

Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf

Institut für Anatomie II - Experimentelle Morphologie

Direktor: Prof. Dr. U. Schumacher

**Erstellung und Anwendung eines digitalen
volumenbasierten Anatomieatlanten der oberen Extremität**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
an der medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

vorgelegt von

Tariq Nazar

geboren in Hamburg

Hamburg, 2014

Angenommen von der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg am 29.04.2015

Veröffentlicht mit Genehmigung der
Medizinischen Fakultät der Universität Hamburg

Prüfungsausschuss, der Vorsitzende: Prof. Dr. Udo Schumacher

Prüfungsausschuss, zweiter Gutachter: Prof. Dr. Wolfgang Rüther

Prüfungsausschuss, dritter Gutachter: Prof. Dr. Karl-Heinz Höhne

Inhaltsverzeichnis

1 Ziel dieser Arbeit	1
2 Einleitung	2
3 Material und Methoden	6
3.1 Gliederung der oberen Extremität	6
3.2 Ursprung und Beschaffenheit des Datensatzes	8
3.3 3D-Visualisierung und Wissensrepräsentation	9
3.4 Prinzip und Methodik der Segmentation	10
3.5 Ein Werkzeug zur Erstellung von Röhrenobjekten	15
4 Ergebnisse und Anwendungen	16
4.1 Die Segmentation der oberen Extremität	16
4.1.1 Segmentation der Knochen	16
4.1.2 Segmentation der Muskulatur	20
4.2 Modellierung mit dem „Tree-Editor“	22
4.2.1 Allgemeines zur Anwendung	22
4.2.2 Modellierung der Arterien	23
4.2.3 Modellierung der Nerven	24
4.2.4 Modellierung von Sehnen und Bändern	30
4.3 Generierung des 3D-Atlas	32
4.3.1 Integration der Objektdaten	32
4.3.2 Aufbau des semantischen Netzwerkes	33
4.4 Anwendung des 3D-Atlas	36
5 Diskussion	40
6 Zusammenfassung	44
Literaturverzeichnis	44

1 Ziel dieser Arbeit

Ziel dieser Arbeit ist es, einen dreidimensionalen, volumenbasierten Atlas der oberen Extremität zu erstellen, der alle wichtigen Strukturen in realistischer räumlicher Beziehung darstellen und zugehörige relevante Informationen auf sinnvolle Weise vermitteln kann.

Um dies zu erreichen, sollen aus einem vorhandenen Volumendatensatz Knochen, Muskeln, Nerven und Gefäße des menschlichen Armes herausgearbeitet, sowie eine mit diesen Strukturen verknüpfte Wissensdatenbank erstellt werden.

Der Benutzer soll mit dem fertigen Atlas die Möglichkeit haben, die anatomischen Strukturen der oberen Extremität im virtuellen dreidimensionalen Raum zu explorieren und zugehörige Informationen einfach und übersichtlich strukturiert abzurufen.

2 Einleitung

Für die Tätigkeit als Arzt ist der Erwerb umfassender Kenntnisse über die Anatomie des menschlichen Körpers eine absolut notwendige Voraussetzung. Neben dem theoretischen Wissen ist auch das praktische Erlernen von Untersuchungstechniken sowie zunehmend spezialisierten Operationsmethoden für eine erfolgreiche Berufsausübung erforderlich.

Um den Erwerb dieser Kenntnisse und Fähigkeiten zu ermöglichen, ist die Medizin nach wie vor in erster Linie auf den Menschen selbst angewiesen - sei es als Lehrender, als Patient oder als Spender des eigenen Körpers für Lehre und Forschung.

Im Studium ist der Lernende zumeist darauf beschränkt, sich sein Wissen aus Lehrbüchern und Atlanten anzueignen, z.B. (BENNINGHOFF, 1985) (LIPPERT, 1996) (SOBOTTA, 2006). Lediglich der Präparierkurs, sowie in begrenztem Maße der spätere Pathologiekurs geben dem Studierenden dreidimensionale, „greifbare“ Informationen über den komplexen Aufbau des menschlichen Körpers.

Neben diesen Lehrveranstaltungen hat der Student wenig Möglichkeiten, aufkommende Fragen und Unklarheiten über räumliche Beziehungen erschöpfend zu klären. Dreidimensionale Zusammenhänge können in der Regel nur indirekt mittels zweidimensionaler Abbildungen und dem eigenen räumlichen Vorstellungsvermögen erarbeitet und verstanden werden.

An dieser Stelle können dreidimensionale, computergestützte Anwendungen als sinnvolle Ergänzung eingesetzt werden.

Solche Anwendungen können es dem Benutzer ermöglichen, anatomische Strukturen im virtuellen dreidimensionalen Raum zu beobachten und gegebenenfalls aktiv Einfluss auf die Darstellung zu nehmen, beispielsweise durch Veränderung des Blickwinkels. Statische, zweidimensionale Abbildungen können dies nicht leisten.

Der Wert derartiger digitaler Anwendungen für Forschung und Lehre wird in Zukunft sicher noch steigen, da mit der zunehmenden Rechenleistung moderner Computer immer detailgetreuere und komplexere Darstellungen möglich werden. Außer für das Erlernen der Anatomie können dreidimensionale Atlanten auch als Grundlage für Operationssi-

mulatoren dienen, wodurch eine Anwendbarkeit weit über das Medizinstudium hinaus gegeben ist. Realitätsgetreue Computersimulationen können die praktischen Fähigkeiten von Ärzten trainieren und ausbauen, ohne dass hierfür Patienten einem Risiko ausgesetzt wären (SHUHAIBER, 2003).

Hierfür nutzbare anatomische Atlanten können auf verschiedene Weisen erstellt werden. Klassischer Ausgangspunkt und Grundlage der meisten Modelle sind anatomische Präparate, also Teile eines echten menschlichen Körpers, die durch unterschiedlichste Verfahren konserviert werden können.

Damit ein anatomisches Präparat auch bestimmte Informationen vermitteln kann, ist darüber hinaus eine entsprechende Präparation erforderlich. Das bedeutet, dass Gewebe entfernt oder bewegt werden muss, um die gewünschten anatomischen Strukturen darstellen zu können, wie beispielsweise das Entfernen von Haut und Fettgewebe, um die darunterliegende Muskulatur freizulegen.

Die so gewonnenen Präparate können entweder direkt als Lehrmedium eingesetzt werden, was eine unmittelbare dreidimensionale Untersuchung erlaubt, oder aber als Vorlage für Fotografien und Zeichnungen dienen, welche dann zwar nur zweidimensional beschaffen sind, dafür aber einfacher einer größeren Zahl an Lernenden zugänglich gemacht werden können.

Eine andere Möglichkeit stellen künstliche Modelle dar. Sie können beispielsweise als Abguss eines echten Präparates entstehen, oder gänzlich modelliert werden. Für die Vermittlung von funktionellen Aspekten sind häufig auch abstrahierte Modelle sinnvoll, die dann in ihrer Erscheinung jedoch keinem natürlichen Präparat mehr entsprechen.

Die Gesamtheit der künstlichen Modelle bietet hierbei den Vorteil, dass eine größere Menge identischer Lehrobjekte gefertigt werden kann.

Eine neuere Variante sind virtuelle anatomische Modelle. Hierbei wird mit Hilfe eines Computers eine anatomische Struktur nachgebildet, die nicht real greifbar, sondern nur virtuell am Bildschirm zu untersuchen ist. Die ersten virtuellen Modelle dieser Art wurden künstlich generiert, also im Regelfall mit Hilfe eines 3D-Modellierprogramms aufgebaut. Modelle dieser Art sind üblicherweise Polygonobjekte, die nur durch ihre Oberflächen definiert und somit quasi „hohl“, sind.

An der Universität des Saarlandes wurde ein anderer Weg beschritten, indem durch

ein spezielles Scan-Verfahren virtuelle dreidimensionale Ansichten echter anatomischer Präparate über das Internet für Studenten oder andere Interessierte zur Verfügung gestellt wurden (BOCK und HECKMANN, 2001).

Die kombinierte Wissensvermittlung von anatomischen Präparaten mit virtuellen dreidimensionalen Ansichten und Verknüpfung mit relevanten Informationen wird darüber hinaus bereits von verschiedenen Firmen als Lern- oder Lehrsoftware angeboten (z.B. Anatomica 3D (BIOVERE, 2006)).

Eine andere Möglichkeit ist die datengesteuerte Erstellung eines virtuellen Modells.

Hierfür können entweder bildgebende medizinische Untersuchungsverfahren, wie zum Beispiel CT und MRT, genutzt werden, oder aber digitalisierte Fotografien von anatomischen Schnitten.

Letztere bieten hierbei den höchstmöglichen Grad an Realismus, da bei anatomischen Schnitten die unmittelbare Anatomie zur Ansicht kommt und keine errechneten Bilddaten, wie bei CT und MRT (STEINKE und THOMAS, 2002).

Problematisch ist allerdings die realistische Farbgebung der anatomischen Strukturen.

Da bislang für anatomische Schnitte stets eine Aufarbeitung des Gewebes notwendig ist, um ein Verwesens zu verhindern, wird durch die möglichen Verfahren (z.B. Fixierung durch Alkohole oder Formalin, Kryokonservierung, Plastination) das Gewebe in seiner Beschaffenheit verändert. Dies bringt neben der gewünschten Haltbarkeit im Regelfall eine unerwünschte Veränderung der Farben verschiedener Gewebestrukturen mit sich. Hierbei stellen Kryokonservierung und Plastination derzeit die Methoden dar, die mit der geringsten Farbänderung des Gewebes einhergehen. Um aus zweidimensionalen Bilddaten ein virtuelles dreidimensionales Modell zu erstellen, sind verschiedene Verfahrensmöglichkeiten möglich. Zunächst besteht die Möglichkeit, anhand von Schnittbildern ein oberflächenbasiertes anatomisches Modell zu fertigen. Die zur Darstellung gelangenden Oberflächen bestehen hierbei aus Polygonen - also Vielecken - die eine Annäherung an das äußere Erscheinungsbild eines anatomischen Objektes ermöglichen. Hierbei können die Objekte entweder manuell durch einen Benutzer erstellt oder anhand automatisierter Verfahren (z.B. Schwellenwertberechnungen) von einer entsprechenden Software errechnet werden.

Oberflächenbasierte Objekte bieten den Vorteil kurzer Rechenzeiten in der optischen

Darstellung, was beispielsweise Echtzeit-Drehungen im virtuellen Raum auf üblichen home-use Rechnern erlaubt. Nachteilig ist allerdings die hohle Beschaffenheit derartiger Objekte, die keinerlei Informationen über innere Strukturen vermitteln kann. So sind Schnitte oder simulierte endoskopische Einblicke bei oberflächenbasierten Objekten nicht möglich.

Eine weitere Möglichkeit stellen volumenbasierte Modelle dar, bei welchen aus den zweidimensionalen Bildinformationen ein dreidimensionales Volumenobjekt erstellt wird.

Hierbei bleiben auch Informationen über die Binnenstruktur eines Objektes erhalten, so dass simulierte Schnitte ermöglicht werden. Die Bearbeitung und Darstellung solcher Volumenobjekte erfordert jedoch eine deutlich größere Rechenleistung, so dass selbst mit modernen Hochleistungscomputern Echtzeit-Drehungen eines hochauflösenden Volumenobjektes nicht möglich sind. Überdies stellt sich die eigentliche Erstellung von Volumenobjekten aus einem detaillierten menschlichen Schnittbilddatensatz als sehr arbeitsintensiv dar, worauf in den folgenden Kapiteln noch näher eingegangen wird. Um ein möglichst detailliertes Modell zu erhalten, sollten die zu Grunde liegenden Bilddaten in möglichst hoher optischer Auflösung vorliegen, wobei technische Grenzen sowohl bei den unterschiedlichen Verfahren der Bildgebung als auch den Möglichkeiten der computerisierten Datenspeicherung und -verarbeitung zu bedenken sind.

Trotzdessen scheint für die Erstellung eines detaillierten anatomischen Atlases lediglich ein volumenbasierter Ansatz in Frage zu kommen, da nur hier der hohe Grad an Realismus und Detailgenauigkeit erreicht werden kann, der für eine medizinische Ausbildung anzustreben ist.

3 Material und Methoden

3.1 Gliederung der oberen Extremität

Zu Beginn erscheint es sinnvoll, zu klären, welche Strukturen in einem späteren Atlas der oberen Extremität enthalten sein sollen. Die Gliederung und Bezeichnung der Strukturen entspricht hierbei der international einheitlichen anatomischen Nomenklatur, die im konkreten Fall anhand anatomischer Standardwerke überprüft wurde (BENNINGHOFF, 1985) (LIPPERT, 1996) (SOBOTTA, 2006).

Während einige Strukturen ganz offensichtlich Teil der oberen Extremität sind (wie z.B. die Hand), ist im Bereich des Überganges zum Rumpf durchaus eine differenzierte Entscheidung erforderlich.

Als grobe Richtlinie soll gelten, dass nur die Strukturen ausgewählt werden, die in unmittelbarem Zusammenhang mit der Funktion der oberen Extremität stehen. Deweiteren wurde die Auswahl auf die vier verschiedene Strukturgruppen Knochen, Muskeln, Nerven und Gefäße beschränkt. Dies umfasst im Einzelnen:

Knochen: Schulterblatt, Schlüsselbein, Oberarmknochen, Elle, Speiche, sowie sämtliche Knochen der Hand.

Ogleich auch an Wirbelsäule und Rippen einige auf den Arm wirkende Muskeln ansetzen (wie z.B. der *M. latissimus dorsi*), sollen diese knöchernen Strukturen nicht in den Atlas übernommen werden.

Muskeln: Es sollen alle Muskeln enthalten sein, deren Ursprung oder Ansatz an Oberarmknochen, Elle, Speiche oder Knochen der Hand liegt.

Nerven: Alle Nerven und deren Endäste, die an der Bildung des *Plexus brachialis* beteiligt sind, bzw. aus diesem hervorgehen, sowie alle Nerven, die Anteile der Arm- und Schultermuskulatur innervieren.

Gefäße: Die *Arteria axillaris* mit allen Ästen. Venen werden aufgrund der hohen interindividuellen Variabilität nicht, in den Atlas integriert.

Natürlich sind auch Haut und Weichteilgewebe Teil des Armes. Da die letzteren Strukturen für das Erlernen der makroskopischen Anatomie aber von untergeordneter Bedeutung sind und zumindest die gesamte äußere Haut bereits durch die VOXEL-MAN-Gruppe dargestellt wurde, wurden diese Strukturgruppen im Rahmen dieser Arbeit nicht gesondert berücksichtigt (HÖHNE et al., 2000).

3.2 Ursprung und Beschaffenheit des Datensatzes

Als Grundlage für die vorliegende Arbeit dienen die Schnittbilddatensätze des **Visible Human Projektes** (ACKERMAN, 1991). Insgesamt bestehen diese aus einem CT-, einem MR- und einem Kryotom-Datensatz eines männlichen menschlichen Körpers.

Die so gewonnenen zweidimensionalen Schnittbilder wurden bereits vorverarbeitet und zu einem Datenvolumen zusammengesetzt, wobei die einzelnen Bilder passgenau übereinandergelegt wurden.

Die kleinste Einheit des auf diese Weise erhaltenen Datenvolumens ist das sogenannte „Voxel“ (kurz für Volumenelement, angelehnt an die Bezeichnung „Pixel“ für Picture-Element), das in den benutzten Datensätzen einem Würfel von 1 mm Kantenlänge entspricht und Informationen über einen Farbwert, eine Position im Raum und die Zugehörigkeit zu einem definierten Volumenobjekt enthält. Für diese Arbeit genutzt wurden lediglich der CT- und vorallem der Kryotom-Datensatz des Visible Human Male.

Dieser Kryotom-Datensatz hat eine Ausdehnung von 2048 mal 1216 Pixeln in 1871 transversalen Schnitten bei einer Schichtdicke von 1 mm.

Auch der CT-Datensatz liegt in 1871 transversalen Schnittbildern vor, mit einer Auflösung von 512 x 512 Pixeln je Bild.

Es wurden nicht die kompletten Datensätze verwendet, sondern nur Ausschnitte aus dem jeweiligen Datenvolumen. Dies war notwendig, da die zur Verfügung stehenden Rechner nicht alle über ausreichend Kapazität verfügten, um für jede Sitzung den gesamten Datensatz zu laden. Da sich für diese Arbeit auf die rechte obere Extremität beschränkt wurde, war eine Bearbeitung des gesamten Datenvolumens ohnehin nicht erforderlich.

Das für die Segmentation genutzte Datenfenster hatte eine Ausdehnung von 300 x 329 x 700 Voxeln.

Dieses Datenfenster enthielt alle für die Segmentation der oberen rechten Extremität benötigten Strukturen.

3.3 3D-Visualisierung und Wissensrepräsentation

Wie bereits unter 2.2 erläutert, setzt sich der benutzte Datensatz aus einzelnen Voxeln zusammen. Mittels des Programmes VOXEL-MAN gelingt es, definierte Volumenobjekte dreidimensional darzustellen, wobei die Grenzen des Objektes als künstlich generierte Oberflächen erscheinen. Die verschiedenen Verfahren zu dieser Form der bildlichen Wiedergabe sind bereits in anderen Arbeiten erschöpfend beschrieben worden (SCHIEMANN et al., 1997)

Mit dieser Technik ist es nun möglich, die segmentierten Objekte im virtuellen dreidimensionalen Raum zu explorieren und sich Ansichten aus jeder gewünschten Blickrichtung und Entfernung anzeigen zu lassen. Neben der bildlichen Darstellung ist vor allem die Möglichkeit der Verknüpfung mit Wissensinhalten der große Vorteil virtueller Atlanten. Dies geschieht hier über die Verbindung eines definierten Volumenobjektes mit einer Wissensdatenbank („knowledge base“), die Verweise auf vielerlei Informationen enthält. So sind neben der namentlichen Bezeichnung des Objektes (die in verschiedenen Sprachen vorliegen kann) auch Informationen über die Zugehörigkeit zu einer übergeordneten Organgruppe, Gefäßversorgung und Innervation (bzw. bei Gefäßen und Nerven die von ihnen versorgten Organe), oder die Funktion abrufbar. Diese Informationen werden hierfür in Form eines *semantischen Netzwerkes* (s. auch 3.3.2) organisiert.

3.4 Prinzip und Methodik der Segmentation

Der Begriff Segmentation bedeutet das Isolieren von Voxeln aus dem Gesamtdatenvolumen und Zusammenfassung derselben zu Objekten, die im Idealfall anatomischen Strukturen entsprechen.

Dies ist notwendig, um überhaupt einzelne Teile aus dem Datenvolumen gesondert anwählen und zur Darstellung bringen zu können. Um die Segmentation zu vereinfachen, stehen verschiedene halbautomatische Verfahren zur Verfügung, die in das Programm VOXEL-MAN integriert sind.

Ein Verfahren ist die Segmentation über Schwellwerte. Grundlage dieses Verfahrens ist

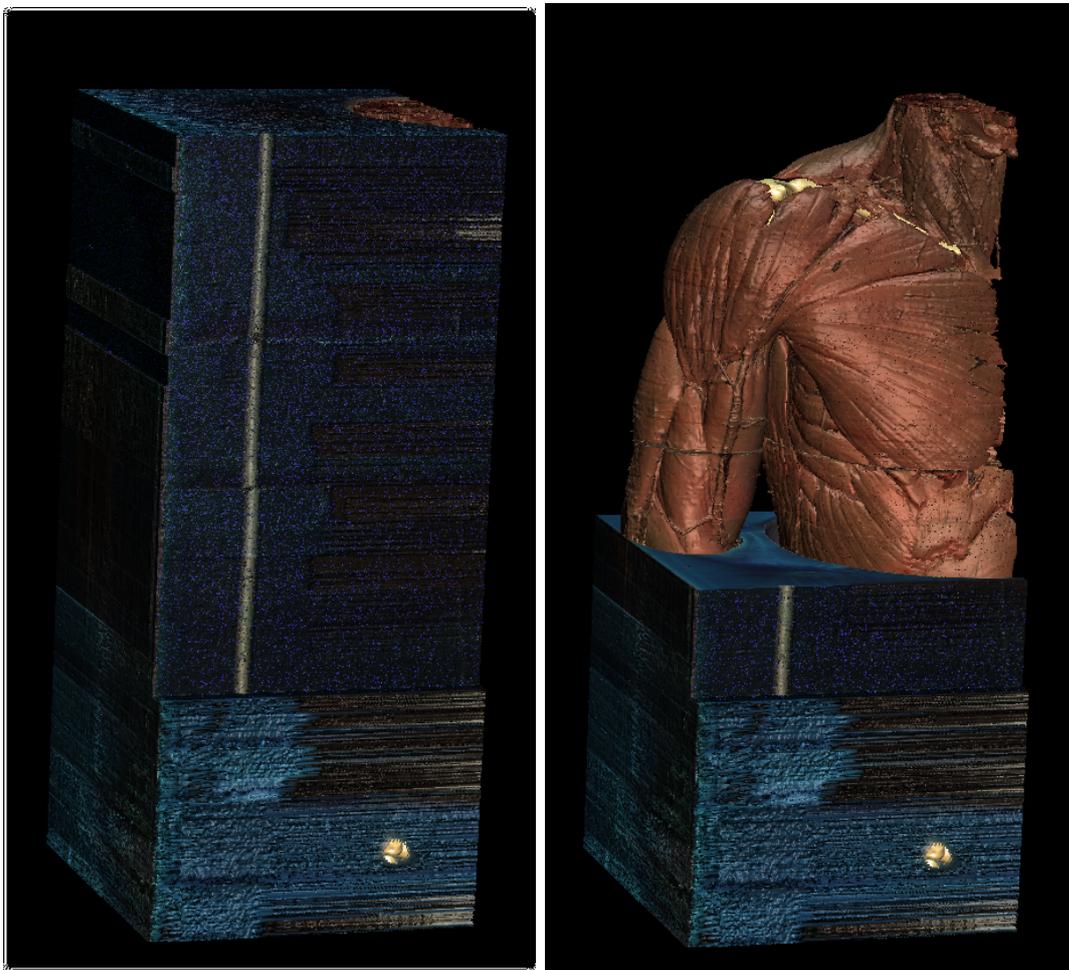


Abbildung 3.1: Erst durch die Segmentation werden einzelne Teile des Gesamtdatenvolumens darstellbar

der Ansatz, dass die Farb- oder Dichtemerkmale, die für eine gesuchte Struktur charakteristisch sind, über Schwellwerte erfasst und entsprechende Voxel automatisch ausgewählt

werden. Im Falle des CT-Datensatzes lassen sich diese Dichtebereiche als eindimensionale Abschnitte auf der Grauwertskala beschreiben. Für den Kryotomdatensatz stellt sich die Erfassung der jeweiligen organspezifischen Farbbereiche als ungleich komplexer dar. Es konnte gezeigt werden, dass Ellipsoide in einem dreidimensionalen Farbraum, dessen Achsen die Grundfarben Rot, Gelb und Grün bilden, mit guter Genauigkeit in der Lage sind, gesuchte Farbbereiche zu umgrenzen (SCHIEMANN et al., 1996).

Die Bestimmung der Farbwerte erfolgt hierbei durch den Benutzer, der mit einem mausgesteuerten Werkzeug Bereiche aus dem gewünschten Organ markiert, auf deren Grundlage dann ein passendes Ellipsoid errechnet wird. Wie exakt dieses mathematische Konstrukt in der Lage ist, die gesuchten Organstrukturen vom übrigen Gewebe abzugrenzen, muss im Einzelfall überprüft werden. Mitunter sind mehrere Versuche nötig, um ein geeignetes Ellipsoid zu erhalten.

Da es im menschlichen Körper praktisch nicht vorkommt, dass spezifische Farb- oder Dichtewerte nur von einem isolierten Organ aufgewiesen werden, müssen weitere Verfahren zur Anwendung kommen, um aus den über Schwellwertsegmentation erhaltenen Bereichen des Datenvolumens die gewünschten Einzelstrukturen herauszulösen.

Eine Möglichkeit hierzu ist die Zusammenhangsanalyse. Dieses Verfahren überprüft, ob die über Schwellwerte ausgewählten Voxel im dreidimensionalen Raum in direkter Verbindung stehen und stellt räumlich isolierte Voxelgruppen als einzelne Objekte dar. Im Programm VOXEL-MAN ist dieses Verfahren als Anwendung mit der Bezeichnung „connected components analysis“ realisiert.

Durch gemeinsame Anwendung dieser beiden Verfahren können bereits mit guten Ergebnissen einzelne Organe segmentiert werden. Dies ist umso genauer möglich, je größer der Farb- oder Dichteunterschied zwischen gesuchtem Organ und umliegendem Gewebe ist.

Führen diese Verfahren allein noch nicht zum gewünschten Erfolg, können verschiedene morphologische Operationen zur Anwendung kommen (HÖHNE und HANSON, 1992) (SCHIEMANN et al., 1992), oder auf die Möglichkeit der manuellen Segmentation zurückgegriffen werden.

Die manuelle Segmentation ist letztlich das Verfahren, das neben der Schwellwertanalyse am häufigsten im Rahmen dieser Arbeit genutzt wurde. Hierbei hat der Benutzer die

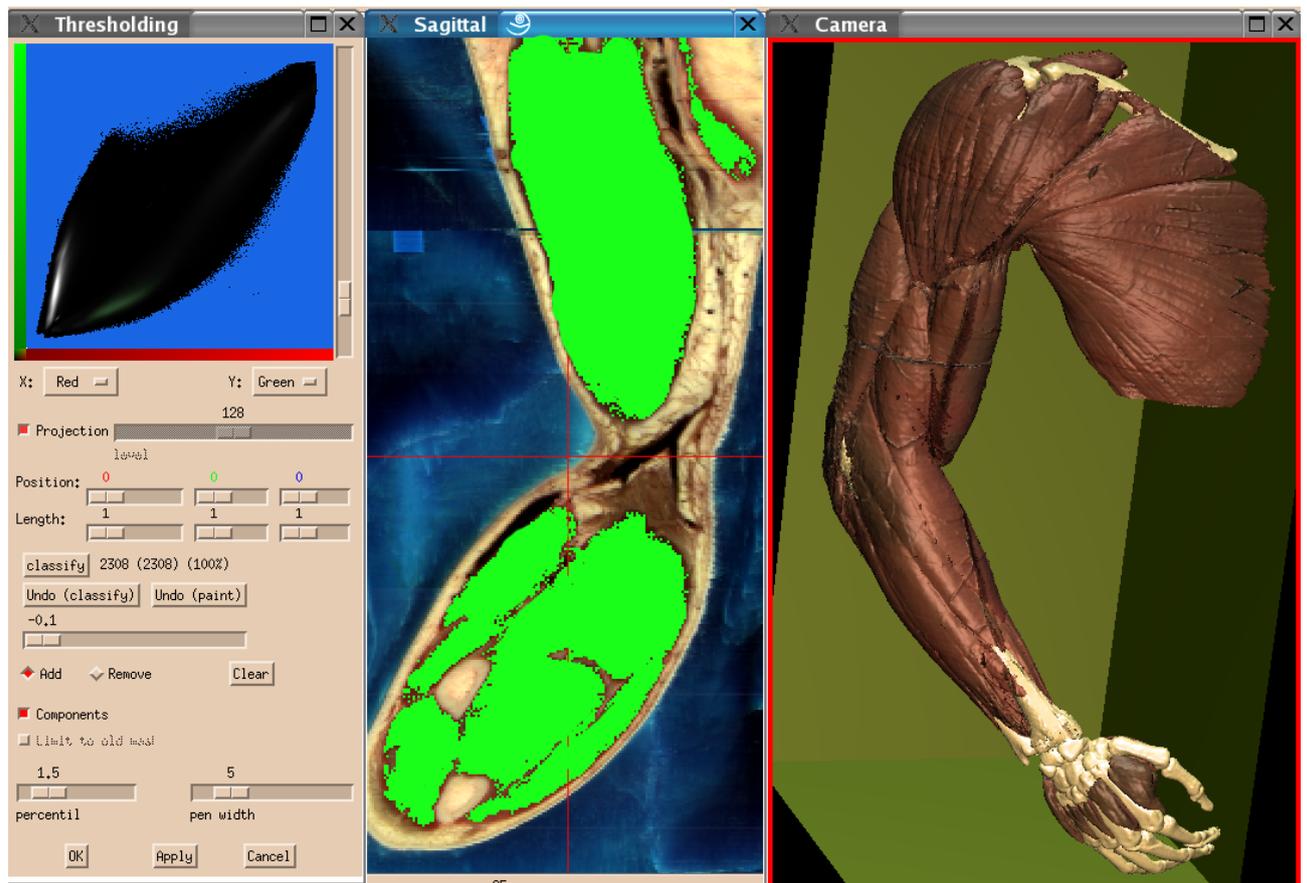


Abbildung 3.2: Segmentation der Muskulatur über Farbschwellwerte

Möglichkeit mittels eines in das Programm VOXEL-MAN integrierten Malwerkzeuges einzelne Voxel in beliebigen Schnittebenen zu markieren. Die auf diese Weise ausgewählten Voxel-Verbände können dann als Volumenobjekte definiert und gespeichert werden. Es können jedoch nicht einzelne Objekte gespeichert werden, sondern stets nur der gesamte bearbeitete Datensatz.

Dies hat den Hintergrund, dass durch die Segmentation keine Voxel entfernt oder hinzugefügt werden, sondern sich lediglich die Zuordnungen ändern. So bilden alle Voxel, die keinem segmentierten Objekt zugeordnet sind, ein gemeinsames Objekt von undefiniertem Restgewebe. Diese Voxel sind damit weiterhin Teil des Datensatzes, werden jedoch nicht gesondert zur Darstellung gebracht.

Die hiermit verbundenen Schwierigkeiten können im laufenden Arbeitsprozess durch andere in das Programm integrierte Hilfsmittel weitestgehend vermieden werden.

So können markierte Voxel auch zunächst als sogenannte Maske zwischengespeichert werden. Werden diese Masken z.B. auf Grundlage von zuvor segmentierten Objekten er-

stellt, lässt sich der gewünschte Arbeitsbereich auf diesem Wege sehr genau eingrenzen. Beispielsweise generiert man hierfür zunächst eine Maske auf Grundlage der gesamten über Schwellwerte segmentierten Muskulatur. Nutzt man nun die vorhandene Option, nur auf dieser Maske das Malwerkzeug benutzen zu können, lässt sich sicherstellen, dass nur solche Voxel in ein im Anschluss definiertes Volumenobjekt integriert werden, die bereits zuvor als Teil der Muskulatur segmentiert wurden.(Abb. 2.3)

Ein solches Vorgehen ist zur Segmentation der Einzelmuskeln unerlässlich, um eine saubere

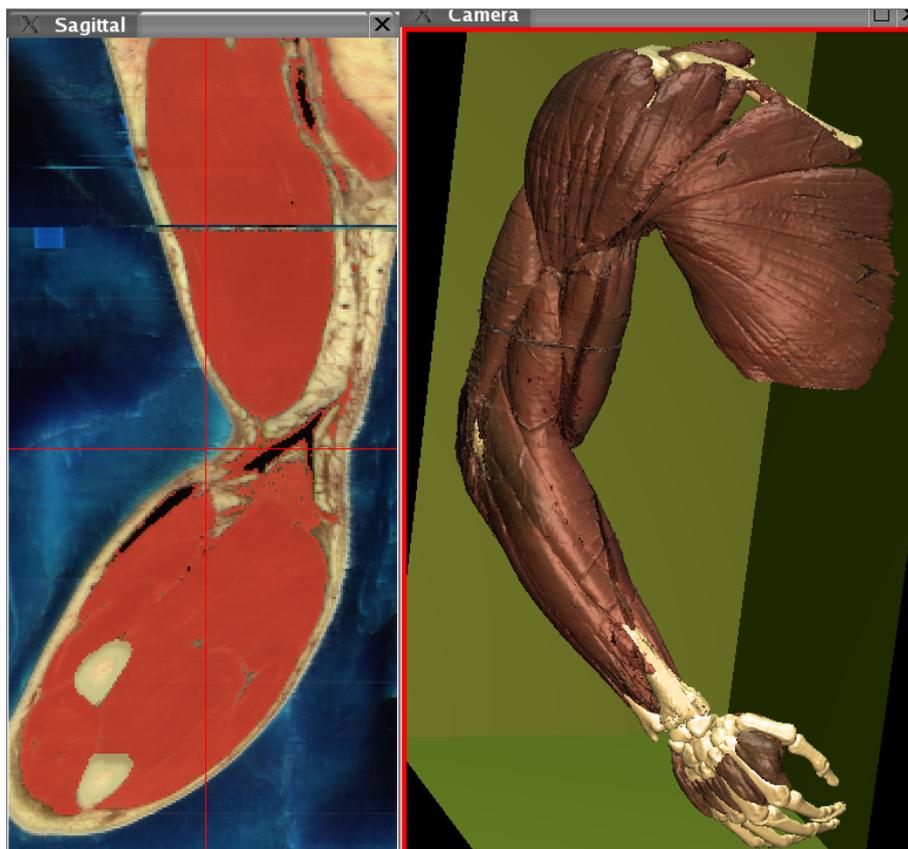


Abbildung 3.3: Überführung der segmentierten Muskulatur in eine Maske (rot)

bere Trennung zu gewährleisten. Es muss hierbei erwähnt werden, dass innerhalb des Datenvolumens nur eindeutige Zuweisungen möglich sind.

Das heißt, jedes Voxel kann nur einem Volumenobjekt zugewiesen werden. Dies hat zur Konsequenz, dass bei jeder neuen Definition eines Volumenobjektes alle Voxel, die zuvor einem anderen Volumenobjekt zugeordnet waren, nach der Definition nun dem neuen Objekt angehören. Um zu vermeiden, dass auf diese Weise „Löcher“ in einem bereits segmentierten Objekt entstehen, muss stets sehr genau darauf geachtet werden, welche Voxel zur Definition eines neuen Objektes genutzt werden.

Eben dies ist durch den gezielten Einsatz der beschriebenen Masken zu erreichen.

Darüberhinaus bietet das Programm die Möglichkeit, mehrere solcher Masken in bis zu vier Pufferspeichern („buffers“) abzulegen. Von dort können die gespeicherten Masken wieder geladen und bei Bedarf durch logische Operationen (AND, OR, XOR) miteinander kombiniert werden.

Diese Funktionen können beispielsweise benutzt werden, um zwei separat segmentierte Objekte, wie zum Beispiel zwei Anteile eines Muskels, zu einem Volumenobjekt zu verbinden.

Die genannte Pufferspeicherfunktion ist jedoch nur während des laufenden Arbeitsprozesses nutzbar. Möchte man Masken für spätere Verwendungen dauerhaft erhalten, müssen auch diese als Volumenobjekte definiert und gespeichert werden.

Dies ist nicht unproblematisch, da der Maske durch ihre Umwandlung in ein definiertes Volumenobjekt die ihr zugehörigen Voxel über eine eindeutige UID zugewiesen werden und im Falle von Überschneidungen diese Voxel damit möglicherweise aus einem früher definierten Objekt entfernt werden.

Als Folge dieses Umstandes ist es nicht möglich, jeden Zwischenstand der Arbeit jederzeit zu sichern und beliebig fortzufahren. Ein Sichern der Objekte ist nur dann sinnvoll möglich, wenn über die verschiedenen genannten Segmentationsverfahren ein Objekt gewonnen werden konnte, dass in dieser Form weiterhin erhalten bleiben kann und soll, ohne Überschneidungen zu bereits fertiggestellten Objekten aufzuweisen.

Berücksichtigt man diese durch die Beschaffenheit von Datensatz und Bearbeitungsprogramm gegebenen Besonderheiten, ist die Segmentation von Volumenobjekten, wie sie für diese Arbeit benötigt werden, gut möglich.

Hiermit wurde ein Überblick über die im Rahmen dieser Arbeit genutzten Verfahren zur Segmentation von Volumenobjekten aus dem vorbestehenden Volumendatensatz des „Visible Human“ gegeben.

Eine weitere Möglichkeit zur Erstellung von Volumenobjekten wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

3.5 Ein Werkzeug zur Erstellung von Röhrenobjekten

Mit dem Programm VOXEL-MAN steht das Werkzeug „TREE EDIT“ zur Verfügung, das in der Lage ist, dreidimensionale, oberflächenbasierte Röhrenobjekte zu erzeugen, die in den späteren Atlas als Objekte integriert werden können (RHEINWALD, 1996).

Anhand vom Benutzer festgelegter Fixpunkte, die im Programm als Kugelobjekte dargestellt werden und deren Radius den jeweiligen Durchmesser des Röhrenobjekts bestimmt, generiert das Programm tubuläre Strukturen, die in Anordnung und Farbe frei im Raum erstellt werden können. Hierfür können die Fixpunkte in den verschiedenen Schnittbildebeneen gesetzt und bei Bedarf im virtuellen Raum verschoben werden.

Der Tree-Editor kann somit als Hilfsmittel genutzt werden, um auch solche Objekte im späteren Atlas zur Darstellung zu bringen, die aus dem eigentlichen Volumendatensatz aufgrund zu großer farblicher Ähnlichkeit zum umgebenden Gewebe nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand segmentiert werden könnten und die in natura ein röhrenförmiges Aussehen aufweisen, wie dies zum Beispiel bei Gefäßen der Fall ist.

Auch Nerven und Sehnen können in gewissem Maße mit diesem Programm modelliert werden. Da aufgrund der festgelegten Kugelform der Ankerpunkte jedoch nur Objekte mit kreisrundem Durchmesser erzeugt werden können, ist die Modellierung dieser Strukturen, die manchmal einen eher flachen, bandartigen Aspekt besitzen können, mit Schwierigkeiten verbunden (s. hierzu auch 3.2). Möchte man z.B. das natürliche Aussehen von Sehnen möglichst exakt reproduzieren, müssen mehrere Röhrenobjekte neben- und übereinander angeordnet werden, was mit entsprechend höherem Arbeitsaufwand einhergeht.

Für die genaue Beschreibung und Funktionsweise des Tree-Editors sei an dieser Stelle auf eine andere Arbeit verwiesen (NOSTER, 2001).

Nachdem die Beschaffenheit der zugrunde liegenden Daten sowie die für deren Bearbeitung benutzten Mittel dargestellt wurden, sollen nun die konkreten Arbeitsvorgänge und deren Ergebnisse dargestellt werden.

4 Ergebnisse und Anwendungen

4.1 Die Segmentation der oberen Extremität

4.1.1 Segmentation der Knochen

Für die Segmentation der Knochen der oberen Extremität wurde in erster Linie der CT-Datensatz des Visible Human Male verwendet, da knöcherne Strukturen aufgrund ihrer hohen Dichte im CT sehr gut abgrenzbar sind.

Mittels Schwellwertsegmentation konnten die Knochen der oberen Extremität als Ganzes problemlos segmentiert werden. Auch die Aufteilung in die Einzelknochen stellte sich unkompliziert dar, da die einzelnen Teile des Bewegungsapparates stets durch Knorpel oder Bandstrukturen verbunden sind, welche eine andere Dichte als Knochen aufweisen. In dem vorliegenden CT-Datensatz fehlt jedoch ein Segment im Bereich des Ellenbogens, weshalb die Segmentation des distalen Humerus, sowie der proximalen Anteile von Radius und Ulna nicht vollständig möglich war.

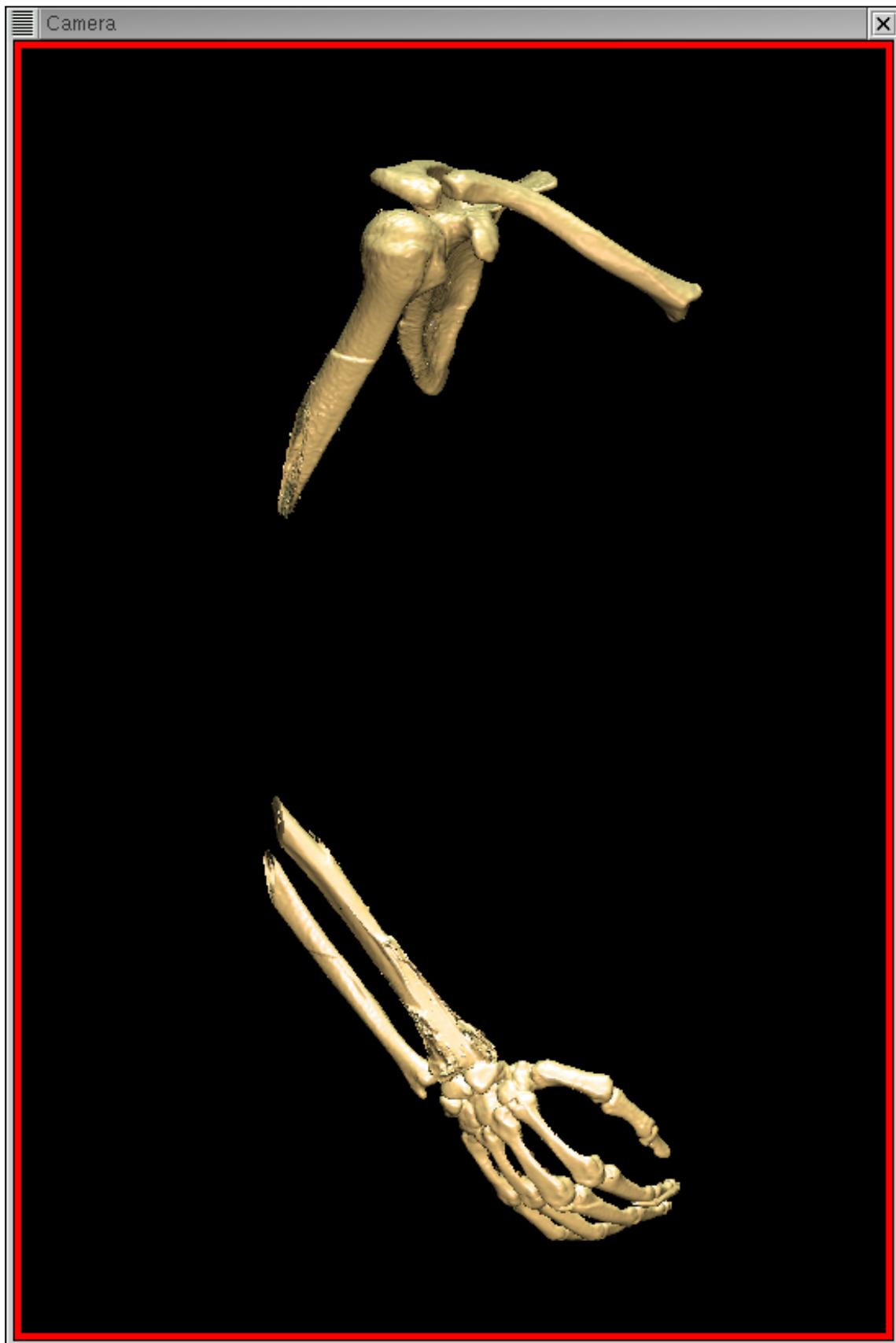


Abbildung 4.1: Im CT-Datensatz ist der Bereich des Ellenbogens angeschnitten. Aufgrund der fehlenden Schichten war hier keine komplette Segmentation von Humerus, Radius und Ulna möglich

Um die fehlenden Segmente zu ersetzen, wurde nun auf den Kryotomdatensatz zurückgegriffen, der die im CT ausgesparten Anteile vollständig enthält. Da das Farbspektrum von Knochen dem von Sehnen und anderen Weichteilen stark ähnelt, war die Segmentierung mit keiner dem CT vergleichbaren Genauigkeit möglich. Es konnte jedoch über Farbschwellwertsegmentation eine ausreichende und nach manueller Einpassung exakt anschließende Rekonstruktion der fehlenden Stücke erreicht werden.



Abbildung 4.2: Die fehlenden Knochensegmente wurden aus dem Kryotom-Datensatz segmentiert und eingepasst.

In der bildlichen Darstellung zeigt sich jedoch eine deutlich unruhigere Oberflächenstruktur der aus dem Kryotom-Datensatz rekonstruierten Segmente. Die vorhandenen aus dem CT-Datensatz gewonnenen Objekte beizubehalten und nur die fehlenden Stücke aus dem Kryotomdatensatz zu segmentieren, erschien daher in diesem Fall als die sinnvollere Lösung. Eine komplette Segmentierung der Knochen mittels Farbschwellwert aus

dem Kryotomdatensatz hätte in der visuellen Darstellung keine vergleichbar guten Ergebnisse liefern können.



Abbildung 4.3: Aufgrund der sehr ähnlichen Farbwerte von Knochen und umgebendem Weichteilgewebe war keine dem CT vergleichbare Schwellwertbestimmung möglich. Die hier abgebildeten caudalen Anteile des Humerus zeigen daher eine unruhigere, optisch weniger ansprechende Oberflächenstruktur

4.1.2 Segmentierung der Muskulatur

Die Muskulatur in ihrer Gesamtheit ließ sich problemlos mittels Schwellwertsegmentation aus dem Kryotomdatensatz segmentieren. Die Muskulatur weist einen sehr spezifischen Rotton auf, dem lediglich das rote Knochenmark, das üblicherweise von Knochen umschlossen ist, und die Wände von Blutgefäßen ähnlich sind. Auch einige Bauchorgane, wie Leber und Milz, weisen eine ähnliche Farbschattierung auf, sind jedoch für die Segmentierung der oberen Extremität nicht von Bedeutung.

Dieses muskelspezifische Farbspektrum konnte mit Schwellwerten sehr exakt umgrenzt werden, womit die Muskulatur mit hoher Genauigkeit vom übrigen Gewebe zu trennen war.

Der deutlich aufwändigere und letztlich zeitintensivste Teil der Arbeit bestand nun darin, die einzelnen Muskeln voneinander zu separieren.

Bei größeren Muskelgruppen, die durch dickere Muskelfaszien getrennt sind, war zum Teil eine Trennung mittels der Zusammenhangsanalyse (s. 2.4) möglich. Bei dem Großteil der Muskulatur war dieses Verfahren jedoch nicht erfolgreich anwendbar, da die einzelnen Muskeln häufig sehr eng aneinander liegen und die trennenden Faszien so dünn sind, dass bei der vorliegenden Bildauflösung eine Trennung nicht gelang. Auch eine Separation der Muskeln aufgrund von Farbunterschieden war nicht möglich, da die farbliche Variation innerhalb eines Muskels teilweise größer war, als zwischen zwei benachbarten Muskeln.

Da die genannten halbautomatischen Verfahren nicht zum Erfolg führten, wurde der Großteil der Muskeln manuell segmentiert. Hierfür wurde das mittels Schwellwertsegmentation gewonnene Volumenobjekt „Armmuskulatur“ als Maske genutzt, auf deren Grundlage die Einzelmuskeln mit dem Malwerkzeug schnittbildweise segmentiert wurden (s. 2.4).

Um den Anspruch der Authentizität zu wahren, wurde zunächst in der Weise vorgegangen, das makroskopisch als getrennt erscheinende Strukturen als Einzelobjekte segmentiert wurden und erst im Anschluss die Prüfung erfolgte, ob die so gewonnenen Objekte beschriebenen Einzelmuskeln entsprechen. Auf diesem Wege konnte bereits ein großer Teil der gesuchten Armmuskulatur segmentiert werden.

Eine solche eindeutige Trennung war jedoch nicht bei allen Muskeln erkennbar. Insbe-

sondere die Separation von *M. brachialis* und *M. biceps brachii* stellte sich als sehr kompliziert dar, da in großen Abschnitten der aneinandergrenzenden Muskelmassen in allen drei Schnittebenen keine visuelle Trennung möglich war. Es wurden schließlich manuell zwei den benannten Muskeln entsprechende Volumenobjekte mit den genannten Bezeichnungen segmentiert, wobei versucht wurde, gleichermaßen dem in anderen Teilen sichtbaren Trennungsverlauf zu folgen und gleichzeitig eine möglichst glatt visualisierbare Trennfläche zu erhalten.

Ähnliche Probleme traten in abgeschwächter Form auch bei der Segmentation der Unterarmmuskulatur auf, da hier eine größere Anzahl Muskeln auf engem Raum zusammenliegt und daher eine visuelle Trennung nicht immer möglich war.

Orientiert an anatomischen Standardwerken konnte letztlich letztendlich eine zufriedenstellende Darstellung der einzelnen Muskeln erreicht werden.

Ein Problem, die Identifizierung der Muskeln betreffend, war hierbei durch die spezielle Armhaltung des Visible Human Male bedingt. In den als Referenz benutzten Anatomieatlanten kamen zumeist standardisierte Armhaltungen in der anatomischen Normalposition zur Darstellung. Da diese Armhaltungen sich jedoch nicht mit der speziellen im Volumenmodell vorliegenden Position deckten, war die Vergleichbarkeit mitunter sehr eingeschränkt.

Es konnte jedoch durch den Vergleich mit diversen anatomischen Atlanten eine verlässliche Zuordnung erfolgen. (LIPPERT, 1996) (BENNINGHOFF, 2002) (SOBOTTA, 2006)

4.2 Modellierung mit dem „Tree-Editor“

4.2.1 Allgemeines zur Anwendung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Werkzeug „TREE EDIT“ genutzt, um Gefäße, Nerven und Sehnen zu modellieren.

Die Erstellung der gewünschten Strukturen war auf diese Weise sehr zeitsparend möglich. Der räumliche Bezug zum Volumendatensatz wurde hierbei in der Form hergestellt, dass die zu erzeugenden Röhrenobjekte direkt auf den Schnittbildern und in der dreidimensionalen Ansicht modelliert werden konnten.

Als Orientierung sollten dabei die tatsächlichen Strukturen im Volumendatensatz dienen, soweit diese ausreichend erkennbar und zu verfolgen waren.

Mitunter war es jedoch erforderlich, die Position der zu erstellenden Objekte anhand anatomischer Standardwerke so zu wählen, wie es ihrem natürlichen Verlauf in Relation zu vorhandenen Strukturen am ehesten entsprechen würde. Dies ist ein unbefriedigender Kompromiss, bedenkt man den Anspruch der Arbeit, die im Atlas dargestellten Objekte auf der Basis im Volumendatensatz tatsächlich vorhandener Strukturen gewinnen zu wollen.

Da aber ohnehin ein gewisses Maß an Abstraktion erforderlich ist, um ein allgemeingültiges anatomisches Modell zu erzeugen, kann bei gewissenhafter Ausführung sicherlich auch die Integration solcher rein künstlichen Strukturen toleriert werden, solange dies der Vollständigkeit des späteren Atlanten dient.

Zum Verständnis des jeweiligen räumlichen Verlaufes oder, im Falle der Sehnenansätze, zur Veranschaulichung der Funktion der Muskeln, sind diese Objekte als abstrahierte Repräsentation der natürlichen Strukturen zweifelsohne in der Lage, die gewünschten Informationen zu vermitteln.

4.2.2 Modellierung der Arterien

Die Modellierung der Arterien war ohne größere Schwierigkeiten mit guter Genauigkeit möglich. Aufgrund ihres Lumens, das sich in den überwiegenden Teilen des Datensatzes als schwarzer Hohlraum darstellte, konnte der Verlauf der Arterien gut verfolgt werden. Hierbei wurde fast ausschließlich die transversale Schnittebene gewählt, da hier im Falle der oberen Extremität die Gefäße und deren Aufzweigungen stets nahezu senkrecht getroffen und damit gut erkennbar waren.

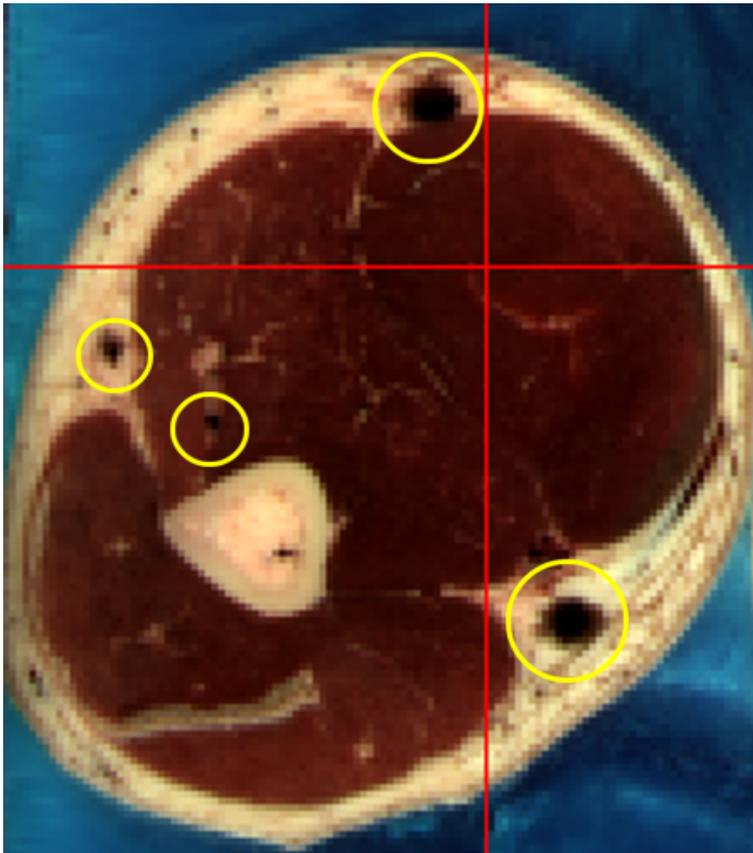


Abbildung 4.4: In der transversalen Schnittebene lassen sich die Gefäße (hier Arterien und Venen) als dunkle Hohlräume gut von den umgebenden Strukturen abgrenzen

4.2.3 Modellierung der Nerven

Auch der Verlauf der Nerven an der oberen Extremität war auf den Schnittbildern ausreichend zu erkennen. Obgleich der farbliche Unterschied zum umgebenden Weichteilgewebe sehr gering war, konnten die Nerven aufgrund ihrer Faserung und des Bindegewebes deutlich vom übrigen Gewebe unterschieden werden.

Während für die meisten Abschnitte der oberen Extremität auch hier die transversale Schnittebene am sinnvollsten für die Modellierung zu nutzen war, stellte sich für die Erstellung des Oberarmnervengeflechts (*Plexus brachialis*) die coronare Schnittebene als günstigere Wahl dar, da hier die Spinalnerven bei ihrem Austritt aus den Zwischenwirbelräumen am einfachsten an ihrer räumlichen Anordnung zueinander identifiziert werden konnten.

Die Darstellung des Nervengeflechtes gestaltete sich etwas schwieriger, da dort mehrere kurze Nervensegmente auf engem Raum in komplexer Weise miteinander verflochten sind. Hier musste neben der korrekten Lage in den Schnittbildern auch ganz besonders die dreidimensionale Ansicht aus verschiedensten Winkeln überprüft werden, um sicherzustellen, dass in der Darstellung die Enden der einzelnen Segmente sauber ineinander übergehen.

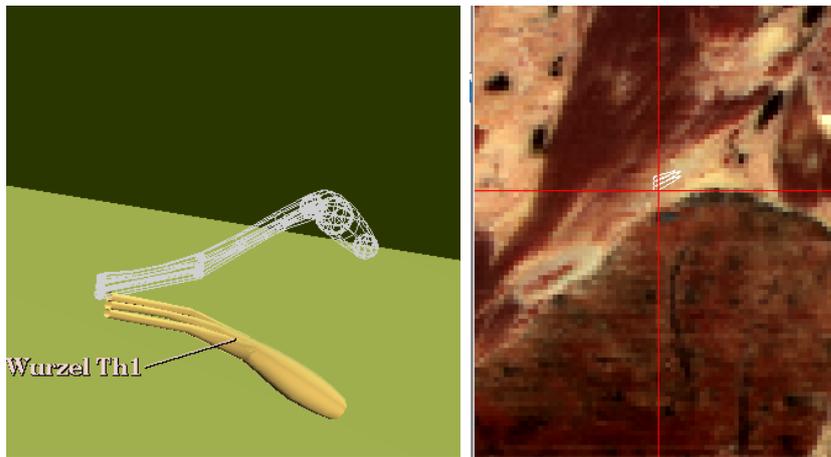


Abbildung 4.5: Das Werkzeug TREE-EDIT bei der Modellierung der Spinalwurzeln in der 3D-Arbeitsansicht und im Schnittbild. Die weißgerasterte, semitransparente Struktur stellt die übliche Objektansicht im Bearbeitungsmodus dar. Im rechten Bild von den sich kreuzenden Positionslinien markiert sieht man den kleinen Anteil der modellierten Struktur, welcher in der aktuell gewählten Schnittebene zum Liegen kommen würde. In dieser Ansicht lassen sich die kugelförmigen Ankerpunkte des aktuell bearbeiteten Röhrenobjektes noch frei verschieben. Änderungen werden dann in Echtzeit mit den Schnittbildern und der 3D-Ansicht kombiniert.

Hierbei ließ sich in besonders effektiver Weise die durch das Werkzeug TREE-EDIT gegebene Möglichkeit zur Speicherung der modellierten Röhrenobjekte in Form von Parameterdateien nutzen. In diesen einfach zu editierenden Parameterdateien werden Position und Radius der Kugelobjekte festgehalten, aus denen ein modelliertes Röhrenobjekt aufgebaut ist.

Durch Modifikation und erneutes Laden der Daten hat der Benutzer hierdurch z.B. die Möglichkeit, ein komplexes Röhrenobjekt (wie hier das Armnervengeflecht) in einzelnen Teilen zu laden und diese Einzelteile als separate Volumenobjekte zu speichern. Eine solche Vorgehensweise war notwendig, um bei der oben beschriebenen angestrebten einwandfreien Darstellung dennoch ein separates Anwählen der jeweiligen Abschnitte des Nervengeflechts zu ermöglichen. Dieses Vorgehen gestaltete sich jedoch problematisch, da das Werkzeug TREE-EDIT nur die Option bietet, *alle* aktuell im Speicher befindlichen Roh-Objekte als *ein einziges* Volumenobjekt zu speichern.

Zum besseren Verständnis sei hier noch einmal der Unterschied zwischen einer Speicherung in einer Parameterdatei und der Speicherung als Volumenobjekt erläutert:

Werden Informationen zu einem modellierten Röhrenobjekt in einer Parameterdatei abgelegt, so können diese Daten zwar problemlos mit einem beliebigen Text-Editor bearbeitet werden, aber nur von dem Werkzeug TREE-EDIT wieder als dreidimensionale Röhrenobjekte dargestellt werden. Auf diese Roh-Objekte kann nicht als Volumendaten zugegriffen werden, wie es für den gewünschten Atlas erforderlich wäre.

Hierfür muss das Roh-Objekt als Volumenobjekt gespeichert werden. Erst dann ist eine Einbettung in einen 3D-Atlas und eine Einbindung in ein semantisches Netzwerk möglich. Allerdings kann ein in dieser Weise gespeichertes Objekt nicht mehr ohne weiteres in seiner Form verändert werden. Daher ist diese entgeltliche Form der Speicherung erst bei einem fertiggestellten Objekt sinnvoll.

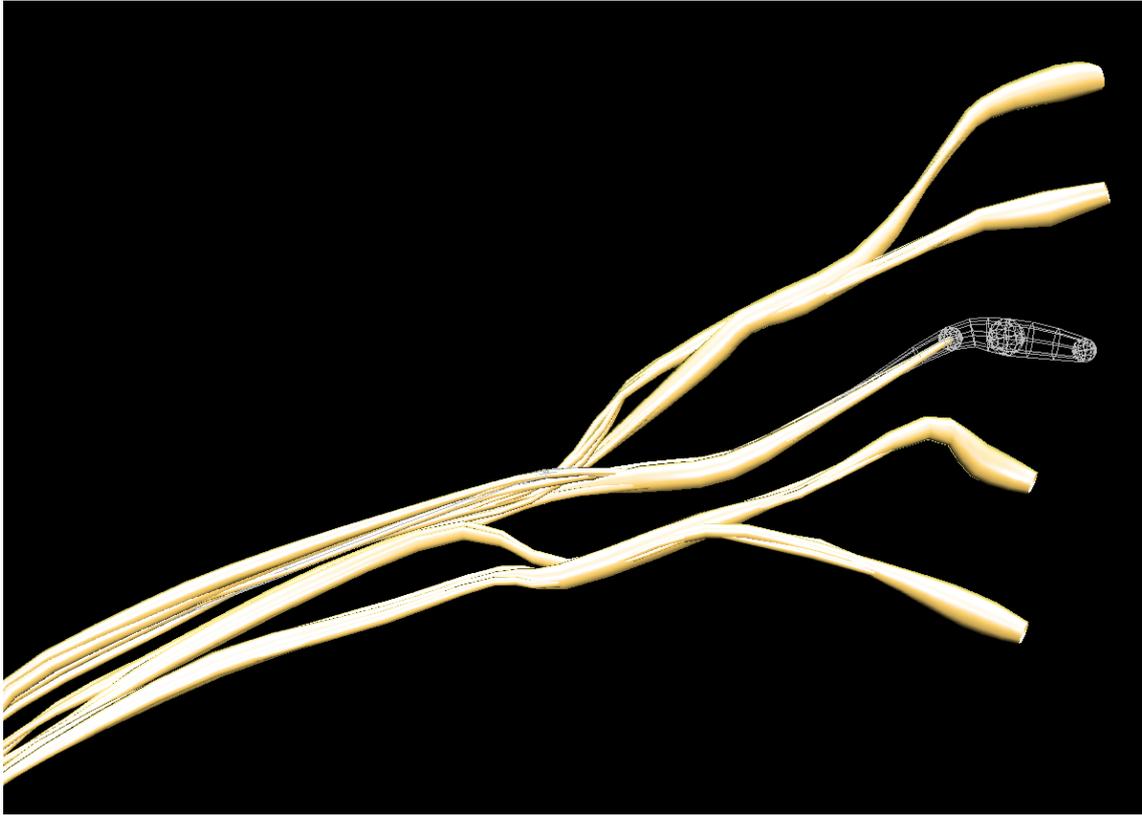


Abbildung 4.6: Das Armnervengeflecht (Plexus brachialis) mit Spinalwurzel in der Arbeitsansicht. Für eine saubere Darstellung in der Gesamtansicht liegen Ende des Objektes „Spinalwurzel C7“ und Beginn des Objektes „Truncus medius“ ineinander.

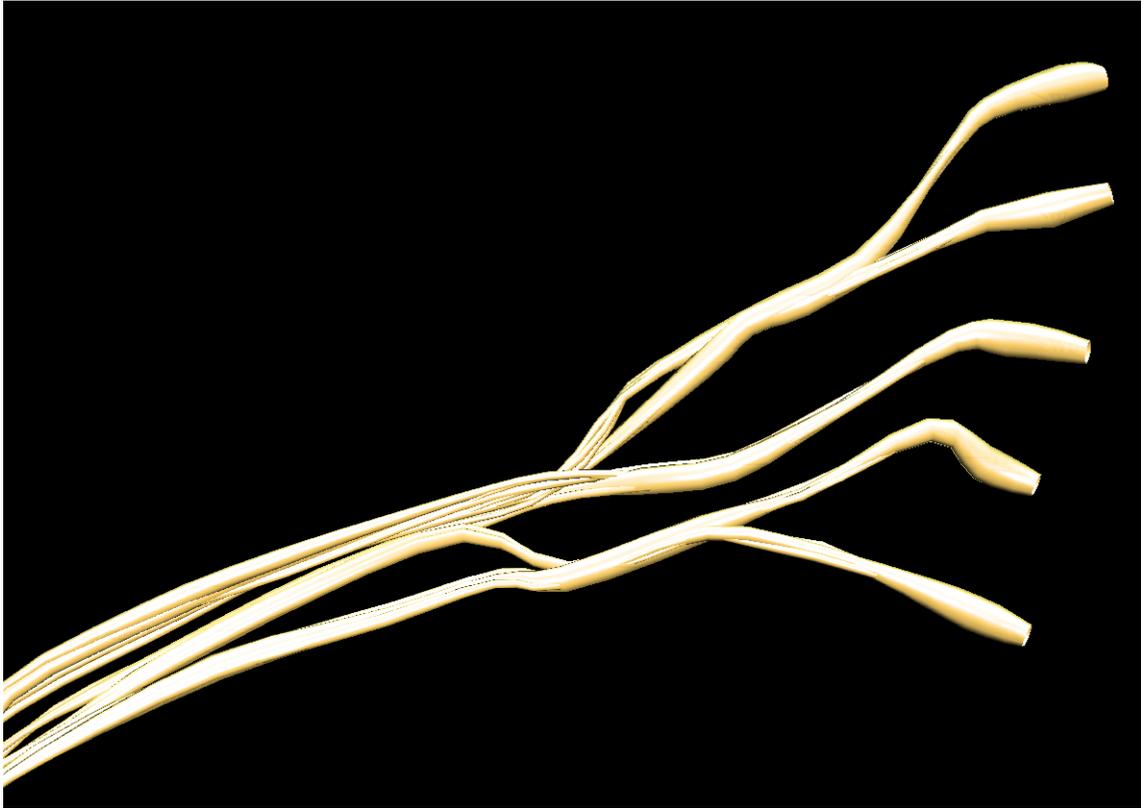


Abbildung 4.7: Gesamtansicht des Armnervengeflechts (plexus brachialis). Durch die Überlappung der einzelnen Anteile ist eine Gesamtdarstellung ohne Umbrüche bei gleichzeitig ausreichend exakter Anwählbarkeit der Einzelobjekte möglich.

Es besteht jedoch die Möglichkeit, die Positionierung eines solchen Volumenobjektes innerhalb eines Datenvolumens zu verändern. Dies kann erforderlich sein, wenn ein Objekt in einem anderen Datenfenster segmentiert wurde und die Strukturen deshalb im aktuellen Datenvolumen räumlich verschoben erscheinen.

Für den konkreten Fall der im Rahmen dieser Arbeit erstellten Röhrenobjekte wurde ein Programm namens ShiftTriangleDataset zur Anwendung gebracht, das eine solche Anpassung der Positionierung leisten kann.

Dieses Programm wurde ursprünglich von Stefan Noster im Rahmen seiner Dissertation in Zusammenarbeit mit Hans-Christian Wulf und Norbert Scheller erstellt (NOSTER, 2001) und später für weitere Anwendungen von Andreas Pommert modifiziert.

Hierbei mussten lediglich einmal zu Beginn im Quellcode des Programms die Koordinaten des benutzten Segmentationsdatenfensters eingegeben werden. In der Folge konnte

das Programm dann einfach auf jedes in diesem Datenfenster modellierte Röhrenobjekt angewendet werden, wobei stets automatisch eine neue Datei mit dem umgerechneten Objekt erstellt wurde.

Durch Kombination dieser Arbeitsgänge ließ sich eine zufriedenstellende Darstellung der Nerven der oberen Extremität erreichen.

4.2.4 Modellierung von Sehnen und Bändern

Für ein gutes Verständnis der Funktion der Muskulatur ist ohne Zweifel die Kenntnis über deren Ansatz und Ursprung erforderlich. Die Verbindung zwischen Muskeln und knöchernem Bewegungsapparat erfolgt über Sehnen.

Da für die Schwellwertsegmentation der Muskulatur deren recht spezifische rötliche Färbung genutzt wurde, wurden in diesem Arbeitsgang die Sehnen und deren Verlauf mitunter nur ungenügend erfasst, da sich Sehnen und Bänder im anatomischen Schnittbild eher weißlich-gelb darstellen

Für die meisten der im Rahmen dieser Arbeit segmentierten Einzelmuskeln ist dies jedoch ohne größere Bedeutung, da der Großteil der zugehörigen Sehnen nur sehr kurz ist und der Verlauf und die Zugrichtung der Muskeln in Bezug auf die knöchernen Strukturen auch so in ausreichendem Maße erkennbar ist.

Nur in Einzelfällen, wie z.B. bei den langen Sehnen des *M. biceps brachii*, war es notwendig, den Sehnenverlauf gesondert darzustellen.

In diesen Fällen wurden mittels des Werkzeugs TREE-EDIT Röhrenobjekte erstellt, die in ihrem Verlauf einzelnen Sehnenfasern entsprachen. Da mit dem genannten Programm nur Objekte mit kreisförmigem Durchmesser erstellt werden können, musste hier eine größere Anzahl von Einzelsträngen zu einem Objekt zusammengefasst werden, um in der späteren Darstellung dem eher flachen, bandartigen Charakter echter Sehnen besser zu entsprechen.

Für die Darstellung der funktionellen Aspekte, hier vor allem zur Veranschaulichung der Zugrichtung eines bestimmten Muskels, hätte sicherlich auch ein einzelnes Röhrenobjekt ausgereicht. Unter Berücksichtigung der hochrealistischen dreidimensionalen Darstellung der übrigen Strukturen schien es jedoch erstrebenswert, auch die Sehnen möglichst realitätsgetreu abzubilden.

Die letztendliche Umsetzung der so modellierten Sehnenverläufe stellt nunmehr einen Kompromiss zwischen realistischer Anatomie und abstrahiertem Modell dar.

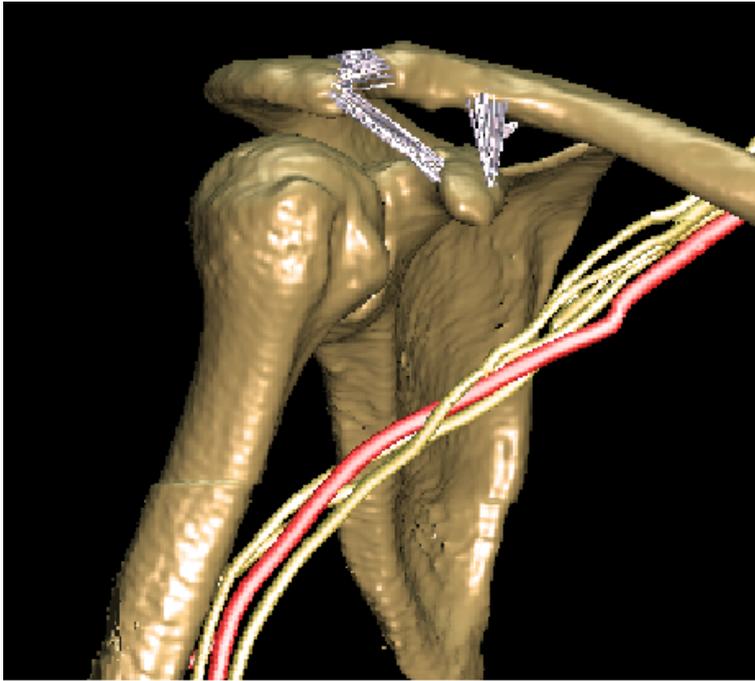


Abbildung 4.8: Darstellung des Bandapparates der Schulter. Durch Kombination zahlreicher einzelner Röhrenobjekte wurde der flache, bandartige Charakter echter Sehnen nachempfunden.

4.3 Generierung des 3D-Atlas

4.3.1 Integration der Objektdaten

In den vorangegangenen Abschnitten wurde beschrieben, auf welche Weise die unterschiedlichen Volumenobjekte segmentiert wurden, die im 3D-Atlas der oberen Extremität enthalten sein sollen.

Auf diese Weise wurden Knochenstrukturen, Muskeln, Gefäße und Nervenstränge segmentiert, die nun gemeinsam in einem interaktiven Atlas der oberen Extremität vereinigt wurden.

Da Knochen und Muskulatur aus verschiedenen Datensätzen gewonnen wurden (CT und Kryotom), musste hierfür eine Anpassung der Koordinaten erfolgen, um sicherzustellen, dass alle Objekte in korrekter räumlicher Beziehung zueinander stehen. Da jedoch beide Datensätze aus je 1871 transversalen Schnitten aufgebaut sind, konnte hier eine einfache händische Umrechnung erfolgen, wobei durch einfache Addition und Subtraktion der Koordinaten des Kryotom-Datenfensters und des CT-Fensters ein voxelgenaues Einpassen der Objekte möglich war.

Gleichermaßen mussten auch die mit TREE-EDIT generierten Nerven und Gefäße in den Volumendatensatz eingepasst werden. Hier konnte die Umrechnung der Koordinaten automatisiert durch das Programm ShiftTriangleDataset (vgl. 3.2.3) erfolgen.

Durch dieses Zusammenführen der auf verschiedene Weise segmentierten Volumenobjekte entstand ein vollständiges, virtuelles dreidimensionales Modell der oberen Extremität, das segmentierte Volumenobjekte gemeinsam mit den modellierten Polygonobjekten zur Darstellung bringen kann (TIEDE, 1999).

So bietet sich die Möglichkeit, alle für das Erlernen der Anatomie der oberen Extremität erforderlichen Strukturen einzeln oder in Verbindung dreidimensional zur Darstellung zu bringen.

Alle über die räumlich-bildliche Darstellung der Objekte hinausgehenden Wissensinhalte wurden in Form einer Wissensbasis („knowledge base“) organisiert, um einen übersichtlich strukturierten Zugriff auf die relevanten Informationen zu ermöglichen.

Mit dem Aufbau dieser Wissensbasis befasst sich der nächste Abschnitt.

4.3.2 Aufbau des semantischen Netzwerkes

Die alleinige räumliche Darstellung anatomischer Strukturen gibt dem Benutzer nur ein begrenztes Maß an Informationen. Um diese Strukturen überhaupt benennen und weitere Wissensinhalte abrufen zu können, müssen die hierfür erforderlichen Informationen mit den Objekten in Verbindung gebracht und strukturiert werden. Dies erfolgt in Form einer sogenannten Wissensbasis. Zunächst erhält jedes segmentierte Objekt im Augenblick der Definition (vgl. 2.4) eine individuelle Zahlenkennung („UID“). Jede UID kann nur einmal vergeben werden und jedes Voxel kann nur einem Objekt zugehörig sein, um widersprüchliche Zuordnungen zu vermeiden. Entsprechend dieser Grundsätze werden die UIDs durch das Segmentationswerkzeug des VOXEL-MAN-Autorensystems automatisch vergeben. Hierbei ist zunächst unerheblich, ob das segmentierte Objekt auch einer einzeln benannten anatomischen Struktur entspricht. So bestehen einige Muskeln, wie z.B. der *M. biceps brachii* aus mehreren Einzelobjekten, die zunächst mit jeweils einer separaten UID gekennzeichnet wurden. Durch die Masken- und Pufferfunktionen des Segmentationsprogrammes wurden sie schließlich zu einem Objekt zusammengefasst und so über eine gemeinsame UID anwählbar.

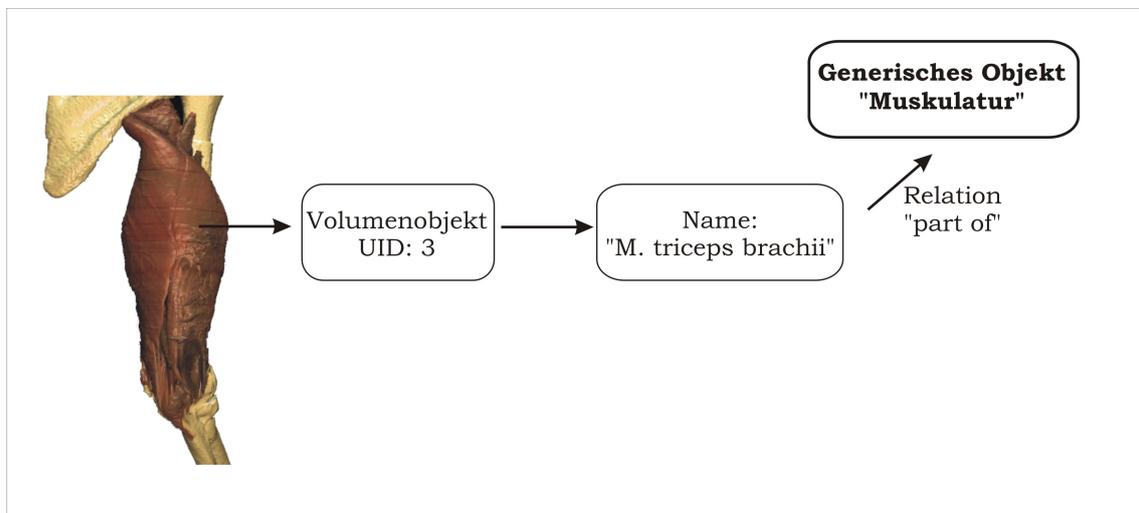


Abbildung 4.9: Ein segmentiertes Volumenobjekt wird mit einer eindeutigen Zahlenkennung, der „UID“, versehen. Mittels dieser UID kann das Objekt nun mit weiteren Informationen, wie z.B. der anatomischen Bezeichnung verknüpft werden.

Nachdem sichergestellt wurde, dass jeder einzeln zu benennenden anatomischen Struktur genau ein segmentiertes Objekt mit genau einer UID entspricht, wurde jeder UID ein Name zugewiesen. Die Namen wurden hierbei entsprechend der internationalen anatomischen Nomenklatur vergeben. Nach dieser ersten Zuweisung können für das neu benannte Objekt weitere Inhalte in die Wissensbasis integriert werden, wie z.B. Bezeichnungen in anderen Sprachen oder die sogenannten Relationen. Letztere beschreiben die Beziehungen von Objekten und können Informationen darüber enthalten, ob das jeweilige Objekt Teil eines definierten generischen Objektes ist (gekennzeichnet über die Relation „part of“), oder, im Fall von Nerven und Gefäßen, ob das Objekt von einem anderen Objekt abzweigt (Relation „branching from“).

Generische Objekte dienen hierbei lediglich der Strukturierung der Informationen und haben keine direkte visuelle Entsprechung. So sind z.B alle Muskeln der oberen Extremität gemeinsam im generischen Objekt „Muskulatur“ verknüpft, das selbst jedoch kein über eine separate UID definiertes Volumenobjekt ist.

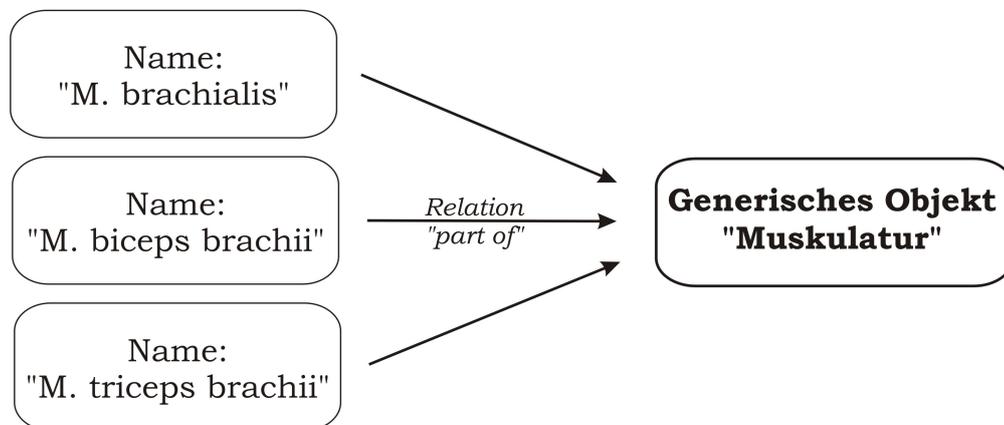


Abbildung 4.10: Generische Objekte dienen der Strukturierung. Über Relationen wie „part of“ oder „branching from“ können Volumenobjekte und generische Objekte miteinander verknüpft werden.

Durch die unterschiedlichen Verknüpfungen der Objekte mit generischen Objekten und

untereinander entsteht ein Netzwerk von Informationsinhalten, das daher als „semantisches Netzwerk“ bezeichnet wird. Dieses in Form der Wissensbasis angelegte Netzwerk repräsentiert und vermittelt auf diese Weise alle Wissensinhalte, die über die räumliche Darstellung der Objekte hinausgehen.

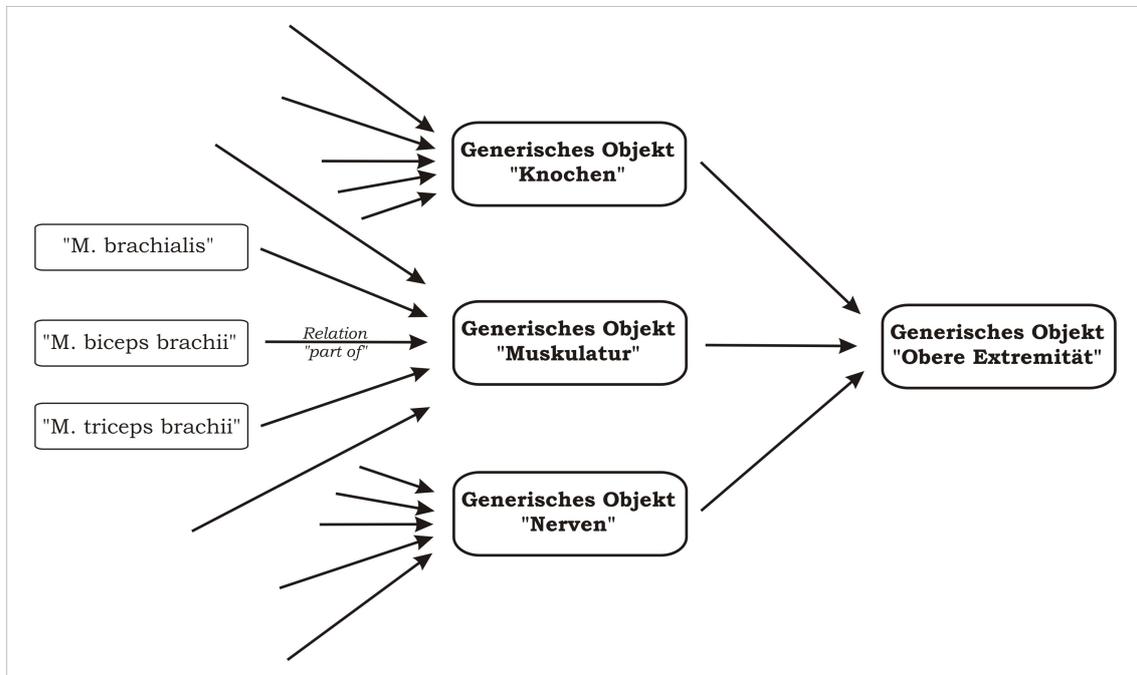


Abbildung 4.11: Durch die Verknüpfungen von Volumenobjekten und generischen Objekten entsteht das semantische Netzwerk. In dieser „Wissensbasis“ sind alle Informationen integriert, die im späteren Atlas in Verbindung mit dem dreidimensionalen Modell abgerufen werden können.

Das semantische Netzwerk stellt in Verbindung mit der dreidimensionalen Visualisierung der Volumenobjekte die eigentliche Basis zur Vermittlung der Informationsinhalte dar und verknüpft so die visuellen und inhaltlichen Informationen zu einem ganz neuen Lehrmedium.

4.4 Anwendung des 3D-Atlas

Nachdem nun die Vorgehensweise zur Erstellung des 3D-Atlas der oberen Extremität beschrieben wurde, soll nun die Anwendung desselben veranschaulicht werden.

Der 3D-Atlas der oberen Extremität wurde integriert in das Programm „VOXEL-MAN 3D-Navigator: Arm und Hand“ (HÖHNE et al., 2008), das neben dem im Rahmen dieser Arbeit erstellten Modell der oberen Extremität noch ein detaillierteres Modell der Hand enthält (GEHRMANN et al., 2006).

Das Programm bietet die Möglichkeit, Knochen, Muskeln, Nerven und Arterien der oberen Extremität dreidimensional darzustellen, einzelne Strukturen anzuwählen und nach der internationalen anatomischen Nomenklatur in lateinischer, deutscher oder englischer Sprache zu benennen.

Hierbei stehen verschiedene Ansichten in Form von „intelligent movies“ zur Verfügung, die als vorerrechnete 3D-Ansichten des Modells eine Echtzeit-Drehung auf üblichen Standardcomputern erlauben. (HÖHNE et al., 1997) (HÖHNE et al., 1996) (SCHUBERT et al., 1999)

Dies umfasst ein rein knöchernes Modell der oberen Extremität, sowie ein kombiniertes Modell aus Knochen, Muskeln, Gefäßen und Nerven, dass durch stückweises Entfernen von Muskelschichten den Blick auf tiefergelegene Strukturen erlaubt. Ferner bietet der Atlas die Möglichkeit, Schnitte in sagittaler und transversaler Ausrichtung durch den Datensatz zu bewegen und die auf diesen Schnittflächen getroffenen Strukturen zu markieren und benennen zu lassen. Als letztes verbleibt eine Ansicht, die einer klassischen Röntgenaufnahme der Schulter entspricht und in Kombination mit einer entsprechenden äußeren 3D-Ansicht das Erlernen der radiologischen Anatomie ermöglicht.

Durch die Möglichkeit, Strukturen beliebig auszuwählen und darstellen zu lassen, bietet sich dem Benutzer die Möglichkeit, Lerninhalte nach seinen speziellen Bedürfnissen zu strukturieren. So können beispielsweise die Muskeln im Gesamtverbund dargestellt werden, um deren Topographie möglichst nah an der Anatomie des Lebenden zu studieren. Ebenso können aber auch einzelne Muskeln separat zur Ansicht gebracht werden, was mitunter das Erlernen von deren Ursprung, Ansatz und Funktion erleichtert.

Knochen, Muskeln, Nerven und Gefäße können so in unterschiedlicher Kombination visualisiert und zugehörige Informationen abgerufen werden, um eine optimale, individuell

angepasste Wissensvermittlung zu gewährleisten.

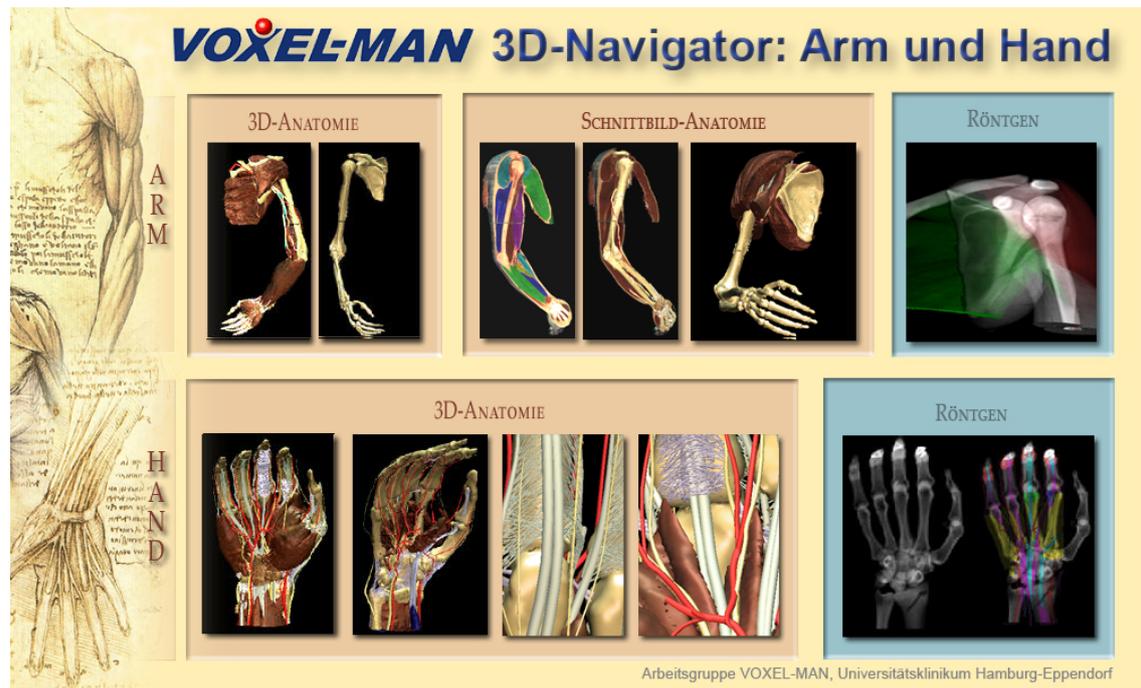


Abbildung 4.12: Das Hauptmenü des VOXEL-MAN 3D-Navigator: Arm und Hand. Das Programm beinhaltet das im Rahmen dieser Arbeit erstellte Modell des Armes, sowie eine detaillierte Darstellung der Hand. Es kann jeweils ausgewählt werden zwischen dreidimensionalen Ansichten, sowie simulierten Röntgenaufnahmen.

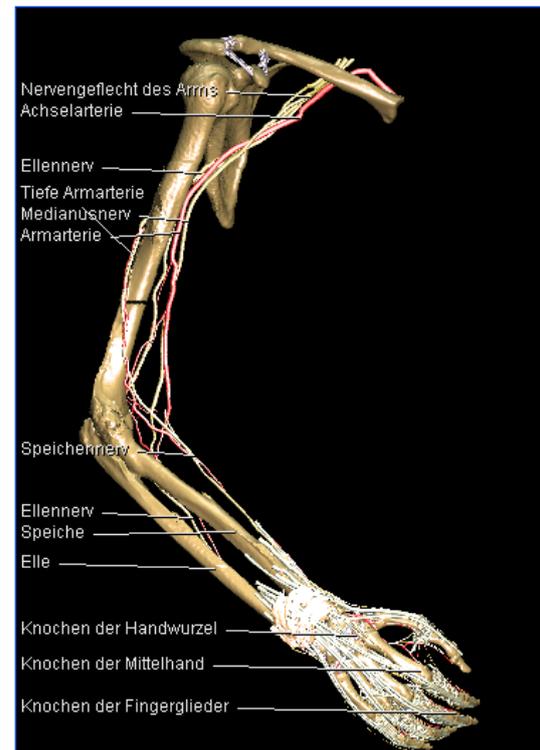
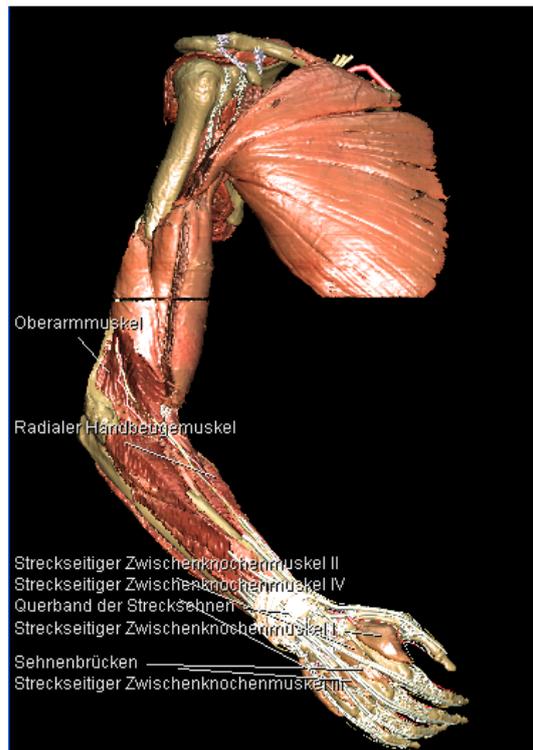
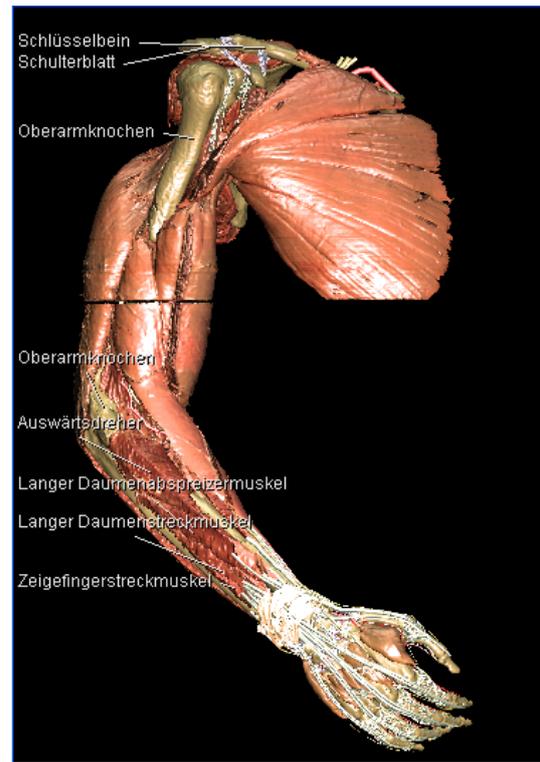
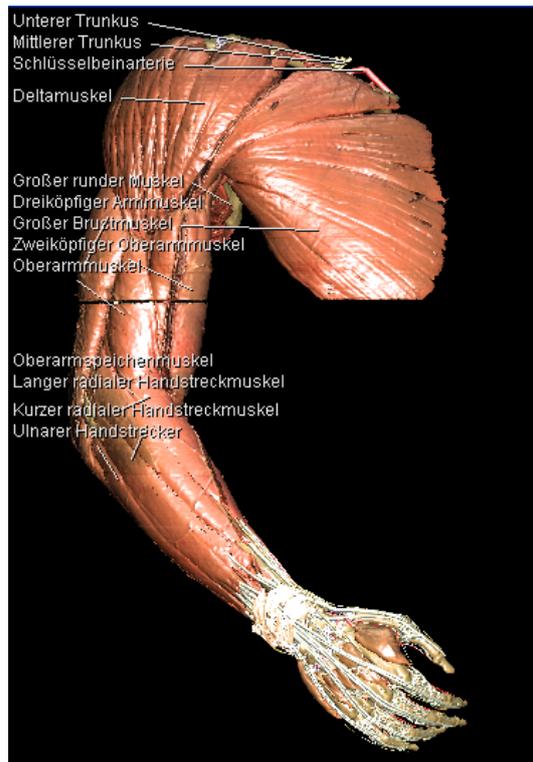


Abbildung 4.13: Kombiniertes Modell der oberen Extremität. Durch schrittweise Entfernung der Muskulatur werden die tieferliegenden Strukturen sichtbar.

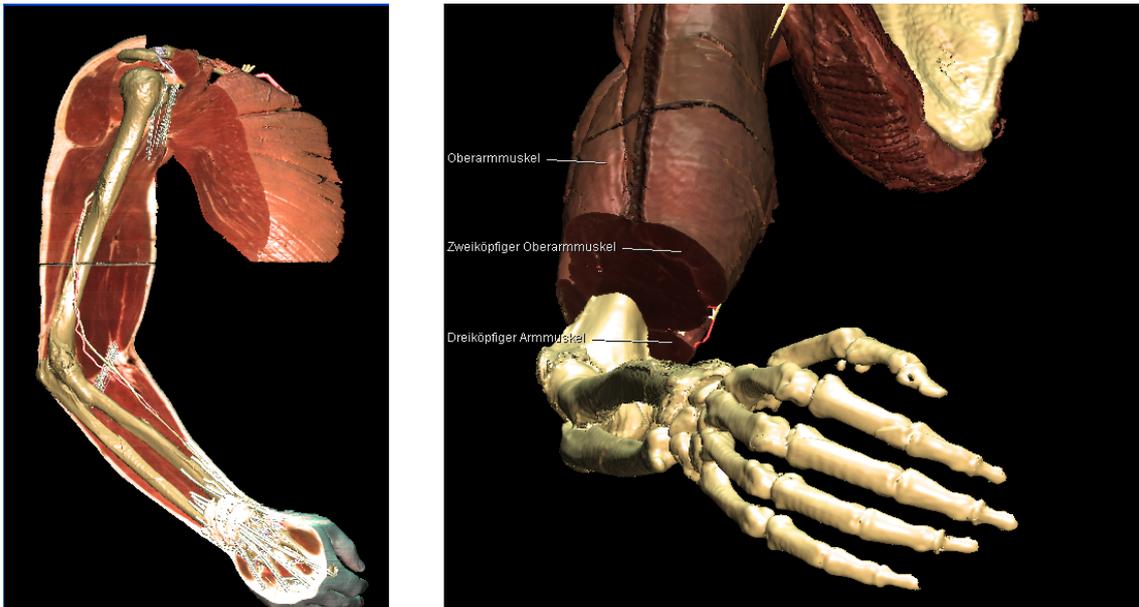


Abbildung 4.14: (a+b) Darstellung eines sagittalen und eines transversalen Schnittes durch das Modell. Die Schnittebenen können im Atlas interaktiv bewegt werden. Zur besseren Orientierung bleiben die knöchernen Strukturen in der vollständigen dreidimensionalen Ansicht erhalten.



Abbildung 4.15: (a+b) Gemeinsame Darstellung von dreidimensionaler Oberflächenansicht und simuliertem Röntgenbild der Schulter. Durch diese unmittelbare Gegenüberstellung kann das Erlernen der radiologischen Anatomie erleichtert werden.

5 Diskussion

Die obere Extremität des Menschen ist eine äußerst komplexe Struktur. Erst durch die Interaktion einer Vielzahl unterschiedlicher Muskeln sind die fein aufeinander abgestimmten Bewegungsmöglichkeiten der menschlichen Hand realisierbar. Das Wissen um diese spezifische Anatomie ist sowohl für Studenten der Medizin, als auch für praktizierende Ärzte gleichermaßen bedeutsam wie schwer zu erlernen.

Zweidimensionale Atlanten können die räumliche Anordnung der beteiligten Strukturen nicht vollständig darstellen, zumal deren Position im Rahmen der Bewegung der Extremität teilweise erheblichen Änderungen unterworfen ist. Das Verständnis für diesen räumlichen Aufbau und die damit verbundene Funktion kann durch dreidimensionale Darstellungen erheblich erleichtert werden. Der Ansatz dieser Arbeit, einen solchen dreidimensionalen Anatomieatlas aus einem realistischen Datensatz zu erstellen, verbindet somit die Möglichkeiten der Wissensvermittlung aus der Präparation einzelner Leichen mit der Anwendbarkeit anatomischer Standardwerke zu einem ganz neuen Lehrmedium. Mögliche Kritikpunkte bei diesem Vorgehen liegen hierbei vor allem in der Beschaffenheit des Datensatzes, sowie der Vorgehensweise bei der Segmentation.

Naturgemäß stellt der benutzte Datensatz nur die anatomischen Verhältnisse eines einzelnen Menschen dar, was das Risiko mit sich bringt, nicht allgemein anwendbare Daten zu erhalten. Um die geforderte Anwendbarkeit dennoch zu gewährleisten, wurde im gesamten Verlauf der Arbeit stets ein Vergleich mit anatomischen Standardwerken vorgenommen. Durch diesen Vergleich konnte sichergestellt werden, dass die im Rahmen dieser Arbeit segmentierten Volumenobjekte sämtlich anatomischen Strukturen entsprechen, die in anatomischen Standardwerken als normal beschrieben sind.

Weiter gilt es anzumerken, dass im Fall dieser Arbeit die Armhaltung sehr ungewöhnlich für anatomische Betrachtungen ist, was die Vergleichbarkeit mit anderen Medien erschwert. Dagegen steht, dass gerade ein aus realistischen Daten erstelltes Volumenmodell eine anders kaum zu erreichende Detailtreue aufweist und aufgrund des Volumencharakters einzigartige Anwendungen ermöglicht (wie z.B. Schnitte in unterschiedlichen

Ebenen), die oberflächenbasierte Modelle, wie detailliert sie auch sein mögen, kaum leisten können.

Ein weiterer Ansatz für Kritik liegt in der Segmentation selbst.

Die in dieser Arbeit beschriebenen Segmentationsverfahren benötigen letztlich stets einen menschlichen Benutzer, der diese Verfahren zur Anwendung bringt. Damit bleibt zu klären, ob die erstellten Objekte tatsächlich vorhandenen Strukturen entsprechen oder ob diese vielmehr der Willkür des Benutzers entspringen. Um den möglichen subjektiven Einfluss des Benutzers auf die segmentierten Objekte zu minimieren, wurde im Rahmen dieser Arbeit bei der Muskulatur ein mehrstufiger Ansatz zur Anwendung gebracht. Hierbei wurde zunächst mit halbautomatischen Verfahren die Muskulatur als Ganzes aus dem Datensatz herausgearbeitet. Erst im Anschluss daran wurden manuell einzelne Muskeln als Volumenobjekte segmentiert. Letztlich verbleibt auch hierbei ein nicht gänzlich zu eliminierendes Maß an Entscheidungen, die der Benutzer selbst zu treffen hat. So gab es wiederholt Situationen, in denen nicht objektiv zu klären war, welchem Muskel bestimmte Voxelverbände zuzuordnen waren. An den Grenzflächen zweier Einzelmuskeln gab es immer wieder einzelne Voxel, die in einer Schnittebene so aussahen, als gehörten sie zu einem Muskel, in einer anderen Schnittebene jedoch, als gehörten sie zu einem anderen. Eine eindeutige Zuordnung war jedoch zwingend erforderlich, um ein vollständiges, lückenloses Modell zu erhalten. Konnte aus den Volumendaten selbst keinerlei Hinweis auf die räumliche Begrenzung eines zu segmentierenden Objektes gewonnen werden, so wurde eine Entscheidung nach Kriterien einer sauberen visuellen Darstellung gefällt. Das Ziel war in diesem Fall die Generierung einer möglichst glatten Grenzfläche.

Durch die Kombination von halbautomatischen Verfahren und manueller Segmentation konnte mit guter Genauigkeit ein Volumenmodell erstellt werden, das alle wichtigen Strukturen der oberen Extremität enthält und deren räumliche Informationen realitätsnah abbildet.

Auf Basis des hier gewonnenen Volumenmodells wurde in einer weiteren Arbeit bereits ein detaillierter dreidimensionaler Atlas der Hand erstellt (GEHRMANN et al., 2006).

Als Ausblick für zukünftige Arbeiten und Anwendungen sind vor allem zwei Richtungen von besonderem Interesse:

Zum einen wäre eine Weiterentwicklung des anatomischen Modells in Form eines beliebig beweglichen Armes wünschenswert, in welchem Funktion und räumliche Änderungen der einzelnen Muskeln realitätsnah dargestellt werden können und welches in einem nächsten Schritt auch zur Simulation von Operationen geeignet wäre.

Realisierungen von beweglichen Modellen sind als oberflächenbasierte Lernprogramme bereits umgesetzt worden (HILLMAN, 2006), kommen bisher aber vor allem aus dem Bereich der Computer-Animation für Filmproduktionen, die teilweise sogar auf Basis des Visible-Human-Datensatzes erarbeitet wurden (BEYLOT et al., 1996) (GARNER und PANDY, 2001) (GINGINS et al., 1996). Allerdings steht bei letzteren weniger die medizinisch-anatomische Wissenvermittlung im Vordergrund, als vielmehr das realistische Aussehen der fertigen Animationsfiguren (ALBRECHT et al., 2003) (HABER et al., 2001) (KONSKY und ZOMLEFER, 1994) (SCHEEPERS et al., 1997). Hinzu kommt hierbei,

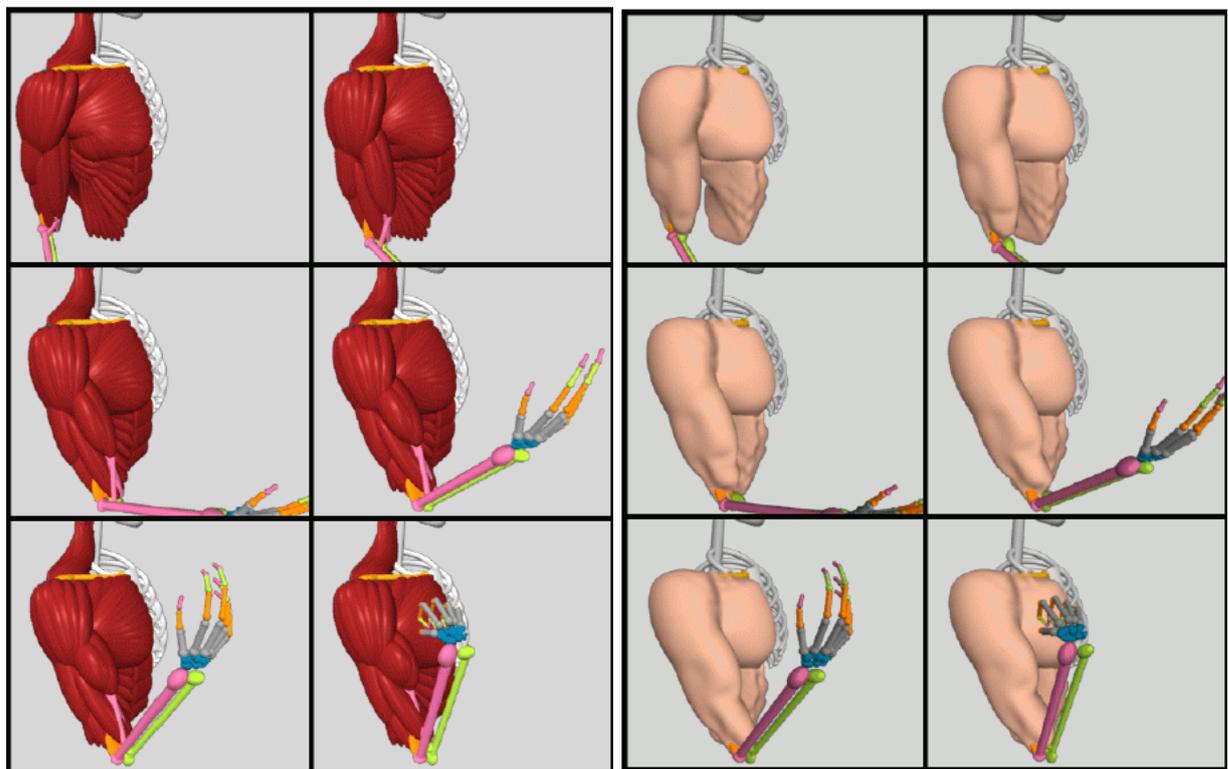


Abbildung 5.1: Anatomisch orientierte Animationsmodelle zeigen durchaus realistische Resultate, geben als oberflächenbasierte Modelle allerdings keinerlei Aufschluss über die innere Beschaffenheit von Körperstrukturen (Scheepers, 1997)

dass im Rahmen der Computeranimation stets oberflächenbasierte Objekte zum Einsatz kommen, auch wenn diese auf der Grundlage realistischer Volumendaten erstellt wurden

(GINGINS et al., 1996) (MAUREL et al., 1996).

Die simulierte Bewegung von Volumenobjekten stellt sich ungleich schwieriger dar, wird aber bereits im Rahmen anderer Arbeiten angegangen (GAGVANI und SILVER, 2000) (WU und PRAKASH, 2000).

Eine zweite vorstellbare Richtung könnte die detaillierte Darstellung anatomischer Strukturen einzelner Patienten sein.

Hierbei könnten halbautomatische Verfahren im Laufe der Zeit so zuverlässig werden, dass eine exakte virtuelle Darstellung auf Grundlage von MRT oder anderer Bildgebung in sehr kurzer Zeit erstellt werden und so als Grundlage für Operationsplanungen genutzt werden könnte.

Beispielsweise ist auf diese Art bereits eine virtuelle Coloskopie möglich, die bereits in diversen Kliniken auf Basis von CT- oder MRT-Daten durchgeführt wird.

(VON STERNBERG-GOSPOS, 2002) Überdies besitzen neuere CT-Geräte bereits regelmäßig eine integrierte Software zur Oberflächendarstellung knöcherner Strukturen. Derartige nicht-invasive Untersuchungsmethoden sind natürlich für alle Bereiche des menschlichen Körpers wünschenswert und vielleicht schon in naher Zukunft realisierbar.

Abschließend ist hierbei zu sagen, dass die computergestützte, virtuelle Darstellung anatomischer Strukturen sicherlich in Zukunft im medizinischen Bereich einen zunehmenden Stellenwert in Lehre, Diagnostik und Therapie haben wird.

6 Zusammenfassung

Das Erlernen der menschlichen Anatomie ist insbesondere für Medizinstudenten und Ärzte eine notwendige Voraussetzung für deren praktische Tätigkeit. Computergestützte, dreidimensionale Anatomieatlanten können hier als sinnvolle Ergänzung zu klassischen Lehrmedien dienen, da sie deutlich anschaulicher räumliche Informationen vermitteln können.

Ziel der Arbeit war es, einen solchen digitalen Anatomieatlas der oberen Extremität als volumenbasiertes Modell zu erstellen. Im Modell enthalten sein sollten visuelle Darstellungen und Strukturinformationen aller Knochen, Muskeln, Nerven und Arterien der oberen Extremität. Grundlage des virtuellen, dreidimensionalen Modells waren die Schnittbilddatensätze des Visible Human Projektes, die bereits von der VOXEL-MAN-Gruppe zu einem Datenvolumen vorverarbeitet wurden. Um die für den zu erstellenden Atlas erforderlichen anatomischen Strukturen als Volumenobjekte zu erhalten, mussten diese aus dem gesamten Datenvolumen herausgelöst werden. Dieses Verfahren ist die *Segmentation*, bei welcher verschiedene halbautomatische und manuelle Verfahren zum Einsatz kamen.

Dieser 3D-Atlas bietet die Möglichkeit, am Computer alle für das Erlernen der Anatomie der oberen Extremität relevanten Strukturen einzeln oder im Zusammenhang im virtuellen Raum zur Darstellung zu bringen und zugehörige Informationen einfach und strukturiert abzurufen. Er kann damit für Lehre und Selbststudium, in erster Linie von Medizinstudenten und Ärzten, jedoch ebenso für weitere Berufszweige aus Medizin- und Gesundheitswesen aber auch für Schüler oder sonstige Interessierte, genutzt werden.

Zukünftige Arbeiten könnten ein bewegliches Volumenmodell oder Programme zu virtuellen Operationssimulation hervorbringen, um auf diese Weise das Spektrum der Anwendbarkeit digitaler dreidimensionaler Atlanten zu erweitern.

Literaturverzeichnis

- ACKERMAN, MICHAEL I. (1991). *Viewpoint: The visible human project*. J. Biocommun., 18(14).
- ALBRECHT, IRENE, J. HABER und H.-P. SEIDEL (2003). *Construction and animation of anatomically based human hand models*. In: *Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, S. 98–109.
- BENNINGHOFF, ALFRED (1985). *Makroskopische und mikroskopische Anatomie*. Urban u. Schwarzenberg, Auflage: 14. A., München.
- BENNINGHOFF, ALFRED (2002). *Makroskopische und Mikroskopische Anatomie*. Urban u. Schwarzenberg; Auflage: 15. A., München.
- BEYLOT, P, P. GINGINS, P. KALRA, N. M. THALMANN, W. MAUREL, D. THALMANN und J. FASEL (1996). *3D Interactive Modeling using the Visible Human Dataset*. In: *Proc. Eurographics '96, Computer Graphics Forum, Switzerland*, S. 33–44.
- BIOVERE (2006). *Anatomica 3D*. 624 North 300 West, Salt Lake City, UT 84103, www.biovere.com.
- BOCK, RUDOLF und N. HECKMANN (2001). *3D Modelle in der Anatomie*. Universität des Saarlandes, Institut für Anatomie und Zellbiologie, D-66421 Homburg.
- GAGVANI, NIKHIL und D. SILVER (2000). *Animating the Visible Human Dataset*. In: *Proceedings for The Visible Human Project Conference*. online proceedings.
- GARNER, B. A. und M. G. PANDY (2001). *Musculoskeletal model of the upper limb based on the visible human male dataset*. In: *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, S. 93–126.
- GEHRMANN, SEBASTIAN, K. H. HÖHNE, W. LINHART, B. PFLESSER, A. POMMERT, M. RIEMER, U. TIEDE, J. WINDOLF, U. SCHUMACHER und J. M. RUEGER (2006). *A novel interactive anatomic atlas of the hand*. Clin. Anat., 19(3):258–266.

- GINGINS, P, P. BEYLOT, P. KALRA, N. M. THALMANN, W. MAUREL, D. THALMANN und J. FASEL (1996). *Modeling using the Visible Human Dataset*. MIRALab, CUI, University of Geneva, 24 rue du General Dufour, 1211 Geneva, Switzerland.
- HABER, JÖRG, K. KÄHLER, I. ALBRECHT, H. YAMAUCHI und H.-P. SEIDEL (2001). *Face to Face: From Real Humans to Realistic Facial Animation*. In: *Proceedings of the 3rd Israel-Korea Binational Conference on Geometrical Modeling and Computer Graphics*, S. 73–82, Seoul, Korea. Kyung Moon.
- HILLMAN, SUSAN K. (2006). *Interactive Functional Anatomy, 2d Edition*. (ISBN 1-904-36964-2).
- HÖHNE, KARL HEINZ, S. GEHRMANN, T. NAZAR, A. PETERSIK, B. PFLESSER, A. POMMERT, U. SCHUMACHER und U. TIEDE (2008). *VOXEL-MAN 3D Navigator: Upper Limb. Systemic and Radiological Anatomy. Arm und Hand. Systematische und Radiologische Anatomie..* Springer-Verlag Electronic Media, Heidelberg. (DVD-ROM, ISBN 978-3-540-21010-8).
- HÖHNE, KARL HEINZ und W. A. HANSON (1992). *Interactive 3D-segmentation of MRI and CT volumes using morphological operations*. *J. Comput. Assist. Tomogr.*, 16(2):285–294.
- HÖHNE, KARL HEINZ, B. PFLESSER, A. POMMERT, K. PRIESMEYER, M. RIEMER, T. SCHIEMANN, R. SCHUBERT, U. TIEDE, H. FREDERKING, S. GEHRMANN, S. NOSTER und U. SCHUMACHER (2000). *VOXEL-MAN 3D Navigator: Inner Organs. Regional, Systemic and Radiological Anatomy*. Springer-Verlag Electronic Media, Heidelberg. (3 CD-ROMs, ISBN 3-540-14759-4).
- HÖHNE, KARL HEINZ, K. PRIESMEYER, M. RIEMER, T. SCHIEMANN, R. SCHUBERT, U. TIEDE, A. POMMERT und H.-C. WULF (1996). *Exploring the Visible Human via "intelligent movies"*. *Radiology*, 201(P):564. (abstract).
- HÖHNE, KARL HEINZ, K. PRIESMEYER, M. RIEMER, T. SCHIEMANN, R. SCHUBERT, U. TIEDE und H.-C. WULF (1997). *Interactive tomographic volume visualization with "intelligent movies"*. *Europ. Radiol.*, 7(Supplement ECR '97):S435. (abstract).

- KONSKY, B. und M. ZOMLEFER (1994). *Interactive visualization of human arm structure and function*. In: *Engineering in Medicine and Biology Society, 1994. Engineering Advances: New Opportunities for Biomedical Engineers. Proceedings of the 16th Annual International Conference of the IEEE*, S. 686–687. Baltimore, MD, USA.
- LIPPERT, HERBERT (1996). *Lehrbuch Anatomie*. Urban u. Schwarzenberg, Auflage: 4. A., München. (ISBN 3-541-10064-8).
- MAUREL, W., D. THALMANN und P. HOFFMEYER (1996). *A Biomechanical Musculoskeletal Model of Human Upper Limb for Dynamic Simulation*. In: *Computer Animation and Simulation '96*, S. 121–136.
- NOSTER, STEFAN (2001). *Modellierung des peripheren Nervensystems im Visible Human Datensatz zur Erstellung eines 3D-Körpermodells*. Doktorarbeit, Fachbereich Medizin, Universität Hamburg.
- RHEINWALD, KLAUS (1996). *Ein interaktiver 3D-Editor zur Modellierung von Blutgefäßen*. Diplomarbeit, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg.
- SCHEEPERS, FERDI, R. PARENT, W. CARLSON und S. MAY (1997). *Anatomy-based modeling of the human musculature*. Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques.
- SCHIEMANN, THOMAS, M. BOMANS, U. TIEDE und K. H. HÖHNE (1992). *Interactive 3D-segmentation*. In: ROBB, RICHARD A., Hrsg.: *Visualization in Biomedical Computing II, Proc. SPIE 1808*, S. 376–383, Chapel Hill, NC. (ISBN 0-8194-1008-X).
- SCHIEMANN, THOMAS, J. NUTHMANN, U. TIEDE und K. H. HÖHNE (1996). *Segmentation of the Visible Human for high quality volume based visualization*. In: HÖHNE, KARL HEINZ und R. KIKINIS, Hrsg.: *Visualization in Biomedical Computing, Proc. VBC '96*, Bd. 1131 d. Reihe *Lect. Notes Comput. Sci.*, S. 13–22. Springer-Verlag, Berlin.
- SCHIEMANN, THOMAS, U. TIEDE und K. H. HÖHNE (1997). *Segmentation of the Visible Human for high quality volume based visualization*. *Med. Image Anal.*, 1(4):263–271.

- SCHUBERT, RAINER, B. PFLESSER, A. POMMERT, K. PRIESMEYER, M. RIEMER, T. SCHIEMANN, U. TIEDE, P. STEINER und K. H. HÖHNE (1999). *Interactive volume visualization using "intelligent movies"*. In: WESTWOOD, JAMES D., H. M. HOFFMAN, R. A. ROBB und D. STREDNEY, Hrsg.: *Medicine meets Virtual Reality, Proc. MMVR 7*, Bd. 62 d. Reihe *Stud. Health Technol. Inform.*, S. 321–327. IOS Press, Amsterdam.
- SHUHAIBER, JEFFREY H. (2003). *Augmented Reality in Surgery*. Department of Surgery, University of Illinois at Chicago, 840 Southwood St (CSB Suite 518-E), Chicago, IL 60612 (e-mail: shuhaibr@uic.edu).
- SOBOTTA, JOHANNES (2006). *Atlas der Anatomie des Menschen 1. Kopf, Hals, Obere Extremität*. Urban u. Fischer Bei Elsevier; Auflage: 22. A., München/Jena. (ISBN 3-437-44400-X).
- STEINKE, H und M. THOMAS (2002). *Plastination: Korrelation von anatomischem Präparat und Magnetresonanztomografie*. Klinische Sportmedizin/Clinical Sports Medicine-Germany (KCS) 2002, 3:41–46.
- TIEDE, ULF (1999). *Realistische 3D-Visualisierung multiattributierter und multiparametrischer Volumendaten*. Doktorarbeit, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg.
- VON STERNBERG-GOSPOS, NORMAN (2002). *Stellenwert der MR-Kolonographie: Vergleich zwischen multiplanarer Rekonstruktion und virtueller Koloskopie*. Doktorarbeit, Fachbereich Medizin, Universität Hamburg.
- WU, ZHONGKE und E. C. PRAKASH (2000). *Visible Human Animation*. In: *Proceedings of the 3rd Israel-Korea Binational Conference on Geometrical Modeling and Computer Graphics*, S. 243–252. Springer, London.

Lebenslauf

- geboren am 16.04.1977 in Hamburg
- 1983 - 1987 Grundschule Redder in Hamburg
- 1987 - 1996 Gymnasium Oberalster in Hamburg
- 1996 allgemeine Hochschulreife am Gymnasium Oberalster
- Januar 1997 bis Oktober 1997 Wehrdienst im Sanitätsbatallion 6 in Breitenburg
- 1997 bis 2004 Studium der Humanmedizin an der Universität Hamburg
- 1. PJ-Tertial Innere Abteilung des Amalie-Sieveking-Krankenhauses in Hamburg
- 2. PJ-Tertial Chirurgische Abteilung des Klinikum Hamburg-Wandsbek
- 3. PJ-Tertial Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
- Juli 2004 bis Dezember 2005 klinische Tätigkeit in der Hals-Nasen-Ohren-Abteilung des Bundeswehrkrankenhauses Hamburg
- Januar 2006 bis März 2009 Tätigkeit als Truppenarzt in der Sanitätsstaffel Appen
- April 2009 bis Oktober 2011 Assistenzarzt in der Hals-Nasen-Ohren-Abteilung des Bundeswehrkrankenhauses Hamburg
- November 2011 bis Oktober 2012 ziviles Weiterbildungsjahr in der HNO-Abteilung des AK Harburg
- November 2012 bis März 2012 Assistenzarzt in der HNO-Abteilung des BWK Hamburg
- seit März 2013 Facharzt in der HNO-Abteilung des BWK Hamburg

Danksagung

Zunächst möchte ich meinem Doktorvater, Prof. Dr. Udo Schumacher danken, der sich bereit erklärte, diese Arbeit zu betreuen und mir für anatomische Fragen aller Art jederzeit zur Verfügung stand.

Prof. Dr. Karl Heinz Höhne danke ich für die Idee zu dieser Arbeit und die Möglichkeit, die technischen und personellen Ressourcen seines Institutes für die praktische Umsetzung nutzen zu dürfen.

Schließlich gilt mein besonderer Dank der Arbeitsgruppe VOXEL-MAN, allen voran Bernhard Pflessner und Dr. Andreas Pommert, die mir während jeder Phase dieser Arbeit stets geduldig mit Rat und Tat zur Seite standen.

Erklärung

Ich versichere ausdrücklich, dass ich diese 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, und dass ich die Dissertation bisher nicht einem Fachvertreter an einer anderen Hochschule zur Überprüfung vorgelegt oder mich anderweitig um Zulassung zur Promotion beworben habe.