

Aus dem Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin,

Abteilung Informatik (Direktor: Prof. Dr. K.H. Höhne)

**Modellierung des peripheren
Nervensystems im Visible-Human
Datensatz zur Erstellung eines
3D-Körpermodells**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

dem Fachbereich der Medizin vorgelegt von

Stefan Noster

geboren in Hamburg

Hamburg, 2001

Angenommen von dem Fachbereich Medizin
der Universitaet Hamburg am 15. Juli 2002

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs
Medizin der Universitaet Hamburg

Dekan: Prof. Dr. C. Wagener

Referent: Prof. Dr. K.-H. Hoehne

Meinen Eltern

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anatomie im Wandel der Zeit	1
1.2	Digitale Atlanten	3
1.3	Stand der Forschung	6
1.3.1	Umsetzung der bildlich-räumlichen Komponente anatomischen Wissens	6
1.3.2	Umsetzung der symbolischen Komponente anatomischen Wissens . . .	10
1.4	Ziel dieser Arbeit	11
2	Material und Methoden	12
2.1	Der Datensatz	12
2.2	Segmentation von Organen	13
2.3	Anforderungen an das Werkzeug für die Modellierungsarbeit	15
2.4	Funktionsweise von Tree-Edit	18
2.5	Die Modellierung der Nerven im Visible-Human Datensatz	19
2.5.1	Die Intercostalnerven	21
2.5.2	Der Plexus lumbalis	23
2.5.3	Der Plexus sacralis	23
2.5.4	Das autonome Nervensystem: Der sympathische Grenzstrang	24
2.6	Integration der entstandenen Objekte in eine Wissensbasis	24
2.7	Übersetzungen der englischen Objektnamen	27
3	Ergebnisse und Anwendungen	30
3.1	Das periphere Nervensystem in der VOXEL-MAN Umgebung	30
3.2	Der VOXEL-MAN 3D-Navigator	34
3.3	Die Grundfunktionen des VOXEL-MAN 3D-Navigators	34
3.4	Visualisierung von funktionellen Inhalten	37
4	Diskussion	37
5	Zusammenfassung	44
6	Inhalt und Benutzung der beiliegenden CD-ROM	45
	Literaturverzeichnis	46

A Änderungen von TREE-EDIT und Integration der Daten in VOXEL-MAN 49

B Systematisierung der Nerven in der Wissensbasis des VOXEL-MAN 52

Danksagung

Lebenslauf

Erklärung

Abbildungsverzeichnis

1	Gliederung anatomischen Wissens	2
2	Eine Nerventafel und eine Zeichnung des Plexus lumbalis	4
3	Erhaltene Binnenstruktur nach Schneideoperationen	8
4	Gitterstrukturen beim Surface-Rendering	9
5	Das Programm "Digital Anatomist"	9
6	Transversalschnitt mit Intercostalstrang	10
7	Segmentation	13
8	Schwellwert-Segmentation	14
9	Connected-Components-Analyse	15
10	Segmentation des Skeletts aus CT-Daten	16
11	Schwellwertsegmentation im Farbraum	17
12	Segmentation mit INTERSEG	17
13	Das Gitternetz und die polygonale Oberfläche der Röhren	19
14	Die Arbeitsumgebung: TREE-EDIT und VOXEL-MAN	20
15	Modellierung eines Spinalganglions	21
16	Modellierung der Intercostalnerven	22
17	Modellierung des Nervus femoralis	23
18	Modellierung des Plexus sacralis	24
19	Modellierung des sympathischen Grenzstrangs	25
20	Generelle Verknüpfungen in der Wissensbasis	26
21	Die Organisation des Plexus sacralis	27
22	Die Organisation des Plexus lumbalis	28
23	Die Organisation der Intercostalnerven	28
24	Übersetzungen der englischen Objektnamen	29
25	Die Semantik des VOXEL-MAN 3D-Navigators	32
26	Der Startup-Screen des VOXEL-MAN 3D-Navigators	33
27	Suchen eines Nerven im 3D-Modell	35
28	Farbliches Hervorheben eines interessierenden Nerven im 3D-Modell	36
29	Beschriften eines Nerven im 3D-Modell	38
30	Der Zugriff auf die Wissensbasis	39
31	Dermatom und versorgender Nerv	40
32	Volumenbasierte und oberflächenbasierte Objekte in einem Modell	40

33	Die Funktionsfenster des Röhreeditors Tree-Edit	49
----	---	----

1 Einleitung

1.1 Anatomie im Wandel der Zeit

Die Kenntnis des menschlichen Körpers in seiner Struktur und Funktion bildet von jeher die Grundlage medizinischer Tätigkeiten. Auch heute noch ist das Erlernen und Verstehen der Strukturen des menschlichen Körpers für jeden Arzt von großer Bedeutung. Pathologische Veränderungen können nur dann als solche erkannt werden, wenn die "normale" Struktur und Funktion des betreffenden Organs bekannt ist. Als normal wird dabei das angesehen, was in der Mehrzahl der menschlichen Körper vorkommt. Abweichungen davon ohne Krankheitswert werden als Normvarianten bezeichnet.

Gute Kenntnisse der Anatomie sind insbesondere für die medizinische Diagnostik wichtig, da hier über verschiedene Techniken nur ein indirektes Abbild der wirklich vorliegenden Strukturen wiedergegeben wird. Thoraxröntgenbilder liefern zum Beispiel nur ein zweidimensionales Überlagerungsbild der Dichte der einzelnen Organe. So unterscheidet sich die Ansicht sehr von dem realen Bild eines offenen Brustsitus. Bei endoskopischen Untersuchungen hingegen verschieben sich die Größenverhältnisse der einzelnen Organe, da die Vergrößerung dynamisch mit dem Abstand zum Objekt variiert. Eine stereoskopische Sichtweise ist monokular nicht möglich, wodurch das endoskopische Vorgehen in Körperhöhlen noch weiter erschwert wird.

Auch der operativ tätige Arzt sollte die Anatomie des Operationsfeldes genau kennen und seine Kenntnisse ständig mit der individuellen Anatomie des Patienten abgleichen. Weiter können speziell nach Voroperationen oder durch große Raumforderungen von Tumoren extreme Abweichungen von der Norm auftreten.

Natürlich beschränkt sich die Anatomie nicht nur auf die mit bloßem Auge erkennbaren Strukturen, also die makroskopische Anatomie. Gerade die mikroskopische Betrachtungsweise erlaubt weitere Einblicke in die Funktion und den Aufbau eines Organs. Ergänzt durch biochemisches und molekularbiologisches Wissen wird ein immer detaillierteres Bild des Körpers des Menschen gezeichnet, durch das die Entstehung einzelner Krankheiten immer mehr erklärt werden kann.

Informationen in der Anatomie bestehen abstrahiert gesehen aus zwei Komponenten: Aus einer symbolischen und aus einer bildlich-räumlichen Information. Diese Informationen sind über den Namen des Organs miteinander verknüpft.

Die bildlich-räumliche Information beschreibt die Struktur in ihrer räumlichen Ausprägung.

Diese Information kann in Worten, in Bildern oder sogar in haptischen Eindrücken vorliegen. Die symbolische Information beschreibt die Struktur, gibt ihr einen Namen und gliedert sie in ein Netzwerk von anderen Informationen. Die Verknüpfungen der einzelnen Strukturen können sich dabei auf die hierarchische Zugehörigkeit (Leberlappen — gehört zu — Leber), auf die Funktion (Hypothalamus – steuert – Hypophyse), die Blutversorgung (A.carotis interna — versorgt – Gehirn), die Innervation (N.phrenicus – innerviert - Zwerchfell), usw. beziehen. So ergibt sich ein Netzwerk der einzelnen Strukturen, die in vielfältigen Abhängigkeiten zueinander stehen.

Beispielsweise ist der Nervus femoralis bildlich-räumlich als ein langer, gelber Strang zu beschreiben. Dieser Strang steht jedoch in Kontakt mit vielen anderen Strängen und endet zum Beispiel in einer anderen Struktur, dem Muskel. Auf der deskriptiven Seite findet man diese topographische Erscheinung ihren Ausdruck, indem der Nervus femoralis zum Plexus lumbalis gehört, der wiederum ein Teil des peripheren Nervensystems darstellt. Nun können Strukturen aber auch nach ihrer Funktion, der Innervierung der entsprechenden Muskelgruppe, nach ihrem histologischen Aufbau und ihren typischen Krankheitsbildern klassifiziert werden.

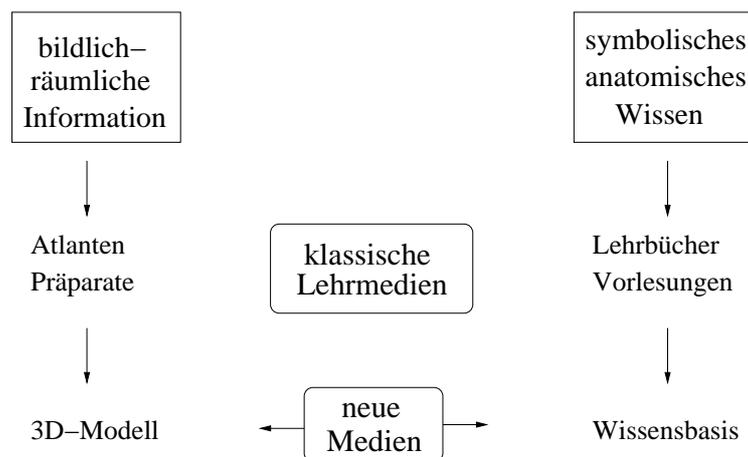


Abbildung 1: Gliederung anatomischen Wissens. Bildlich -räumliche Information und symbolisches anatomisches Wissen werden mit herkömmlichen Methoden immer räumlich und zeitlich getrennt betrachtet und erlernt. Ein interaktiver Atlas kann eine Verknüpfung zwischen beiden Komponenten schaffen.

Mit klassischen Lehrmethoden lassen sich die deskriptive und die visuelle Komponente nur räumlich und zeitlich getrennt voneinander erlernen. So haben die meisten Medizinstudenten nur während des Präparierkurses die Möglichkeit, einzelne Organe in ihrer dreidimensionalen Ausprägung zu erfassen. Danach kann der Student für visuelle Informationen nur auf einen Bildatlas zurückgreifen. Das zweidimensionale Bild im beschreibenden Atlas erlaubt dabei nur kleine Einblicke in die wahren Verhältnisse der Organe. Der Leser bleibt auf die vorgefertigten Ansichten der einzelnen Strukturen beschränkt.

Weiterführende Informationen zur Nomenklatur, zur mikroskopischen Struktur, Blutversorgung oder Funktion des Organs müssen aus Büchern und Vorlesungen räumlich und zeitlich getrennt davon angeeignet werden. Gerade aber Strukturen mit einem komplizierten Verlauf im Körper und mit komplexen Lagebeziehungen zu anderen Organen können durch die beschriebene Vorgehensweise nur schwer erlernt werden. Dies gilt im besonderen Maße für das periphere Nervensystem, welches den Schwerpunkt dieser Arbeit darstellt.

Um das komplexe Netzwerk der Nerven zu erklären, benutzen traditionelle Atlanten drei verschiedene Modalitäten der Inhaltsvermittlung. Zum einen werden in Texten die Nerven in ihrem Verlauf und in ihrer Funktion beschrieben. Um einen visuellen Eindruck davon zu vermitteln, werden auf Bildern kleine Ausschnitte des beschriebenen Verlaufs mit den umgebenden Organen dargestellt. Da diese Informationen jedoch so unstrukturiert und somit schwer erlernbar sind, werden in vielen Atlanten und Lehrbüchern zusätzlich Nerventafeln abgedruckt, die einen genauen Aufbau des Netzwerkes schematisch wiedergeben. Einen Eindruck davon vermittelt Abbildung 1.

Diese drei Modalitäten müssen vom Lernenden über den Namen des Nerven in Zusammenhang gebracht werden. Eine ideale Form der Darbietung wäre es, wenn der Student alle Informationen zur gleichen Zeit und am gleichen Ort zur Verfügung hätte. Digitale Atlanten versuchen die verschiedenen Lernmodalitäten zu kombinieren und gleichzeitig dem Lernenden darzubieten. Dabei soll der Lernende die Möglichkeit haben, die einzelnen Informationsebenen interaktiv zu explorieren und so schnell wie möglich und didaktisch sinnvoll an die gewünschte Information zu gelangen. Ein höchst realistisches Abbild der bildlich-räumlichen Information bieten dabei die digitalen dreidimensionalen Atlanten, die in dieser Arbeit vorgestellt werden.

1.2 Digitale Atlanten

Medizinstudenten und chirurgisch tätige Ärzte sind schon lange nicht mehr nur auf gedruckte Anatomieatlanten und Lehrbücher zur Erlangung ihres anatomischen Wissens angewiesen. Viele Standardwerke der Anatomie sind inzwischen als CD-ROM erhältlich. Die Umsetzung der Inhalte auf das neue Medium CD-ROM fällt dabei jedoch recht unterschiedlich aus. Einige digitale Atlanten, wie z.B. die interaktive Version des Gray, beschränken sich auf eine identische Wiedergabe der Bild- und Textinformation aus der Printversion, mit dem Vorteil, daß die Produktion und Vervielfältigung der CD-ROM deutlich preiswerter ist als bei einem Printmedium [Williams 1998].

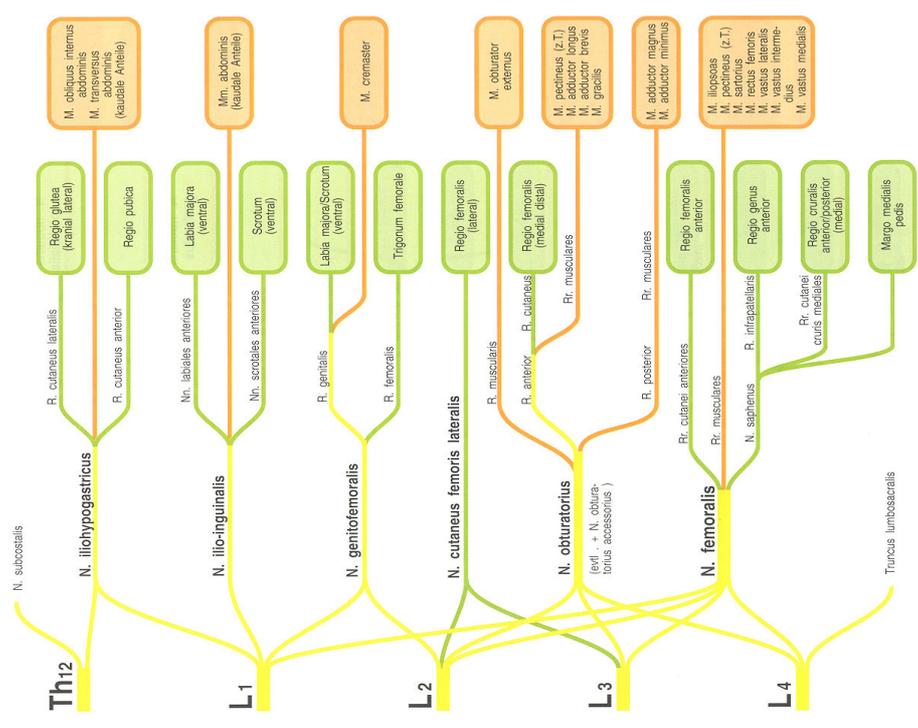
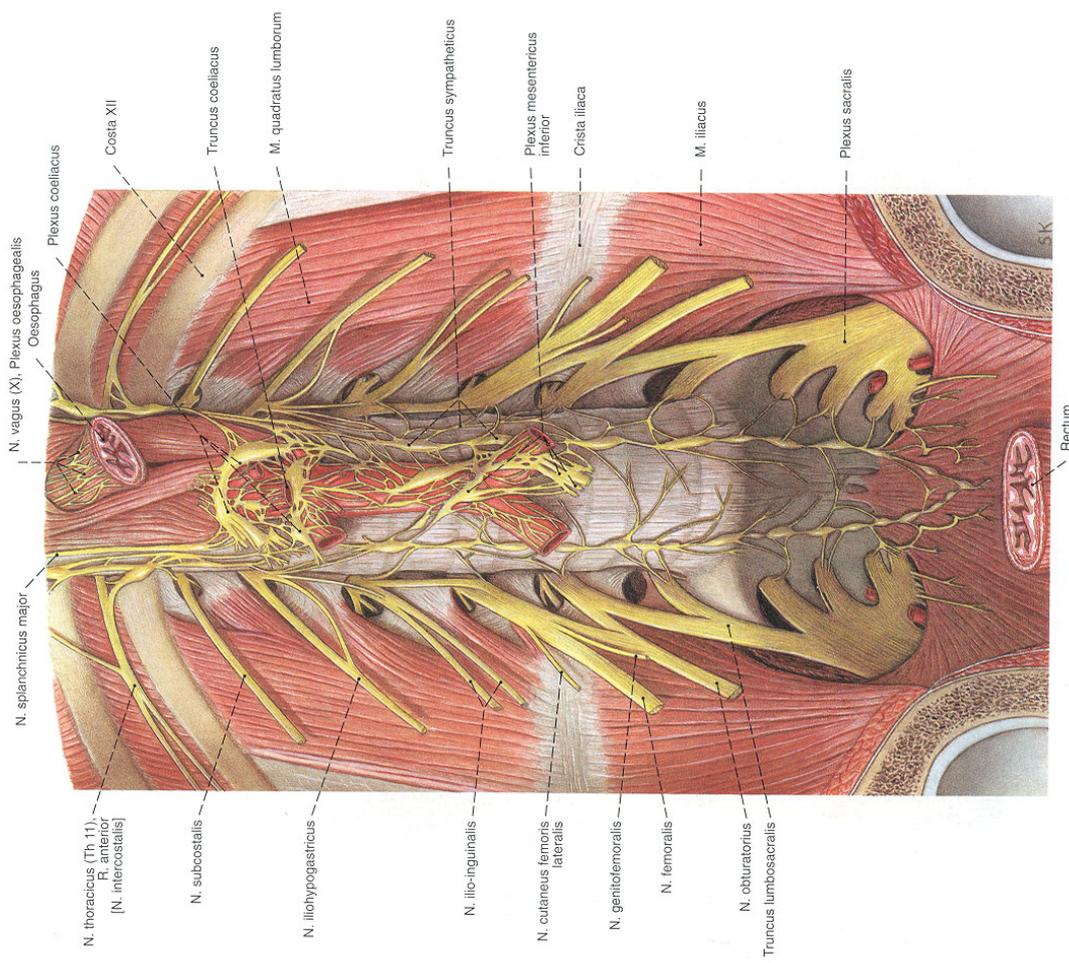


Abbildung 2: Herkömmliche Printmedien: Eine Nerventafel und eine Zeichnung des Plexus lumbalis

In anderen Umsetzungen werden die Informationen aus dem Printmedium nicht nur direkt auf das digitale Medium übertragen, sondern es werden auch die zusätzlichen Möglichkeiten der Computertechnik genutzt. So bietet der Sobotta Atlas, das Standardwerk der menschlichen Anatomie, in seiner interaktiven Form auf CD-ROM neben den Zeichnungen und Lerntexten aus dem Buch auch animierte Bewegungsabläufe und interaktive Filmszenen [Sobotta 2000].

Andere Atlanten entstehen erst durch die neuen Medien und sind dann ausschließlich auf CD-ROM erhältlich. Hier wird eine Verknüpfung zwischen Bildinformation und anatomischen Inhalten angestrebt. So können durch einen Mausklick auf eine Struktur im Bild der zugehörige anatomische Terminus und weitere erklärende Texte dargestellt werden. Erst diese Verknüpfung der bildlich-räumlichen mit der deskriptiven Inhaltskomponente kennzeichnet einen interaktiven Atlas.

Die anatomischen Bilder können dabei als digitalisierte Zeichnung in zwei Dimensionen, (so z.B. der A.D.A.M. Atlas [Lipscomb, Kittrel 1991]), oder aber als räumliche dreidimensionale Repräsentationen vorliegen, wie z.B. der Digital Anatomist [Brinkley *et al.* 1997][Brinkley, Rosse 1997][Rosse *et al.* 1997]. Dreidimensionale (3D) digitale Atlanten, mit denen sich diese Arbeit beschäftigt, sollen dem Betrachter einen sehr plastischen und realen Eindruck der Anatomie des Menschen vermitteln. Ein dreidimensionaler Eindruck wird dadurch erreicht, daß die Abbildungen der Organe drehbar sind. Der Betrachter kann so interaktiv das dreidimensionale Modell bewegen und von allen Seiten betrachten.

Durch die weite Verbreitung der PCs und den günstigen Vertrieb der Programme als CD-ROM sind diese neuen Medien in fast unbegrenzter Menge produzierbar und können so von einer großen Anwendergruppe genutzt werden. Die Qualität der einzelnen Atlanten und ihre Zielgruppen unterscheiden sich dabei erheblich. So richten sich einige Atlanten an Schüler oder an medizinisch interessierte Laien, die sich einen orientierenden Eindruck über die Anatomie verschaffen wollen. Andere Atlanten hingegen erheben den Anspruch, hinsichtlich ihrer Detailtreue und Ausführlichkeit einem gedruckten Anatomieatlas für Mediziner in nichts nachzustehen.

Zusammenfassend betrachtet wird klar, daß zur Wissensvermittlung in der Anatomie ein integriertes Modell aus einem dreidimensionalen digitalen Atlas und einer umfangreichen Beschreibung der einzelnen Strukturen wünschenswert wäre. Gerade ein komplexes Organsystem, wie es das periphere Nervensystem darstellt, kann von der guten räumlichen Darstellung eines dreidimensionalen digitalen Atlases kombiniert mit der verfügbaren deskriptiven Information

profitieren.

1.3 Stand der Forschung

Wie schon oben beschrieben unterscheidet man eine bildlich-räumliche von einer symbolischen Komponente anatomischen Wissens. Um diese beiden Modalitäten in einem digitalen dreidimensionalen Atlas zu repräsentieren, können verschiedene Wege beschrrieben werden, die hier kurz aufgezeigt werden sollen.

1.3.1 Umsetzung der bildlich-räumlichen Komponente anatomischen Wissens

Um die bildlich-räumliche Komponente in einem dreidimensionalen digitalen Atlas abzubilden, gibt es momentan zwei Ansätze, die im Folgenden erläutert werden:

- Oberflächenbasierte Repräsentation der Objekte aus Dreiecken (Polygonen). Oberflächenbasierte Objekte werden entweder komplett mit Hilfe des Computers generiert (Computer Aided Design) oder aber aus einem Schnittbilddatensatz vom Menschen berechnet. Die verwendeten Schnittbilddatensätze können z.B. durch einen Kernspin- oder Computertomographen erzeugt werden, oder aber als Farbbilder vorliegen, wie es bei den digitalen photographischen Kryotomschnittbildern des "Visible-Human Projekts" der National Library of Medicine (NLM) der Fall ist.

Der Vorteil dieser Vorgehensweise liegt in der kurzen Berechnungszeit, die zur Erstellung einer bestimmten Ansicht der Objekte benötigt wird. Echtzeit-Drehungen eines Organs mit der Maus sind somit ohne weiteres möglich. Hinzu kommt, daß Grafikkarten in PCs Polygonberechnungen durch einen eigenen Prozessor unterstützen und somit zusätzlich ihre Darstellung auf dem Bildschirm beschleunigen.

Der Nachteil dieser Vorgehensweise zeigt sich, wenn man Objekte virtuell schneiden möchte, wie es z.B. nötig ist, um Schnittbilder zu erzeugen, die eine Sonographie simulieren sollen. Hier zeigt sich, daß die Information über die Binnenstruktur der Objekte nicht verfügbar ist und somit die Ansicht der Schnittseite nicht dargestellt werden kann. Abbildung 4 zeigt die verwendeten Gitterstrukturen, die dabei die Hülle des Objekts bilden. Bei Atlanten, die über ein CAD-System erstellt wurden, stellt sich die Frage, ob die rein modellierten Objekte in ihrer Form, Lage und Ausprägung auch der realen Anatomie entsprechen.

- Volumenbasierte Repräsentationen auf der Basis von Schnittbildsequenzen. Dabei wird aus den Schnittbildern ein Volumen erzeugt und dann für jedes Volumenelement (Voxel, dreidimensionales Bildelement) die Zugehörigkeit zu einem Organ bestimmt. Diese Zuordnung wird typischerweise über ein halbautomatisiertes Verfahren realisiert, das sich die Grauwertinformation der CT- und MR- Datensätze zunutze macht (Schwellwertsegmentation) [Höhne, Hanson 1992] [Schiemann *et al.* 1992]. Wenn das Volumen als Farbdatsatz vorliegt, wie dies beim Kryotomdatensatz der NLM der Fall ist, läßt dieses Verfahren noch bessere 3D-Darstellungen zu [Schiemann *et al.* 1997].

Der Vorteil dieser Darstellung liegt darin, daß die Binnenstruktur der Objekte erhalten bleibt. Schnitte durch Organe sind also ohne weiteres möglich, wie es Abbildung 3 zeigt. Außerdem bildet die Grundlage der Darstellung ein Datensatz, der direkt vom Menschen gewonnen wurde, wodurch eine realistische Wiedergabe der Anatomie gewährleistet wird.

Nachteilig ist die hohe Rechenleistung, die zur Erstellung der 3D-Darstellung benötigt wird. So ist selbst mit modernen Rechnern die Drehung eines Objekts in Echtzeit nicht möglich. Weiter lassen sich einige Organe, wie z.B. das periphere Nervensystem aus verschiedenen Gründen nicht segmentieren, was im folgenden Kapitel noch genauer erläutert werden soll [Bomans 1994].

Somit scheint zur Erstellung eines anatomischen Atlases für die Mediziner Ausbildung nur eine volumenbasierte Repräsentation in Frage zu kommen, da hier die Anforderung an Detailauflösung und Realitätsnähe sehr hoch sind. Allerdings konnten, wie schon oben erwähnt, durch die beschriebenen Vorgehensweisen bis jetzt einige Organe in solchen 3D-Atlanten nicht oder nur unbefriedigend dargestellt werden. Dazu gehören in erster Linie das Gefäßsystem und das periphere Nervensystem, da diese Strukturen ein sehr kleines Kaliber aufweisen und in ihrer Farbgebung von der Umgebung fast nicht zu unterscheiden sind, wie es in Abbildung 6 zu erkennen ist. Auch in den korrespondierenden CT- und MR-Aufnahmen lassen sich diese Strukturen kaum auflösen. Das vaskuläre System läßt sich bis zu einem gewissen Grad durch Kontrastmittelgabe darstellen. Dies trifft für das Nervensystem nicht zu, da die Nerven kein Lumen besitzen, in das ein Kontrastmittel injiziert werden könnte.

Gerade das periphere Nervensystem spielt jedoch in der Anatomie eine große Rolle, da chirurgische Zugänge zum Teil nur durch die Lage der peripheren Leitungsbahnen verstanden werden können. Ebenso können gerade 3D-Atlanten die Lagebeziehung der Organe zueinander deutlich

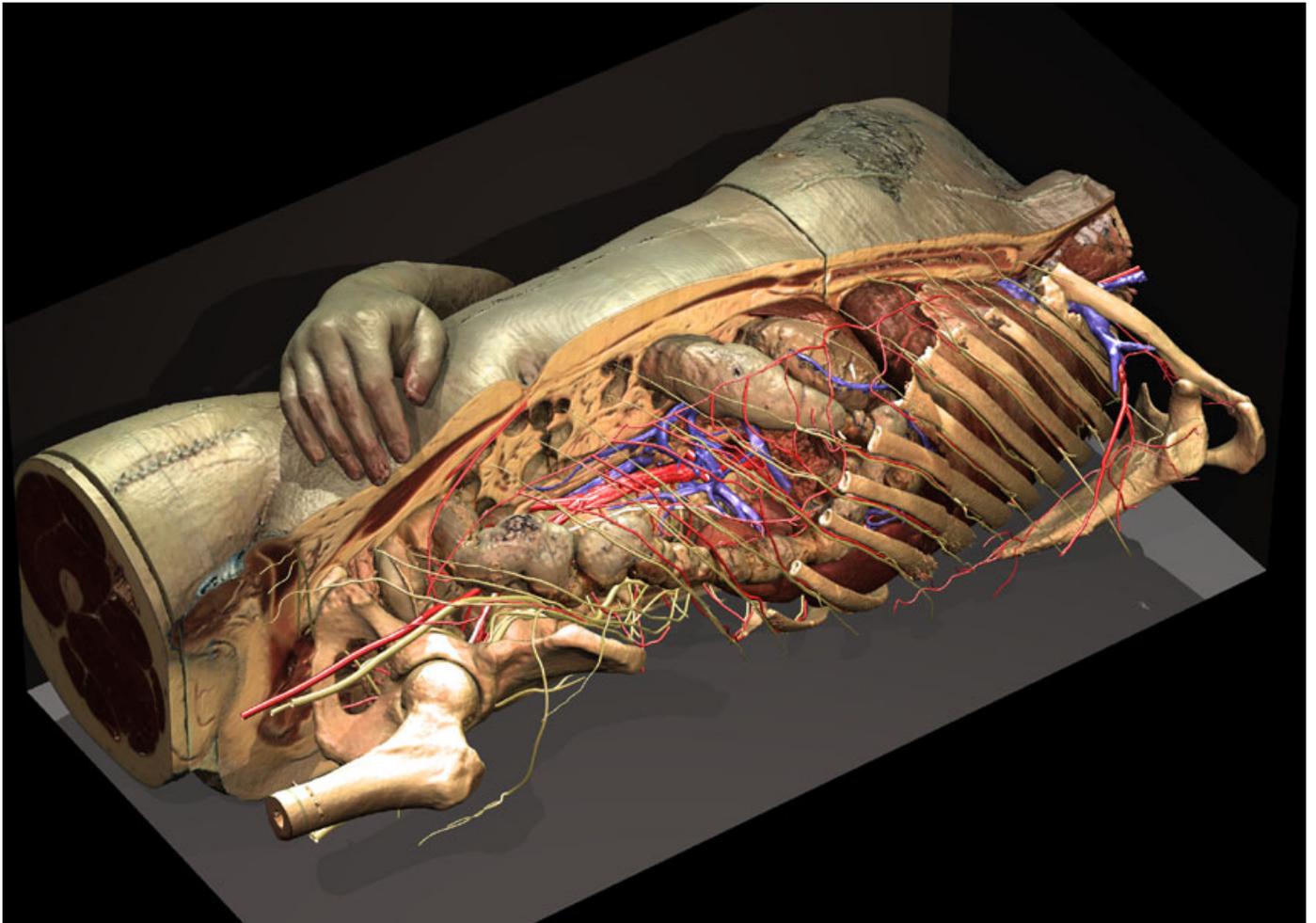


Abbildung 3: Ein Schnitt durch eine volumenbasierte Repräsentation. In einer volumenbasierten Repräsentation kann durch Schneideoperationen die Binnenstruktur der Organe an den Schnittflächen dargestellt werden. Das Fettgewebe und die Muskeln der Leibeswand lassen sich gut erkennen.

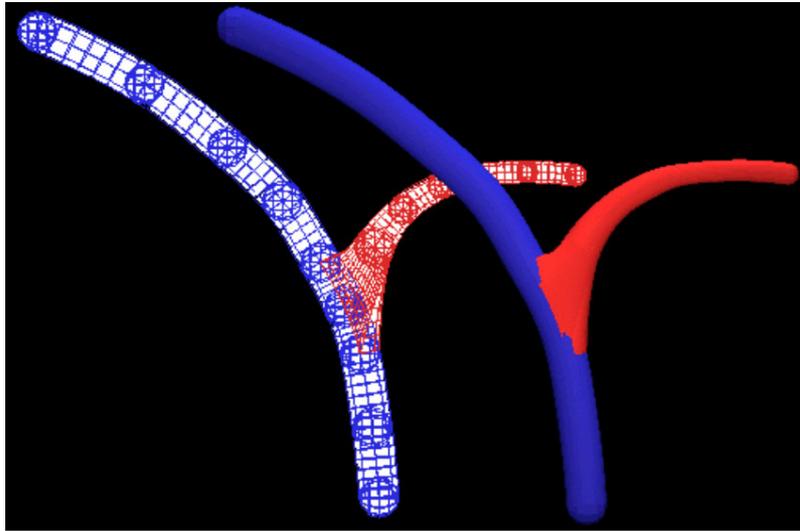


Abbildung 4: Die Oberflächen modellierter Objekte werden durch Polygone repräsentiert. Eine Binnenstruktur ist nicht vorhanden.

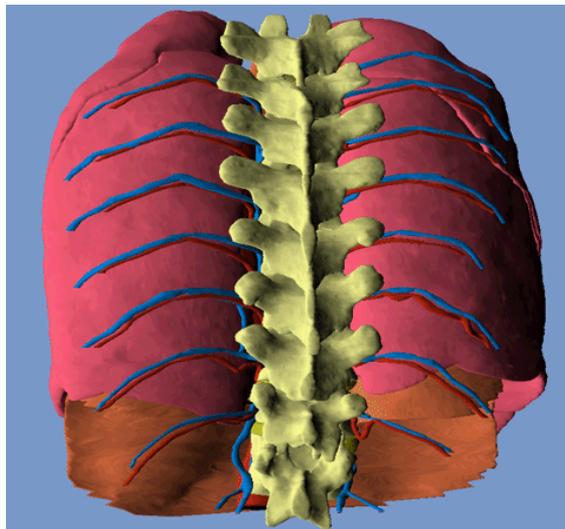


Abbildung 5: Ein Bild aus dem "Digital Anatomist". Die oberflächenbasierte Darstellung erlaubt keine Schneideoperationen und hinterläßt einen eher schematischen Eindruck der Anatomie.

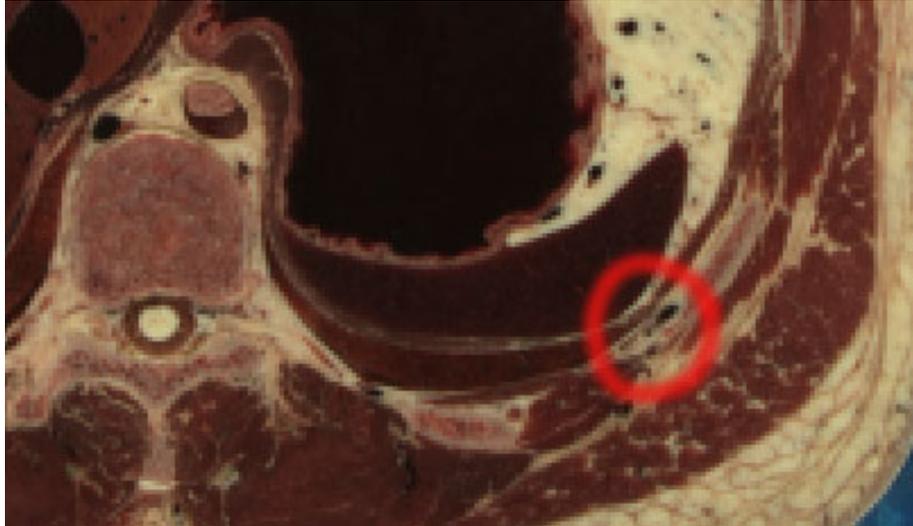


Abbildung 6: Ein Schnittbild aus dem Visible-Human Datensatz. Der Intercostalnerve ist unter dem Lumen der Intercostalvene nicht vom umgebenden Gewebe abzugrenzen (roter Kreis). Die Rippe selber ist mit ihrem roten Knochenmark gut zu erkennen (über der Markierung).

besser vermitteln als ein zweidimensionales Printmedium und wären somit für die Vermittlung der topographischen Zusammenhänge besonders geeignet. Da es jedoch mit den verfügbaren Methoden bis jetzt nicht möglich war, das periphere Nervensystem einer dreidimensionalen Visualisierung zuzuführen, sucht man einen digitalen dreidimensionalen Atlas dieses Organs vergeblich.

1.3.2 Umsetzung der symbolischen Komponente anatomischen Wissens

Das bisher Gesagte bezieht sich auf die bildlich-räumliche Komponente anatomischen Wissens. Eine weitere Komponente anatomischen Wissens ist die symbolische Repräsentation, die einzelnen anatomischen Strukturen Namen gibt und sie in Beziehung zueinander setzt. Man unterteilt die symbolische Information in zwei Teilbereiche. Zum einen in die Bezeichner der Terminologie und zum anderen in Relationen und Funktionen. Um diese Informationen für ein Computerprogramm verwendbar zu machen, muß eine Struktur in die Information gebracht werden, die für den Computer eindeutig ist. So sollte idealerweise jedem bildlichen Objekt genau ein eindeutig definierter Name zugeordnet sein. Die Terminologie muß dabei formal definiert werden. Die Relationen der einzelnen Objekte zueinander müssen einer eindeutig konsistenten Systematik folgen, um für ein virtuelles Modell verwertbar zu sein. Die in der modernen Medizin benutzten Werke verfügen jedoch häufig nur über eine rudimentäre Systematik der Relationen und Funktionen und sind nie formal. So ordnet die Nomina Anatomica zwar die einzelnen Objekte nach Organsystemen oder Körperbereichen, ein Benennen der Relationen und Querverweise auf Äste in anderen Hierarchieebenen gibt es jedoch nicht [by the Twelfth International Congress of Anatomists in London 1989][Schubert 1999].

Ein ehrgeiziges Projekt, die Terminologie in der Medizin zu vereinheitlichen und für verschiedenste computergestützte Anwendungen zur Verfügung zu stellen, ist das Unified Medical Language System der National Library of Medicine [McCray, Nelson 1995][Rosse *et al.* 1995][Lindberg *et al.* 1993]. Es enthält ein umfangreiches medizinisches Wörterbuch, das sich aus 30 verschiedenen Quell-Vokabularien und -Terminologien zusammensetzt. Ferner ist ein semantisches Netzwerk enthalten, welches eine semantische Verknüpfung der Begriffe aus dem Wörterbuch erlaubt. Allerdings ist das UMLS monolingual ausgelegt und steht so nur in englischer Sprache zur Verfügung. Weiter ist die Granularität nicht groß genug, um kleine anatomische Details wiederzugeben [Rosse *et al.* 1995].

Somit fehlt ein streng formal gegliedertes symbolisches Modell der Anatomie des Menschen und insbesondere des peripheren Nervensystems, das durch seine Aufzweigung in Äste und Plexus ein riesiges Netzwerk darstellt. Eine detaillierte bildlich räumliche Darstellung kann allerdings nur dann ein effizientes Lernen ermöglichen, wenn die entsprechende Terminologie definiert ist und die Lagebeziehungen eindeutig dargestellt sind.

1.4 Ziel dieser Arbeit

Ziel der Arbeit soll es sein, in eine durch Segmentation entstandene volumenbasierte Repräsentation der Brust- und Bauchorgane mittels eines geeigneten Werkzeuges, Nerven in polygonaler Repräsentation zu modellieren und anhand von sichtbaren anatomischen Strukturen im Datensatz zu plazieren. Außerdem sollen die entstandenen Nerven in ein symbolisches Modell eingefügt werden, in dem sie benannt und über Relationen verknüpft und organisiert werden, wodurch vielschichtige Informationen zu jeder Struktur des Modells zur Verfügung stehen.

Der Benutzer soll die Möglichkeit haben, das Modell interaktiv zu bewegen, um die Lagebeziehungen der Nerven zu angrenzenden Organen zu verstehen und die anatomischen Verhältnisse selbst zu explorieren. Dabei sollten stets Informationen zu jeder sichtbaren Struktur zur Verfügung stehen, um so eine direkte Verknüpfung zwischen der visuellen und der deskriptiven Information zu schaffen.

2 Material und Methoden

2.1 Der Datensatz

Als Datensatz wurde der Schnittbilddatensatz des "Visible-Human Projekts" gewählt, der von der National Library of Medicine seit 1994 zur Verfügung steht. Im Rahmen dieses Projekts wurde ein Mann, der am 5. August 1993 rechtskräftig durch die Todesspritze hingerichtet worden war, post mortem einer Magnetresonanztomographie und einer hochauflösenden Computertomographie in nativem und gefrorenen Zustand unterzogen. Dann wurde der gefrorene Leichnam in 1mm-Schritten abgehobelt und mit einer Pixelgröße von 0,33 mmx0,33 mm und einer Farbtiefe von 24 bit Schicht für Schicht digital fotografiert (Kryotom-Schnittbilddatensatz). Es entstanden auf diese Weise 1924 Schichtbilder, und damit ein Datenvolumen von ca. 14 Gigabyte.

Da moderne Workstations jedoch nicht über einen Arbeitsspeicher in der Größe dieses Datenvolumens verfügen, wurde der Datensatz auf 1/9 der Originalgröße reduziert, indem 3x3 Voxel auf den Schnittbildern zu einem Voxel zusammengefaßt wurden. Die Voxel entsprechen in ihrer Ausdehnung somit einem Würfel mit einer Kantenlänge von 1 Millimeter. Damit nimmt man zwar in Kauf, daß auf den zweidimensionalen Schichten die einzelnen Strukturen nicht mehr so differenziert zu erkennen sind, erreicht aber auf der anderen Seite, daß die einzelnen Voxel auf Grund ihrer Geometrie besser einem Visualisierungsverfahren und damit der dreidimensionalen Darstellung zugeführt werden können.

Der "Visible-Human" Datensatz bietet den großen Vorteil, daß Datensätze eines Menschen in verschiedenen Modalitäten vorliegen. So kann man sich für die Segmentation die Abbildung der einzelnen Organe in CT, MR und Kryotom zunutze machen, um ein optimales Segmentationsergebnis zu erhalten. Knochen läßt sich zum Beispiel aufgrund seiner hohen Dichte am Besten aus dem CT-Datensatz segmentieren. Andere Organe profitieren von der Farbinformation des Kryotomdatensatzes, aus dem sie sehr präzise segmentiert werden können.

Das periphere Nervensystem jedoch, um das es in dieser Arbeit geht, läßt sich wegen des schwachen Kontrasts weder im MR noch im Kryotomdatensatz segmentieren. Die Dichte der Nerven unterscheidet sich kaum von umliegenden Strukturen wie Fettgewebe oder Muskeln, wodurch auch die Segmentation im CT-Datensatz unmöglich wird. Lediglich Nerven mit relativ großem Kaliber, wie zum Beispiel der Nervus ischiadicus, lassen sich in kleinen Teilbereichen erkennen. Somit wurden die umgebenden Organe segmentiert. Die Nerven aber wurden über ein neues Modellierungsverfahren in das Modell eingefügt, was im Detail später genauer

beschrieben wird.

2.2 Segmentation von Organen

Als Segmentation bezeichnet man das Zusammenfassen von Voxeln zu Objekten, wobei jedes Objekt eine anatomische Struktur im digitalen Atlas darstellt. Dieser Schritt ist nötig, um aus dem Datenvolumen, das primär als ein großer Block vorliegt, Organe mit ihren Untereinheiten in dreidimensionaler Repräsentation visualisieren zu können, wie es in Abbildung 7 zu erkennen ist. Die Zuordnung der einzelnen Volumenelemente zu einem Objekt wird dabei typischerweise über ein halbautomatisches Verfahren realisiert.

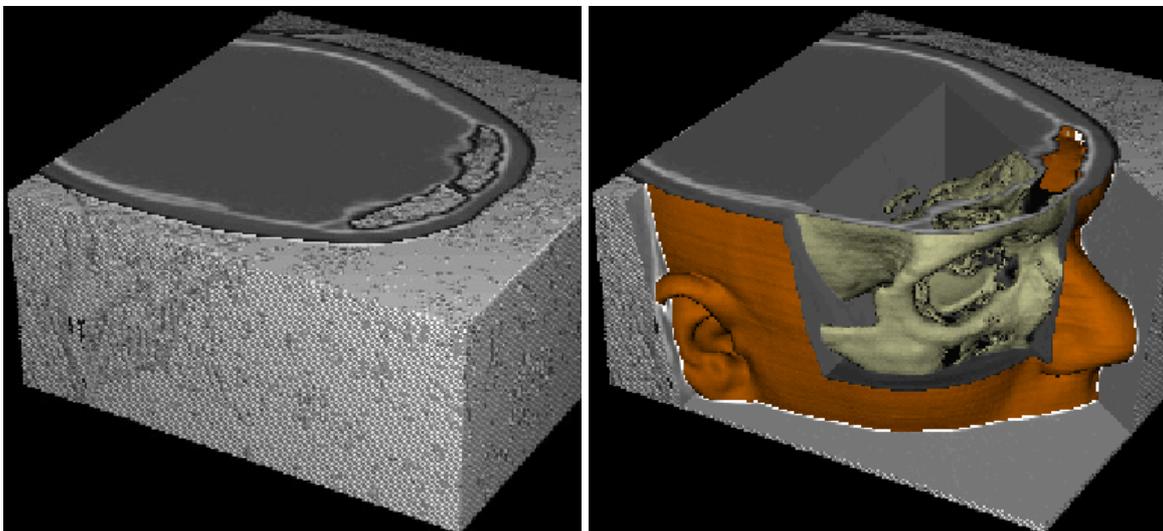


Abbildung 7: *Prinzip der Segmentation. Aus einem Datenvolumen werden die einzelnen Volumenelemente (Voxel) zu Objekten zusammengefaßt. Diese aus dem Datensatz extrahierten Objekte lassen sich dann getrennt von einander in verschiedenen Farben darstellen.*

In grauwertbasierten Datenvolumina, wie sie aus CT- oder MR-Schnittbildern entstehen, lassen sich über eine Schwellwertsegmentation relativ schnell halbautomatisiert einzelne Strukturen aus dem Datensatz segmentieren. Hierbei definiert man Bereiche auf einer Grauwertskala, die typisch für ein Objekt sind. Allen Voxeln, die zu einem Objekt gehören, muß ein Grauwert zugeordnet sein, der im ausgewählten Bereich auf der Grauwertskala liegt. Für die Segmentation einer Niere aus einem CT-Datensatz, wie sie in Abbildung 8 zu sehen ist, könnten das alle Voxel mit einem Grauwert zwischen 131 und 170 sein. Das bedeutet, daß die Niere nur Volumenelemente mit zugeordneten Grauwerten zwischen 131 und 170 enthält, wobei hohe Zahlen für helle Grauwerte und niedrige Zahlen für dunkle Grauwerte stehen.

Eine reine Schwellwertsegmentation kann jedoch nicht einzelne Organe oder etwa Organsegmente aus einem Datensatz hervorbringen. Es kommt nämlich vor, daß sich die bestimmten

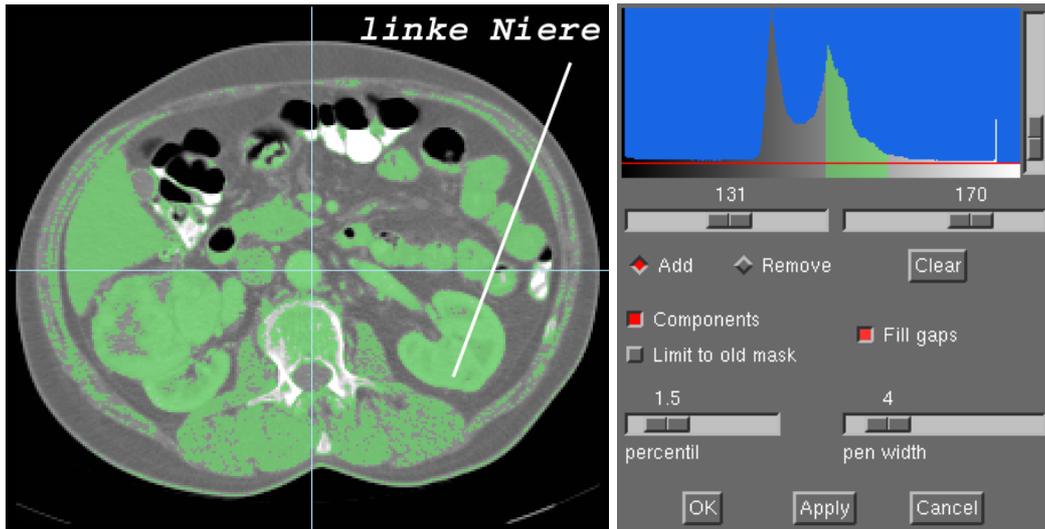


Abbildung 8: Schwellenwertsegmentation. Viele Objekte liegen im selben Grauwertbereich wie die in diesem Beispiel zu segmentierende Niere.

Grauwertbereiche der einzelnen Organe überschneiden. So ist auf Abbildung 8 zu erkennen, daß der ausgewählte Grauwertbereich für die Niere auch Teile der Leber umfaßt.

Um nun einzelne Objekte, die Voxel mit ähnlichen Grauwerten beinhalten, voneinander zu trennen, bedient man sich einer "Connected Components Analyse". Dabei werden Volumenelemente eines Grauwertbereichs, die eine gemeinsame Fläche haben, zu Objekten zusammengefaßt. Wenn also alle Voxel, die direkt an die zu segmentierende Niere in Abbildung 8 grenzen, außerhalb des definierten Grauwertbereichs liegen, wird die Niere nach der "Connected Components Analyse" als segmentiertes Objekt darstellbar. So lassen sich Organe, die in ihrer Farbgebung einen Kontrast zu ihrer Umgebung aufweisen, relativ schnell und mit sehr guten Ergebnissen in der dreidimensionalen Repräsentation segmentieren. Sollte dieses Verfahren noch nicht zum gewünschten Ergebnis führen, läßt sich über morphologische Operationen eine weitere Unterteilung der Objekte verwirklichen [Höhne, Hanson 1992].

Auf diese Weise wurden Knochenstrukturen aus dem CT-Datensatz des Visible-Human Projekts segmentiert, was aufgrund des großen Dichteunterschieds des Knochens zum umgebenden Gewebe zu sehr guten Darstellungen führt, wie es Abbildung 10 zeigt.

Der Kryotomdatensatz der NLM unterscheidet sich von herkömmlichen Datensätzen aus CT- und MR- Aufnahmen jedoch dadurch, daß den Voxeln nicht ein Grauwert zugeordnet ist, sondern ein Farbwert, der sich aus den drei Komponenten der Rot-Grün-Blau-Farbskala (RGB) zusammensetzt. Ein Schwellwert läßt sich hier also nicht eindimensional auf einer Skala bestimmen. Die in den Organen enthaltenen Farben müssen im dreidimensionalen Farbraum

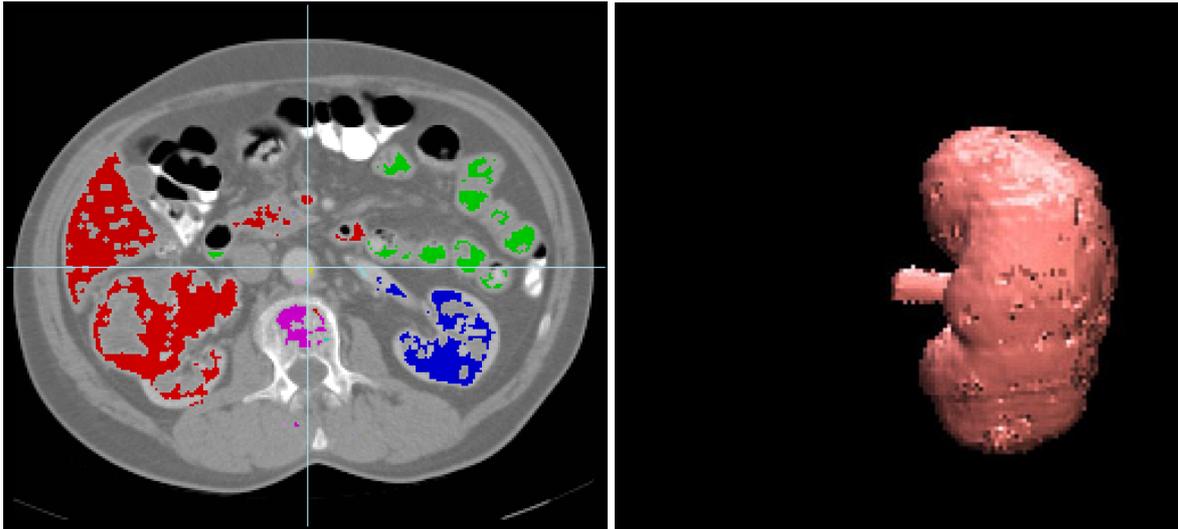


Abbildung 9: Anwendung einer "Connected-Components-Analyse". Die Volumenelemente im ausgewählten Grauwertbereich werden daraufhin untersucht, ob sie verbunden sind. Die linke Niere wurde als getrennt identifiziert und (blau) markiert. Sie kann nun isoliert dargestellt werden (rechts).

für jedes Objekt definiert werden. Die drei Achsen des Raumes werden dabei von den drei Grundfarben Rot, Grün und Blau gebildet (siehe Abbildung 11 und 12). Um diese Ausschnitte aus dem Farbraum, die für jedes Objekt spezifisch sind, mathematisch anzunähern, hat sich die Form eines Ellipsoids im Farbraum als repräsentativ erwiesen [Schiemann *et al.* 1996].

Die Segmentation der Organe aus dem CT- und dem Kryotomdatensatz wurde mit dem interaktiven Segmentationsprogramm INTERSEG durchgeführt, das am IMDM entwickelt wurde.

Die Schwellwerte (aus dem CT-Datenvolumen) bzw. Ellipsoide im Farbraum (aus dem Kryotomdatensatz) werden dabei automatisch nach einer Auswahl von typischen Strukturen der Organe durch den Benutzer berechnet. Je nach Ergebnis der Segmentation kann die Auswahl der Voxel dann noch über morphologische Operationen verfeinert werden [Schiemann *et al.* 1992].

Alle größeren Organe des Brust- und Bauchraumes wurden segmentiert und damit einer 3D-Visualisierung zugänglich gemacht. Dazu gehören z.B. die Leber, das Herz, der Magen-Darm-Trakt, die Knochen, die Lunge usw.

2.3 Anforderungen an das Werkzeug für die Modellierungsarbeit

Um nun in dem segmentierten Datensatz die Nerven des peripheren Nervensystems zu modellieren, mußte ein geeignetes Werkzeug gefunden werden, mit dem diese Arbeit zu bewältigen war. Folgende Kriterien waren an das Modellierungswerkzeug zu stellen:

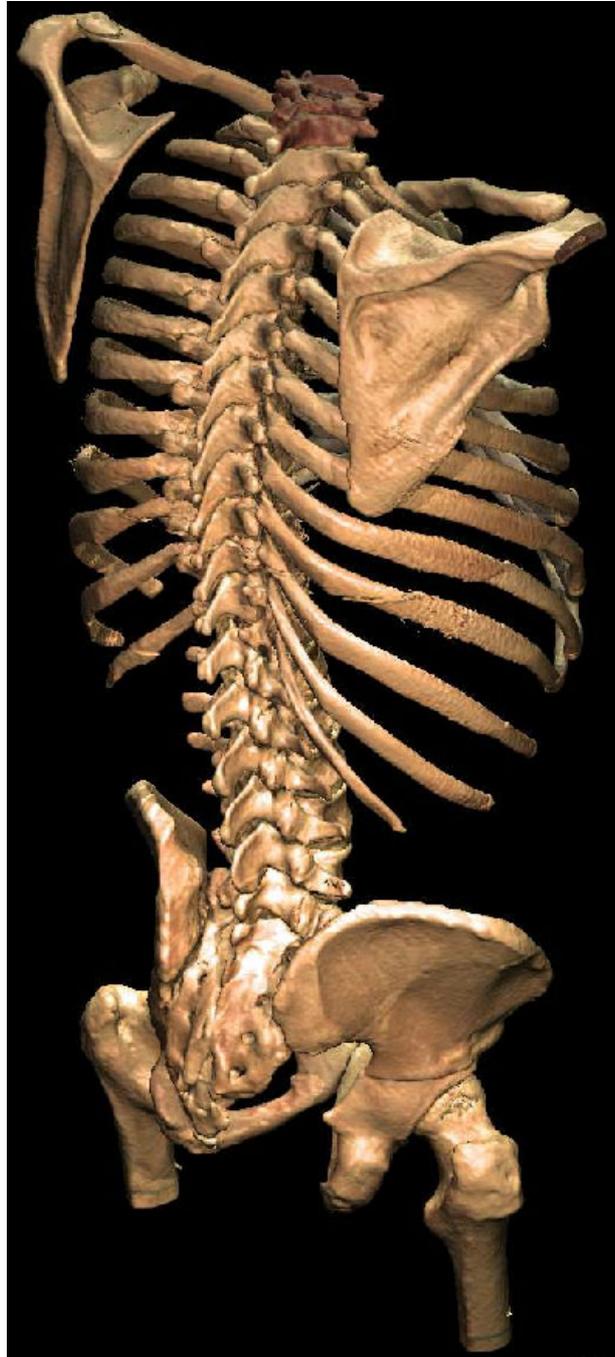


Abbildung 10: *Segmentation des Skeletts aus CT-Daten. Knochenstrukturen lassen sich aus CT-Daten über eine Schwellwertsegmentation gut segmentieren und führen zu einer realitätsnahen dreidimensionalen Repräsentation.*

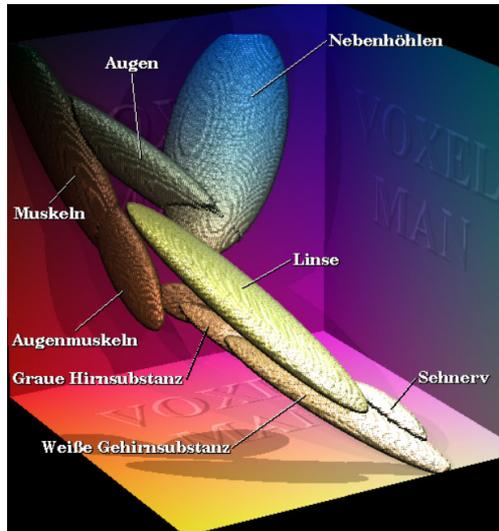


Abbildung 11: Objektcharakterisierung im Farbraum. Im dreidimensionalen Farbraum lassen sich die einzelnen Objekte (Organe) als Ellipsoide charakterisieren.

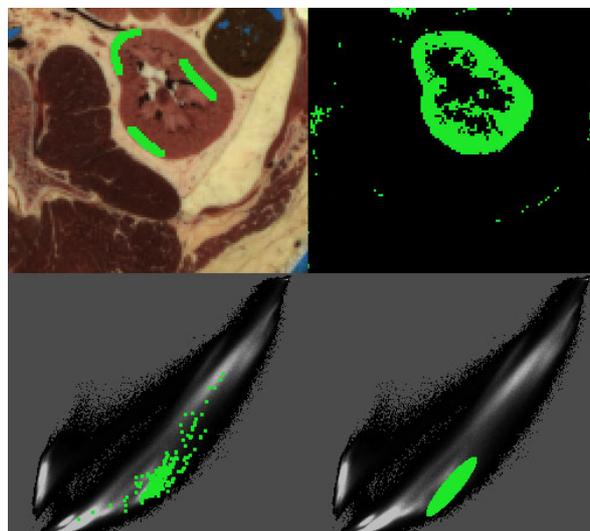


Abbildung 12: Interaktive Segmentation von Farbbildern. Der Benutzer wählt einen Farbbereich aus (links oben), die zugehörige Punktwolke im Farbraum wird angezeigt (links unten), sie wird zu einem Ellipsoid zusammengefaßt (rechts unten). Das Ergebnis ist rechts oben zu sehen.

- Das Werkzeug sollte Röhren mit verschiedenen Radii erzeugen, die in jeder Position im dreidimensionalen Raum liegen können.
- Es sollte eine Funktion vorhanden sein, mit der man einzelne Stränge verknüpfen und so z.B. Plexus oder andere Nervenverzweigungen modellieren kann.
- Es sollten auch Röhren mit nicht-kreisrundem Durchmesser erstellt werden können, wie es z.B. bei der Modellierung des Plexus sacralis erforderlich ist.
- Es sollten anhand von anatomischen Strukturen in den Schnittbildern Punkte zu definieren sein, durch welche die einzelnen Nerven hindurchtreten. Anhand dieser identifizierten Stützpunkte sollte das Programm den Nervenverlauf im dreidimensionalen Raum berechnen können.

Im Rahmen einer Diplomarbeit entstand am IMDM ein Programm mit dem Namen "TREE-EDIT", das in der Lage ist, oberflächenbasierte Repräsentationen in Röhrenform zu generieren [Rheinwald 1996].

2.4 Funktionsweise von Tree-Edit

TREE-EDIT ist ein Modellierungsprogramm, das durch oberflächenbasierte Darstellung Röhrenstrukturen generieren kann. Es nutzt hierbei Stützpunkte im Raum, die vom Benutzer definiert werden und verbindet sie nacheinander mit Röhren. Die Stützpunkte haben dabei die geometrische Form einer Kugel, die im Radius frei wählbar ist. Je nach Größe der Kugel entsteht dabei eine Röhre mit größerem oder kleinerem Durchmesser. Da die Stützpunkte ausschließlich die Form einer Kugel annehmen können, zeigt sich hier auch der größte Nachteil dieses Programms: Es können nur Objekte mit kreisrundem Querschnitt erstellt werden. Nervenplatten und Plexus, wie sie im Sakral- und Lumbalbereich vorkommen, sind also nur schwer darzustellen.

Die Lage und Größe der Kugeln und ihre Zugehörigkeit zu einem Strang können dann als Parameterdatei gespeichert und von Tree-Edit wieder eingelesen werden. Änderungen der Koordinaten oder der Kugeldurchmesser können sowohl in der Parameterdatei als auch interaktiv durch Auswahl einer Kugel auf der dreidimensionalen Darstellung vorgenommen werden. Die genaue Bedienung und die Besonderheiten dieses Programms wurden bereits an anderer Stelle beschrieben [Noster 1999].

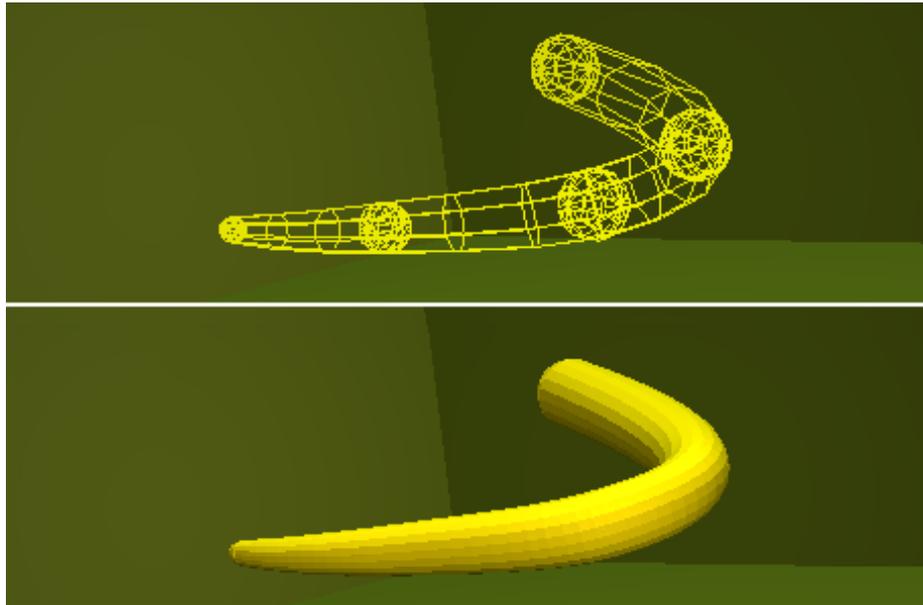


Abbildung 13: *Modellierung von rohrförmigen Strukturen. Entlang der Stützpunkte (Kugeln) wird ein Gitternetz generiert (oben). Die Gitterelemente werden zu Flächen gefüllt (unten).*

2.5 Die Modellierung der Nerven im Visible-Human Datensatz

Um nun Nerven in Form von Röhren in den Kryotomdatensatz des Visible-Human Projekts einzufügen, mußten zunächst die Koordinaten der Stützpunkte im Datensatz definiert werden.

Hierfür werden Nervenanschnitte in den zweidimensionalen Schnittbildern des Kryotomdatensatzes aufgesucht. Da zum Teil der Nervenanschnitt nicht direkt zu sehen ist, dienen benachbarte Strukturen, wie z. B. das Lumen der Intercostalvene, unter der sich die Intercostalarterie und der Intercostalnerv befinden, als Orientierungspunkt. An die identifizierte Position wird eine Kugel gesetzt und der Radius der Kugel festgelegt. Dann werden weitere Koordinatenpunkte im Verlauf des Nerven aufgesucht und wieder mit einer Kugel markiert. Der Abstand der einzelnen Kugeln einer Röhre im Datensatz legt zugleich fest, wie genau die modellierte Röhre mit dem tatsächlichen Nerv übereinstimmt. Je näher nämlich die Kugeln aneinander liegen, desto mehr entspricht die modellierte Röhre dem tatsächlichen Verlauf des Nerven. Auf der anderen Seite bewirkt ein größerer Abstand häufig eine bessere 3D-Repräsentation, da der Verlauf glatter wirkt. Hier muß also ein Kompromiß zwischen der Genauigkeit der Lage und einer didaktisch guten dreidimensionalen Darstellung gefunden werden.

Da die Nerven nicht immer in ihrem gesamten Verlauf im Datensatz zu verfolgen sind, wurden Standardwerke der Anatomie herangezogen, um den Verlauf der Nerven trotzdem realistisch zu modellieren. Es wurden sowohl die Abbildungen als auch die Texte zu den Verläufen berücksichtigt. Hierbei zeigte sich sehr deutlich, daß die zweidimensionalen Bilder nur sel-

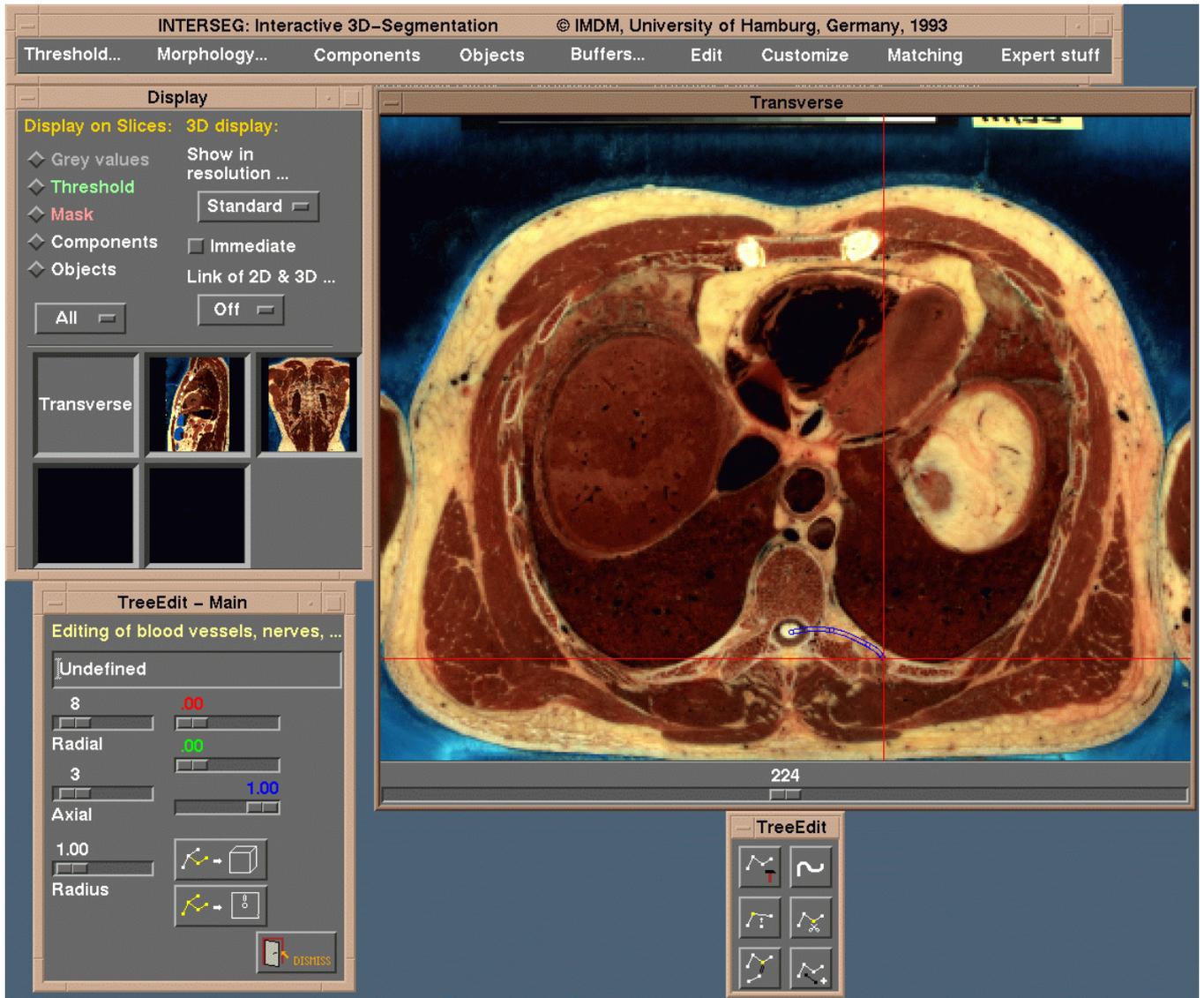


Abbildung 14: Die Arbeitsumgebung: TREE-EDIT und das Autorensystem VOXEL-MAN, das in Abschnitt 3 beschrieben ist.

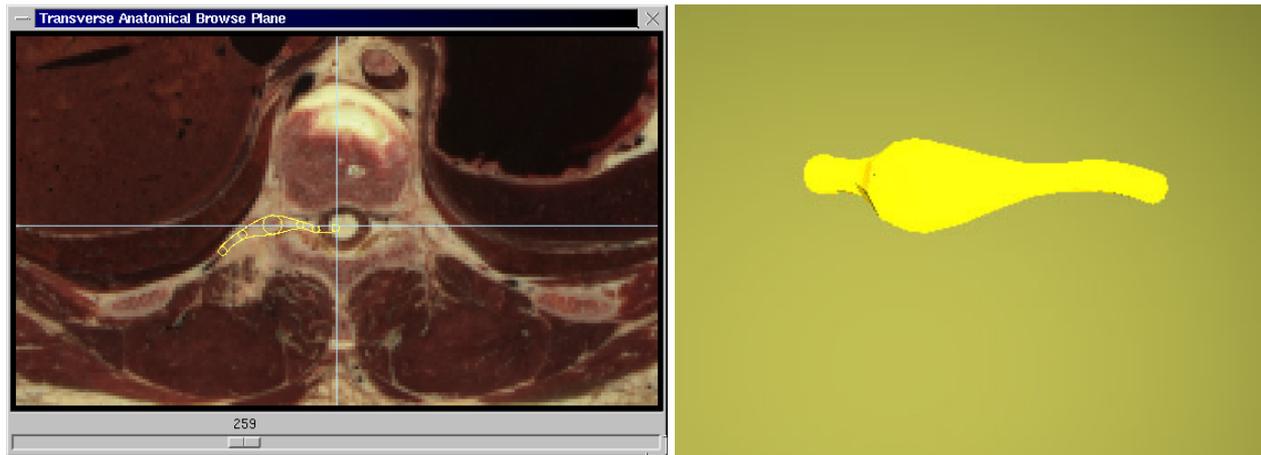


Abbildung 15: *Modellierung eines Spinalganglions im zweidimensionalen Schnittbild und in der 3D-Ansicht*

ten den beschriebenen Verlauf zweifelsfrei wiedergeben können [Sobotta 1993] [Sobotta 1963] [Benninghoff-Goerttler 1964] [Hagens *et al.* 1991].

Um aus der Vielzahl der Nerven des peripheren Nervensystems mit ihren zahlreichen Varianten und Verzweigungen die medizinisch relevanten herauszuarbeiten, wurden kleinere Kompendien der Anatomie eingesehen und die hier erwähnten Nerven zur Modellierung ausgewählt [Tillmann, Schünke 1993] [Kahle 1991].

2.5.1 Die Intercostalnerven

Es wurde mit den Intercostalnerven begonnen, da ihre Lage unterhalb der Rippen sehr gut anhand der angrenzenden Intercostalgefäße bestimmt werden konnte. Die Schwierigkeit bestand nun darin, einen Kompromiß zwischen der exakten anatomischen Lage und einer ansprechenden dreidimensionalen Darstellung zu finden. Setzt man nämlich die einzelnen Kugeln in dicht benachbarte Schichten, entsteht in der 3D-Darstellung ein sehr stark geschlängelt Bild der Nerven, da die vielen definierten Punkte nicht in einem einheitlichen Kreisbogen liegen. Als optimal erwies sich ein Kugeleinsatz in jeder sechsten Schicht.

Die Spinalganglien wurden durch ein Vergrößern des Durchmessers einer Kugel auf das 2,6fache der anderen Stützpunkte modelliert, was zu einer sehr befriedigenden Darstellung führte. Der Anschluß der Hautäste wurde nicht mit der Verknüpfungsfunktion von TREE-EDIT durchgeführt, sondern durch ein einfaches "Einlegen" des Hautastes in den Intercostalnerv realisiert, was zu einer deutlich besseren Darstellung führte. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf Rami communicantes zum Grenzstrang und auf eine differenzierte Darstellung der beiden Radices verzichtet.

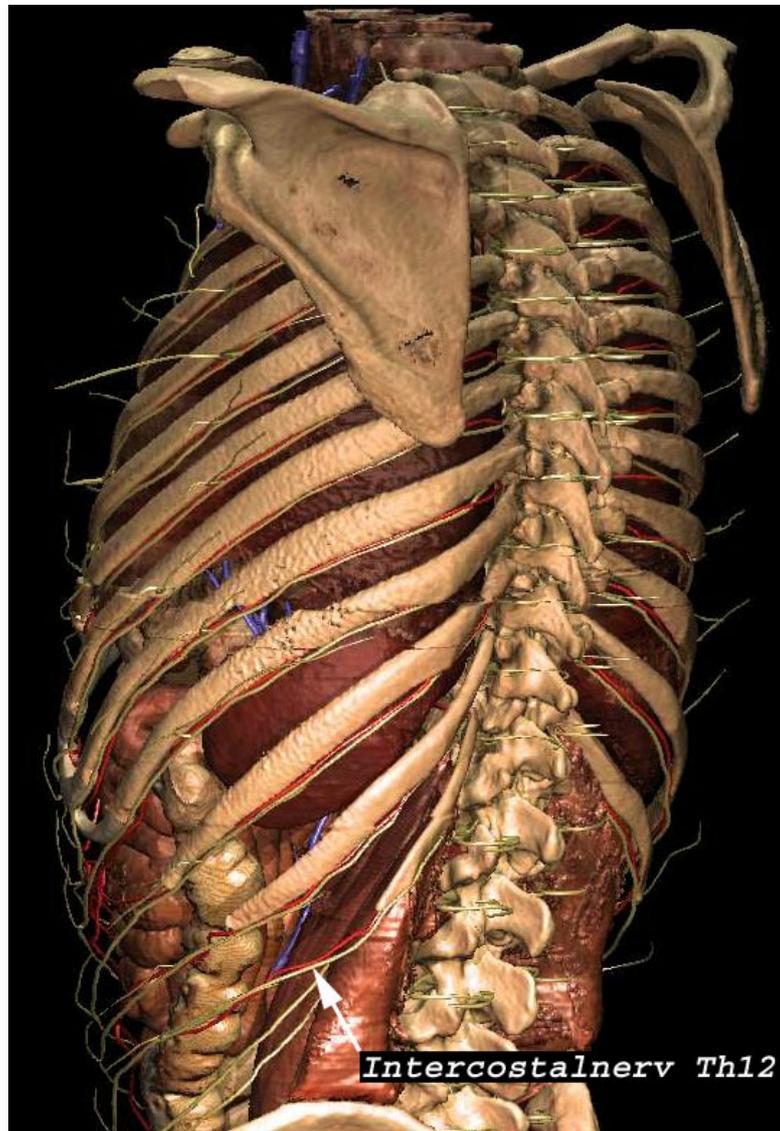


Abbildung 16: *Dreidimensionale Repräsentation der Interconstalnerven. Die Intercostalnerven und die korrespondierenden Rami dorsales der Spinalnerven hinterlassen einen realistischen Eindruck. Als Orientierung diente bei der Modellierung das Lumen der begleitenden Interco-stalvene.*

2.5.2 Der Plexus lumbalis

Die Modellierung des Nervus femoralis stellte sich als besonders schwierig heraus, da die einzelnen Äste aus den Spinalnerven L1-L4 zum mächtigen Nerv konfluieren. Auch hier stellte sich das Ineinanderlegen der Stränge als die beste Methode heraus. Die anderen wichtigen Nerven des Plexus wurden anhand der erkennbaren Strukturen und der Verläufe zwischen den Muskeln in den Datensatz eingefügt [Tillmann, Schünke 1993].

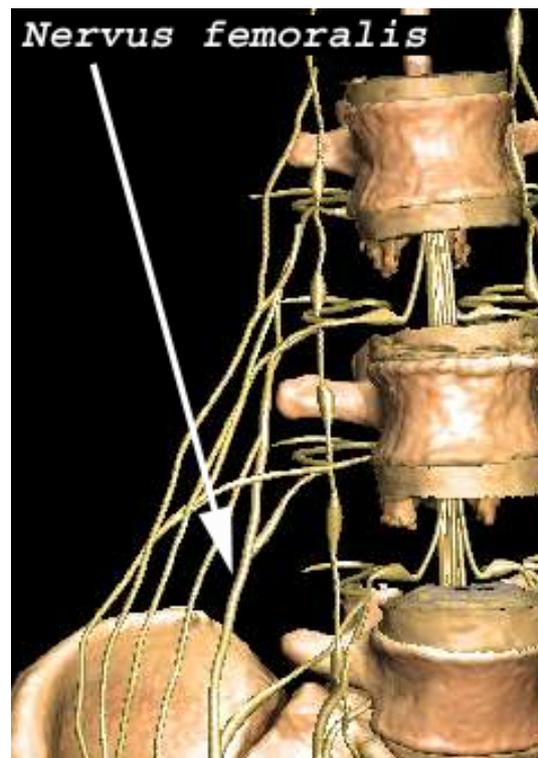


Abbildung 17: *Dreidimensionale Repräsentation des Nervus femoralis. Der Nervus femoralis läßt sich durch Ineinanderlegen einzelner Röhren realistisch modellieren.*

2.5.3 Der Plexus sacralis

Bei der Darstellung des Plexus sacralis zeigten sich die Grenzen des Werkzeuges, da der Plexus in der Realität als Nervenplatte imponiert, die durch eine Modellierung mit Röhren nicht darzustellen ist (siehe Abb. 18). Auch das parallele Führen von mehreren Röhren brachte nur mäßige Erfolge. Ein neues Tool auf der Basis eines NURBS-Algorithmus soll hier in Zukunft Abhilfe schaffen, da damit jede erdenkliche Form zu modellieren wäre.

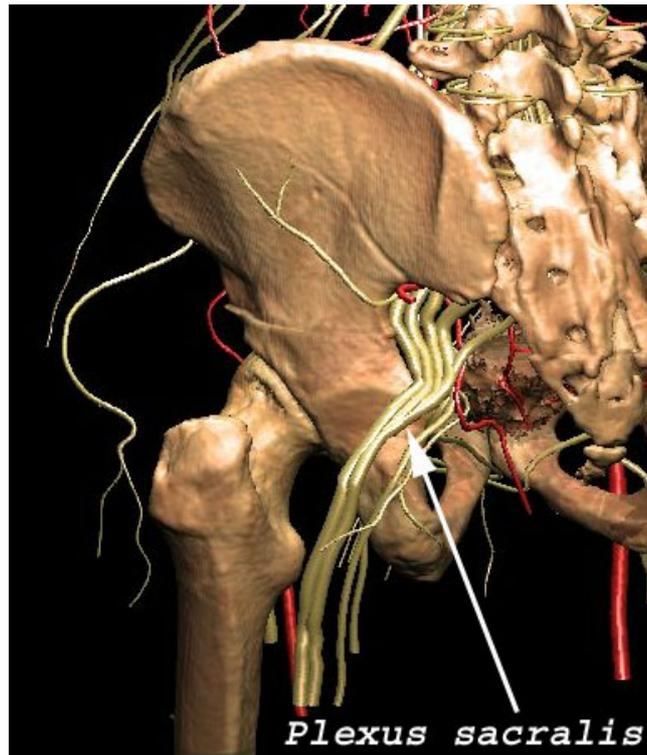


Abbildung 18: *Dreidimensionale Repräsentation des Plexus sacralis. Der Plexus sacralis läßt sich mit Röhrenstrukturen nur unbefriedigend modellieren.*

2.5.4 Das autonome Nervensystem: Der sympathische Grenzstrang

Über das eigentliche Thema hinaus wurde der sympathische Grenzstrang als ein Teil des autonomen Nervensystems modelliert. Die Lokalisation der Stützpunkte ist hierbei recht einfach, da der Grenzstrang den Wirbelkörpern direkt anliegt. Die Ganglien konnten über vergrößerte Stützpunkte sehr realitätsgetreu modelliert werden, obgleich der Übersicht wegen auf kleine Seitenäste (z.B. Rami communicantes) verzichtet wurde.

2.6 Integration der entstandenen Objekte in eine Wissensbasis

Die beschriebene Modellierung der Nerven behandelte bis jetzt erst den bildlich-räumlichen Aspekt der Anatomie. Es ist ferner noch nötig, den entstandenen Objekten die entsprechenden Namen zu geben und sie in die richtigen Beziehungen (Relations) zueinander zu setzen, um so eine symbolische Repräsentation des peripheren Nervensystems zu erstellen. Diese Vorgehensweise ist zum einen nötig, um Nerven, die aus mehreren Strängen zusammengesetzt sind, im Atlas nur als ein Objekt zu präsentieren. So wurde z.B. der Nervus femoralis, wie schon oben beschrieben, aus vier verschiedenen Strängen zusammengesetzt. Zum anderen müssen die einzelnen Nerven hierarchisch in das periphere Nervensystem eingeordnet werden. Hierfür muß jedem Objekt zunächst eine individuelle Kennung (UID) zugeordnet werden,



Abbildung 19: *Der sympathische Grenzstrang konnte mit seinen Ganglien sehr realitätsnah modelliert werden. Als Leitstruktur dienten die Wirbelkörper mit ihren Querfortsätzen.*

damit der Computer das Objekt anhand dieser Zahl erkennen kann.

Nun wurde eine Wissensbasis erstellt, in der jeder UID ein anatomischer Name zugeordnet wurde. Dieser Vorgang wurde über ein Skript automatisiert, so daß die UIDs der Objekte nacheinander vergeben werden und der jeweilige Name des Objekts automatisch aus dem Namen der erstellten Datei mit den Objektdaten für die 3D-Repräsentation hervorgeht. Das erstellte Skript findet sich im Anhang.

Um die einzelnen Nerven entsprechend ihrer Organisation im menschlichen Körper zu verknüpfen, wurden sie in der Wissensbasis über "part of" (Teil von) Verknüpfungen miteinander in Beziehung gesetzt. Dabei entsteht eine typische Baumstruktur, bei dem jedes stammferne Objekt zu einem stammnahen gehört und alle Objekte dem generischen Objekt "Nervensystem" zugeordnet sind. Generische Objekte sind hierbei Objekte, die keine eigene visuelle Entsprechung haben. So besteht das generische Objekt "peripheres Nervensystem" nur aus einer Vielzahl von untergeordneten Nerven, die es visuell repräsentieren.

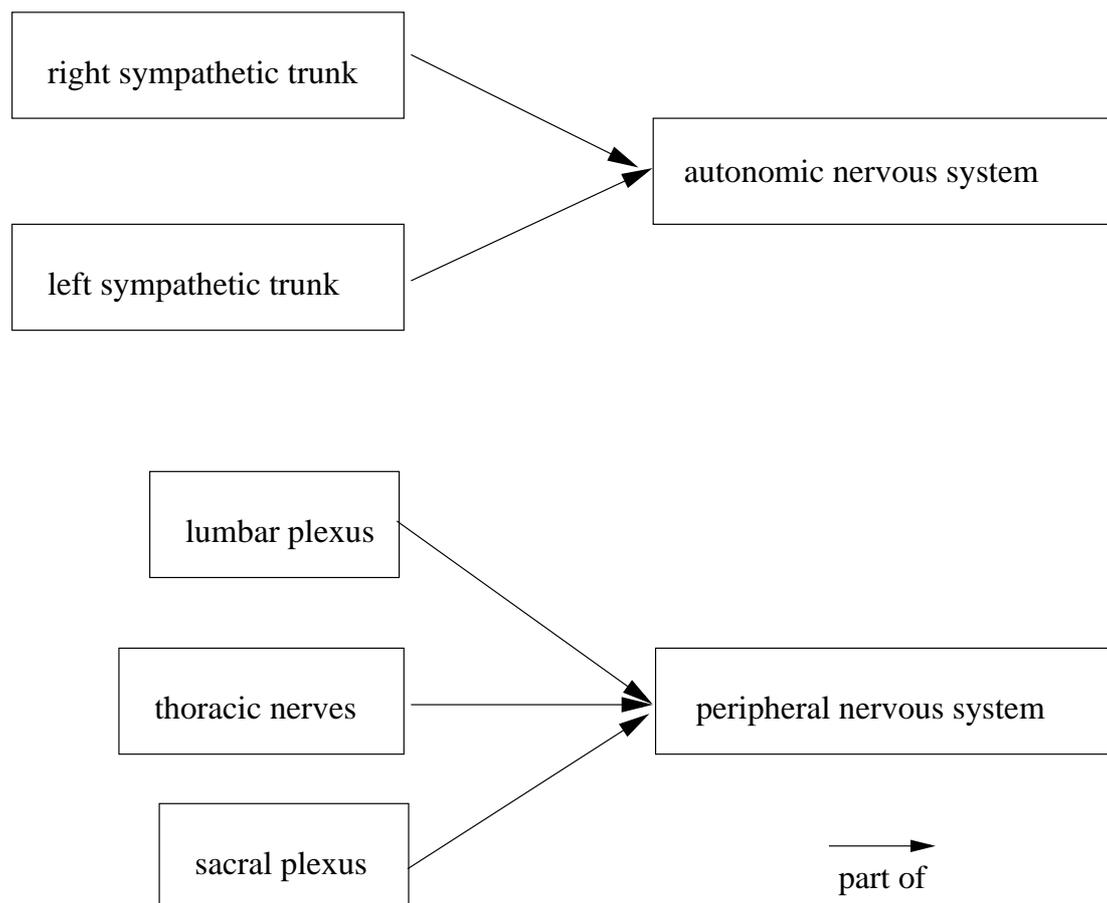


Abbildung 20: Strukturierung des peripheren Nervensystems in der Wissensbasis. Die Grafik zeigt die Strukturierung des peripheren Nervensystems des Thorax und Abdomen durch Verknüpfungen der übergeordneten generischen Objekte in der Wissensbasis

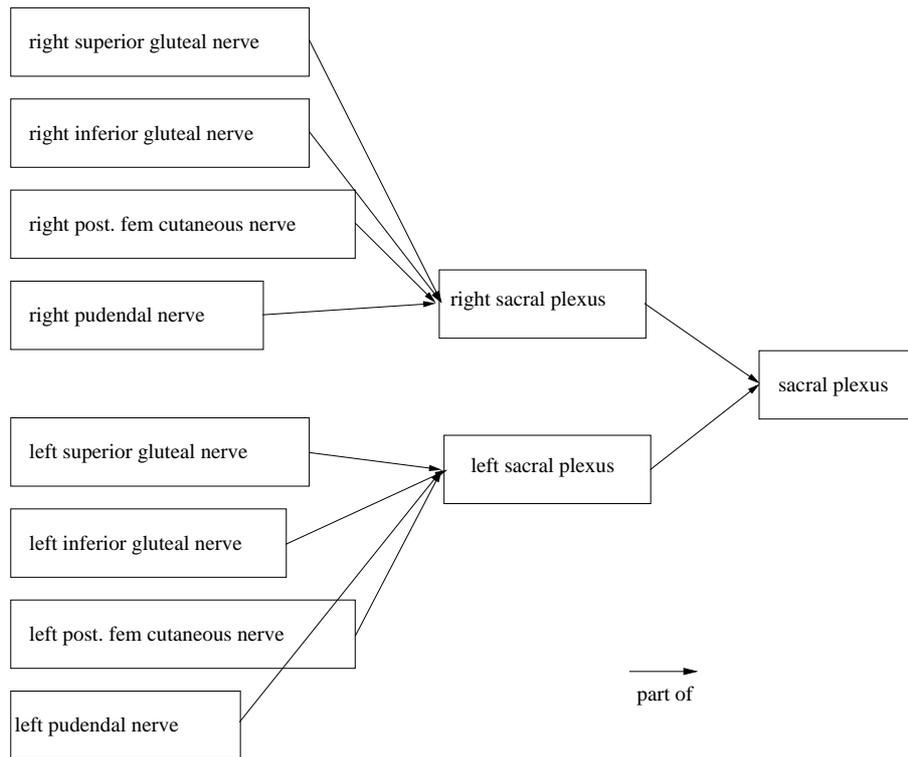


Abbildung 21: *Symbolische Modellierung des Plexus sacralis. Die einzelnen Nerven des Plexus sacralis werden über “part of“ Verknüpfungen mit den übergeordneten Generica in Beziehung gesetzt.*

2.7 Übersetzungen der englischen Objektamen

Um das Modell für möglichst viele Anwender nutzbar zu machen, wurden die Bezeichnungen der Objekte in drei Sprachen erstellt. Die deutsche Sprache wurde als Laiensprache gewählt, in der soweit wie möglich medizinische Fachtermini vermieden und statt dessen gebräuchliche deutsche Begriffe verwendet wurden. Als Referenz wurde dabei das Lehrbuch der Anatomie von H. Lippert benutzt [Lippert 1996]. Die lateinische Version umfaßt die medizinischen Fachtermini, die natürlich nicht immer aus dem Lateinischen stammen. Hier wurden medizinisch gebräuchliche Begriffe gewählt.

Die englische Version umfaßt die englischen Fachtermini nach der Übersetzung in der Nomina Anatomica [Whitmore 1998]. Sie dient als programminterne Definitionssprache, über die die Objekte benannt und in der Wissensbasis strukturiert werden.

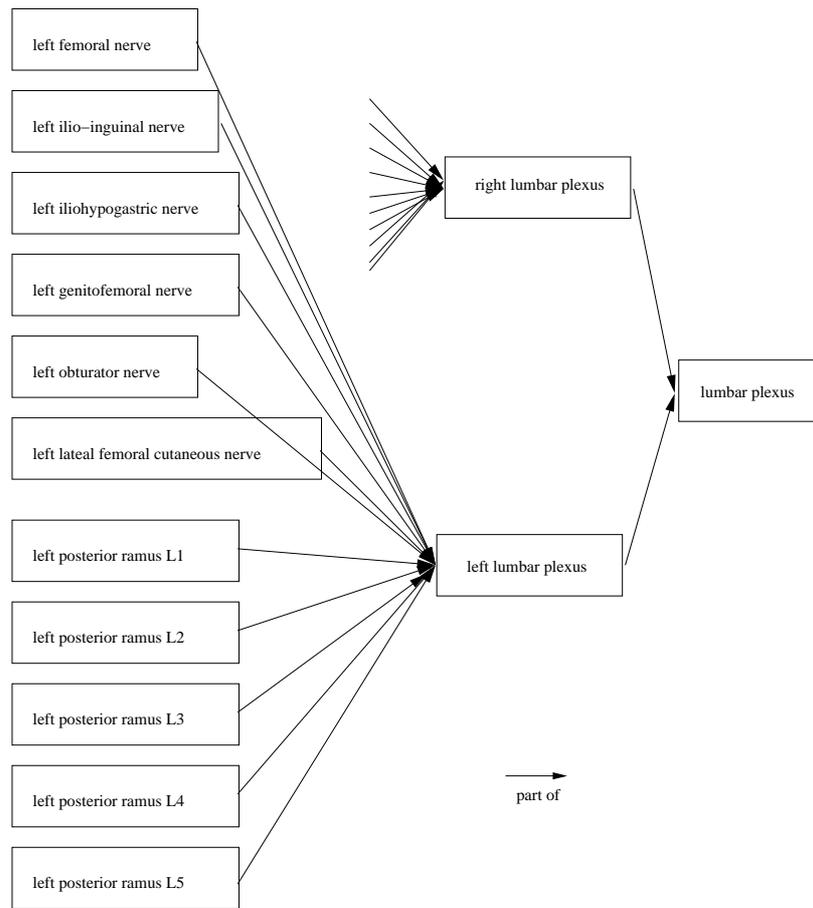


Abbildung 22: Symbolische Modellierung des Plexus lumbalis. Die Grafik zeigt die Struktur des Plexus lumbalis mit den Verknüpfungen der einzelnen Nerven über "part of" Relationen.

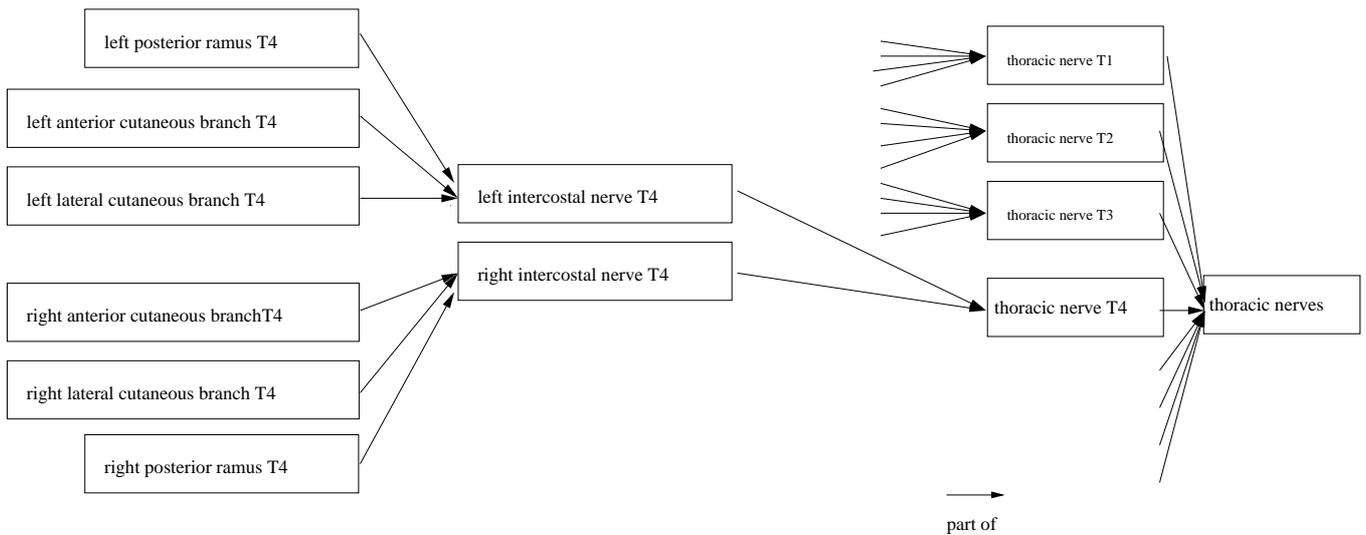


Abbildung 23: Symbolische Modellierung der Intercostalnerven. Die Grafik zeigt die Hierarchie der Intercostalnerven mit Verknüpfungen der einzelnen Nerven über "part of" Relationen.

right anterior cutaneous branch T1–12	rechter vorderer Hautast Brustwirbel 1–T12	ramus cutaneus anterior dexter T1–T12
right femoral nerve	rechter Oberschenkelnerve	nervus femoralis dexter
right genitofemoral nerve	rechter Genitofemoralnerve	nervus genitofemoralis dexter
right ilio–inguinal nerve	rechter Ilioinguinalnerve	nervus ilioinguinalis dexter
right iliohypogastric nerve	rechter iliohypogastrischer Nerve	nervus iliohypogastricus dexter
right inferior gluteal nerve	rechter unterer Glutealnerve	nervus gluteae inferior dexter
right intercostal nerve T1–12	rechter Zwischenrippennerv Brustwirbel 1–12	nervus intercostalis dexter T1–T12
right intercostobrachial nerve T2	rechter Zwischenrippenarmnerve Brustwirbel 1–12	nervus intercostobrachialis dexter T2
right lateral cutaneous branch T3–12	rechter seitlicher Hautast Brustwirbel 3–12	ramus cutaneus lateralis dexter T3–T12
right post. fem. cutaneous nerve	rechter hinterer Oberschenkelhautnerve	nervus cutaneus femoris posterior dexter
right posterior ramus L1–5	rechter hinterer Ast Lendenwirbel 1–5	ramus posterior dexter L1–L5
right posterior ramus T1–12	rechter hinterer Ast Brustwirbel 1–12	ramus posterior dexter T1–T12
right sacral plexus	rechtes Kreuzbeingeflecht	plexus sacralis dexter
right superior gluteal nerve	rechter oberer Glutealnerve	nervus gluteae superior dexter
right sympathetic trunk	rechter sympathischer Grenzstrang	truncus sympathicus dexter
right lateral femoral cutaneous nerve	rechter seitlicher femoraler Hautnerve	nervus cutaneus femoris lateralis
right obturator nerve	rechter Obturatornerve	nervus obturatorius dexter
right pudendal nerve	rechter Pudendusnerve	nervus pudendus dexter
right lumbar plexus	rechtes Lendengeflecht	plexus lumbalis dexter

Abbildung 24: Übersetzung der englischen Nomenklatur. Alle modellierten und generischen Objekte sind in das Lateinische und Deutsche übersetzt. Die englische Terminologie dient als Definitionssprache im Programmkontext und liefert von daher die Dateinamen der Objekte. Die Tabelle zeigt die rechte Körperseite. Mit den Objekten der linken Seite wurde ebenso verfahren.

3 Ergebnisse und Anwendungen

Es wurden insgesamt über 250 Objekte unterschiedlicher Länge modelliert, die mit 4 bis zu 96 Kugeln im Datensatz positioniert wurden. Für die symbolische Modellierung und die formale Definition der Objekte wurden 137 Namen vergeben und den Objekten zugeordnet. Die so definierten Objekte wurden über 230 Relationen miteinander verknüpft und systematisch geordnet. Um nun die entstandene bildlich-räumliche und symbolische Modellierung explorieren zu können, wurden diese in das VOXEL-MAN Autorensystem integriert. Die Funktionen und Möglichkeiten des VOXEL-MAN Systems werden im folgenden erläutert.

3.1 Das periphere Nervensystem in der VOXEL-MAN Umgebung

Das VOXEL-MAN Autorensystem, in dem die Segmentierung der großen Organe über INTERSEG und die Modellierung der Nerven mit TREE-EDIT erfolgt ist, bietet über die Generierung der Objekte hinaus noch weitere Funktionen. So verfügt das VOXEL-MAN Autorensystem über eine Vielzahl von Möglichkeiten der Visualisierung und der Manipulation der generierten Objekte.

Die grundlegenden Möglichkeiten sollen hier kurz zusammengefaßt werden:

- Das 3D-Modell kann in jede beliebige Richtung gedreht werden. Der sichtbare Ausschnitt läßt sich dabei frei wählen.
- Die Objekte können in jeder Ebene geschnitten werden. Die Schnittkanten zeigen dabei die Binnenstruktur des Organs aus dem CT- oder dem Kryotomdatensatz.
- Einzelne Organe können hinzugefügt, eingefärbt, weggenommen oder transparent dargestellt werden.
- Jedes Objekt kann auf Mausklick mit seinem Namen und seiner Zugehörigkeit zu übergeordneten Organsystemen versehen werden.

Die genannten Operationen können dabei sowohl mit Volumenobjekten, die aus der Segmentierung hervorgegangen sind, als auch mit den oberflächenbasierten Nerven aus der Modellierung durchgeführt werden. Lediglich die Schnittflächen der Nerven zeigen einen Querschnitt ohne Binnenstruktur. Die segmentierten Objekte können dabei in Subvoxelauflösung betrachtet werden, wodurch sich eine sehr glatte Oberfläche der Objekte verwirklichen läßt. Die modellierten Nerven werden daneben in polygonaler Repräsentation dargestellt [Tiede 1999].

Das VOXEL-MAN Autorensystem, wie es gerade beschrieben wurde, stellt ein hochkomplexes Programm dar, das für die einzelnen Funktionen eine hohe Rechenkapazität vom eingesetzten

Rechner verlangt. Daher wird zum Einsatz des Programms mit hochauflösenden Datensätzen, wie dem Visible-Human-Datensatz der NLM, eine Workstation mit dem Betriebssystem UNIX oder ein hochwertiger PC mit dem Betriebssystem LINUX benötigt. Diese Rechner sind zur Zeit noch sehr teuer und dadurch wenig verbreitet. Als große Einschränkung zeigt sich weiter, daß die Operationen (Drehungen, Schnitte) nicht in Echtzeit zu realisieren sind. Gerade ein Atlas als Lern- und Lehrsystem erfordert jedoch eine schnelle Verfügbarkeit der 3D-Szenen.

Um diese genannten Nachteile des VOXEL-MAN Autorensystems zu umgehen, wurde am Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in Hamburg ein weiteres Programm erstellt, das speziell auf Lern- und Lehranwendung zugeschnitten ist: Der VOXEL-MAN 3D-Navigator [Höhne 1998]. Das Grundprinzip ist dabei, daß aus dem Autorensystem interaktive "intelligente" Filme erzeugt werden, die dann auf einfachen, weit verbreiteten PCs angesehen werden können. Es handelt sich hierbei nicht um normale Filme, bei denen unbeeinflussbar ein Bild nach dem anderen folgt, sondern um "intelligente" Filme im Quicktime-VR-Format. Die Filme enthalten nicht nur die Bildinformation über die Objekte, sondern auch die Information aus der Wissensbasis des VOXEL-MAN Autorensystems. Die einzelnen Bilder sind dabei auf einer Matrix angeordnet, von der immer nur ein Bild sichtbar ist. Der Anwender navigiert mit der Maus über diese Matrix und kann damit jedes Bild einsehen. So liegt zum Beispiel rechts neben dem gerade sichtbaren Bild ein anderes Bild, auf dem das gleiche Objekt drei Grad nach links gedreht ist. Sobald der Betrachter nun die Maus nach rechts bewegt und das entsprechende Bild sieht, bekommt er den Eindruck, er habe das Objekt um genau drei Grad in eben diese Richtung gedreht.

Hinter dieser bildgebenden Matrix befindet sich noch eine Matrix, auf der jedem Pixel (Bildpunkt) eine Nummer zugeordnet ist. Diese Nummer zeigt für den Computer die Zugehörigkeit zu einem Objekt an. So kann auf Mausklick die Zugehörigkeit jedes Bildpunkts zu einem Organ ermittelt werden [Höhne *et al.* 1996].

Der Anwender kann dadurch in jedem Bild des Filmes Informationen und Verknüpfungen zum sichtbaren Objekt abfragen, wie es in Abbildung 25 dargestellt ist. Allerdings sind die Ansichten in diesem Programm auf die im VOXEL-MAN Autorensystem berechneten Filme beschränkt [Schubert *et al.* 1999]. Die beiden Freiheitsgrade (vertikal, horizontal) können dazu genutzt werden, das Objekt um zwei Achsen zu drehen. Damit läßt sich ein Objekt von allen Seiten betrachten und der Benutzer erhält einen realistischen dreidimensionalen Eindruck. Es ist auch möglich eine Achse für das Hinzufügen und Wegnehmen der Objekte zu nutzen. So bleibt zwar die Drehbarkeit auf eine Ebene beschränkt, man erhält jedoch gleichzeitig Einblicke in tiefere Organschichten.

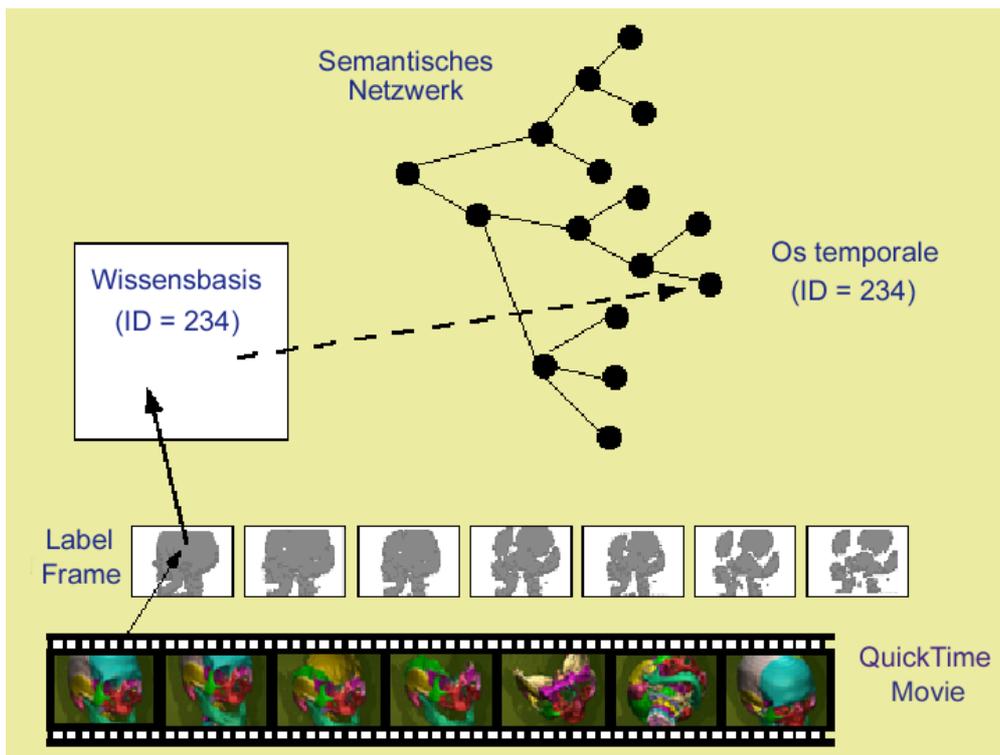


Abbildung 25: Das Grundprinzip des VOXEL-MAN 3D-Navigators. Die Grafik zeigt die Funktionsweise des VOXEL-MAN 3D-Navigators. Hinter dem eigentlich sichtbaren Bild des interaktiven Films befindet sich ein weiteres "Bild", bei dem jedem Bildpunkt nicht ein Farbwert sondern die Zugehörigkeit zu einem Objekt zugeordnet ist. So kann man während der Exploration durch Mausklick auf eine Struktur den Namen und die Zugehörigkeit zu übergeordneten Strukturen erfragen.

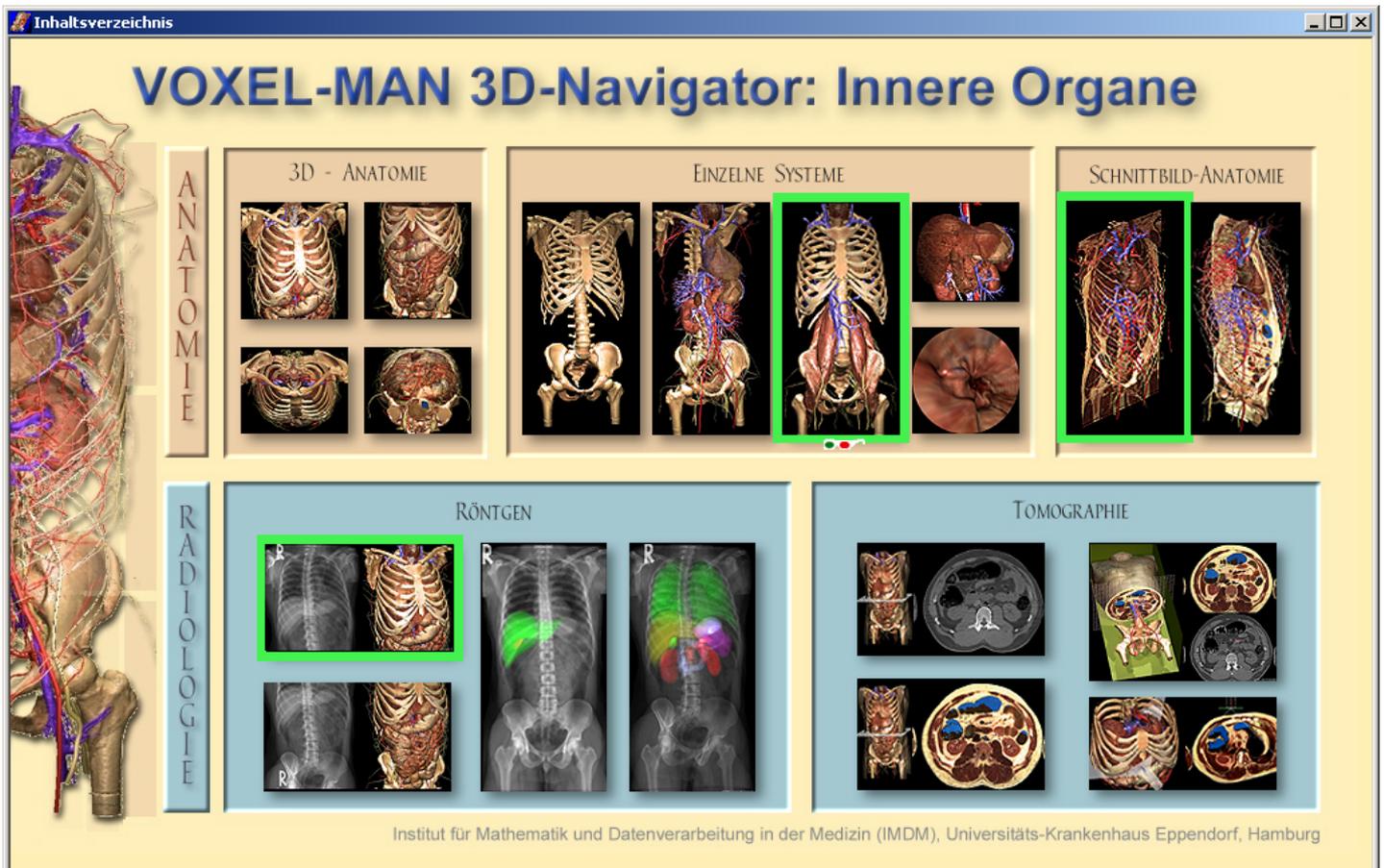


Abbildung 26: Der Startup-Screen des VOXEL-MAN 3D-Navigators. Der Atlas bietet eine Vielzahl von "Szenen", die auf jedem PC unter Windows interaktiv exploriert werden können. Die grün markierten Szenen betreffen das periphere Nervensystem (siehe auch beigefügte CD-ROM).

3.2 Der VOXEL-MAN 3D-Navigator

Aus dem VOXEL-MAN Autorensystem wurden nun 27 interaktive Quicktime-VR-Filmen erstellt, die sich mit den einzelnen Regionen und Organsystemen der inneren Organe beschäftigen. Acht davon sind als stereoskopische Filme mit einer Rot/Grün-Brille zu betrachten. Ca. 650 Objekte mußten dafür über Segmentation und Modellierung erstellt werden [Höhne *et al.* 2000a].

Die 3D-Szenen zeigen dabei nicht nur die Organe, sondern stellen sie radiologischen Bildern direkt gegenüber. So erklären sich Strukturen auf dem Röntgenbild durch den direkten Vergleich mit dem 3D-Bild. Auch Schnittbilder aus dem CT- und dem Kryotomdatensatz werden den 3D-Filmen zur Seite gestellt und erleichtern so das Verständnis der Strukturen auf den Schnittbildern [Höhne *et al.* 2000b].

3.3 Die Grundfunktionen des VOXEL-MAN 3D-Navigators

Im Folgenden werden die Grundfunktionen des VOXEL-MAN 3D-Navigators erklärt und die bestehenden Möglichkeiten verdeutlicht. Wie in Abbildung 27 zu sehen ist, gliedert sich die Benutzeroberfläche des VOXEL-MAN 3D-Navigators in verschiedene Fenster. Im linken großen Fenster werden die Bildinformationen dargestellt. Das rechte Fenster zeigt die verfügbaren Objekte an. Ein kleineres Fenster am rechten unteren Bildschirmrand gibt Benutzungshinweise zum gewählten intelligenten Film.

Soll nun ein bestimmter Nerv, wie z. B. der rechte Zwischenrippennerv in Höhe Th10 gesucht und angezeigt werden, wird zunächst in der Menüleiste die Funktion "Suchen" ausgewählt. Nun trägt der Button neben dem Eingabefeld auf der rechten Seite die Aufschrift "Suchen" und führt somit diese Funktion aus, nachdem man einen Suchbegriff eingegeben hat. Gibt man nun als Suchbegriff "Zwischenrippennerv" ein und startet die Suche durch einen Mausklick auf den Button links daneben, so wird ein passender Begriff in der Wissensbasis gesucht und durch einen Balken auf der rechten Seite markiert. Soll das entsprechende Objekt dargestellt werden, klickt der Benutzer den Begriff doppelt an und das Objekt wird im linken Fenster dargestellt. Das gesuchte Objekt wird dabei als einziges farbig dargestellt und hebt sich so gut von den anderen Objekte ab, wie man in Abbildung 27 sehr gut sehen kann.

Die Färbefunktion hebt, ähnlich wie die Suchfunktion ein ausgewähltes Objekt aus den anderen Objekten hervor, indem es seine "normale" Farbe gegen eine andere eintauscht. Die Farben werden bei jeder neuen Färbeoperation gewechselt, damit auch mehrere gefärbte Objekte nebeneinander gut sichtbar sind. Abbildung 28 zeigt diese Funktion.

Eine weitere wichtige Funktion stellt das Beschriften dar. Hier hat der Benutzer die Möglichkeit, beliebig viele Objekte mit Beschriftungen zu versehen. So können die anatomischen Strukturen

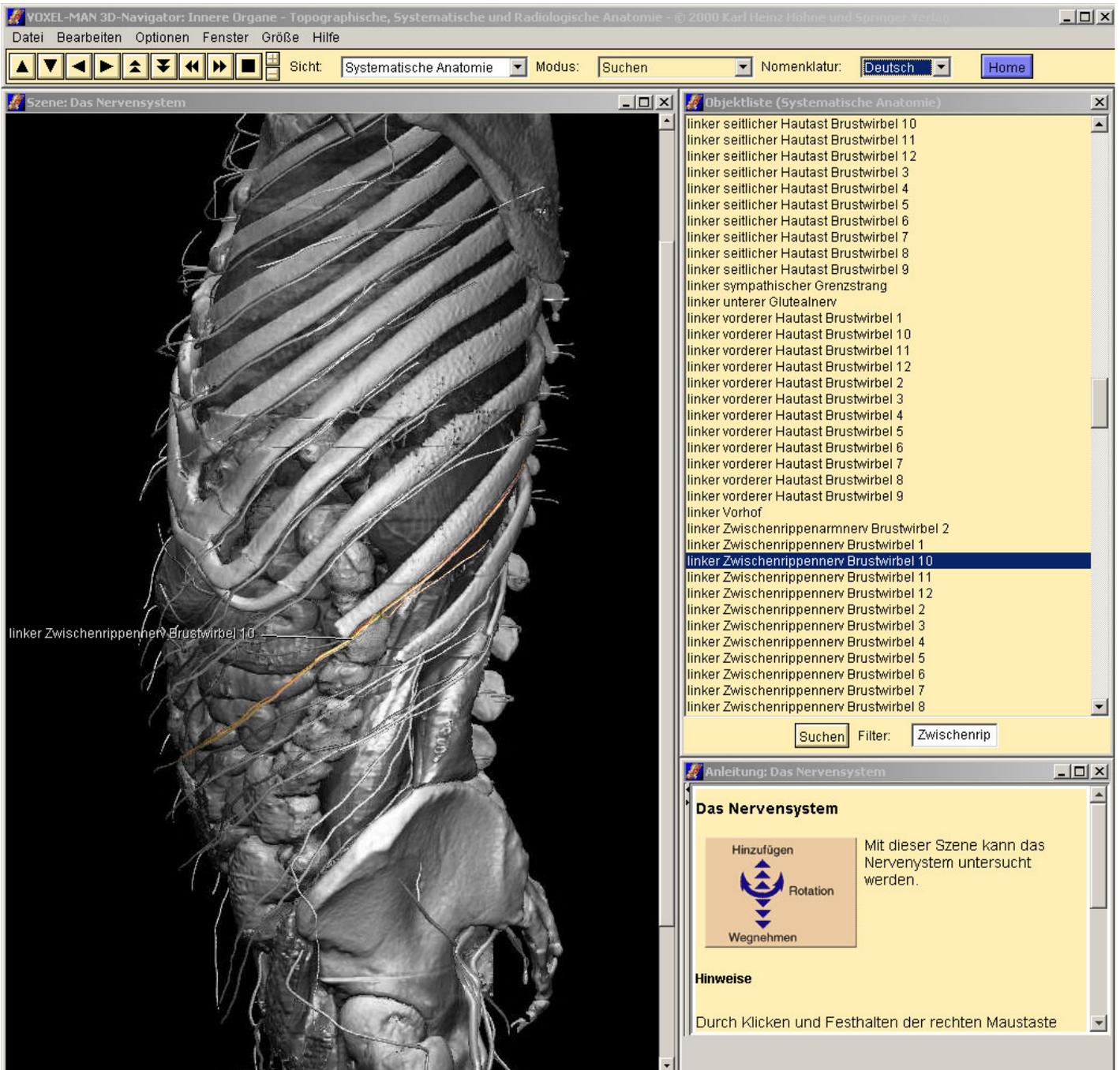


Abbildung 27: Suchen eines Nerven im 3D-Modell. Durch Auswahl des Suchmodus (oben) und Eingabe des Suchbegriffs (rechts) kann der gesuchte Nerv aufgefunden und von den anderen Organen farblich abgehoben werden.

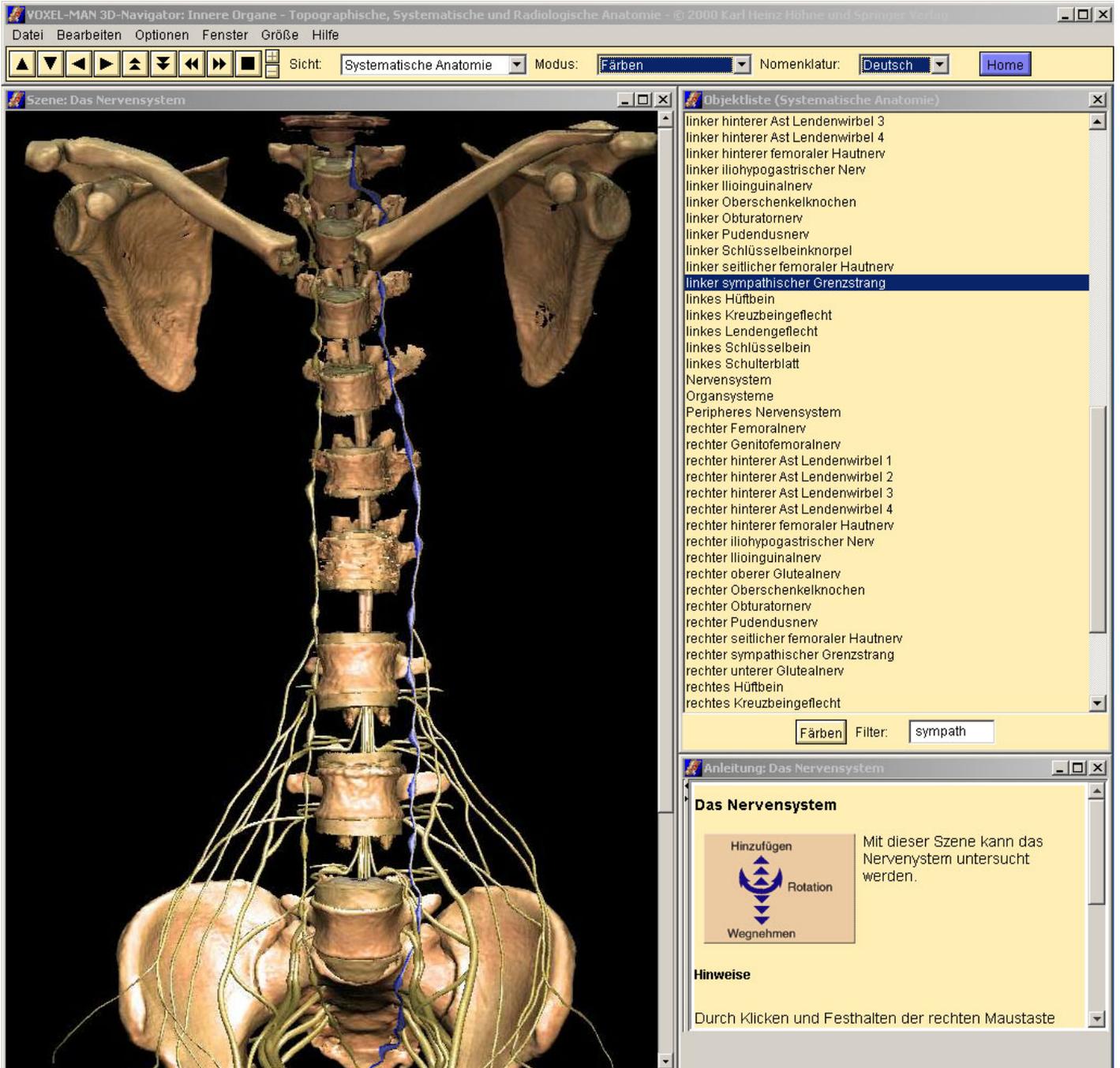


Abbildung 28: Farbliches Hervorheben eines interessierenden Nerven im 3D-Modell. Durch Auswahl des Färbemodus wird die gesuchte Struktur andersfarbig dargestellt und hebt sich so von den anderen Organen ab.

direkt aus dem Bild identifiziert werden. Abbildung 29 zeigt diese Funktion.

Möchte man nun mehr über ein Objekt und seine Einordnung im peripheren Nervensystem wissen, kann man durch einen Mausklick mit der rechten Maustaste auf das Objekt die Zugehörigkeit zu übergeordneten Strukturen ermitteln. So zeigt der Mausklick mit der rechten Taste auf die Struktur des sympathischen Grenzstrangs die Zugehörigkeit zum vegetativen Nervensystem an. Hier werden nun alle Informationen zur Verfügung gestellt, die während der symbolischen Modellierung erstellt und in die Wissensbasis eingegeben wurden.

3.4 Visualisierung von funktionellen Inhalten

Die einzelnen Objekte eines 3-D Atlases sind, wie schon erwähnt, über eine Wissensbasis miteinander verknüpft und können so hierarchisch zu komplexen Systemen verknüpft werden. Natürlich bieten die Verknüpfungen in der Wissensbasis noch andere Möglichkeiten als das simple Sortieren der Objekte in Hierarchieebenen. Es können Verknüpfungen zwischen anatomisch sehr unterschiedlichen Strukturen dazu genutzt werden, funktionelle Beziehungen zwischen den Objekten zu verdeutlichen. So kann z.B. ein Intercostalnerve dem von ihm innervierten Dermatome zugeordnet werden. Damit ist der typische Ausfall dieses Hautareals bei einer Kompression der Nervenwurzel in dieser Höhe zu demonstrieren oder aber der betroffene Bereich bei einer Herpes zoster-Infektion. Wenn die Haut in entsprechend viele Teile segmentiert ist, ist solch eine Zuordnung in allen Bereichen des Körpers möglich. Abbildung 31 macht dies visuell deutlich. Eine weitere sinnvolle Möglichkeit der Zuordnung besteht zwischen den Nerven und den muskulären Strukturen. So können betroffene Muskeln bei nervalen Funktionsstörungen dargestellt werden, woraus der Betrachter unmittelbar auf die Bewegungseinschränkung schließen kann. Weiter gedacht könnten auch komplette Reflexbögen dargestellt und sogar animiert werden.

4 Diskussion

Das periphere Nervensystem ist eines der kompliziertesten Organe des menschlichen Körpers. Die traditionellen Methoden der Wissensvermittlung über Atlanten, Präparierkurse und Tafeln können hier nur einen unvollständigen Eindruck der wahren Gegebenheiten aufzeigen. Schwierig ist die Wissensvermittlung dieses Organs deshalb, da es sich bei dem Organ "peripheres Nervensystem" um ein baumartiges Geflecht handelt, das sich in eine Vielzahl von Endästen aufzweigt, um in Millionen von afferenten und efferenten Fasern zu enden. Einen klaren Anfangs- oder Endpunkt gibt es also per definitionem nicht. Ein Atlas, der Nerven und ihre Verläufe darstellt, ist also schon von daher ungenau, weil er die einzelnen Nervenfasern im peripheren Verlauf nicht darstellen kann. So muß ein Kompromiß zwischen didaktisch

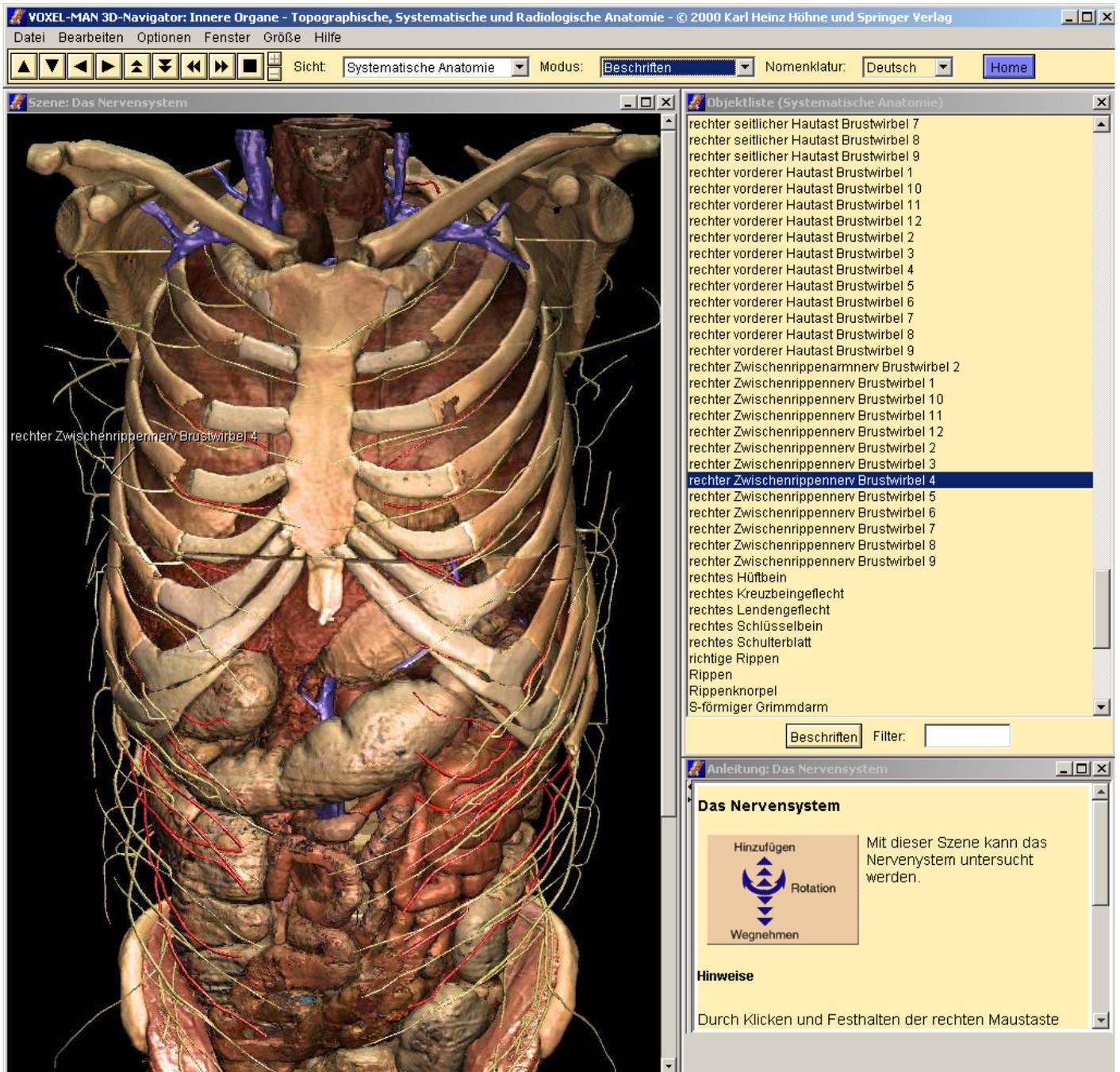


Abbildung 29: Beschriften eines Nerven im 3D-Modell. Mit der gewählten Funktion "beschriften" lassen sich ausgewählte Objekte mit Beschriftungen versehen. In diesem Fall wurden der rechte Zwischenrippennerv in der Höhe Th4 ausgewählt.

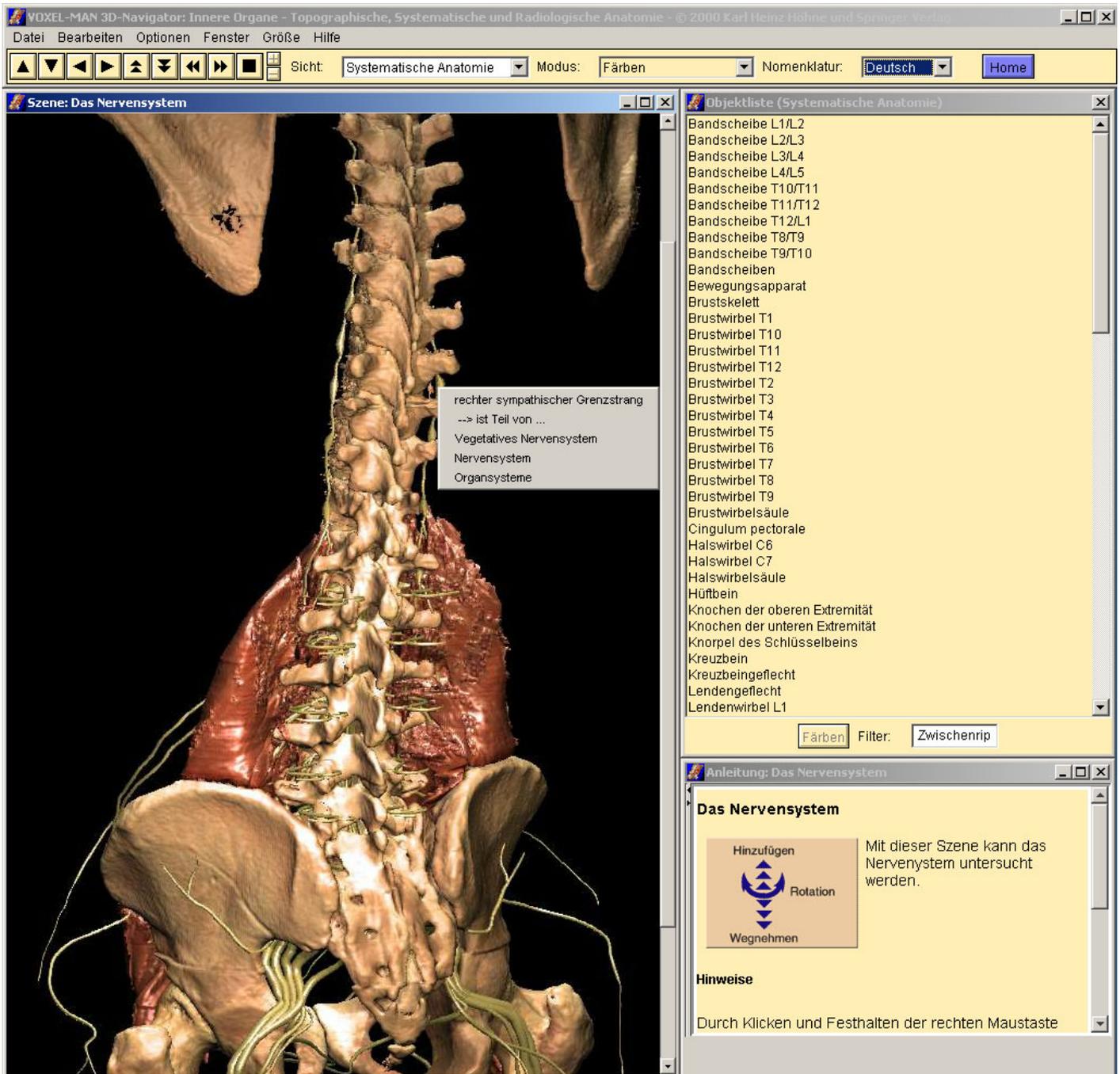


Abbildung 30: Der Zugriff auf die Wissensbasis. Durch einen Klick mit der rechten Maustaste, können Informationen zu den angeklickten Objekten abgerufen werden. Es wird der Name des Objekts und seine Zugehörigkeit zu übergeordneten Organsystemen angezeigt.

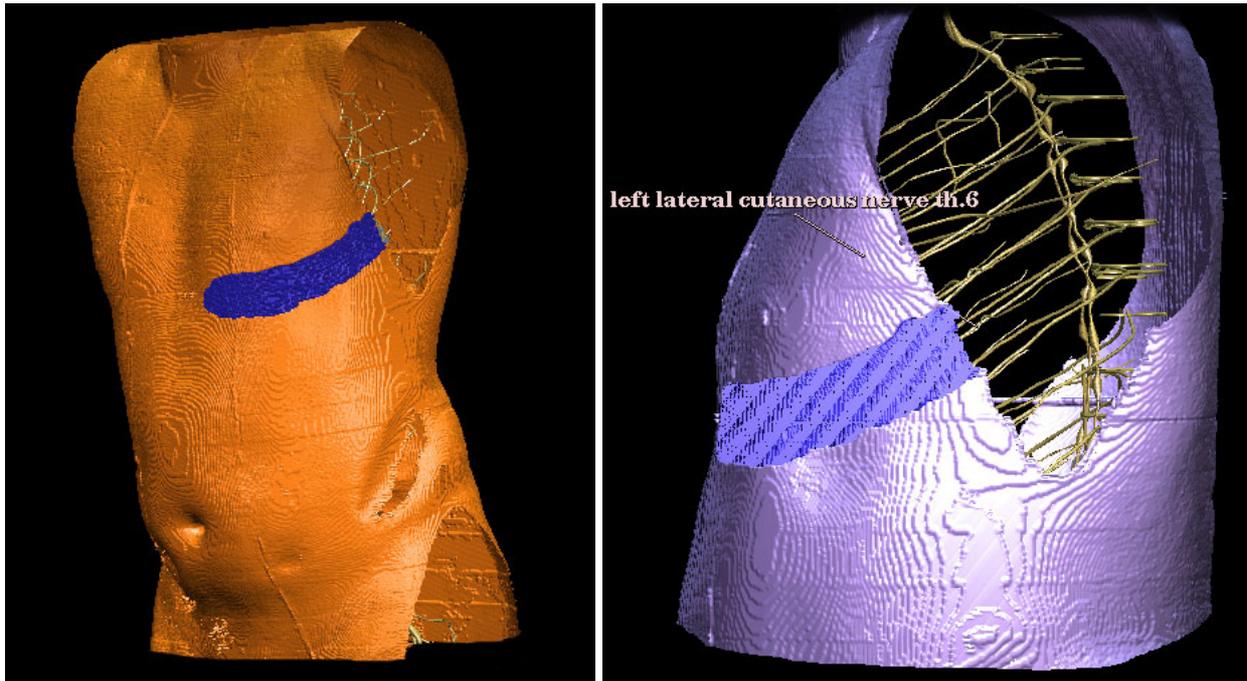


Abbildung 31: Visualisierung von funktionellen anatomischen Inhalten. Der Nerv ist über Relationen in einer Wissensbasis mit dem von ihm innervierten Hautareal (Dermatom) verknüpft.

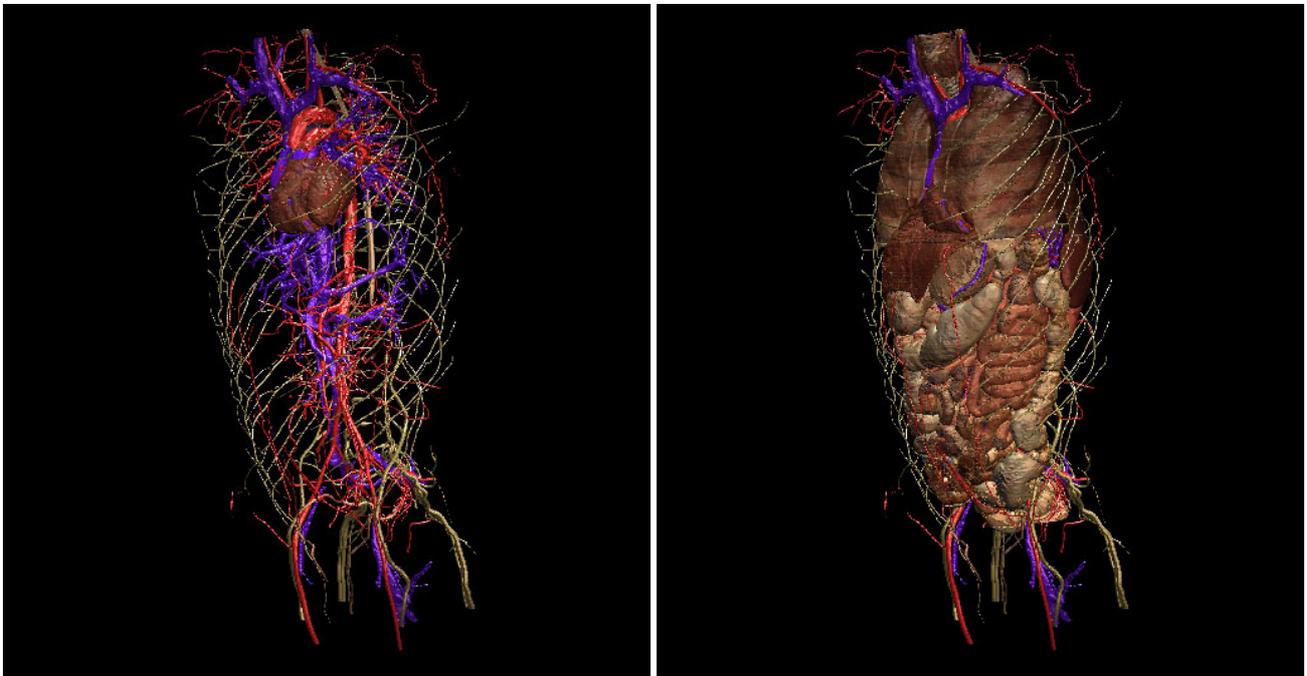


Abbildung 32: Volumenbasierte und Oberflächenbasierte Objekte in einem Modell. Die Abbildungen zeigen die modellierten Nerven und Arterien neben segmentierten Volumenobjekten aus dem Kryotomdatensatz des Visible-Human.

sinnvoller Vereinfachung und klinisch relevanter Genauigkeit gefunden werden.

Die Nervenrepräsentation dieser Arbeit basiert auf der Modellierung der Strukturen. Topographie und Morphologie der Nerven gehen somit nicht unmittelbar aus dem Datensatz hervor, aus dem die anderen Organe segmentiert wurden. So kann zwar kritisiert werden, daß die Strukturen nicht der Realität entsprechen, da sie manuell in den Datensatz gelegt wurden. Der Vorteil dieser Vorgehensweise besteht aber darin, daß Informationen aus sehr viel mehr "Datensätzen" einfließen. Anatomische Atlanten, aus denen die Lageinformation der Nerven gewonnen wurde, basieren nämlich auf vielen Sektionen und Präparaten. Normvarianten und pathologische Zustände können so relativiert werden. Auf der anderen Seite sind auch segmentierte Objekte in ihrer Entstehung einer gewissen Willkür des Segmentierenden unterworfen. Das Auswählen unterschiedlicher Grauwertbereiche kann durchaus das gleiche Organ mit sehr unterschiedlichen dreidimensionalen Repräsentationen hervorbringen.

Weiter ist zu erwähnen, daß es momentan keine Möglichkeit gibt, über ein Segmentationsverfahren das periphere Nervensystem aus einem Datensatz zu segmentieren. Die "hybride Darstellung" aus segmentierten Objekten in volumenbasierter Darstellung und modellierten Objekten in oberflächenbasierter Repräsentation ist somit eine Methode, die es zum ersten Mal möglich macht, das periphere Nervensystem dreidimensional darzustellen.

In nachfolgenden Arbeiten müssen nun weitere Teile des peripheren Nervensystems modelliert werden. Hierbei wäre im besonderen die Darstellung der Hirnnerven und ihrer Verläufe für den Lernenden von großem Interesse.

Die dreidimensionale Darstellung kann gerade im Bereich des Schädels die Anatomie sehr viel besser vermitteln als ein zweidimensionales Printmedium. Außerdem stehen schon Atlanten des Schädels auf der Basis des VOXEL-MAN Programms zur Verfügung, die als umgebender Datensatz für modellierte Hirnnerven dienen könnten. Desweiteren sind periphere Leitungsbahnen in den Extremitäten in topographischer Beziehung zu Muskeln und Faszien für Studenten und Chirurgen von großem Interesse.

Ein nächster Schritt wäre die weitere Verknüpfung zwischen Nerven, Muskeln, Dermatomen und Hirnarealen. Damit wäre dann der einzelne Nerv seinem Erfolgsorgan und dessen kontrollierendem Hirnareal zugeordnet. Weiter wären hier echte Animationen im Sinne eines sichtbaren Impulses aus der Hirnrinde bis in das Erfolgsorgan oder umgekehrt afferente Hautreize zu realisieren.

Die vorliegende Arbeit beschäftigte sich mit der dreidimensionalen Modellierung des peripheren Nervensystems, das in sehr aufwendiger Handarbeit entstanden ist. Es entstand ein Atlas auf der Grundlage der Anatomie eines individuellen Menschen, in diesem Fall des Visible Human. Die Abbildung der Anatomie eines Menschen wiederholt sich mit vielen Abweichungen bei allen gesunden anderen Menschen. Ein weiterer großer Schritt wäre es, wenn man dreidimensionale digitale Atlanten in kurzer Zeit von vielen Patienten anfertigen könnte. Damit könnte das Einsatzspektrum dieser Atlanten von der Lehr- und Operationsplanungsanwendung zu einem diagnostischen Mittel erweitert werden. Die Vision eines gläsernen Patienten, von dem ohne körperliche Belastung und nach kurzer Zeit eine hochwertige, detailgenaue dreidimensionale Repräsentation erstellt werden kann, ist zwar noch in weiter Ferne, rückt aber durch neue Methoden immer näher.

Die Realisierung dieser Vision hängt im wesentlichen von zwei Faktoren ab:

- Zum einen müssen bildgebende Verfahren zur Verfügung stehen, die einen hochwertigen Datensatz des jeweiligen Patienten erstellen können. Die Magnetresonanztomographie (MRT) scheint hier zur Zeit am ehesten geeignet zu sein, da durch die fortschreitende Entwicklung auf diesem Gebiet immer höher auflösende Datensätze erstellt werden können. Außerdem scheint die MRT nach bisherigen Studien den Patienten nicht zu belasten.
- Zum anderen müssen die Verfahren zur Erstellung der dreidimensionalen Repräsentation (Segmentation) weiter automatisiert werden. Vollautomatisierte Verfahren zeigen momentan nur sehr schlechte Ergebnisse, da die Kenntnisse des Mediziners über die Anatomie dem Computer nicht zur Verfügung stehen. Programme, die mit neuronalen Netzen arbeiten, verfolgen allerdings den Ansatz, daß der Computer aus seinen Aktionen, die benutzergesteuert sein können, lernt und sie bei weiteren Schritten sinnvoll einsetzt. So könnte der Computer die Vorgehensweise des anatomisch Geschulten erlernen und selber anwenden. Vorstellbar wäre auch, daß der Rechner aus einer großen Menge an verfügbaren Datensätzen einen Vergleichsdatsatz errechnet, der als Norm dient. Abweichungen davon würden dem Arzt im Datensatz kenntlich gemacht werden und so eine Diagnose erleichtern.

Die Medizin ist eine alte Wissenschaft, deren Lehre über Jahrhunderte gepflegt und weiter vorangebracht wurde. Das Erlernen der Anatomie des Menschen an der Leiche und aus Lehrbüchern gehört dabei zur Basis des Medizinstudiums. Diese Methoden der anatomischen Wissensvermittlung haben sich lange bewährt und gerade die Präparation eines menschlichen Leichnams mit ihren dreidimensional visuellen und haptischen Eindrücken kann wohl nie durch ein anderes Lernverfahren ersetzt werden. Der große Nachteil der Präparation ist jedoch die zeitliche Unflexibilität dieses Verfahrens, da die Möglichkeit der Präparation nur einmal im

Medizinstudium gegeben wird. Gerade hier liegt die Stärke eines dreidimensionalen digitalen Atlases, der zu jeder Zeit und bei entsprechend technischer Ausrüstung des Lernenden auch an fast jedem Ort zur Verfügung steht. So kann dieser Atlas, wenn die nötige Akzeptanz den neuen Medien gegenüber weiter steigt, eine sinnvolle Ergänzung zu den herkömmlichen Lehrmethoden in der Medizin sein.

Zusammenfassend betrachtet ist mit dem hier vorgestellten 3D-Modell somit ein großer Schritt in Richtung eines sinnvollen computergestützten Lern- und Planungssystem gelungen. Es wurde gezeigt, daß gerade das komplexe Organ "peripheres Nervensystem" in besonderem Maße von der digitalen dreidimensionalen Repräsentation profitiert. In weiteren Arbeiten muß sich nun der Vision eines vollständigen, virtuellen interaktiven 3D-Atlases weiter angenähert werden, um so die Ausbildung in der Medizin immer weiter zu verbessern.

5 Zusammenfassung

Die Wissensvermittlung in der Medizin befindet sich im Wandel. Dem klassischen Erlernen der Anatomie mit Hilfe von Atlanten, Lehrbüchern, Nerven- und Gefäßtafeln, Vorlesungen und dem Präparierkurs stehen inzwischen die "neuen Lehrmedien" gegenüber. Die zukunftsweisendste Entwicklung stellen dabei die interaktiven, dreidimensionalen, digitalen Atlanten dar. Sie zeichnen sich dadurch aus, daß der Benutzer seinen Blickwinkel auf die Organe frei wählen kann und so nicht auf nur eine Ansicht im Lehrbuch beschränkt bleibt. Aufgrund der bisher verwendeten Vorgehensweisen war es bis jetzt jedoch nicht möglich, komplexe Strukturen, wie das periphere Nervensystem, realistisch zu visualisieren.

Ziel der Arbeit war es, ein digitales, dreidimensionales Lernmodell des peripheren Nervensystems im Brust- und Bauchraum zu erstellen. 137 Nerven wurden dabei über ein neues Verfahren im Visible-Human Datensatz der National Library of Medicine modelliert und gemeinsam mit segmentierten Organen aus diesem Datensatz im VOXEL-MAN System des IMDM implementiert.

Hierbei zeigte sich, daß auf diesem Wege eine realistische dreidimensionale Repräsentation vieler Nerven erreicht werden kann. Lediglich die als Nervenplatten imponierenden Plexus konnten dem realen Bild der Anatomie nicht entsprechen. Durch Registrierung der Objekte in einer Wissensbasis wurden die Nerven hierarchisch sortiert und in Beziehung zueinander gesetzt. Dadurch kann dem Benutzer durch Mausklick auf die entsprechende Struktur der Name und die Zugehörigkeit zu übergeordneten Organsystemen angezeigt werden.

Aus dem VOXEL-MAN Autorensystem heraus wurden interaktive, "intelligente" Filme erstellt, die als VOXEL-MAN 3D-Navigator auf jedem PC lauffähig sind. Auf diese Weise kann die Funktionalität des VOXEL-MAN Systems (Drehbarkeit der Modelle, Verknüpfung mit einer Wissensbasis) auf normalen PCs genutzt werden und steht somit einer großen Anwendergruppe zur Verfügung.

Im Ergebnis entstand ein hochauflösender Atlas des peripheren Nervensystems im Bereich des Thorax und des Abdomens, der durch seine interaktive Funktionalität und seine Verknüpfung mit anatomischen Inhalten den herkömmlichen Bildatlanten deutlich überlegen ist.

In weiteren Arbeiten muß die Organrepräsentation in einigen Bereichen verfeinert und komplettiert werden. Die Wissensbasis kann dabei als Gerüst dienen, um noch mehr anatomische, funktionale und pathologische Inhalte in den Atlas zu integrieren. So können Krankheitsursachen (z.B. Nervenwurzelkompression) direkt in Beziehung zum klinischen Symptom (sensibler Ausfall eines Dermatoms) dargestellt werden.

6 Inhalt und Benutzung der beiliegenden CD-ROM

Die beiliegende CD-ROM enthält interaktive Szenen, die das in dieser Arbeit besprochene Modell des peripheren Nervensystems demonstrieren. Sie können mit der ebenfalls auf der CD-ROM enthaltenen Anwendung VOXEL-MAN 3D-Navigator exploriert werden. Das Programm ist auf Rechnern mit Windows 95, 98, 2000 und NT lauffähig. Für eine befriedigende Darstellung ist ein Prozessor mit 500MHz Taktfrequenz und ein Arbeitsspeicher von 128 MB empfehlenswert. Das CD-ROM Laufwerk sollte eine Geschwindigkeit von mindestens 24fach haben.

Die Anwendung wird bei eingestellter Autostartfunktion direkt nach Einlegen der CD-ROM gestartet. Sollte das nicht der Fall sein, klicken Sie das Arbeitsplatz- und danach das CD-ROM-Symbol doppelt an. Hier wählen Sie die Datei

VM3DN_de.bat

und führen sie wiederum durch einen Doppelklick aus. Das Programm wird nun geladen und ein Startmenü angezeigt. Hier können Sie nun einen der drei "Intelligenten Filme" durch einfaches Klicken auf die Ikonen auswählen. Die verfügbaren Filme sind mit einem grünen Rahmen gekennzeichnet, wobei ein Film durch Anklicken des 3D-Brillensymbols auch als stereoskopischer Film für die Betrachtung mit einer rot-grün Brille zur Verfügung steht.

Um einen anderen Film zu explorieren, drücken sie den Home Button in der Menüzeile oben rechts. Es erscheint nun wieder das Auswahlfenster mit den verschiedenen Filmen zur Auswahl. Weiter Informationen zur Bedienung der einzelnen Filme erhalten sie über die Hilfe-Funktion und das jeweils in der rechten unteren Ecke angezeigte Anleitungsfenster.

Literaturverzeichnis

- [Benninghoff-Goerttler 1964] Benninghoff-Goerttler. *Lehrbuch der Anatomie des Menschen*. Urban und Schwarzenberg, München-Berlin, 1964. 21
- [Bomans 1994] Michael Bomans. *Segmentationsverfahren zur 3D-Visualisierung von Kernspintomogrammen des Kopfes: Evaluierung der Standardverfahren und Entwurf und Realisierung eines klinisch einsetzbaren Systems*. Dissertation, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, 1994. 7
- [Brinkley *et al.* 1997] J. F. Brinkley, S. W. Bradley, J. W. Sundsten, C. Rosse. The digital anatomist information system and its use in the generation and delivery of web-based anatomy atlases. 1997. 5
- [Brinkley, Rosse 1997] James F. Brinkley, Cornelius Rosse. The Digital Anatomist distributed framework and its applications to knowledge-based medical imaging. *J. Am. Med. Inf. Ass.*, 4(3):165–183, 1997. 5
- [by the Twelfth International Congress of Anatomists in London 1989] Authorised by the Twelfth International Congress of Anatomists in London (Ed.). *Nomina Anatomica, sixth edition*. Churchill Livingstone, Edinburgh, London, Melbourne, New York, 1989. 10
- [Hagens *et al.* 1991] Hagens, Romrell, Ross, Tiedemann. *The visible human body*. LEA and FEBIGER, London, 1991. 21
- [Höhne *et al.* 1996] Karl Heinz Höhne, Kay Priesmeyer, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Rainer Schubert, Ulf Tiede, Andreas Pommert, Hans-Christian Wulf. Exploring the Visible Human via “intelligent movies”. *Radiology*, 201(P):564, 1996. (abstract). 31
- [Höhne *et al.* 2000a] Karl Heinz Höhne, Sebastian Gehrman, Stefan Noster, Bernhard Pflesser, Andreas Pommert, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Rainer Schubert, Udo Schumacher, Ulf Tiede. A realistic 3D atlas of the inner organs based on the Visible Human data. In Heinz U. Lemke, Michael W. Vannier, Kiyonari Inamura, Allan G. Farman, Kunio Doi (Eds.), *Computer Assisted Radiology and Surgery, Proc. CARS 2000*, volume 1214 of *Excerpta Medica International Congress Series*, 625–628. Elsevier, Amsterdam, 2000. 34
- [Höhne *et al.* 2000b] Karl Heinz Höhne, Bernhard Pflesser, Andreas Pommert, Kay Priesmeyer, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Rainer Schubert, Ulf Tiede, Hans Frederking, Sebastian Gehrman, Stefan Noster, Udo Schumacher. *VOXEL-MAN 3D Navigator: Inner Organs. Regional, Systemic and Radiological Anatomy*. Springer-Verlag Electronic Media, Heidelberg, 2000. (3 CD-ROMs, ISBN 3-540-14759-4). 34

- [Höhne, Hanson 1992] Karl Heinz Höhne, William A. Hanson. Interactive 3D-segmentation of MRI and CT volumes using morphological operations. *J. Comput. Assist. Tomogr.*, 16(2):285–294, 1992. 7, 14
- [Höhne 1998] Karl Heinz Höhne (Ed.). *VOXEL-MAN Junior: Interactive 3D Anatomy and Radiology in Virtual Reality Scenes, Part 1: Brain and Skull*. Springer-Verlag Electronic Media, Heidelberg, 1998. (CD-ROM, ISBN 3-540-14676-8). 31
- [Kahle 1991] W. Kahle. *Taschenatlas der Anatomie, Band 3, Nervensystem und Sinnesorgane*. Thieme, New York, 1991. 21
- [Lindberg *et al.* 1993] D. A. Lindberg, B. L. Humphreys, A. T. McCray. The Unified Medical Language System. *Meth. Inform. Med.*, 32(4):281–291, 1993. 11
- [Lippert 1996] H. Lippert. *Lehrbuch Anatomie*. Urban und Schwarzenberg, München-Berlin, 1996. 27
- [Lipscomb, Kittrel 1991] K. Lipscomb, A. Kittrel. Software gets under your skin. *Physicians and Computers*, 9(7):14–16, 1991. 5
- [McCray, Nelson 1995] A. T. McCray, S. J. Nelson. The representation of meaning in the umls. *Meth. Inform. Med.*, 34:193–201, 1995. 11
- [Noster 1999] Noster. *TREE-EDIT, ein Leitfaden*. IMDM, Hamburg, 1999. 18
- [Rheinwald 1996] Klaus Rheinwald. Ein interaktiver 3D-Editor zur Modellierung von Blutgefäßen. Diplomarbeit, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, 1996. 18
- [Rosse *et al.* 1995] Cornelius Rosse, Mohamed Ben Said, Kraig R. Eno, James F. Brinkley. Enhancements of anatomical information in UMLS knowledge sources. In *Annu. Symp. Comput. Appl. Med. Care, Proc. SCAMC*, 873–877, New Orleans, LA, 1995. 11
- [Rosse *et al.* 1997] C. Rosse, J. L. Mejino, R. M. Jakobovits, B. R. Modayur, J. F. Brinkley. Motivation and organizational principles for the digital anatomist symbolic knowledge base: an approach toward standards in anatomical knowledge representation. *J. Am. Med. Inf. Ass.*, 1997. 5
- [Schiemann *et al.* 1992] Thomas Schiemann, Michael Bomans, Ulf Tiede, Karl Heinz Höhne. Interactive 3D-segmentation. In Richard A. Robb (Ed.), *Visualization in Biomedical Computing II, Proc. SPIE 1808*, 376–383, Chapel Hill, NC, 1992. 7, 15
- [Schiemann *et al.* 1996] Thomas Schiemann, Jochen Nuthmann, Ulf Tiede, Karl Heinz Höhne. Segmentation of the Visible Human for high quality volume based visualization. In

- Karl Heinz Höhne, Ron Kikinis (Eds.), *Visualization in Biomedical Computing, Proc. VBC '96*, volume 1131 of *Lecture Notes in Computer Science*, 13–22. Springer-Verlag, Berlin, 1996. 15
- [Schiemann *et al.* 1997] Thomas Schiemann, Ulf Tiede, Karl Heinz Höhne. Segmentation of the Visible Human for high quality volume based visualization. *Med. Image Anal.*, 1(4):263–271, 1997. 7
- [Schubert *et al.* 1999] Rainer Schubert, Bernhard Pflesser, Andreas Pommert, Kay Priesmeyer, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Ulf Tiede, P. Steiner, Karl Heinz Höhne. Interactive volume visualization using “intelligent movies”. In James D. Westwood, Helene M. Hoffman, Richard A. Robb, Don Stredney (Eds.), *Medicine meets Virtual Reality, Proc. MMVR '99*, volume 62 of *Health Technology and Informatics*, 321–327. IOS Press, Amsterdam, 1999. 31
- [Schubert 1999] Rainer Schubert. *Symbolisch-Räumliche Computermodelle der Anatomie*. 1999. Habilitationsschrift, Fachbereich Medizin, Universität Hamburg. 10, 52
- [Sobotta 1963] J. Sobotta. *Atlas der Anatomie des Menschen*. Urban und Schwarzenberg, München-Wien-Baltimore, 1963. 21
- [Sobotta 1993] J. Sobotta. *Atlas der Anatomie des Menschen*. Urban und Schwarzenberg, München-Wien-Baltimore, 1993. 21
- [Sobotta 2000] J. Sobotta. *Sobotta interaktiv*. Urban und Fischer, München-Jena, 2000. 5
- [Tiede 1999] Ulf Tiede. *Realistische 3D-Visualisierung multiattribuierter und multiparametrischer Volumendaten*. Dissertation, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, 1999. 30
- [Tillmann, Schünke 1993] Tillmann, Schünke. *Taschenatlas zum Präparierkurs*. Thieme, New York, 1993. 21, 23
- [Whitmore 1998] Whitmore. *Terminologia Anatomica*. Thieme, New York, 1998. 27
- [Williams 1998] P.L. Williams. *Gray's Interactive Anatomy*. Churchill, Livingstone, 1998. 3

A Änderungen von TREE-EDIT und Integration der Daten in VOXEL-MAN

Für eine Bearbeitung von mehreren Nervensträngen, wie es etwa beim Modellieren der Plexus nötig ist, mußte zunächst ein hinreichend großer Wert für die maximale Anzahl an Koordinatenpunkten gesetzt werden. Weiter wurde ein Defaultpfad zur Speicherung der Parameterdateien eingerichtet, wodurch Tree-Edit sofort in das richtige Verzeichnis zum Speichern springt. Das Fenster für die Dateinamen wurde vergrößert, um auch die langen anatomischen Bezeichnungen der Nerven darstellen zu können.

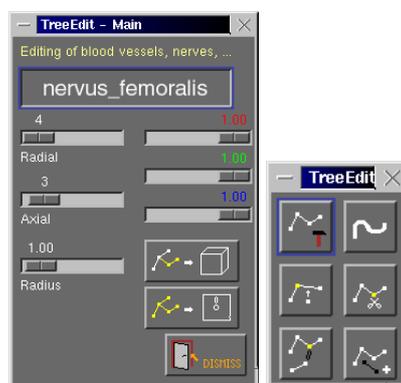


Abbildung 33: Die Benutzeroberfläche des Röhreneditors Tree-Edit. Das linke Fenster wird zur Speicherung der Röhren und zur Modifikation der Darstellung benutzt. Das rechte Fenster verfügt über Buttons zur Modellierung der Röhren.

Gespeicherte Daten von TREE-EDIT sind einfache Parameterdateien, die dreidimensionale Koordinaten für die Stützpunkte der Röhren enthalten. Vor den Koordinaten werden zudem noch der Name der Röhre und die ausgewählten Darstellungsoptionen festgehalten. Jede Datei kann dabei mehrere Röhren und somit mehrere Namen und Darstellungsoptionen enthalten. VOXEL-MAN kann jedoch aus den Parameterdateien keine Röhren generieren. Daher müssen die Objekte von TREE-EDIT in ein Format konvertiert werden, das von VOXEL-MAN eingelesen werden kann. Dieses neue Format mit der Dateiendung “.vmt“ ist binär und enthält die Objekte als Polygondaten. Die Positionierung der Objekte im dreidimensionalen Raum ist in diesem Dateiformat an dem Volumenelement mit den Koordinaten 0,0,0 orientiert. Da die Nerven immer nur in Teilbereichen des Datensatzes modelliert wurden, muß die Lage auf den Gesamtdatensatz umgerechnet werden.

Die Objekte der “.vmt“ Dateien werden deswegen einzeln über ein Konvertierungsprogramm in Beziehung zum ganzen Datensatz gesetzt, um sie unabhängig vom Datenfenster in jedem Teil des Datensatzes darstellen zu können. Dann muß für jeden Strang ein Eintrag in eine Startparameterdatei gemacht werden, um die Nerven als Objekt für VOXEL-MAN zu definieren, mit

einer UID zu versehen und in der Wissensbasis als generisches Objekt anzumelden.

Diese letzten beiden Schritte konnten über zwei Skripts in Zusammenarbeit mit Hans-Christian Wulf und Norbert Scheller automatisiert werden. Lediglich die Speicherung als “.vmt“ Datei muß für jeden Nervenstrang einzeln durchgeführt werden.

Da die Anzahl der Nerven im Laufe der Arbeit recht schnell zunahm, entschloß man sich die Namen, die jeder Strang haben sollte, schon bei der ersten Speicherung als “.vmt“ Datei fest zu definieren. Ein Skript nutzt diesen Namen dann später, um die Objekte dynamisch mit einer UID zu versehen und als Objekt für VOXEL-MAN anzumelden.

Das Konvertierungsprogramm liest die Parameterdaten ein und rechnet sie mit einem Programm (ShiftTriangleDataset) vom bearbeiteten Ausschnitt des Datensatzes (mit den Koordinaten 100,5,450) auf den gesamten Datensatz um. Der Benutzer erhält eine Rückmeldung, wieviele Datensätze konvertiert wurden.

```
#!/usr/bin/csh -f

set PROG = /users/schiemann/cc/ShiftTriangleDataset.alpha
set PAR = '"trans=(100,5,450) outsize=(573,330,1049) "'

set n_conv = 0

foreach var (`ls -1 *.vmt | grep -v conv`)
    set BASE = `basename $var .vmt`
    set IN    = $BASE.vmt
    set OUT   = $BASE.conv.vmt
    if ( ! -f $OUT ) then
        echo "$PROG $IN $OUT $PAR" | sh
        @ n_conv++
    endif
end

echo " "

switch ( $n_conv )

    case "0":
```

```

    echo "Kein Datensatz konvertiert! "
    breaksw

case "1":
    echo '"Ein Datensatz konvertiert! "'
    breaksw

default:
    echo "$n_conv Datensaeetze konvertiert! "
    breaksw

endsw

```

Das "Create"-Skript erstellt aus den Dateinamen der einzelnen Nervenstränge Objektnamen, mit denen das Skript die Definitionen zur Integration in VOXEL-MAN und in die Wissensbasis in eine Datei mit dem Namen "myObjects.par" hineinschreibt.

```

#!/usr/bin/csh -f

set UID = 256

foreach FILENAME (`ls -1 *.conv.vmt`)

    set BASENAME = `basename $FILENAME .conv.vmt`
    set OBJECTNAME = `echo $BASENAME | awk
    'BEGIN{FS="_"}{for(i=1;i<=NF;i++)
    printf("%s ",$i); printf"\n"}'`

    echo "VM: Define DataSet \"\"$OBJECTNAME\"\"
    echo "      Type=Triangle"
    echo "      File=$FILENAME"
    echo "      End DataSet"

    echo "VM: Define Object \"\"$OBJECTNAME\"\"

```

```

echo "      uid=$UID"
echo "      Data Definition="\ "$OBJECTNAME"\ "
echo "      Shading=STANDARD"
echo "      Color=NERVES"
echo "      End Object"

echo "KB: Define Generic "\ "$OBJECTNAME"\ " End"

echo "KB: Define Object "\ "$OBJECTNAME"\ "
echo "      uid=$UID"
echo "      Data Label=STRUCTURE"
echo "      End"

@ UID++
end

```

B Systematisierung der Nerven in der Wissensbasis des VOXEL-MAN

Um die einzelnen Nerven zu systematisieren und in eine hierarchische Ordnung zu bringen, werden sie über Relationen miteinander verknüpft. Der Typ der Relationen kann dabei ausgewählt werden. Einen Überblick über die implementierten Relationstypen des VOXEL-MAN findet sich in [Schubert 1999]. Die einfachste Verknüpfung stellt dabei der Typ “part of“ dar, der die Zugehörigkeit mehrerer Strukturen zu einer übergeordneten Struktur beschreibt. Weitere Verknüpfungstypen können funktionelle Abhängigkeiten beschreiben, wie z.B. “innerviert“, “versorgt motorisch“, “versorgt sensibel“ usw.. Das in dieser Arbeit entstandene Nervenmodell wurde über “part of“-Relationen strukturiert. Weitere Relationen können später nach weitergehenden Segmentierungen wichtiger Kennmuskeln der einzelnen Nerven eingefügt werden. Das unten abgedruckte Beispiel zeigt die hierarchische Strukturierung der einzelnen Nerven zum Plexus lumbalis der rechten Seite.

```

DEFINE RELATION
  TYPE=PartOf
  Domain=("Systematic Anatomy", "Topographic Anatomy")

```

```
("right femoral nerve",  
"right ilio-inguinal nerve",  
"right iliohypogastric nerve",  
"right genitofemoral nerve",  
"right posterior cutaneous nerves",  
"right obturator nerve",  
"right lateral femoral cutaneous nerve")  
"right lumbal plexus"  
END
```

Danksagung

An erster Stelle danke ich meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr. Karl Heinz Höhne, für die Möglichkeit zu dieser Dissertation und für seine ständige Unterstützung bei der Ausführung. Das familiäre Klima in seinem Institut und seine ruhige, wohlwollende Art haben die Zeit meiner Doktorarbeit zu einem wichtigen Teil meines Studiums gemacht.

Weiter danke ich meinen Betreuern, Herrn Dr. Thomas Schiemann und Herrn Dr. Ulf Tiede. Sie hatten immer ein offenes Ohr für meine Fragen und gaben mir durch Gespräche weitere Einsichten in die medizinische Bildverarbeitung.

Herrn Prof. Dr. Schumacher danke ich für seine anatomischen Hilfestellungen und seine motivierende Begeisterung.

Ebenso danke ich auch allen anderen Mitarbeitern und Studenten am IMDM für ihre Hilfsbereitschaft und freundliche Aufnahme am Institut.

Lebenslauf

- geboren am 20. September 1974 in Hamburg
- 1981-1985 Grundschule Bickbargen, Halstenbek
- 1985-1994 Sophie-Barat-Schule, Hamburg
- 1994 Allgemeine Hochschulreife an der Sophie-Barat-Schule, Hamburg
- 1994-1995 Wehrdienst beim Marinemusikkorps Ostsee, Kiel
- 1995-1998 Studium der Humanmedizin an der Albert-Ludwigs Universität, Freiburg
- 1997 Physikum an der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg
- 1998 1. Staatsexamen an der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg
- seit 1998 Studium der Humanmedizin an der Universität Hamburg
- 2001 2. Staatsexamen an der Universität Hamburg
- 1. PJ-Tertial in der Hals-Nasen-Ohren Klinik St. Georg, Hamburg
- 2. PJ-Tertial, Chirurgie im Kings Mill Health Centre, Sutton in Ashfield, UK
- 3. PJ-Tertial, Innere Medizin im Krankenhaus Bozen, Bolzano, IT

Erklärung

Ich versichere ausdrücklich, daß ich die Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe verfaßt, andere als die von mir angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und die aus den benutzten Werken wörtlich oder inhaltlich entnommenen Stellen einzeln nach Ausgabe (Auflage und Jahr des Erscheinens), Band und Seite des benutzten Werkes kenntlich gemacht habe, 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.