu einem neuen Programm zusammengefasst werden. Zu diesem Zweck werden die einzelnen Ultraschallbilder in einer Bildersequenz nacheinander abgespielt, so dass sich ein Film ergibt, der von einem erfahrenen Gastroenterologen kommentiert wird.

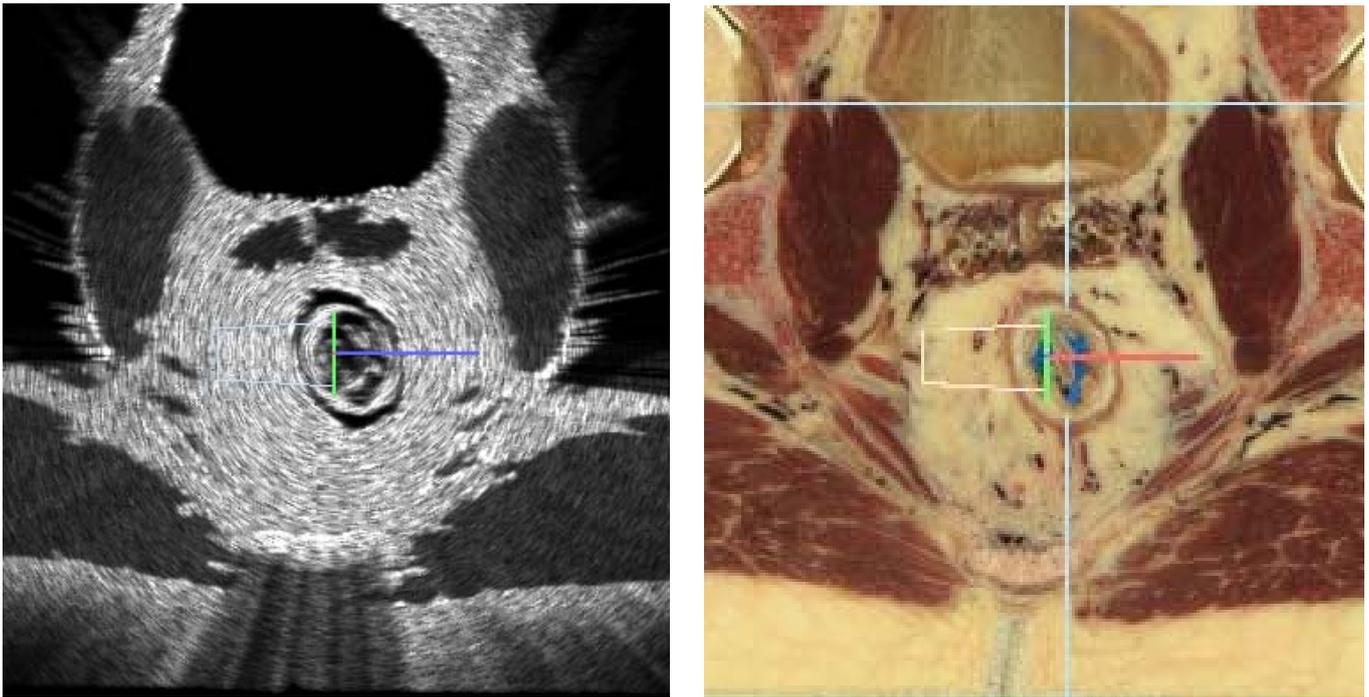
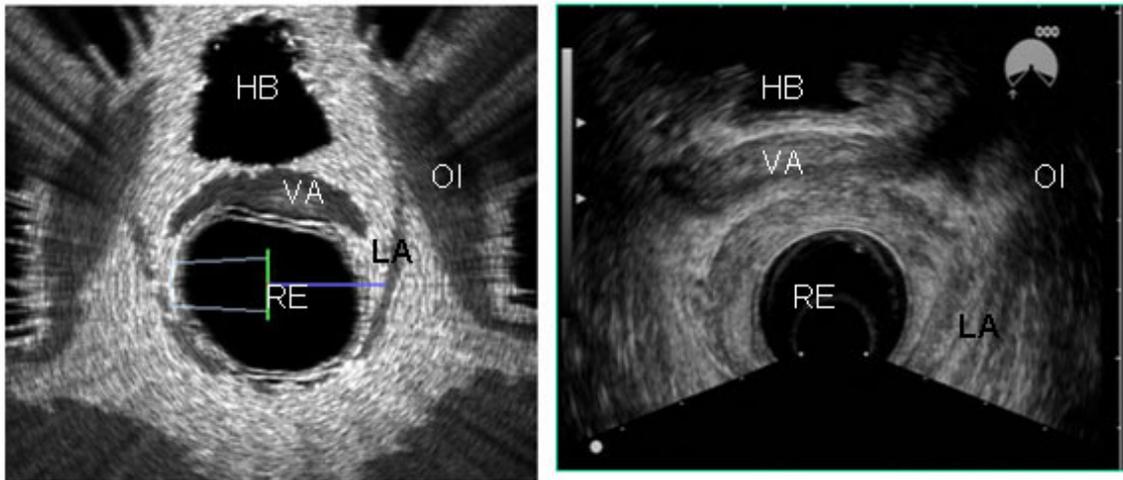


Abb. 32: Die Simulation des transrektalen Ultraschalls ermöglicht auch eine Gegenüberstellung der Ultraschallbilder mit den anatomischen Schnitten, wodurch dem Lernenden die Zuordnung der Strukturen leichter fällt.

Diese Ultraschallsimulation kann den Ärztinnen und Ärzten das Erlernen des transrektalen Ultraschalls vereinfachen und die Lernphase am Patienten verkürzen. Sie bekommen hierdurch die Möglichkeit, einen physiologischen Ultraschall immer wieder zu betrachten, denn das Programm läuft auf jedem gängigen PC und Betriebssystem. So kann sich der Lernende die Lage der Sonde im Verhältnis zu der Lage der Organe vergegenwärtigen und sich die Strukturen, die Anatomie und die ungewohnte Darstellung des intraluminalen Ultraschalls näher bringen.

Die Orientierung wird des Weiteren dadurch vereinfacht, dass den Ultraschallbildern entsprechende anatomische Schnitte gegenüber gestellt werden und die Lage der Sonde durch die dreidimensionale Visualisierung veranschaulicht wird. So bietet diese Simulation die optimalen Lernvoraussetzungen für den Einstieg.

Durch ein leichteres Erlernen des transrektalen Ultraschalls werden vielleicht mehr Ärztinnen und Ärzte die Möglichkeiten nutzen sich in diesem ausbilden zu lassen, da er eine große Rolle in der Diagnostik von Tumoren im Stadium T1 im Darm spielt [Kulig et al., 2006]. In diesem Zusammenhang sollte man bedenken, dass das kolorektale



HB	Harnblase
VA	Vagina
OI	M. obturatorius internus
RE	Rectum
LA	M. levator ani

Abb. 33: Ein Vergleich von einem Ultraschallbild aus der Ultraschallsimulation (links) und einem Ultraschallbild aus dem TRUS an einem Patienten (rechts). Es wird deutlich, dass der Lernende die Strukturen, nachdem er gelernt hat sie in der Ultraschallsimulation zuzuordnen, wenig Schwierigkeiten haben wird diese auch im TRUS am Patienten wiederzufinden.

Karzinom eines der häufigsten Karzinome der westlichen Welt ist und dass bis zu 60% dieser Karzinome im Rectum liegen [Meyer, 2005, Renz-Polster et al., 2004].

Doch auch in weniger bekannten Bereichen kann der transrektale Ultraschall zur Diagnosefindung oder zur Einschätzung der Diagnose dienen. Durch den transrektalen Ultraschall kann z. B. die Darmwandinfiltration einer Beckenendometriose diagnostiziert werden [Bahr et al., 2006], was den transrektalen Ultraschall noch über das Gebiet der Gastroenterologie hinaus interessant werden lässt.

5 Diskussion

Wie aber des Öfteren schon angedeutet besitzt dieses Beckenmodell einige Stärken und Schwächen, die im Folgenden noch einmal näher erläutert werden sollen.

5.1 *Probleme der dreidimensionalen Visualisierung*

Hier ist zum einen das Problem der dreidimensionalen Visualisierung zu nennen, welches vor allem nach manueller Segmentierung, aber auch nach der dreidimensionalen Visualisierung ohne Verwendung eines Ellipsoids auftreten kann. Das Problem äußert sich meist in Absätzen, herausragenden Spitzen oder Stufen im Bild.

Um in diesem Fall eine realitätsgetreue 3D-Rekonstruktion der Organe zu erlangen, müssen sie ausgebessert werden. Dies geschah manuell. Hierzu wurde das zu bearbeitende Objekt dreidimensional visualisiert, vergrößert und gedreht. Bei diesen Aktionen wurde immer auf Unstimmigkeiten wie Sprünge, Stufen oder Absätze geachtet. Da das 3D-Bild mit den Schnittebenen verlinkt ist, genügt ein Klick mit der Maustaste im 3D-Bild auf die zu bearbeitende Stelle und im Schnittbild wird der entsprechende Teil mittels eines Fadenkreuzes angezeigt. Auf diese Art und Weise konnte die 3D-Visualisierung der einzelnen Objekte nachbearbeitet werden. Im Endeffekt konnten hierdurch alle Objekte gut dargestellt werden.

5.2 *Trennung der Skelettmuskulatur*

Natürlich muss an dieser Stelle auch die manuelle Trennung der Skelettmuskulatur genannt werden, da bei dieser nicht immer eine deutliche Unterscheidung zweier Skelettmuskeln möglich war und diese somit lediglich nach anatomischen Gesichtspunkten erfolgen konnte. So fielen, wie oben erwähnt, besonders die Trennung

des *M. sphincter ani externus* vom *M. levator ani* und die Trennung der einzelnen Anteile des *M. levator ani* schwer.

Im Anatomieatlas ist zumindest die Grenze zwischen dem *M. levator ani* und dem *M. sphincter ani externus* immer sehr deutlich zu erkennen und es ist nach dessen Betrachtung kaum vorstellbar, dass eine Trennung der beiden Skelettmuskeln an anatomischen Leichenschnitten schwer sein könnte. Doch fällt die Trennung dieser Skelettmuskeln nicht nur an den anatomischen Schnitten der *Visible Human* Datensätze schwer, sondern oft auch an der Leiche, welche präpariert wird. So lässt sich sagen, dass die Anatomiebücher die Verhältnisse vereinfacht abbilden und die Überschneidungen von zwei Muskeln, wie es z. B. bei den Anteilen des *M. levator ani* der Fall ist (Abb. 34), gar nicht berücksichtigt werden [Fritsch et al., 2004].

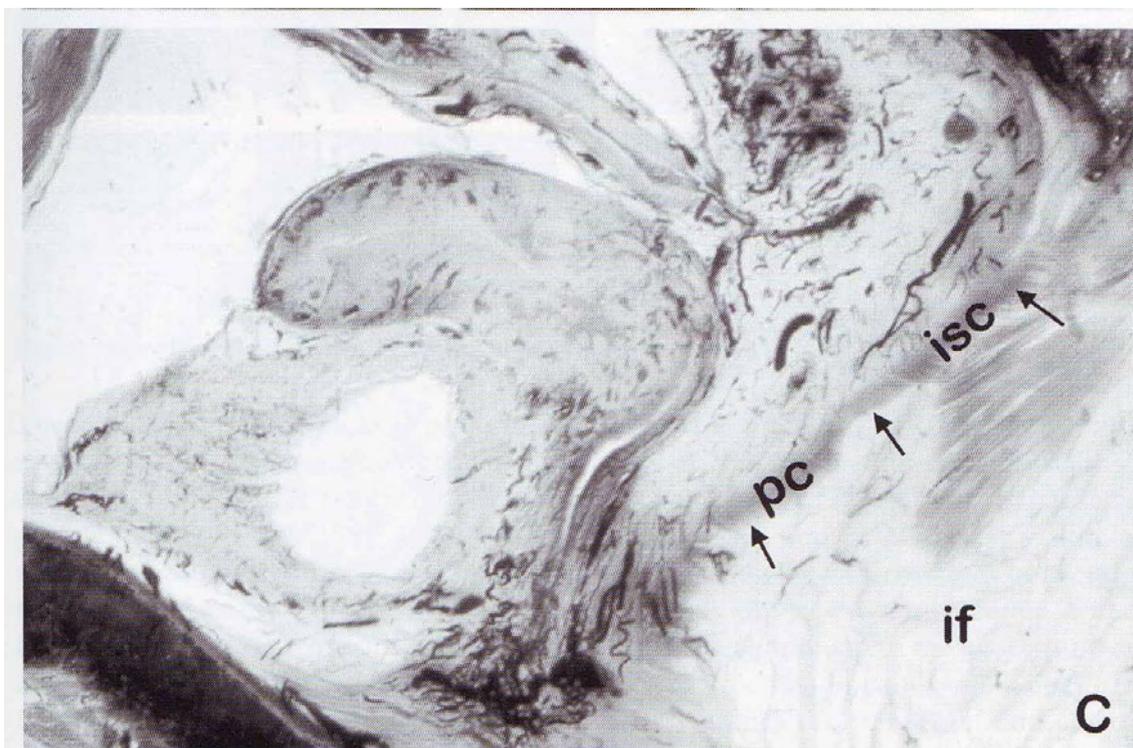


Abb.34: Sagittale Schnittbilder aus einem weiblichen Becken. An der unterschiedlichen Zugrichtung der Muskelfasern erkennt man deutlich die Überlappung des *M. pubococcygeus* (*pc*) mit dem *M. ischiococcygeus* (*isc*) [Fritsch et al., 2004]. *if*: Fossa ischioanalis

Um die Verhältnisse auch im transrektalen Ultraschall abbilden zu können, wurden die Trennungslinien nach anatomischen Gesichtspunkten gewählt. Dadurch wurde eine klare Trennungslinie genau wie im Atlas definiert. Der einzige Nachteil in dieser Art der Trennung besteht darin, dass die 3D-Rekonstruktion unter der manuellen Abtrennung der Skelettmuskeln, wie oben in *Abschnitt 3.1.4* beschrieben, eventuell leidet.

Die Trennungslinien der einzelnen Anteile des *M. levator ani* hingegen sind selbst im Atlas nicht eindeutig zu erkennen. Lediglich die einzelnen Anteile werden benannt, so dass der Lernende sich an dem unterschiedlichen Faserverlauf selber die Trennungslinien denken kann. Es ist selbstverständlich, dass somit auch in den anatomischen Datensätzen der Visible Human die unterschiedlichen Anteile des Muskels nicht ausgemacht werden konnten und die Trennung nach anatomischen Gesichtspunkten verlaufen musste. Dies spielte besonders bei den *Mm. puborectales* und *pubococcygei* eine Rolle, da eine Unterscheidung aufgrund von Ansatz und Ursprung nicht möglich war. Der *M. iliococcygeus* hingegen ließ sich aufgrund des anderen Ursprungs relativ gut von den anderen beiden Anteilen abgrenzen. Im Endeffekt wurden alle drei Anteile definiert, so dass der Lernende die Möglichkeit hat, die Ausdehnung der einzelnen Anteile zu erfassen.

Es lässt sich somit feststellen, dass die Trennung der Skelettmuskulatur zwar nicht immer so einfach nachvollzogen werden konnte wie im vereinfacht dargestellten Atlas, dass aber eine Trennung aller für den transrektalen Ultraschall notwendigen Skelettmuskeln und Skelettmuskelanteile nach anatomischen Gesichtspunkten möglich war und gelungen ist. So ist die Simulation des transrektalen Ultraschalls durchaus in der Lage, dem Lernenden die Lage und Ausdehnung der einzelnen Skelettmuskeln zu vermitteln.

5.3 Die weiblichen Geschlechtsorgane

Wie schon bei den Muskeln erwähnt, ist die Trennung der einzelnen Anteile nicht immer ersichtlich. Dies Problem stellte sich auch bei den weiblichen Geschlechtsorganen, wo besonders die Abgrenzung der Bänder eine Schwierigkeit darstellte.

Im Endeffekt konnten das *Lig. cardinale* und das *Lig. teres uteri* sicher ausgemacht werden. Nach Bajka et al. [2004] sind in den Datensätzen auch die *Tuben*, die

Eierstöcke, das *Lig. suspensorium ovarii* und das *Lig. latum uteri* auszumachen. Eine sichere Unterscheidung von diesen Strukturen konnten wir aber nicht nachvollziehen, zumal auch die von uns erkannten Strukturen in den anatomischen Bildern nur schwach ausgeprägt sind.

Somit weist der Halteapparat des Uterus in der Darstellung nicht alle Bänder und Strukturen auf. Dies ist für den transrektalen Ultraschall aber auch nicht von so großer Bedeutung, da die Bänder ohnehin nicht besonders gut dargestellt werden können. Die zur Orientierung und Diagnostik wichtigen weiblichen Geschlechtsorgane, wie der *Uterus* oder auch die *Vagina*, konnten segmentiert werden und stellen sich im simulierten Ultraschall gut dar.

5.4 Schichtung der Darmwand

Die Schichtung der Darmwand folgt, wie oben schon erwähnt, nicht genau der später im echten transrektalen Ultraschall zu sehenden Darmschichtung. Normalerweise ist eine Fünfschichtung im Ultraschall zuerkennen (Abb. 35 + 36). Die erste Schicht wird von der Interaktion des intraluminalen Flusses und der Oberfläche der *Tunica mucosa* gebildet, die zweite Schicht bildet nur die *Tunica mucosa*, während die dritte Schicht sowohl die *Tunica mucosa* als auch die *Tela submucosa* enthält. Die vierte Schicht wird schließlich von der *Tunica muscularis* gebildet. Abgeschlossen werden diese Schichten durch die fünfte Schicht, welche die *Tunica serosa* und das umliegende Gewebe repräsentiert. Es ist verständlich, dass in den anatomischen Schnitten die Interaktion der *Tunica mucosa* mit dem intraluminalen Fluss nicht sichtbar ist und dass auch die *Tunica serosa* vom umliegenden Gewebe nicht zu trennen ist. Hieraus folgt, dass drei Schichten bei einem nicht dilatierten Darm, wie es z. B. beim *Visible Human Male* der Fall ist, gut auszumachen und zu segmentieren sind.

Da die *Tunica mucosa* ohne den oben erwähnten Eintrittsreflex nicht vom *Lumen* zu unterscheiden wäre, wurde der Darmwand für die Ultraschallsimulation noch eine weitere, in beiden Datensätzen nicht sichtbare Schicht hinzugefügt. Hierfür wurde das Darmlumen erodiert und dieses verkleinerte Darmlumen vom ursprünglichen Darmlumen subtrahiert. Die nun entstandene Schicht wird nur im Ultraschall als heller Eintrittsreflex sichtbar, nicht aber auf den anatomischen Schichten und hat in beiden Aufrufen keine eigene Bezeichnung (Abb.37).

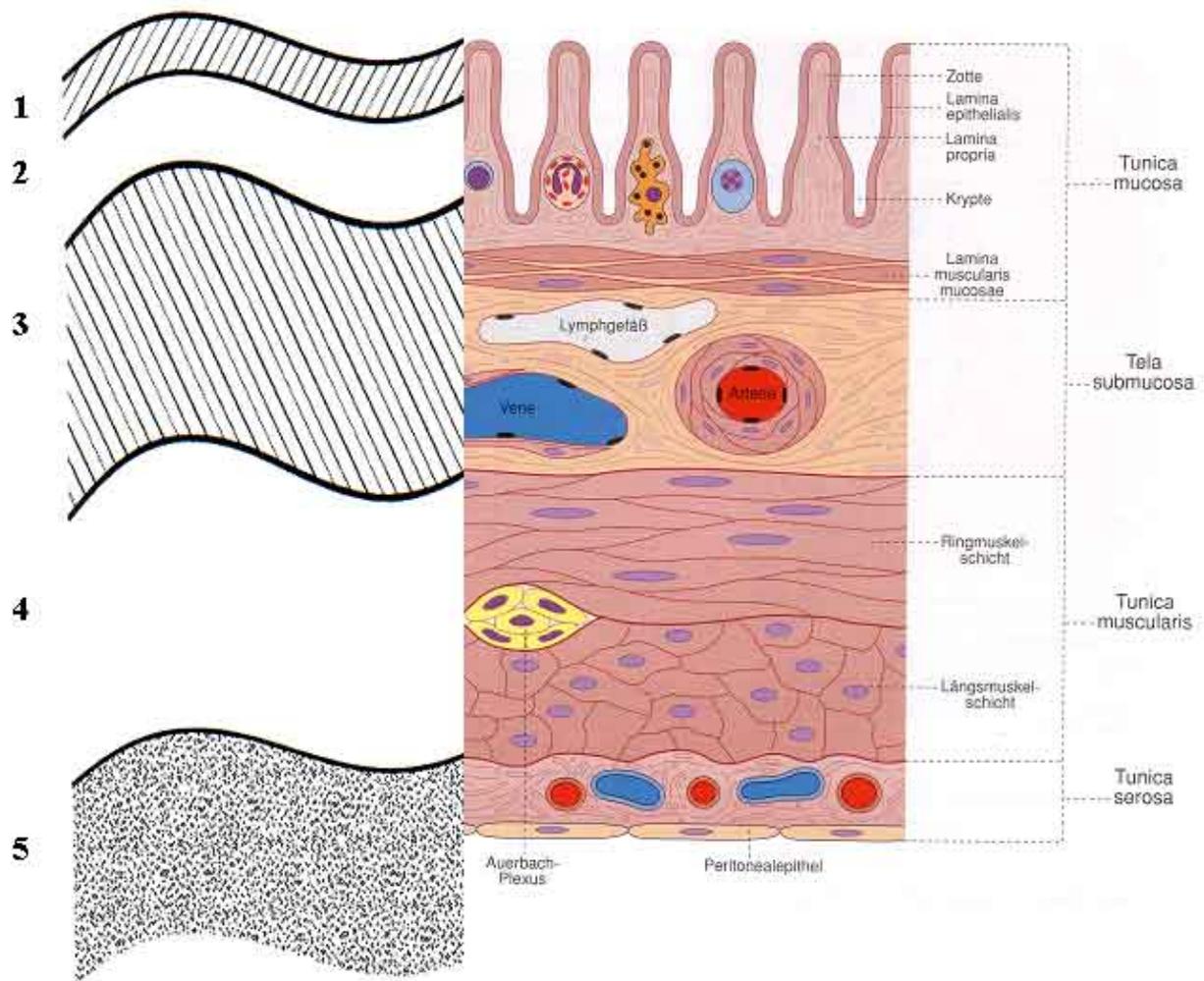


Abb. 35: Eine Gegenüberstellung der schematischen Darstellung der Fünfschichtung der Darmwand im endoskopischen Ultraschall links [nach Kimmey, 2000] mit einem histologischen Bild der Darmwandschichtung anhand des Colons aus einem Lehrbuch [nach Welsch, 2002]. Die erste Schicht wird durch die Interaktion der Tunica mucosa mit dem intraluminalen Fluss gebildet, die zweite Schicht repräsentiert die Tunica mucosa, die dritte Schicht enthält sowohl Anteile der Tunica mucosa, als auch der Tela submucosa während die vierte Schicht von der Tunica muscularis gebildet wird. Die äußerste Schicht repräsentiert die Tunica serosa und das umliegende Gewebe.

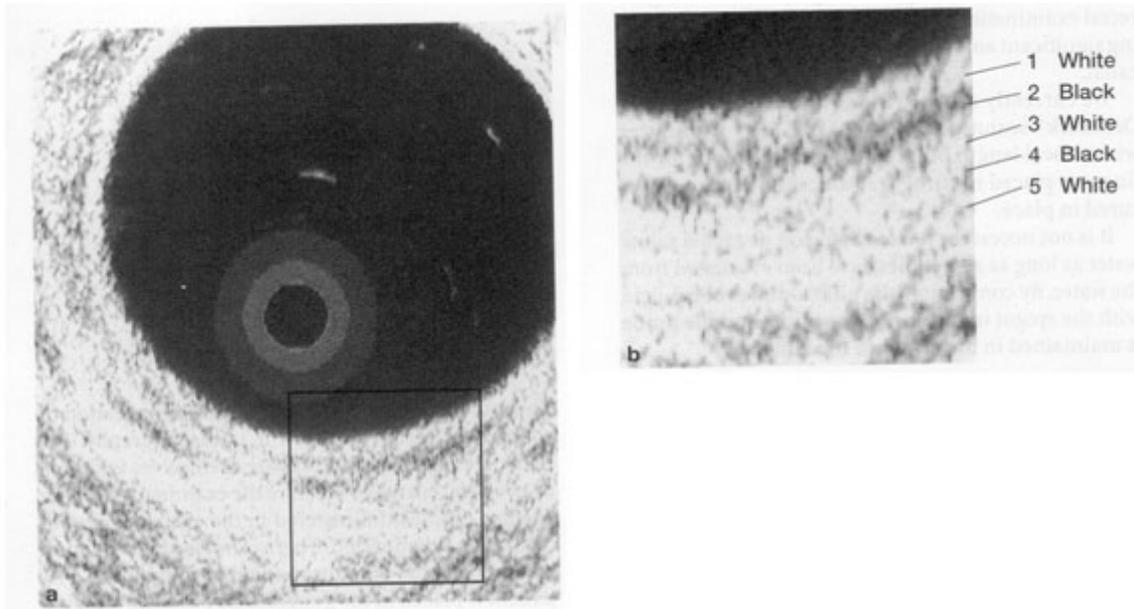


Abb. 36: Diese Abbildung zeigt die Darstellung der Darmwand im transrektalen Ultraschall [Roche, 2001]. Die Abb. 30b zeigt die Vergrößerung des in Abb.30a markierten Ausschnittes. Die Fünfschichtung ist nur schwer nachvollziehbar, so dass eine Reduktion auf vier Schichten inkl. Eintrittsreflex für den Beginn des Lernens durchaus berechtigt erscheint.

Diese Vierschichtung gibt dem Lernenden einen Eindruck von den drei wichtigsten Schichten in der Darmwand. Prägt der Lernende sich diese Schichten genau ein, wird er keine Probleme haben, diese auf die Fünfschichtung zu übertragen und pathologische Auffälligkeiten festzustellen.

Somit stellt die Vierschichtung ein gutes Fundament dar, welches in vielen bis heute üblichen Trainingsmethoden nicht gegeben ist. Von daher war es wichtig, auch in den Datensätzen des *Visible Human Female* die Schichtung, obwohl sie nicht zu sehen war, zu realisieren.

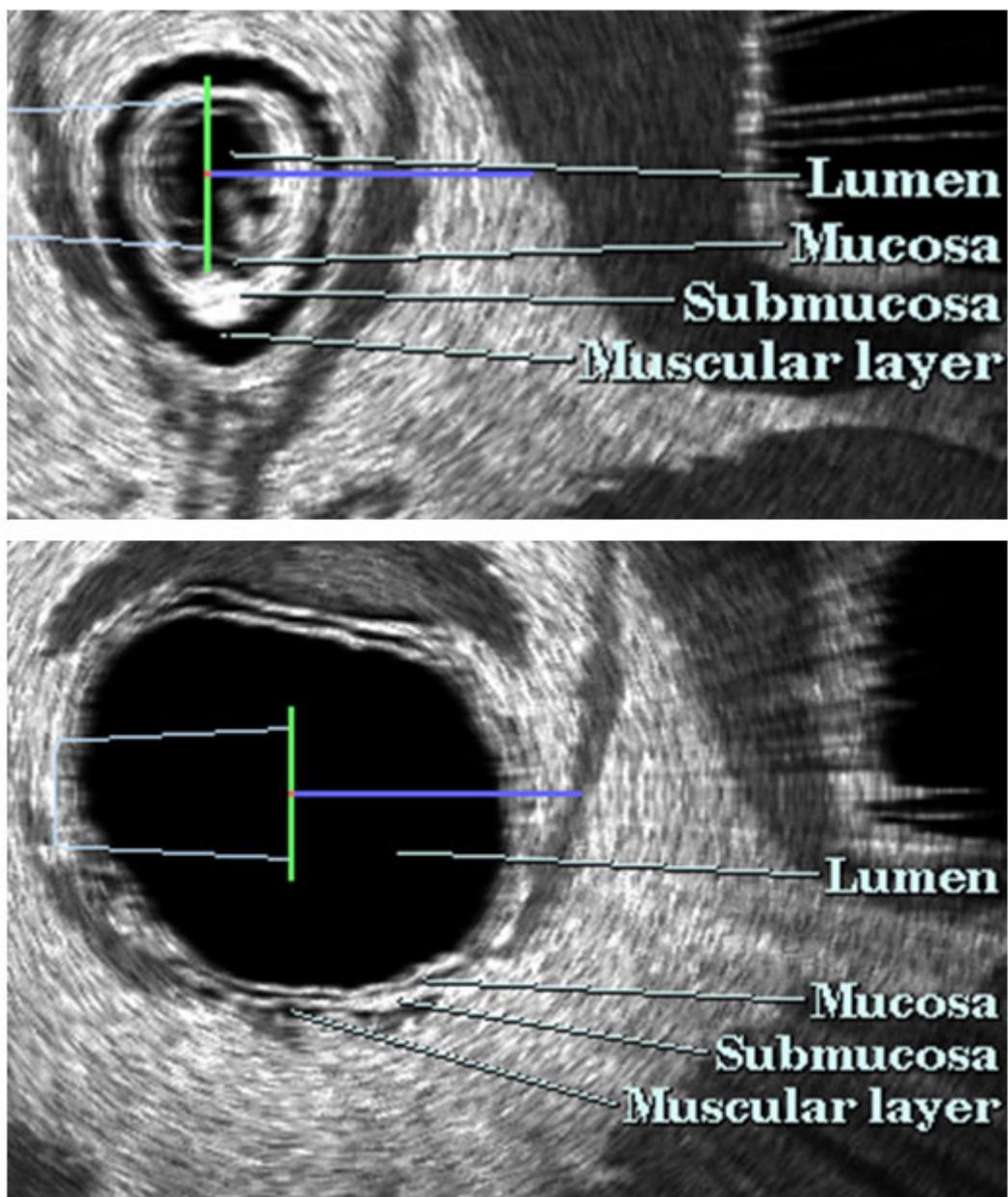


Abb. 37: Das obere Ultraschallbild zeigt die Vierschichtung im Visible Human Male, während das untere Bild diese im Visible Human Female im gleichen Maßstab darstellt. Die Tunica mucosa, Tela submucosa und die Tunica muscularis sind in beiden Fällen sehr gut voneinander abzugrenzen. Ebenfalls an manchen Stellen zu sehen ist der Eintrittsreflex, welcher im Text näher erläutert wird und als Teil des Lumens keine eigene Bezeichnung erhält.

5.5 *Schlussfolgerung*

Trotz der Probleme, die oben beschrieben wurden, ist es zum ersten Mal gelungen, ein virtuelles Modell des Beckens darzustellen. So konnte die Muskulatur bis auf den *M. pubovaginalis* beim *Visible Human Female* und den *M. perineus profundus* beim *Visible Human Male* und *Female* vollständig identifiziert und segmentiert werden, so dass der Beckentrichter im dreidimensionalen Modell sehr gut rekonstruiert werden konnte. Der Lernende kann sich zum ersten Mal anhand eines virtuellen Beckenmodells die Lage und die Beziehung der Muskeln untereinander verdeutlichen.

Auch die Lage und die Beziehung der weiblichen und männlichen Geschlechtsorgane zu anderen Organen des Beckens werden in diesem Modell erstmals verdeutlicht und können eine große Hilfe bei dem Erlernen der Anatomie des Beckens darstellen, da dreidimensionale Modelle des menschlichen Körpers Wissen effektiver und besser vermitteln können [Höhne et al., 1995].

Doch nicht nur die Anatomie, welche wie in *Abschnitt 1.1* dargestellt eines der beiden großen Probleme beim Erlernen des TRUS darstellt, kann durch dieses Modell sehr gut dargestellt und erläutert werden, sondern auch das in *Abschnitt 1.1* erwähnte Problem der Übertragung des anatomischen Wissens auf den intraluminalen Ultraschall wird durch dieses Modell um ein Vielfaches vereinfacht. Durch das virtuelle Beckenmodell und die Erstellung von Ultraschallbildern, kann der intraluminale Blick simuliert werden und der Lernende kann die anatomischen Schnittbilder mit den Ultraschallbildern gegenüberstellen und hierdurch den TRUS erlernen.

Ein besonderer Vorteil besteht in der Flexibilität des Modells, da es mit dem *Voxel-Man Autorensystem* erstellt wurde. Hierdurch könnte man sich neben der Ultraschallsimulation, die in *Abschnitt 4.1* erläutert wird, auch noch einen *VOXEL-MAN 3D-Navigator* [Höhne et al., 2003] des Beckens in Anlehnung an den *VOXEL-MAN 3D-Navigator: Innere Organe* vorstellen.

Es zeigt sich also, dass das virtuelle Modell des Beckens viele verschiedene Anwendungsbereiche beinhaltet, die unterschiedlichste Gruppen wie den Studierenden oder den Facharzt ansprechen und für diese von großem Nutzen sein können.

Durch die Erleichterung des Lernens des transrektalen Ultraschall z. B. durch die von uns entwickelte Simulation besteht die Möglichkeit, dass der transrektale Ultraschall häufiger, diagnosesicherer und von den unterschiedlichsten Facheinrichtungen genutzt werden kann.

6 Zusammenfassung

In den letzten Jahren hat der transrektale Ultraschall (TRUS) in der Gastroenterologie erheblich an Bedeutung gewonnen. Die Hauptindikationsgebiete für den TRUS stellen das Anal- und das Colonkarzinom dar. Doch auch andere Erkrankungen wie z. B. unter der Schleimhaut oder außerhalb der Wand gelegene Tumoren, Abszesse, Fisteln und die Abklärung von analer Inkontinenz sind Indikationen für die Anwendung des TRUS.

Da es sich beim TRUS um einen intraluminalen Ultraschall handelt und der Beckenraum dadurch aus einer anderen Perspektive als gewöhnlich beurteilt werden muss, fällt das Erlernen des TRUS oft schwer. Hinzu kommen Schwierigkeiten bei der Interpretation der artefaktbehafteten Ultraschallbilder. Um dieses zu vereinfachen, wurden in dieser Arbeit virtuelle computergestützte Modelle des männlichen und weiblichen Beckens erstellt, dessen Ergebnisse in einem Programm zur Simulation des TRUS verwendet werden.

Diese Beckenmodelle wurden im *Voxel-Man Autorensystem* erstellt, welches die Segmentierung, d. h. Zuordnung von Pixeln zu Organen, mit Hilfe von Ellipsoiden im Farbraum ermöglicht. Alle Punkte auf den Schnittbildern, deren Farben innerhalb dieses Ellipsoids liegen, werden markiert. Oft werden trotz gut gewähltem Ellipsoid noch weitere Strukturen angefärbt, die manuell abgetrennt werden müssen. Ist dies der Fall, bleibt nur noch die manuelle Trennung der Strukturen voneinander.

Auf diese Art gelang die Segmentierung der Skelettmuskulatur, der Darmschichtung und des Urogenitaltraktes. Bis auf die *Aa.* und *Vv. sacraliae*, welche postmortal kollabiert sind, konnten alle wichtigen Strukturen für den TRUS segmentiert werden. Der Knochen wurde auf den CT-Daten segmentiert, da er sich in diesen kontrastreich darstellt und leicht mit Hilfe eines bestimmten Helligkeitswertes von der Umgebung abzugrenzen ist.

Somit steht als Ergebnis ein weibliches und männliches virtuelles Beckenmodell zur Verfügung, dessen Bilder mittels eines Algorithmus auch als Ultraschallbilder dargestellt werden können. Mit Hilfe dieser Ultraschallbilder kann das Erlernen der Normalanatomie des TRUS um ein Vielfaches vereinfacht werden. Dieses Modell stellt damit ein Lehrprogramm ähnlich dem *VOXEL-MAN 3D-Navigator: Inner Organs* oder *EUS meets VOXEL-MAN* dar.

A Literatur

Ackerman MJ (1991). Viewpoint: The Visible Human Project. *J. Biocommun.* 18:14.

Bahr A, de Parades V, Godonneix P, Ezienny I, Salet-Lisee D, Villet R, Atienza P (2006). Endorectal ultrasonography in predicting rectal wall infiltration in patients with deep pelvic endometriosis: a modern tool for an ancient disease. *Dis. Colon Rectum* 49:869-75.

Bajka M, Manestar M, Hug J, Székely G, Haller U, Groscurth P (2004). Detailed anatomy of the abdomen and pelvis of the Visible Human Female. *Clin Anat.* 17:252-260.

Bhattacharya I, Gress FG (2000) History of endoscopic ultrasonography. In: Gress, Bhattacharya (2000), 1-3.

Bhutani MS (2000). Colorectal endoscopic ultrasonography. In: Gress, Bhattacharya (2000), 126-135.

Bommersheim S, Tiede U, Burmester E, Riemer M, Handels H (2005). Simulation von Ultraschallbildern für ein virtuelles Trainingssystem für endoskopische Longitudinal-Ultraschalluntersuchungen. In Meinzer HP et al. (Hrsg.), *Bildverarbeitung für die Medizin 2005: Algorithmen - Systeme - Anwendungen*, Informatik aktuell, Springer-Verlag, Berlin, 450-454.

Brooks JD, Chao WM, Kerr J (1997). Male pelvic anatomy reconstructed from the Visible Human data set. *J Urol.* 159:868-72.

Burmester E (2006), persönliche Mitteilung.

Burmester E (2007), persönliche Mitteilung.

- Burmester E, Leineweber T, Hacker S, Tiede U, Hütteroth TH, Höhne KH (2004). EUS meets Voxel-Man: Three dimensional anatomic animation of linear-array endoscopic ultrasound images. *Endoscopy* 36:726-730.
- Dancygier H, Lightdale CJ, Stevens PD (1999). Endoscopic ultrasonography of the upper gastrointestinal tract and colon. In: Dancygier H (Hrsg.), *Endosonography in Gastroenterology*. Thieme, Stuttgart, 159-174.
- Di Magno EP, Baxton JL, Regan PT, Hattery RR, Wilson DA, Suarez JR, Green PS (1980). Ultrasonic endoscope. *Lancet* 1:629-631.
- Einenkel J, Braumann U-D, Baier D, Kuska J-P, Horn L-C, Höckel M (2005). Die sonomorphologische Topographie des weiblichen Beckens. *Ultraschall Med.* 26:385-398.
- Federative Committee on Anatomical Terminology (Hrsg.) (1998). *Terminologia Anatomica, International Anatomical Terminology*. Thieme, Stuttgart.
- Fritsch H, Kühnel W (Hrsg.) (2003). *Taschenatlas der Anatomie, Band 2, Innere Organe*. Thieme, Stuttgart, 8. korr. Auflage.
- Fritsch H (2003) Schnittanatomie. In: Fritsch, Kühnel (2003), 287.
- Fritsch H, Lienemann A, Brenner E, Ludwikowski B (2004) Clinical anatomy of the pelvic floor. *Adv Anat Embryol Cell Biol.* 175:III-IX, 1-64.
- Gress FG, Bhattacharya I (Hrsg.) (2000). *Endoscopic Ultrasonography*. Blackwell Science, Malden, MA.
- Höhne KH, Bomans M, Pommert A, Riemer M, Schiers C, Tiede U, Wiebecke G (1990). 3D-visualization of tomographic volume data using the generalized voxel-model. *Visual Comput.* 6: 28-36.

- Höhne KH, Hanson WA (1992). Interactive 3D-segmentation of MRT and CT volumes using morphological operations. *J. Comput. Assist. Tomogr.* 16:285-294.
- Höhne KH, Pflessner B, Pommert A, Priesmeyer K, Riemer M, Schiemann T, Schubert R, Tiede U, Frederking H, Gehrman S, Noster S, Schumacher U (2003). *VOXEL-MAN 3D Navigator: Inner Organs. Regional, Systemic and Radiological Anatomy. Innere Organe. Topographische, Systematische und Radiologische Anatomie.* Springer-Verlag Electronic Media, Heidelberg (DVD-ROM, ISBN 3-540-40069-9).
- Höhne KH, Pflessner B, Pommert A, Riemer M, Schiemann T, Schubert R, Tiede U (1995). A new representation of knowledge concerning human anatomy and function. *Nat. Med.* 1: 506-511.
- Höhne KH, Priesmeyer K, Riemer M, Schiemann T, Schubert R, Tiede U, Pommert A, Wulf HC (1996). Exploring the Visible Human via intelligent movies. *Radiology* 201P:564.
- Jastrow H, Vollrath L (2002). Anatomy online: Presentation of a detailed WWW atlas of human gross anatomy-reference for medical education. *Clin. Anat.* 15:402-408.
- Kimmey MB (2000). Basic principles and fundamentals of endoscopic ultrasound imaging. In: Gress, Bhattacharya. (2000), 9.
- Kimmey MB, Martin RW, Haggit RC, et al. (1989). Histologic correlates of gastrointestinal ultrasound images. *Gastroenterology* 96:433-441.
- Kulig J, Richter P, Gurda-Duda A, Gach T, Klek S (2006). The role and value of endorectal ultrasonography in diagnosing T1 rectal tumors. *Ultrasound Med. Biol.* 32:469-472.
- Marti MC, Givel J-C (Hrsg.) (2001). *Surgical Management of Anorectal and Colonic Diseases.* Springer-Verlag, Berlin.

- Meyer R (2005). Maligne Tumoren des Gastrointestinaltraktes. In: Dietel M, Dudenhausen J, Suttorp N (Hrsg.), *Harrisons Innere Medizin*. ABW Wissenschaftsverlag, Berlin, 16. Auflage, 557-562.
- Netter FH (1999) Becken und Dammregion. In: Netter FH (Hrsg) *Atlas der Anatomie des Menschen*. Novartis Pharma AG, Basel, 2. erw. Auflage, 336.
- Pommert A, Höhne KH, Petersik A, Pflesser B, Tiede U (2007). Virtuelle Körpermodelle in der Medizin. In: Niewiadomski O (Hrsg.), *Geometrie, Kunst und Wissenschaft*. Einwurf 06: Dialoge zwischen Kunst und Musik an der Hochschule für Künste Bremen. H. M. Hauschild, Bremen, 239-247.
- Pommert A, Höhne KH, Pflesser B, Richter E, Riemer M, Schiemann T, Schubert R, Schumacher U, Tiede U (2001). Creating a high resolution spatial/symbolic model of the inner organs based on the Visible Human. *Med. Image Anal.* 5: 221-228.
- Pommert A, Schubert R, Riemer M, Schiemann T, Tiede U, Höhne KH (1994). Symbolic modeling of human anatomy for visualization and simulation. In: Robb RA (Hrsg.), *Visualization in Biomedical Computing 1994, Proc SPIE 2359*. Rochester, MN, 412-423.
- Putz R, Pabst R (Hrsg.) (2006). *Sobotta Atlas der Anatomie des Menschen, Band 2, Rumpf, Eingeweide, untere Extremität*. Urban & Fischer Verlag, München, 236.
- Renz-Polster H (2004). Magen-Darm-Trakt. In Renz-Polster H, Krautzig S, Braun J (Hrsg.), *Basislehrbuch Innere Medizin*. Urban & Fischer Verlag, München, 3. Auflage, 590-591.
- Roche B (2001). Endorectal and anal sonography. In: Marti , Givel (2001), 71-74.
- Schiebler TH, Schmidt W (2003). *Anatomie*. Springer-Verlag, Berlin, 8. Auflage.

- Schiemann T, Bomans M, Tiede U, Höhne KH (1992). Interactive 3D-segmentation. In: Robb RA (Hrsg.), *Visualization in Biomedical Computing II, Proc. SPIE 1808*. Chapel Hill, NC, 367-383.
- Schiemann T, Nuthmann J, Tiede U, Höhne KH (1996). Segmentation of the Visible Human for high quality volume based visualization. In: Höhne KH, Kikinis R (Hrsg.), *Visualization in Biomedical Computing, Proc. VBC '96*. Lecture Notes in Computer Science 1131, Springer-Verlag, Berlin, 13-22.
- Schubert R, Schiemann T, Tiede U, Höhne KH (1997). Applications and perspectives in anatomical 3-dimensional modelling of the Visible Human with VOXEL-MAN. *Acta Anat.* 160:123-131.
- Spitzer V, Ackermann MJ, Scherzinger AL, Whitlock D (1996). The Visible Human Male: A technical report. *J. Am. Med. Inform. Assoc.* 3:118-130.
- Temkin B, Acosta E, Hatfield P, Onal E, Tong A (2002). Web based three-dimensional virtual body structures: W3D-VBS. *J. Am. Med. Inform. Assoc.* 9: 554-556.
- Tiede U, Schiemann T, Höhne KH (1998). High quality rendering of attributed volume data. In: Ebert D, Hagen H, Rushmeier H (Hrsg.), *Proc. IEEE Visualization '98*. IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, 255-262.
- Welsch U (Hrsg.) (2003). *Sobotta Lehrbuch Histologie*. Urban & Fischer Verlag, München, Kap. 10.2, 323.

B Danksagung

Zuerst möchte ich meinem Doktorvater Prof. Dr. Udo Schumacher danken, der es mir ermöglicht hat, diese Arbeit in seinem Institut anzufertigen und für anatomische Fragen immer Zeit erübrigen konnte. Prof. Dr. Karl Heinz Höhne danke ich für seine Bereitschaft, ein Zweitgutachten zu übernehmen.

Außerdem gilt mein Dank der AG Voxel-Man, die mir einen Arbeitsplatz zur Verfügung stellte und mir während der Arbeit wertvolle Hilfestellungen leistete. Besonders danken möchte ich an dieser Stelle meinem Betreuer Dr. Andreas Pommert, der mir den Einstieg in die Arbeit um ein Vielfaches erleichtert hat und auch bei Fragen und Problemen immer sofort zur Stelle war.

Ein weiterer Dank geht an Dr. Eike Burmester, der das Thema angeregt hat und dessen Hilfe beim Einstellen der Helligkeitswerte für die einzelnen Strukturen unabdingbar war.

C Lebenslauf

Persönliche Daten

Geburtsdatum: 22.09.1982

Geburtsort: Hamburg

Ausbildung

1989-1993: Grundschule Falkenberg, Norderstedt

1993-2002: Gymnasium Harksheide, Norderstedt

Seit dem WS 2002: Studium der Humanmedizin an der Universität
Hamburg

Sept. 2004: Physikum

Daten

27.08.2007 – 16.12.2007 Praktisches Jahr im Klinikum Nord/Heidelberg
Tertial: Chirurgie

17.12.2007 – 06.04.2008 Praktisches Jahr im Klinikum Barmbek
Tertial: Innere Medizin

07.04.2008 – 28.07.2008 Praktisches Jahr im Klinikum Barmbek
Tertial: Wahlfach (Neurologie)

Dez. 2008 2. Abschnitt der ärztlichen Prüfung

D Eidesstattliche Versicherung

Ich versichere, 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.