Aus dem Institut für Medizinische Informatik
des Zentrums für Experimentelle Medizin
des Universitätsklinikums Hamburg-Eppendorf
(Direktor: Prof. Dr. Heinz Handels)

Ein interaktiver Atlas für die Sonographie und Anatomie des Säuglingsgehirns

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin
dem Fachbereich Medizin der Universität Hamburg vorgelegt von
William Albert Arkhurst
aus Kiel
Hamburg, 2005

Angenommen vom Fachbereich Medizin
der Universität Hamburg am:

Veröffentlicht mit Genehmigung des Fachbereichs
Medizin der Universität Hamburg

Prüfungsausschuss, der/die Vorsitzende:

Prüfungsausschuss: 2. Gutachter/in:

Prüfungsausschuss: 3. Gutachter/in:

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1
1.1 Problemstellung 1
1.2 Die Ultraschalluntersuchung des Säuglings 2
1.3 Zielsetzung 5

2. Stand der Forschung 7
2.1 Lehrbücher und Anatomieatlanten 7
2.2 Digitale Bücher 8
2.3 Interaktive Programme 9

3. Materialien und Methoden 15
3.1 Materialien 16
3.1.1 MRT-Datensätze 18
3.2 Methoden 19
3.2.1 Erzeugung des MRT-Volumendatensatzes 19
3.2.2 Erzeugung des Ultraschall-Volumendatensatzes 20
3.2.3 Registrierung 23
3.2.4 Segmentation 24
3.2.5 Volumen-Modellierung 26
3.2.6 3D-Visualisierung 28
3.2.7 Intelligente Volumen 29
3.2.8 Auswahl der bildlichen Darstellung 30
3.2.9 Erzeugung von intelligenten Filmen 32

4. Ergebnisse 37
4.1 Modell eines Säuglingsschädels 37
4.1.1 Erzeugung der Wissensbasis 40
4.2 Intelligente Szenen 42

5. Anwendungen 47

6. Diskussion 51
6.1. Ausblick 52

7. Zusammenfassung 55

Literaturverzeichnis 57

Anhang A Abkürzungsverzeichnis 61

Anhang B Danksagung 63

Anhang C Lebenslauf 65

Anhang D EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG: 67

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Die Ultraschalluntersuchung des Kopfes gehört zu den wichtigsten Untersuchungsmethoden in der Kinderradiologie. Dazu hält der Untersucher eine Ultraschallsonde an den Kopf des Säuglings, als Aufsetzpunkte werden hierbei meist natürliche Öffnungen im knöchernen Säuglingsschädel verwendet, da der Schall hier am besten ins Schädelinnere dringen kann. Am häufigsten wird die Große Fontanelle verwendet. Dadurch, dass von einem festen Punkt aus untersucht wird, muss der Schallkopf um seine Achsen geschwenkt werden, um alle Bereiche des Schädelinneren mit dem Ultraschallfeld erreichen zu können. Dies führt dazu, dass die Schnittebene des resultierenden Ultraschallbildes häufig schräg im Raum liegt. Bei anderen Schnittbildverfahren wie z. B. bei der Computertomographie (CT) oder Magnetresonanztomographie (MRT) liegt die Bildebene dagegen auf einer vertikalen oder horizontalen Achse. Die Sonographie ist eine dynamische, in Echtzeit ablaufende Untersuchungsmethode, bei der der Untersucher die Ergebnisse direkt an einem Bildschirm abliest. Er kann zwar in begrenztem Maße einzelne Schnittbilder ausdrucken, doch dazu muss der Untersucher sinnvollerweise zuerst einen wichtigen Befund im weitläufigen Untersuchungsgebiet gefunden haben.
Den Unerfahrenen stellt die Durchführung der Ultraschalluntersuchung vor vielfache Probleme: Wo soll der Schallkopf aufgesetzt werden? Wo im Raum liegt die resultierende Schnittebene? Welche Strukturen werden auf dem Ultraschallbild dargestellt? Diese Fragen zu beantworten wird zusätzlich dadurch erschwert, dass das Ultraschallbild im Vergleich zu CT und MRT eine geringere Auflösung besitzt. Die Bildqualität wird außerdem durch Artefakte und Rauschen beeinträchtigt. Als weitere Erschwernis ist der medizinische Anatomieunterricht größtenteils auf die Erwachsenenanatomie ausgerichtet. Die Anatomie des Säuglings unterscheidet sich hiervon zum Teil erheblich.
Bisher ist der unerfahrene Untersucher auf Hilfsmittel wie Anatomieatlanten oder Multimediaprogramme angewiesen, die nur eingeschränkt beim Erlernen der Ultraschalluntersuchung behilflich sind, wie in Kapitel 2 näher dargestellt wird. Ein innovativer Weg ist daher notwendig, um die Möglichkeiten zum Erlernen der Ultraschalluntersuchung zu verbessern. Zum einen müsste eine Methode zur realistischen Simulation der Ultraschalluntersuchung gefunden werden. Außerdem sollte eine Möglichkeit gefunden werden, ein besseres Verständnis für die Anatomie des Säuglingskopfes zu vermitteln. Im folgenden Abschnitt wird noch einmal ausführlich auf die klinische sonographische Untersuchung mit ihren Vor- und Nachteilen eingegangen. Anschließend werden im Abschnitt Zielsetzung Kriterien entwickelt, die der in dieser Arbeit entwickelte Atlas erfüllen soll, um zur Lösung der Probleme beim Erlernen der Ultraschalluntersuchung beizutragen.

1.2 Die Ultraschalluntersuchung des Säuglings

In der pädiatrischen Radiologie ist die Sonographie (Ultraschalluntersuchung) bei vielen Untersuchungen die Methode der Wahl. Beim Neugeborenen werden z. B. das Hüftgelenk, die Organe des Bauches vor allem aber auch das Gehirn hinsichtlich Größe und Form der einzelnen Hirnteile untersucht [Hofmann et al. 1996]. So kann z. B. eine Abflussstörung des Liquors (Hirnwasser) durch vergrößerte Hirnkammern mit einer Ultraschalluntersuchung frühzeitig sichtbar gemacht und diagnostiziert werden [Dittrich et al. 2001]. Bevor das empfindliche Gehirn des Neugeborenen Folgeschäden erleidet, kann jetzt eine Therapie eingeleitet werden [Cedzich und Wießner 2003]. Zwar gibt es auch andere bildgebende Verfahren wie z. B. die Magnetresonanztomographie (MRT) und die Computertomographie (CT) [Schuster und Färber 1996]. Aus der Untersuchung des Kindes ist die Sonographie heutzutage aber nicht mehr wegzudenken. Dies ist auf unterschiedliche Faktoren zurückzuführen:

- Die Ultraschalluntersuchung nutzt Ultraschallwellen zur Bilderzeugung. Die Ultraschalluntersuchung gilt sowohl für den Patienten als auch für den Untersucher als gesundheitlich unbedenklich [ECMUS 2003]. Dagegen produzieren herkömmliche Röntgenaufnahmen sowie Computertomogramme (CT = Röntgenschnittbilder) ionisierende Röntgenstrahlen, die bei entsprechender Dosierung zu Zell- und Gewebeschäden führen können [Berrington und Darby 2004].
- Die Ultraschallbilder besitzen eine hohe diagnostische Aussagekraft.
- Die Ultraschalluntersuchung ist in Krankenhäusern überall und schnell verfügbar, da neueste Sonographiegeräte nur noch die Abmessungen eines Aktenkoffers besitzen. So kann eine dringende Untersuchung auch sehr kurzfristig am Krankenbett durchgeführt werden. CT– und MRT-Aufnahmen dagegen erfordern eine langwierige Vorbereitung des Patienten (z. B. Sedierung (Ruhigstellung mit Hilfe von Medikamenten) bei Kleinkindern, da der Patient über einen längeren Zeitraum allein im Untersuchungsgerät liegen muss). Auch eine Untersuchung am Krankenbett ist bei CT- und MRT-Untersuchungen nicht möglich.
- Die Sonographie ist ein relativ kostengünstiges Untersuchungsverfahren, während z. B. die Magnetresonanztomographie mit erheblichem Material -und Personalaufwand verbunden ist. Dieser Aufwand erfordert natürlich auch höhere Kosten.
- Die Ultraschalluntersuchung findet in Echtzeit statt. Wenn Besonderheiten im Untersuchungsgebiet auffallen, kann der Untersucher sofort reagieren und dieses Gebiet einer ausgedehnten Untersuchung unterziehen.

Auf der anderen Seite hat die Erfahrung gezeigt, dass insbesondere die Interpretation von Ultraschallbildern in der Pädiatrie schwierig ist und eine langjährige Erfahrung des Untersuchers voraussetzt. Dieser Umstand hat seine Ursache in folgenden Faktoren:

- Die Ultraschallbilder zeigen im Vergleich zu anderen radiologischen Untersuchungstechniken eine geringere räumliche Auflösung und mehr Bildartefakte, d.h. unerwünschte Darstellungsfehler wie z. B. Rauschen. Diese Bildartefakte erschweren die Interpretation von Ultraschallbildern. Abbildung 1.1 zeigt beispielhaft die Ultraschalluntersuchung des Gehirns eines Säuglings.
- Bei Luftüberlagerung des zu untersuchenden Bereiches kommt es teilweise zu vollständiger Schallreflexion, so dass eine sonographische Darstellung des zu untersuchenden Bereiches unmöglich gemacht wird.
- Die Ultraschallwellen können menschlichen Knochen nur in sehr begrenztem Umfang durchdringen, so dass eine Untersuchung z. B. des Gehirns durch den Schädelknochen kaum möglich ist.
- Der vorige Punkt macht es notwendig, zur Untersuchung des Gehirns bestimmte Zugangspunkte zum Aufsetzen der Ultraschallsonde wie z. B. die Große Fontanelle zu verwenden. Um nun einen möglichst großen Bereich zu untersuchen, muss der Schallkopf geschwenkt werden, was schräge Anschnitte des Untersuchungsgebietes zur Folge hat. Abbildung 1.2 zeigt einen schrägen Ultraschallschnitt ausgehend von der Großen Fontanelle.
- Die Interpretation von Ultraschalluntersuchungsbildern des Neugeborenen wird zusätzlich durch folgende Umstände erschwert: Die Anatomie des Kindes unterscheidet sich erheblich von der eines Erwachsenen, was eine spezielle Ausbildung in kindlicher Anatomie voraussetzt, wie auch Abbildung 1.3 verdeutlicht. Außerdem sind die Gehirnstrukturen eines Säuglings sehr viel feiner und kleiner als die eines Erwachsenen. Bei der im Vergleich zum Röntgenbild niedrigeren Auflösung des Ultraschallbildes kann es für den Untersucher schwierig sein, besonders feine Strukturen zu erkennen.

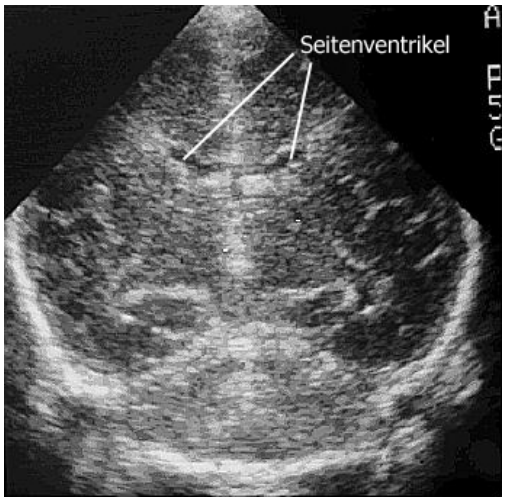


Abbildung 1.1: *Das Ultraschallbild zeigt einen Anschnitt der Seitenventrikel. Für den ungeübten Betrachter ist es schwierig, die dargestellte Organstruktur überhaupt zu erkennen. Außerdem ist für den Betrachter nicht ersichtlich, in welcher Ebene der Schallkopf angesetzt worden ist. Der erfahrene Untersucher erkennt, dass es sich um einen coronaren Schnitt ausgehend von der Großen Fontanelle handelt.*

Abbildung 1.2*: Dieses Ultraschallbild zeigt einen Schnitt, der von der Großen Fontanelle ausgehend schräg zum Hinterkopf geführt ist. Im Vergleich zu Abbildung 1.1 wird deutlich, dass insbesondere Bilder mit schräg im Raum liegender Schnittebene schwer zu interpretieren sind.*

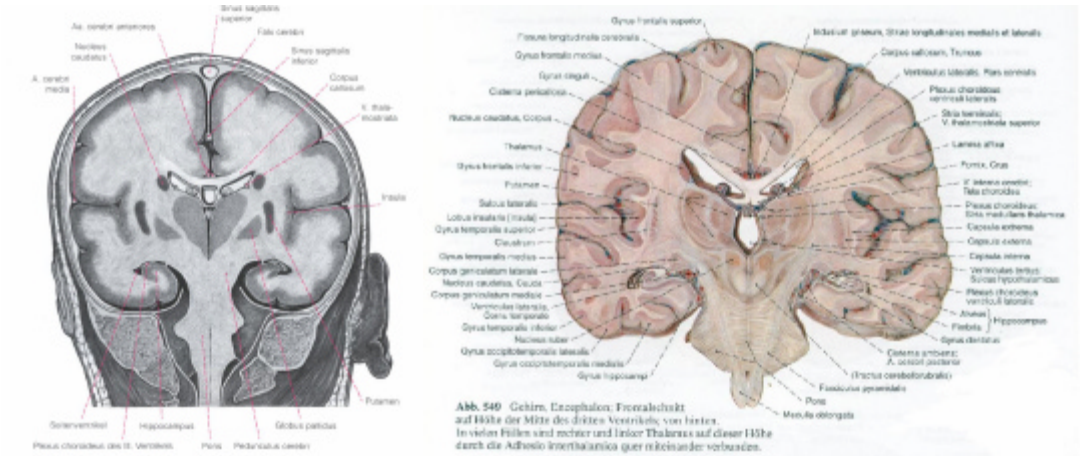


Abbildung 1.3: Wie aus dieser Gegenüberstellung ersichtlich wird, unterscheidet sich die Anatomie des Gehirns im Kindesalter (links, Zeichnung aus Richter und Lierse [1990]) erheblich von der Anatomie des Erwachsenen (rechts, Zeichnung aus Putz und Pabst [1993]). So sind z. B. die Gehirnwindungen und Gehirnfurchen beim Erwachsenen sehr viel prägnanter ausgebildet.

1.3 Zielsetzung

Da die Ultraschalluntersuchung wie oben beschrieben eine immens wichtige Untersuchungsmethode darstellt, insbesondere das Erlernen dieser Untersuchungsmethode den Anfänger aber auch vor vielfache Hürden stellt, ist es das Ziel dieser Arbeit, ein Modell zu erzeugen, welches beim Erlernen der Interpretation von Ultraschallschnittbildern hilft und folgende Merkmale besitzt:

- Die Anatomie eines Säuglingskopfes, insbesondere das Gehirn, wird dargestellt.
- Dieses Modell soll es ermöglichen, realistische Schnittbilder zu zeigen. Besonderer Wert wird auf die Darstellung von Bildern mit beliebig im Raum liegender Schnittführung gelegt.
- Die Bilderzeugung soll in Echtzeit erfolgen wie bei einer realen Ultraschalluntersuchung.
- Es soll sowohl die Möglichkeit bieten, Ultraschallschnittbilder mit MRT-Schnittbildern zu vergleichen, als auch ein dreidimensionales Modell eines Säuglingskopfes zu betrachten.
- Das Modell soll weiterhin auf Wunsch die abgebildeten Strukturen mit ihrer anatomischen Bezeichnung versehen. Diese Funktion ist besonders in der Ultraschalldiagnostik hilfreich, da Unerfahrene häufig Schwierigkeiten mit dem Erkennen der im Ultraschallbild dargestellten Organstrukturen haben.
- Bei der Darstellung von Ultraschallbildern sollen der Schallkopf sowie das von ihm ausgesendete Ultraschallfeld in einer dreidimensionalen Übersichtsdarstellung sowie natürlich auf den Schnittbildern dargestellt werden,

damit der Benutzer sehen kann, in welcher Position sich Schallkopf und Schallfeld am Untersuchungsobjekt befinden.

- Dieses Modell soll auf einem Standard-PC ohne teure Hardwareerweiterung lauffähig sein.

2. Stand der Forschung

Um die Anatomie eines Säuglingsschädels verstehen zu lernen, gibt es bis jetzt verschiedene Ansätze:

- Lehrbücher und Anatomieatlanten
- Elektronische Bücher in Form von Multimedia-Programmen
- Interaktive Anatomie-Lehrprogramme

Diese sollen im Folgenden betrachtet werden.

2.1 Lehrbücher und Anatomieatlanten

Es gibt zahlreiche Anatomieatlanten und Lehrbücher, die sich mit der Anatomie des Schädels auseinandersetzen. Zu nennen wären z. B. Putz und Pabst [1993] oder Netter [1996]. Es gibt auch Atlanten, die die Anatomie in Form von MR- oder CT-Schnittbildern darstellen (z. B. Romrell et al. [1996] oder Möller und Reif [1997]). Diese Bücher zeigen allerdings nur die Anatomie des Erwachsenen und gehen nicht auf die Anatomie des Kindes ein. Ein Atlas, der speziell auf die Anatomie des Kindes eingeht wird z. B. von Benz-Bohm [1997] präsentiert.
Pädiatrische Anatomieatlanten, die z. B. parasagittale oder schräge Schnittbilder zeigen, wie z. B. Richter und Lierse [1990] sind bisher leider äußerst selten und beschränken sich häufig auf bestimmte Aspekte der Anatomie des Kindes. In Abbildung 2.1 sieht man Ultraschallschnittbilder und anatomische Zeichnungen aus diesem Buch. Allen Büchern gemeinsam ist natürlich die statische Darstellung ihrer Inhalte. Die Bilder können immer nur beispielhafte Bilder der Gehirnanatomie oder wie der Atlas von Richter und Lierse [1990] Einzelbilder einer Unterschalluntersuchung zeigen. Dagegen werden bei einer realen Ultraschalluntersuchung ganze Bildersequenzen produziert. Gerade die dynamische Darstellung des Untersuchungsgebietes durch das Bewegen der Ultraschallsonde ist eine Besonderheit der Sonographie und für die Beurteilung der untersuchten Körperregion äußerst wertvoll. Die Darstellung von vollständigen Ultraschalluntersuchungssequenzen würde jedoch den Umfang eines gedruckten Anatomieatlanten sprengen.
Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Lehrbücher bei der Interpretation von Ultraschallbildern mit schräg im Raum liegenden Schnittebenen nur bedingt weiterhelfen.

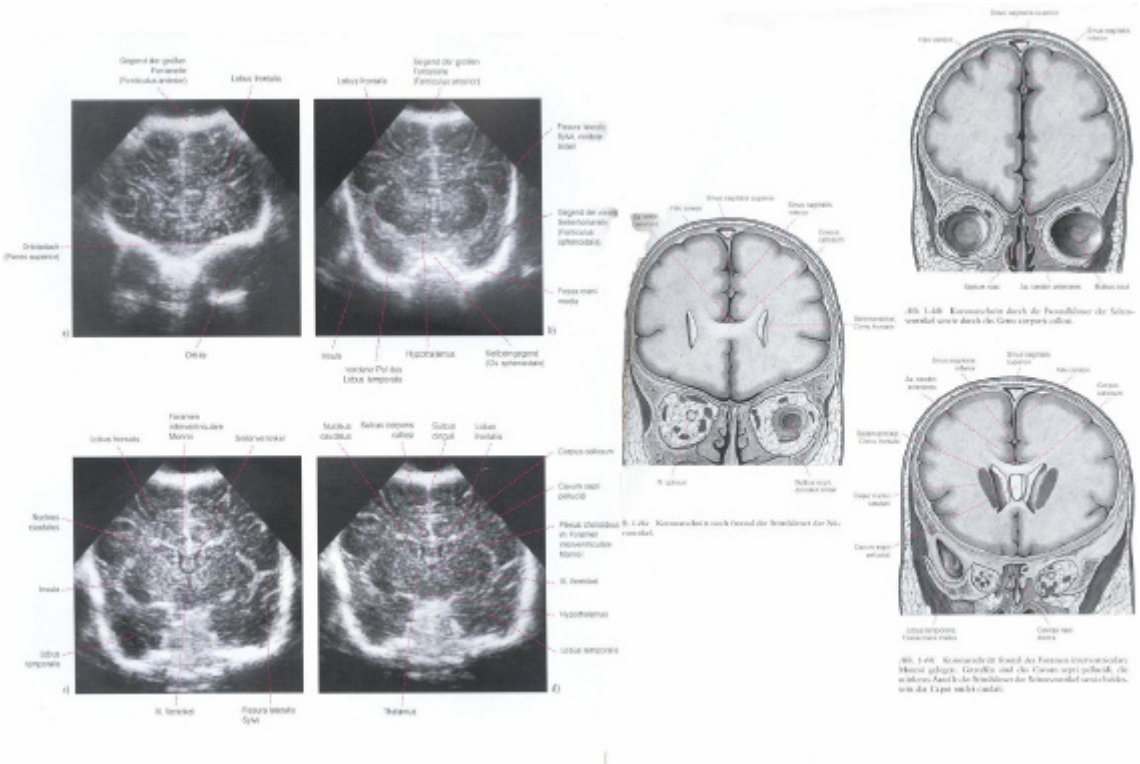


Abbildung 2.1: Diese Abbildung zeigt Ultraschallbilder (links) und anatomische Zeichnungen aus dem Buch von Richter und Lierse [1990]. Zu sehen sind coronare Schnitte ausgehend von der Großen Fontanelle, links Ultraschallschnittbilder, rechts die dazugehörigen anatomische Zeichnungen. Die Darstellung ist natürlich statisch und kann im Gegensatz zur echten Untersuchung nicht in den sechs Freiheitsgraden oben/unten, links/rechts und vorwärts/rückwärts weiterbewegt werden, um angrenzende Organstrukturen sichtbar zu machen und so das räumliche Verständnis der Organstrukturen zu vermitteln.

2.2 Digitale Bücher

Seit ungefähr einem Jahrzehnt wird eine zunehmend größer werdende Zahl von Multimedia CD-ROMs zur medizinischen Ausbildung veröffentlicht. Diese Programme folgen meist noch dem alten Grundsatz, dass eine Seite mit Text dargestellt wird, zu der dann begleitendes Bildmaterial präsentiert wird. Häufig sind diese Programme die digitale Ausgabe eines Buches, z. B. Putz und Pabst [1997], siehe Abbildung 2.1.1. Diese Bücher gehen kaum auf die Ultraschalluntersuchung ein. Die Darstellung von Schnittbildern erfolgt wie in den gedruckten Ausgaben entlang der Hauptachsen oben/unten, links/rechts und vorn/hinten. Damit helfen digitale Bücher beim Erlernen der Interpretation von Ultraschallbildern, insbesondere bei solchen mit schräg im Raum liegender Schnittachse, nur bedingt weiter.

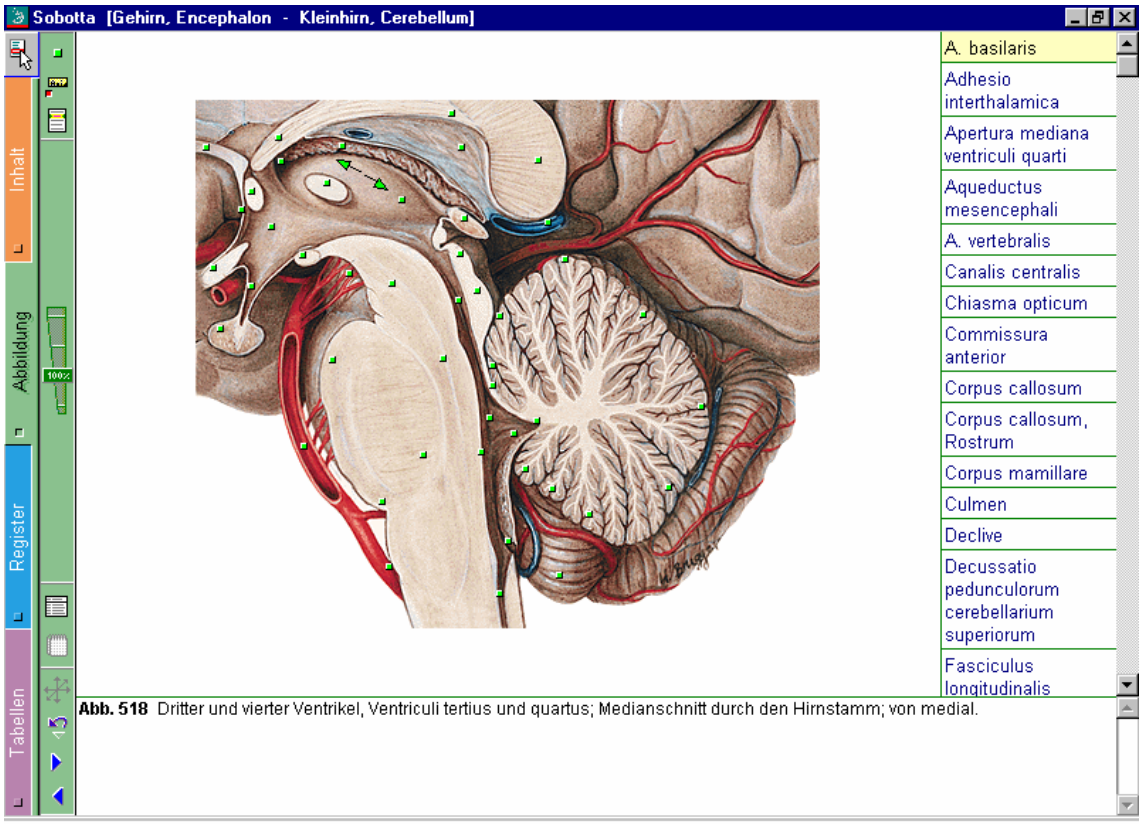


Abbildung 2.1.1: Diese Abbildung zeigt einen Screenshot aus Putz und Pabst [1997]. Dieses digitale Buch geht nicht auf die Ultraschalluntersuchung ein und zeigt die Anatomie des Erwachsenen. Die Schnittbilder sind entlang der vertikalen oder horizontalen Schnittachse ausgerichtet. Aus diesen Gründen können auch digitale Bücher nur bedingt zum Erlernen der Ultraschalluntersuchung beitragen.

2.3 Interaktive Programme

Die nächste Gruppe von Programmen erlaubt im Gegensatz zu elektronischen Büchern die Interaktion des Benutzers. Genannt sei etwa das Programm ’Neurotutor’ von Luft und Drews [1997]. Dieses Programm ist für den Anfänger leider schwer zugänglich. Abbildung 2.2 zeigt einen Screenshot aus dem Programm. Die Fülle an Informationen und die unübersichtliche Programmführung erschweren die intuitive Benutzung. Dargestellt wird die Anatomie des Erwachsenen, auf die Ultraschalluntersuchung geht das Programm nicht ein.

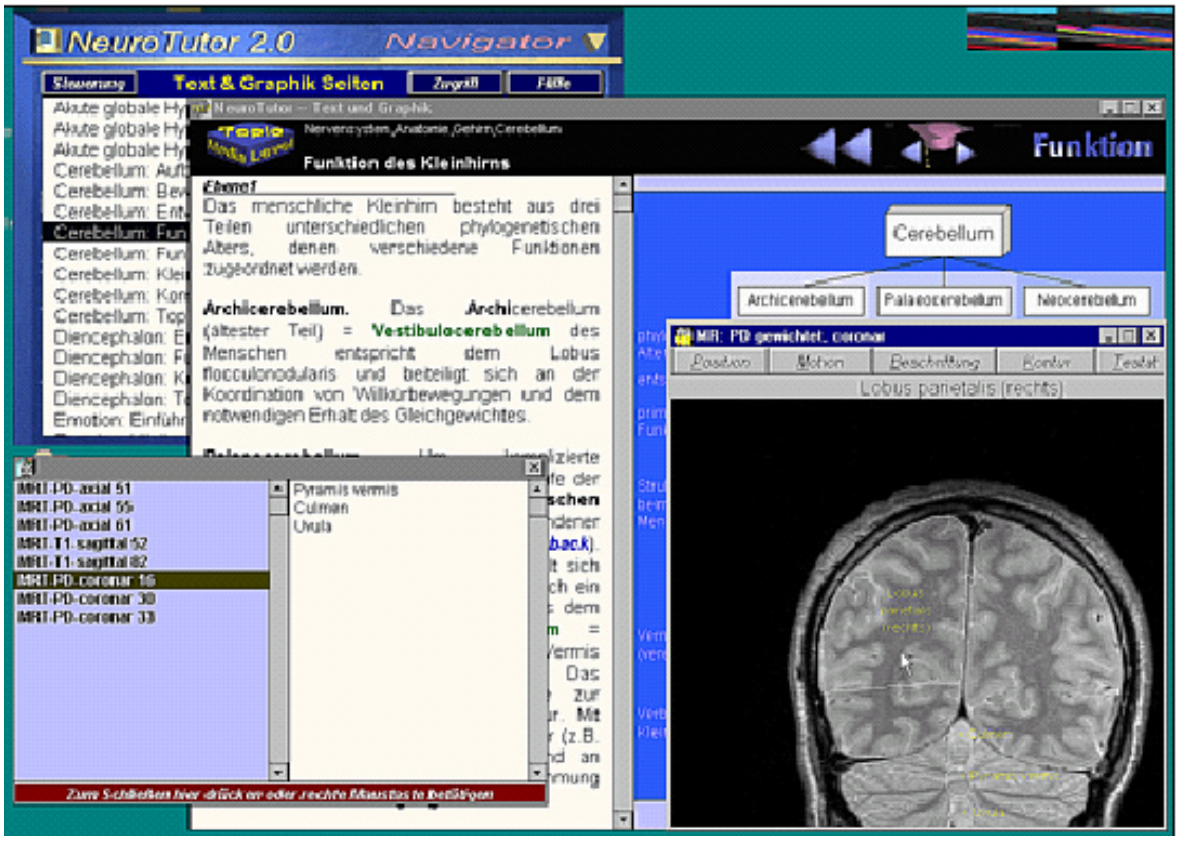


Abbildung 2.2: Screenshot aus dem Programm 'Neurotutor' von Luft und Drews [1997]. Die Programm-Oberfläche erfordert einige Einarbeitungszeit. Der Benutzer muss durch überlappende Fenster und eine sehr komplexe Menuführung navigieren.

Ein Beispiel für gute Anwenderführung mit kurzer Einarbeitungszeit ist das Programm von Banholzer [1996]. Es bietet interessante Interaktionsmöglichkeiten: Bewegt man die Maus auf eine Struktur im Bild, dann wird der zugehörige Name angezeigt. Andersherum wird die Struktur markiert, wenn die Maus auf den Namen zeigt. Dadurch ist eine gewisse Selbstabfrage möglich. Außerdem bietet das Programm schematische Zeichnungen, Legenden und Differentialdiagnosen (siehe Abbildung 2.3). Dieses Programm bietet auch eine Übersicht über die Ultraschalluntersuchung des Bauches beim Erwachsenen. Die Untersuchungsbilder können nicht in einer dynamischen Bildfolge dargestellt werden. Sie werden statisch dargestellt und sind einzeln auswählbar.

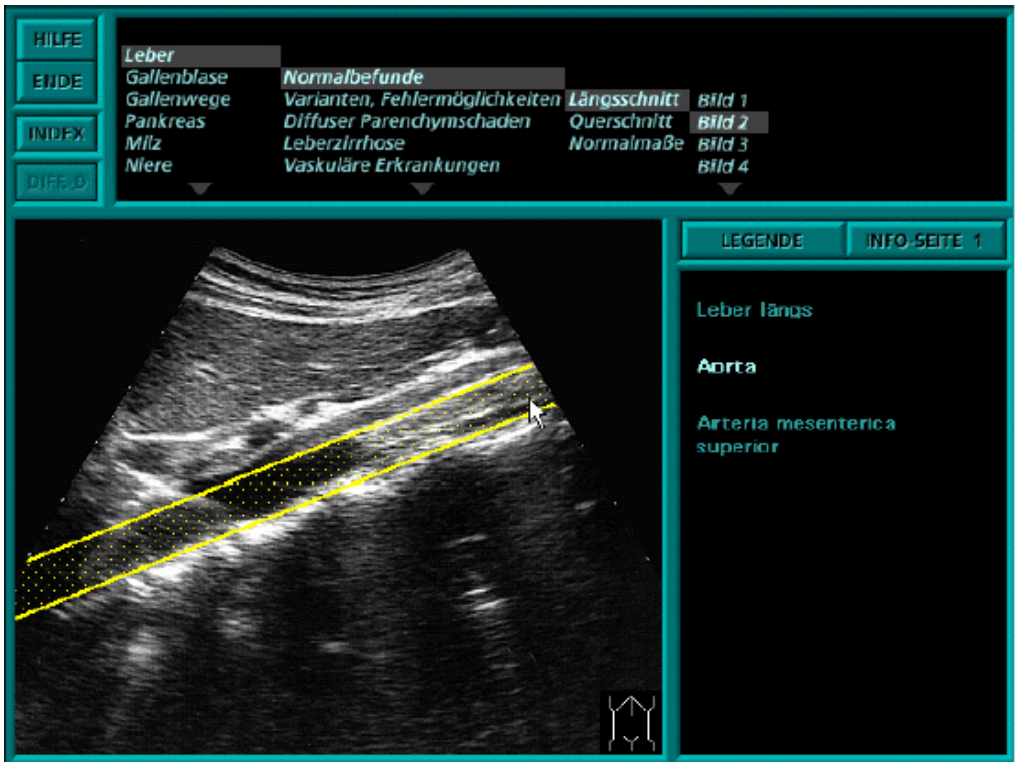


Abbildung 2.3: Bild aus dem Ultraschall-Lernprogramm von Banholzer [1996] mit interaktiver Markierung und Benennung der relevanten Strukturen auf dem Ultraschallbild. Hier ist ein sagittaler Längsschnitt durch die Leber dargestellt. Unten rechts im Bild zeigt eine stilisierte Schemazeichnung die Lage und Haltung des Schallkopfes (der Schallkopf wird frontal auf den Oberbauch aufgesetzt), um diese Schnittansicht zu erzeugen.

Einen anderen Ansatz hat das Programm ’Pädiatrische Ultraschalldiagnostik, 3DSonographie’ von Leidig und Grunert [1998] (siehe Abbildung 2.4). Hier wird die Programmoberfläche der 3D-Ultraschallgeräte der Firma Kretz benutzt, um die mitgelieferten 3D-Ultraschall-Datensätze interaktiv explorieren zu können. Letztendlich ist es jedoch nur ein Trainingsprogramm für die 3D-Ultraschallgeräte dieser Firma. Es ist nicht möglich, die sonographische Anatomie des Säuglings oder des Kleinkindes mit diesem Programm wirklich zu erlernen. Es fehlen Erläuterungen und Abfragemöglichkeiten.

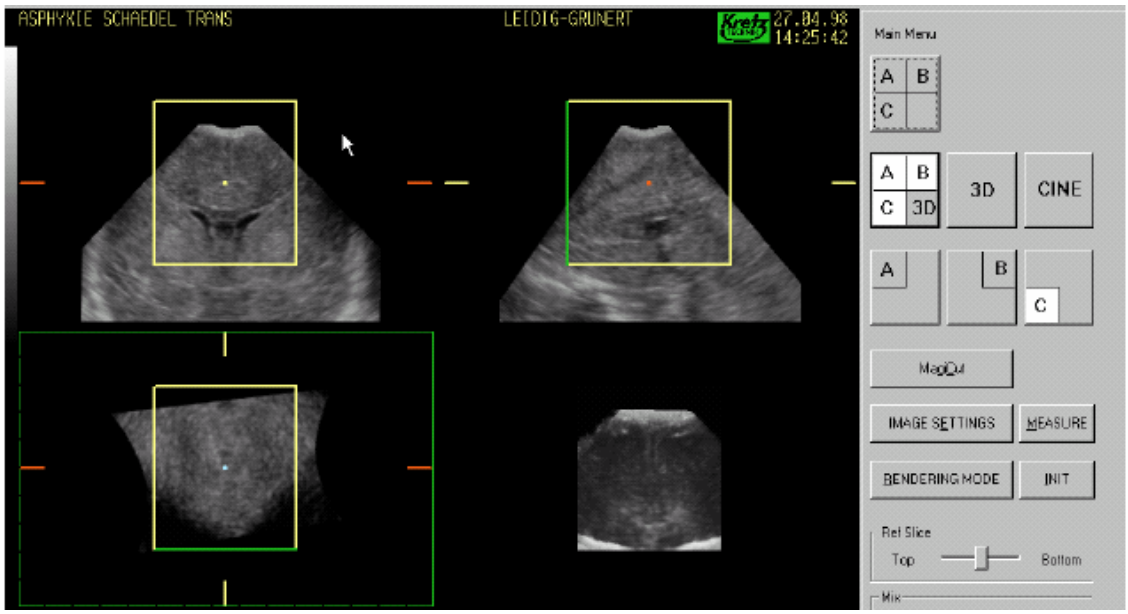


Abbildung 2.4: *Interaktive Programmoberfläche 'Pädiatrische Ultraschalldiagnostik, 3DSonographie' von Leidig und Grunert [1998]. Schallkopflage und -position werden nicht angezeigt.*

Die räumliches Vorstellung der Anatomie kann gut vermittelt werden, wenn am Computer erzeugte dreidimensionale Modelle verwendet werden. Ein Beispiel wäre das Programm 'Interbrain' [Hirsch, 1998] (siehe Abbildung 2.5), welches mit grafisch hochqualitativen anatomischen Modellen einen realitätsnahen Einblick in das Gehirn gewährt. Es basiert allerdings wie die meisten Modelle auf der Darstellung des Gehirns von Erwachsenen.

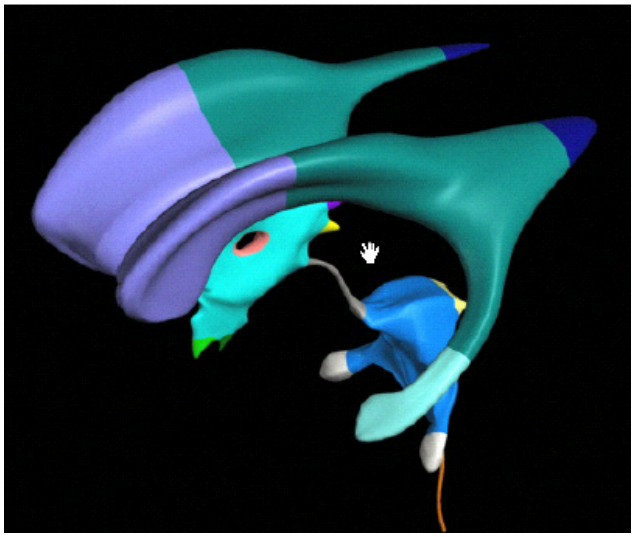


Abbildung 2.5: *Bild aus dem Programm 'Interbrain' [Hirsch, 1998]. 3D-Darstellung des Ventrikelsystems des Großhirns mit verschiedenfarbiger Markierung der einzelnen Ventrikel-Teilregionen. Das Ventrikelsystem liegt als 3D-Modell vor und kann interaktiv beliebig gedreht und betrachtet werden.*

Ein weiteres Beispiel für ein interaktives Lehrprogramm ist der ’Neurotrainer’ von 3B Scientific [2002]. Dieses Modell behandelt die einzelnen Teile des Gehirns in unterschiedlichen Abschnitten. Für jeden Abschnitt sind mehrere vorberechnete Ansichten des Modells verfügbar. Leider wird wieder nur das Erwachsenengehirn in diesem Programm dargestellt. Auch Ultraschallbilder fehlen (siehe Abbildung 2.6).

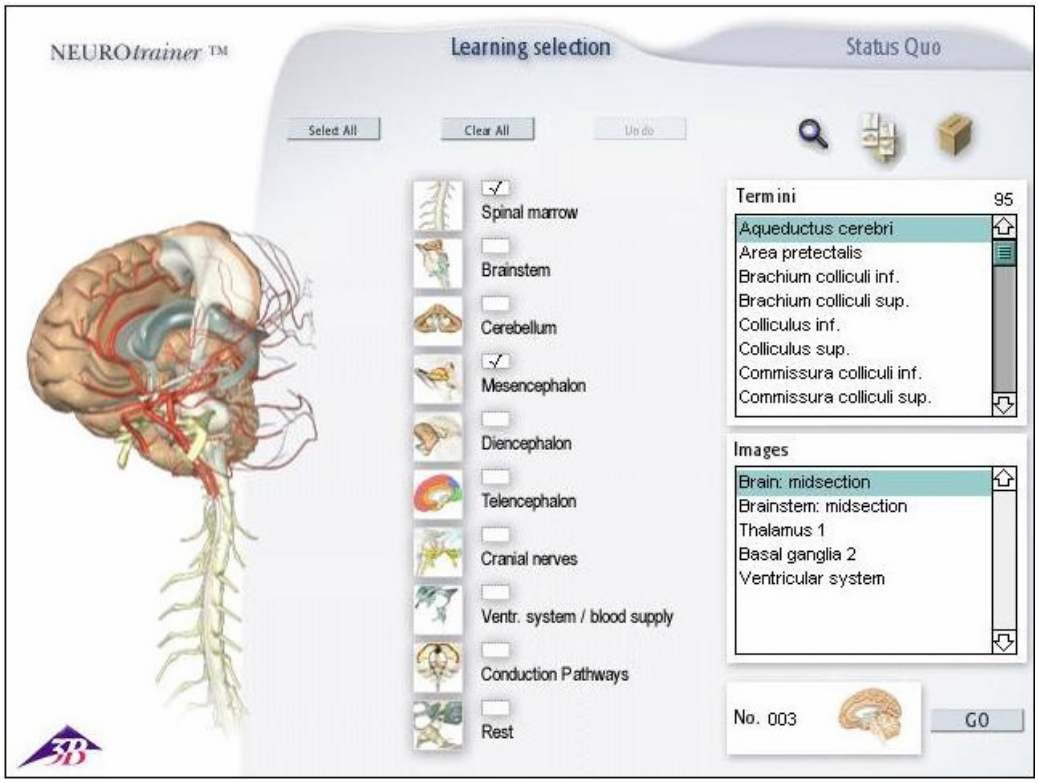


Abbildung 2.6: *Bild aus dem Lernprogramm ’Neurotrainer’ [3B Scientific, 2002]. Dieses Lernprogramm stellt das Gehirn des Erwachsenen in mehreren Abschnitten dar. Zu jedem Abschnitt des Programms gibt es mehrere vorberechnete Ansichten.*

Das Institut für Medizinische Informatik (IMI) in Hamburg bietet zu Lehrzwecken detaillierte dreidimensionale Modelle an, die die Anatomie im natürlichen Kontext darstellen. Dazu gehören Modelle des Schädels [Höhne et al., 2001], der Inneren Organe [Höhne et al., 2003] oder Modelle der Neugeborenenanatomie und -Pathologie [Richter et al., 1994].
Eine auf einem Modell basierende Simulation einer Ultraschalluntersuchung wurde zuerst von Kim et al. [1999] präsentiert. Jenes Modell nutzt allerdings einen Erwachsenenschädel als Referenz. Der Datensatz in diesem Modell ist nicht segmentiert, d.h. die dargestellten Strukturen sind nicht gegeneinander abgegrenzt. Es sind außerdem keine Informationen zu den dargestellten Strukturen abrufbar. Der Nutzer ist weiterhin auf Hilfsmittel wie z. B. Anatomieatlanten angewiesen, um die dargestellten Organstrukturen bezeichnen zu können.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die bisher verfügbaren Anatomieatlanten und Lehrbücher, die digitalen Bücher und die interaktiven Computerprogramme beim

Erlernen der Ultraschalluntersuchung des Säuglings nur in begrenztem Umfang hilfreich sind. Ein System, mit dem die Ultraschalluntersuchung dynamisch und in bewegten Bildern gezeigt wird und in dem alle Strukturen mit Namensbezeichnungen abfragbar sind, bietet bisher keines der hier vorgestellten Programme und Bücher.

3. Materialien und Methoden

Wie schon einleitend dargelegt, ist es das Ziel dieser Arbeit, ein Modell zu erstellen, welches beim Erlernen der Beurteilung von Ultraschallschnittbildern des Säuglingsgehirns hilft. Es soll ein dreidimensionales Modell des Säuglingsgehirns betrachtet werden können, um so ein besseres Verständnis für die räumliche Lage der Organe zu vermitteln. Außerdem sollen frei wählbare Ultraschall-Schnittbilder des Säuglingsschädels dargestellt werden können. Der Benutzer soll durch diese Schnittbilder mit der Hilfe eines virtuellen Schallkopfes navigieren können. In allen Schnittbildern und in einer Übersichtsdarstellung soll der Schallkopf mit Informationen zu seiner Lage und Position am untersuchten Schädel in Abhängigkeit zu dem gezeigten Schnittbild dargestellt werden. Es soll jederzeit möglich sein, die in den Schnittbildaufnahmen dargestellten Organstrukturen abzufragen.
Gegenüber bisherigen Arbeiten erfordert dies die komplette Segmentation eines Säuglingskopfes. Dazu wurden MRT-Datensätze als Grundlage des erstellten Modells ausgewählt, da sie im Gegensatz zu Ultraschallaufnahmen eine höhere Auflösung besitzen und somit eine Darstellungsqualität erreichen, die teilweise schon recht nah an anatomische Schnitte heranreicht. Dieser MRT-Datensatz muss segmentiert werden, das heißt die einzelnen Organe, die vor der Segmentation einen zusammenhängenden, nicht näher definierten Datenblock bestehend aus verschieden Grauwertstufen gebildet haben, müssen voneinander abgegrenzt werden und mit ihren anatomischen Bezeichnungen versehen werden. Der MRT-Datensatz muss daraufhin mit einem Ultraschall-Volumendatensatz zusammengeführt werden. Die Informationen bezüglich Organgrenzen und Organbezeichnungen sind dann auch im Ultraschalldatensatz abrufbar. Aus den Volumendatensätzen können sowohl Schnittbilder als auch dreidimensionale Bilder berechnet werden. Mehrere dieser berechneten Bilder können daraufhin zu einer Sequenz zusammengefügt werden. So kann man z. B. Einzelbilder berechnen, die für eine coronare Ultraschalluntersuchung durch die Große Fontanelle repräsentativ sind. Wenn die Einzelbilder wie bei einem Trickfilm in der richtigen Reihenfolge schnell hintereinander abgespielt werden, ergibt sich ein virtueller Schwenk mit dem Ultraschallkopf. Diese Animationen und die dazugehörigen Informationen bezüglich der darin dargestellten Strukturen müssen in ein Modell eingebunden werden, welches die interaktive Steuerung der Sequenzen und die Abfrage der dargestellten Strukturen ermöglicht.

3.1 Materialien

Folgende Tabelle gibt einen Überblick über die in dieser Arbeit verwendeten Datensätze. Die Abbildungen 3.1.1, 3.1.2 und 3.1.3 zeigen Beispielbilder aus den Datensätzen:

Eigenschaften der verwendeten Patientendatensätze		
Patient 1 – kein pathologischer Befund		**Patient 2 – kein pathologischer Befund**
MRT-Datensatz einer Kopfuntersuchung bei einem Säugling nativ (siehe Abbildung 3.1.1): • Matrix 256x256x192 Pixel • Voxelgröße 0,78 mm • Gap 0 mm	MRT-Datensatz einer Kopfuntersuchung bei einem Säugling mit Kontrastmittel (siehe Abbildung 3.1.2): • Matrix 256x256x192 Pixel • Voxelgröße 0,78 mm • Gap 0 mm	Ultraschalldatensatz einer Kopfuntersuchung bei einem Säugling (siehe Abbildung 3.1.3): • Sektor-Schallkopfkopf 5 MHz

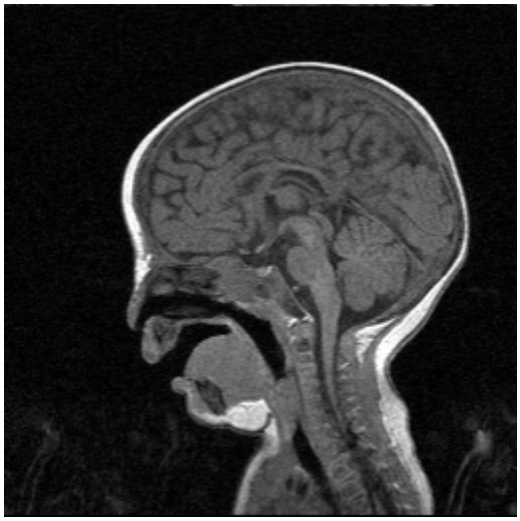


Abbildung 3.1.1: *Schnittbild aus dem in dieser Arbeit verwendeten MRT-Datensatz einer Kopfuntersuchung bei einem Säugling ohne Kontrastmittel.*

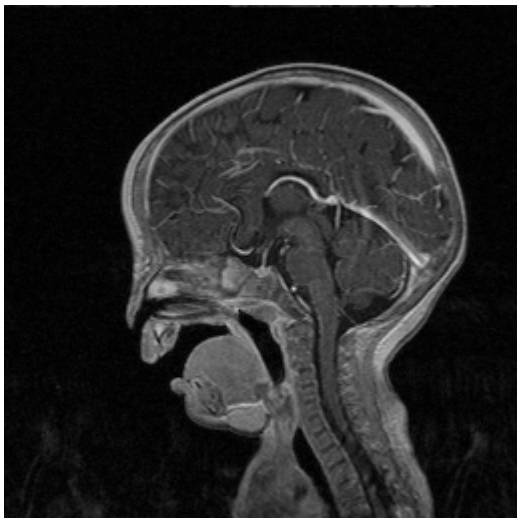


Abbildung 3.1.2: *Schnittbild aus dem in dieser Arbeit verwendeten MRT-Datensatz einer Kopfuntersuchung bei einem Säugling mit Kontrastmittel. Durch die Verwendung von Kontrastmittel wird die Sichtbarkeit der Blutgefäßen erhöht.*

Abbildung 3.1.3: *Schnittbild aus dem in dieser Arbeit verwendeten Ultraschalldatensatz einer Kopfuntersuchung bei einem Säugling*

3.1.1 MRT-Datensätze

Das dreidimensionale Modell basiert auf zwei MRT Datensätzen, die mit einem Siemens Vision-MRT aufgenommen worden sind. Die benutzten Datensätze sind im Pädiatrischen Zentrum in Stuttgart unter der Leitung von Prof. Dr. Winkler (Ärztlicher Direktor des Radiologischen Institutes, Pädiatrisches Zentrum) erstellt worden. Es handelt sich hierbei um den Kopf eines Jungen mit der Fragestellung: Ausschluss intrakranieller Veränderungen bei allgemeiner Entwicklungsverzögerung. Die MRT-Aufnahmen wurden unter Narkose erstellt um zu gewährleisten, dass die Sequenzen nicht zu stark bewegungsüberlagert und somit ausreichend zu beurteilen sind. Die MRT-Untersuchung zeigt keine pathologischen Befunde.

Beide Datensätze sind T1 gewichtet, d.h. dass auf einem MRT-Schnittbild Flüssigkeiten wie z. B. Liquor (Gehirnwasser) dunkel dargestellt wird, während fettreiches Hirngewebe heller ist. Der erste Datensatz zeigt eine Nativaufnahme, das heißt es wurde kein Kontrastmittel eingesetzt.

Für den zweiten Datensatz wurde zusätzlich Gadolinium als Kontrastmittel eingesetzt. Das flüssige Kontrastmittel wird dem Säugling über eine Vene injiziert und verteilt sich bis in die kleinsten Blutgefäße. Nach kurzer Zeit hat sich das Kontrastmittel in allen Blutgefäßen verteilt. Im MRT-Untersuchungsgerät löst das Kontrastmittel ein hohes Signal aus, so dass auch sehr feine Gefäße noch dargestellt werden können. Beide Datensätze besitzen eine Auflösung von 256x256x192 Voxeln und haben eine Voxelgröße von 0,78 mm. Voxel ist ein Kunstwort abgeleitet von engl. = Volume Element (Volumenelement). Ein Voxel ist das dreidimensionale Äquivalent zu einem Pixel.

3.2 Methoden

Um nun ausgehend von den Patientendatensätzen ein Modell zu erhalten, das die Anatomie im Säuglingsalter realitätsnah darstellt und auch eine Ultraschallsimulation erlaubt, sind folgende Schritte notwendig:

1. **Erzeugung des MRT-Volumendatensatzes:** Erzeugung eines 3D-Volumens aus einer Folge von MRT-Schnittbildern.
2. **Erzeugung des Ultraschall-Volumendatensatzes:** Erzeugung eines 3D-Volumens (Pyramidenstumpf) aus einer Folge von Ultraschall-Schnittbildern.
3. **Registrierung:** MRT- und Ultraschalldatensatz werden aufeinander abgeglichen (‚Matching'), damit gleiche Organstrukturen in den unterschiedlichen Datensätzen an den gleichen Positionen zu finden sind.
4. **Segmentation:** Das 3D-Volumen wird in seine anatomischen Bestandteile zerlegt.
5. **Volumen-Modellierung:** Nicht segmentierbare Strukturen werden künstlich geformt und in das 3D-Volumen integriert.
6. **3D-Visualisierung:** Die segmentierten und modellierten Strukturen werden perspektivisch dargestellt.
7. **Intelligente Volumen:** Das 3D-Volumen wird über eine Wissensdatenbank (‚Knowledge-Base') mit Informationen zu den abgebildeten Organen verknüpft.
8. **Auswahl der bildlichen Darstellung:** Der Ausgangspunkt für die spätere Berechnung eines simulierten Ultraschallschwenkes bzw. dreidimensionalen Filmes wird bestimmt.
9. **Erzeugung von intelligenten Filmen:** Interaktive Filmsequenzen werden von dem in **8.** erzeugten Ausgangspunkt erzeugt.

Diese Verarbeitungsschritte werden im Folgenden näher erläutert.

3.2.1 Erzeugung des MRT-Volumendatensatzes

Zur Erzeugung eines dreidimensionalen Modells muss als erstes ein geeignetes Volumen erstellt werden. Grundlage für die Volumen-Datensätze ist fast immer ein Satz aus zweidimensionalen Einzelbildern, wie sie z. B. bei den Schnittbildverfahren CT oder MRT in der radiologischen Diagnostik gewonnen werden.
Die Einzelbilder besitzen jeweils eine bei der Aufnahme definierte Schichtdicke (z. B. 1 Millimeter), so dass das gesamte Untersuchungsgebiet lückenlos aufgenommen wird. Um ein Untersuchungsgebiet von 1 Millimeter Breite auf einem flachen Bild darstellen zu können, wird für alle Pixel, die in diesem Millimeter jeweils übereinander liegen, ein durchschnittlicher Grauwert gemessen. Diese gemittelten Pixel werden dann auf den Einzelbildern dargestellt. Die Einzelbilder werden aufeinandergestapelt, die

Schichtdicken der Einzelbilder werden addiert und so zu einem 3D-Volumen geschichtet (siehe Abbildung 3.2.1).

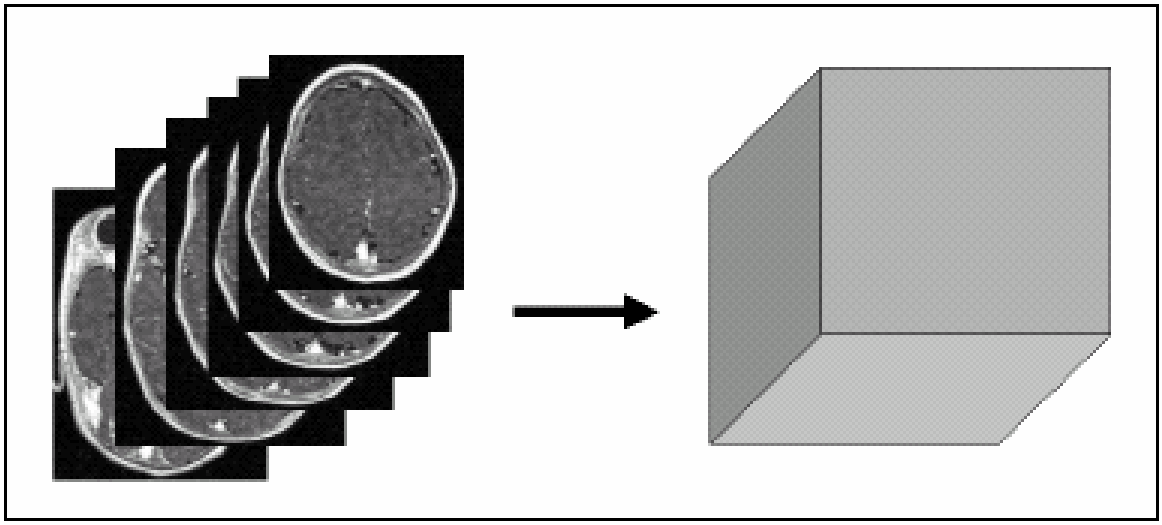


Abbildung 3.2.1: *Die zweidimensionalen Aufnahmen (hier MRT-Schichten) werden aufeinandergeschichtet und bilden somit einen Volumenblock, der als 3D-Volumen weiterbearbeitet werden kann.*

3.2.2 Erzeugung des Ultraschall-Volumendatensatzes

Vor ein paar Jahren war es noch nicht denkbar, einen Volumendatensatz aus Ultraschalldaten zu erhalten. Die rasante Entwicklung auf dem Gebiet der medizinischen digitalen Bildverarbeitung hat auch in diesem Teilbereich zu vielen neuen Entwicklungen geführt. Eine davon ist die Möglichkeit, aus vielen Einzelschichtaufnahmen einer Ultraschalluntersuchung einen 3D-Volumendatensatz zu berechnen. Dafür ist eine genaue Orts- und Richtungslokalisation des Schallkopfes (Tracking) während der Aufnahme der Einzelschichten notwendig. Eine Lösung dieses Problems stellten anfangs unhandliche Schallkopfaufsätze dar, die mit dem Schallkopf einen vordefinierten Schwenk mittels Elektromotoren vollzogen. Diese Methode konnte sich aber aufgrund der großen unhandlichen Aufsätze nicht durchsetzen. Später wurden dann kleine elektrische Schrittmotoren direkt in die Schallköpfe eingebaut. Diese Schallköpfe bezeichnete man als 3D-Schallköpfe (z. B. im Ultraschallgerät ’Dornier AI-3200’) [Umgelter, 1997]. So konnten die Einzelschichten bestimmten Positionen des Schallkopfes während einer Ultraschalluntersuchung zugeordnet werden.
Heutzutage hat sich eine neue Methode etabliert, um die genaue Raum- und Ortposition des Schallkopfes zu jedem Zeitpunkt zu ermitteln. Dabei wird ein lokales Magnetfeld erzeugt und mit Hilfe eines kleinen Magnetfeldsensor-Aufsatzes auf dem Schallkopf die Änderungen der Magnetfeldlinien gemessen. Dieses System ist weitaus handlicher und genauer und hat überdies den großen Vorteil, dass es nicht geräteabhängig ist. Es kann im Prinzip mit jedem Ultraschallgerät und vor allem mit jedem Transducer (Schallkopf) verknüpft werden. Auf Abbildung 3.2.2 erkennt man das Tracking-System der Firma

’3D-Echotec’. Der Quader links erzeugt das Magnetfeld, rechts sind drei Magnetfeld-Sensoren abgebildet.

Abbildung 3.2.2: *Tracking-System der Firma ’3D-Echotec’. Der Quader links im Bild ist der Magnetfelderzeuger. In der Mitte ist ein länglicher Schallkopf dargestellt, der z. B. bei gynäkologischen Untersuchungen angewandt wird. An dessen Stiel aufgesetzt erkennt man einen kleinen Magnetfeld-Sensor. Rechts daneben sind noch zwei weitere, etwas größere Magnetfeld-Sensoren abgebildet.*

Allen Systemen gemeinsam ist die Notwendigkeit einer Orthogonalisierung (Umwandlung in ein kartesisches Koordinatensystem) der fächerförmig auseinanderweichenden schrägen Schnittbilder, da für die Erzeugung eines Volumenblocks normalerweise orthogonal liegende Einzelschichten verwendet werden. In Abbildung 3.2.3 ist die Orthogonalisierung schematisch dargestellt. Der abgetastete Volumenkörper entspricht theoretisch einem Pyramidenstumpf mit gewölbtem Boden, wie die spätere Visualisierung im VOXEL-MAN bestätigt (Siehe Abbildung 3.2.4).

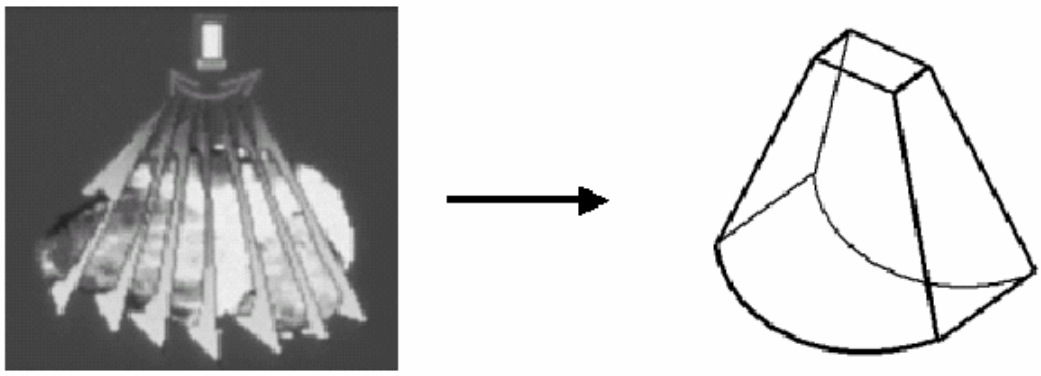


Abbildung 3.2.3: *Orthogonalisierung der Einzelschichten: Die fächerförmig angeordneten Schichten aus einer Schallkopfbewegung werden zu einem 3D-Volumenblock umgeformt. Im Falle eines Sektorschallkopfes erhält man damit einen Pyramidenstumpf mit gewölbtem Boden.*

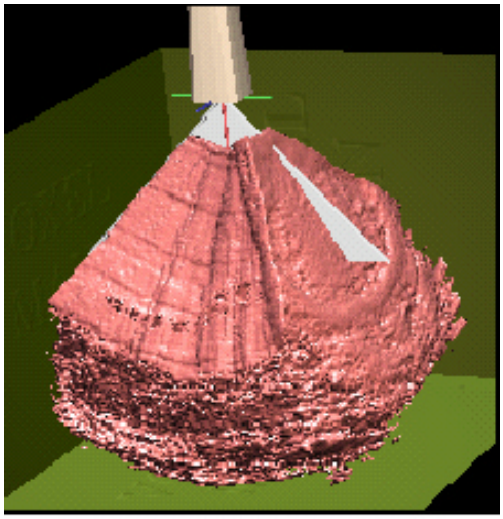


Abbildung 3.2.4: *Visualisierung eines 3D-Sono-Datensatzes im VOXEL-MAN. Der gewonnene Pyramidenstumpf lässt sich z. B. mit dem Ultraschall-Werkzeug bearbeiten. Hiermit können beliebige schräge 2D-Ansichten erzeugt werden.*

Für die Gewinnung der Ultraschall-Datensätze und deren Aufbereitung zu einem 3D-Volumen wurde das Bildbearbeitungs-System der Firma ’3D-Echotec’ und ein Ultraschallgerät der Firma ’Acuson’, Modell ’Sequoia’, verwendet. Die Sonographie des Säuglingsgehirns erfolgte mit einem Sektorschallkopf mit einer Schallfrequenz von 5 MHz. Bei dem Säugling handelte es sich um eine Routineuntersuchung mit der Frage nach intracraniellen morphologischen Veränderungen bei unklarer Muskel-Hypotonie und Dystrophie bei einem reifen Neugeborenen. Es wurden keine pathologischen Gehirnveränderungen festgestellt.
Der MRT- und der Ultraschalldatensatz stammen von unterschiedlichen Patienten. Es handelt sich um Patientendatensätze, leider sind an den jeweiligen Patienten im Rahmen der klinischen Untersuchungen jeweils nur MRT- bzw. Ultraschalldatensatz aufgenommen worden. Es wäre wünschenswert gewesen, die unterschiedlichen

Datensätze an einem Patienten gewinnen zu können. Im Rahmen dieser Arbeit war dies leider nicht möglich.
Der Ultraschalldatensatz ist mit dem MRT-Datensatz hinsichtlich Übereinstimmung in Größe und Anatomie der untersuchten Regionen von Professor Richter am Institut für Kinderradiologie des Universitätskrankenhauses Eppendorf überprüft worden.

3.2.3 Registrierung

Eine Segmentation auf der Basis von Schwellenwerten - wie im MRT-Datensatz möglich- lässt sich im Ultraschalldatensatz nicht durchführen. Die Strukturen auf heutigen Ultraschallaufnahmen sind durch Bildartefakte und der im Vergleich zu MRT-Aufnahmen niedrigen Auflösung nicht ausreichend gegeneinander abgrenzbar. Daher wäre eine aufwendige Segmentation der einzelnen Strukturen von Hand notwendig. Dabei müssten in jeder Einzelschicht des Ultraschalldatensatzes die entsprechenden Strukturen wie in einem Zeichenprogramm gemalt werden. Da es wünschenswert ist, die wichtigen Strukturen auch im Ultraschallschnittbild hervorheben und mit einem anatomischen Namen versehen zu können, muss ein Umweg über den schon segmentierten MRT-Datensatz gemacht werden. Man stelle sich vor, dass die in den Datensätzen enthaltenen Strukturen exakt in Größe und Lage übereinstimmen. Wenn nun ein Objekt im Ultraschallbild angeklickt wird, kann sein Umriss und seine Bezeichnung aus dem MRT-Datensatz übernommen werden. Die Segmentation des MRT-Datensatzes wird praktisch auf den Ultraschalldatensatz übertragen.
An diesem Punkt ist eine Registrierung notwendig, also die Anpassung der Datensätze hinsichtlich Maßstab und Lage. Zwei unterschiedliche Datensätze weisen leider nie eine vollkommene Übereinstimmung hinsichtlich Größe und Lage der in ihnen enthaltenen Strukturen auf. Die Datensätze müssen daher mit Hilfe mathematischer Verfahren in größtmögliche Übereinstimmung gebracht werden. Hierzu wurden in den jeweiligen Datensätzen von Hand unter freundlicher Hilfe von Professor Ernst Richter vom Institut für Kinderradiologie der Universität Eppendorf medizinisch sinnvolle Referenzschnittbildaufnahmen bestimmt. Diese Schichten heißen deshalb Referenzschichten, da sie jeweils eine Schicht aus dem MRT- und Ultraschalldatensatz repräsentieren, die übereinander gelegt möglichst genau die gleichen anatomischen Strukturen im gleichen Schnittwinkel darstellen. In diesen Referenzschichten wurden dann anhand der anatomischen Strukturen Referenzpunkte bestimmt. Die Referenzpunkte werden für an mehreren Orten in jedem Datensatz bestimmt. Dem Computer werden nun die Referenzpunkte im MRT-Datensatz als Vorlage gegeben. Wenn die Referenzpunkte im Ultraschalldatensatz an anderen Koordinaten liegen als im MRT-Datensatz, kann der Ultraschalldatensatz vom Computer gestreckt bzw. gestaucht werden, bis die Referenzpunkte an den jeweils gleichen anatomischen Strukturen exakt übereinander liegen. Das Ergebnis sind zwei Datensätze, deren unterschiedliche Bildmodalitäten theoretisch zueinander deckungsgleich sind. In der Praxis ist eine vollständige Übereinstimmung der Datensätze nicht zu erreichen. Die Qualität der Registrierung hängt in großem Masse davon ab, inwieweit die Datensätze vor der

Registrierung miteinander korrelieren: Je größer die Korrelation, desto besser das Ergebnis der Registrierung. Wichtig ist natürlich auch die Auswahl der Referenzschichten und Referenzpunkte, auch hier gilt: Je mehr die ausgewählten Referenzpunkte anatomisch miteinander übereinstimmen, desto besser das Ergebnis der Registrierung. Einschränkender Faktor bei der Registrierung der Datensätze in dieser Arbeit ist der Umstand, dass Ultraschall- und MRT-Datensätze von unterschiedlichen Patienten stammen und sich die Anatomie der beiden untersuchten Patienten im Rahmen der natürlichen Variabilität der menschlichen Anatomie voneinander unterscheiden. Für die Erstellung eines Trainingsmodells ist die Korrelation der Datensätze jedoch zufriedenstellend.

3.2.4 Segmentation

Das MRT-Datenvolumen wurde in dieser Arbeit hinsichtlich der Hauptstrukturen interaktiv segmentiert unter besonderer Berücksichtigung solcher Strukturen, die bei einer Ultraschalluntersuchung als Leitstrukturen für den Untersucher dienen. Technisch gesprochen heißt dies, dass jedem Volumenelement eine Objektkennung zugeordnet wird, die spezifisch für ein Organ ist. Um durch die Segmentation die einzelnen Strukturen voneinander abgrenzen zu können, wurde das Segmentationsmodul der VOXEL-MAN Visualisierungs-Software verwendet. Abbildung 3.2.5 zeigt die Benutzeroberfläche des Programms.

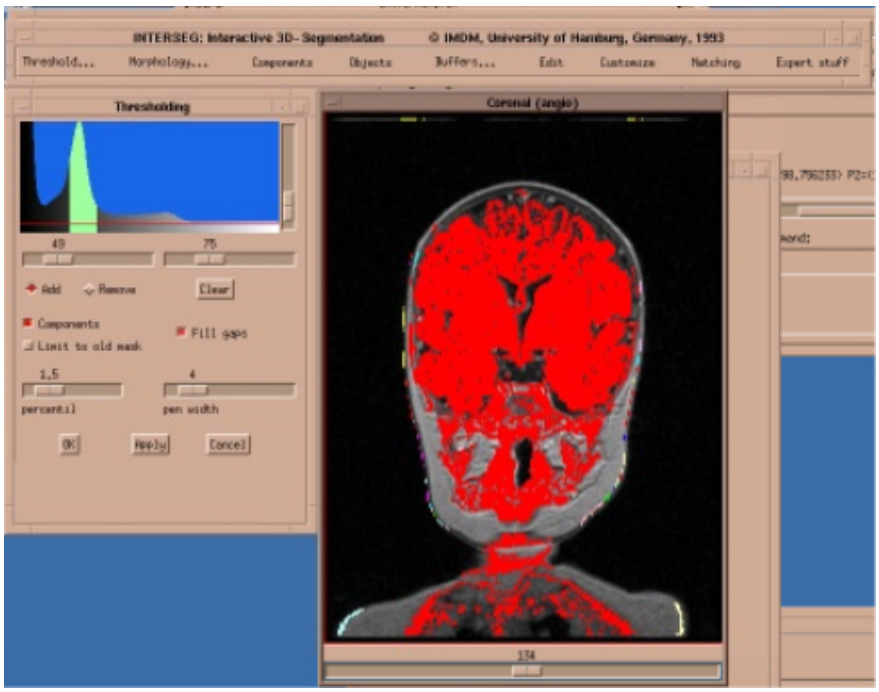


Abbildung 3.2.5: *Die am Institut für Medizinische Informatik (IMI) entwickelte Bildverarbeitungs- und Visualisierungssoftware VOXEL-MAN bietet vielfältige Werkzeuge zur Segmentation eines Datensatzes.*

Zur Segmentation wurden verschiedene Methoden miteinander kombiniert:

- Setzen von Schwellenwerten (Thresholding): Zuerst wurde ein Schwellenwert-Bereich innerhalb der Grauwerte des MRT-Datensatzes gesucht, der möglichst nur das gewünschte Organsystem repräsentiert. Z. B. würde man, um die Ventrikel darzustellen, einen Schwellenwert wählen, der einem Grauwertbereich von dunklem Grau bis Schwarz entspricht, da der Liquor, der die Ventrikel ausfüllt, in der T1-Wichtung fast schwarz erscheint. Die umliegende Hirnmasse wird mit einem helleren Grauwert dargestellt und ist nicht im Schwellwertbereich enthalten. Wenn man sich nun nur diejenigen Bildpunkte darstellen lässt, die innerhalb des gewählten Grauwertebereichs liegen, so werden nur diejenigen Bildpunkte dargestellt, die dem Ventrikelsystem entsprechen. Die umliegenden Bildpunkte, die einem helleren Grauwertebereich entsprechen, werden nicht dargestellt, man erhält also in diesem Beispiel ein erstes grobes Modell des Ventrikelsystems.
  In der Praxis gibt es viele Strukturen, die durch denselben Grauwertbereich repräsentiert werden. So umfasst in diesem Beispiel der Liquor im Ventrikelsystem den gleichen Grauwertebereich wie der Liquor in den äußeren Liquorräumen des Subarachnoidalraumes. Diese Strukturen würden im Modell als zusammengehörige Strukturen dargestellt, anatomisch gesehen handelt es sich aber um getrennte Organsysteme. Um diese Organsysteme als eigenständige Strukturen darstellen zu können, kommt die folgende Methode zum Einsatz:

- Analyse von miteinander verbundenen Komponenten (Connected components analysis): Das Programm stellt Strukturen mit gleichem Grauwertbereich, die nicht zusammenhängen zur besseren Unterscheidung in unterschiedlichen Farben dar. Dies funktioniert allerdings nur, wenn die beiden Strukturen keine Verbindung zueinander besitzen, sonst werden sie vom Programm als eine Organstruktur dargestellt. Da es sich bei solchen unbeabsichtigten Verbindungen oft um nur sehr schmale Voxelbrücken handelt, gestaltet sich die Suche nach solchen Verbindungen oft schwierig, selbst angesichts der Tatsache dass das Programm den Benutzer bei der Suche nach solchen Verbindungen unterstützt. Um solche Verbindungen möglichst zu eliminieren wird folgende Methode angewendet:

- Mathematische Morphologie: Die unerwünscht miteinander verbundenen Strukturen werden erodiert, d.h. sie werden mit Hilfe eines mathematischen Algorithmus einem virtuellen Schrumpfungsprozess unterzogen. Dies wird in mehreren Schritten durchgeführt, so dass die Strukturen schließlich keine Verbindung mehr zueinander besitzen. In diesem Prozess geht allerdings auch ein Teil der Oberflächencharakteristik der Strukturen verloren. Um diese wiederherzustellen, werden die Strukturen virtuell dilatiert (erweitert), bis sie ihre ursprüngliche Oberflächencharakteristik wieder besitzen. Dieser Prozess der Erosion/Dilatation ist letztlich aber immer mit einem Verlust von Volumeninformationen der bearbeiteten Strukturen verbunden. Daher muss immer ein Kompromiss zwischen

Darstellungsqualität und der Notwendigkeit, Strukturen getrennt voneinander darstellen zu können, gefunden werden.

- Trotz der genannten Hilfsmittel wie Analyse von miteinander verbundenen Komponenten und mathematischer Morphologie bleiben häufig immer noch Stege zwischen angrenzenden Strukturen bestehen. Dies liegt darin begründet, dass der in dieser Arbeit verwendete MRT-Datensatz eines Säuglings nicht die optimalen Kontrastunterschiede bietet, wie sie MRT-Datensätze eines Erwachsenen vorweisen. Diese Pixelbrücken müssen entfernt werden, damit ein bestimmtes Objekt mit seinen anatomisch korrekten Organgrenzen dargestellt werden kann. Daher musste die Segmentation in dieser Arbeit durch viele manuelle Arbeitsschritte verbessert werden. Es wurde daher im Datensatz Schicht für Schicht überprüft, wo die tatsächliche anatomische Grenze einer Struktur verläuft. Alle außerhalb dieser Grenze liegenden Strukturen wurden in dieser Bildschicht genau an den Sturkurgrenzen entlang mit einem virtuellen Pinsel von Hand gelöscht. Diese Prozedur wurde für alle Datensatzschichten durchgeführt, auf denen die herauszuarbeitende Struktur abgebildet ist. Als Resultat erhält man schließlich eine Struktur, die sich anatomisch korrekt von ihrer Umgebung abgrenzt und gespeichert werden kann.

3.2.5 Volumen-Modellierung

Einige Strukturen wie z. B. die Basalganglien konnten wegen fehlender Kontraste nicht mit der Methode der Segmentation dargestellt werden. Auch große Teile der Arterien konnten selbst mit Hilfe des Kontrastmittel-Datensatzes nicht dargestellt werden, da die Grauwerte der Arterien sich nicht ausreichend von dem umliegenden Gewebe unterschieden haben. Diese Hirnteile wurden daher mit Hilfe des sogenannten Tube (Schlauch)-Editor des VOXEL-MAN Programmpaketes modelliert. Mit Hilfe dieses Werkzeugs kann man im MRT-Datensatz entlang von Strukturen, wie z. B. den Arterien, die in der Realität schlauchförmig aussehen, Kugeln als Stützpunkte setzen. Diese Kugeln werden so definiert, dass sie dem Durchmesser der Struktur entsprechen, die modelliert werden soll. Diese Kugeln können anschließend mit dem Tube-Editor miteinander verbunden werden, so dass sie einen geschlossenen Schlauch bilden. Die Wände dieses Schlauches werden vom Tube-Editor aus Polygonen (flache Vielecke) erzeugt. Diese Polygone stellen die Wand des modellierten Objektes dar.
Ein praktisches Beispiel: Um die Arterien darzustellen, musste im Datensatz Schicht für Schicht überprüft werden, ob die darzustellende Arterie in dieser Schicht abgebildet wird. Falls ja, wurde eine Kugel, deren Durchmesser auf genau den Durchmesser der Arterie eingestellt wurde, im Bild dort platziert, wo die Arterie zu sehen ist. Dann wurde auf der angrenzenden Schicht überprüft, wo die Arterie weiterverläuft. Falls die Arterie auf dieser angrenzenden Bildschicht wieder dargestellt wird, wird auch auf dieser Bildschicht eine Kugel dorthin platziert, wo die Arterie abgebildet wird. Eventuell muss der Durchmesser der Kugel angepasst werden, falls sich die Weite einer

Arterie im Vergleich zur vorhergehend bearbeiteten Schicht verändert hat. Erschwerend ist natürlich der Umstand, dass eine organische Struktur wie z. B. eine Arterie nie gerade von oben nach unten oder von links nach rechts in einem Datensatz verläuft. Daher müssen auch Kurven und Abzweigungen modelliert werden. Dazu ist viel räumliches Vorstellungsvermögen während der Modellierung nötig. Die Modellierung einer Struktur wie z. B. einer Arterie muss auch immer wieder mit Anatomie- und Radiologieatlanten überprüft werden. Am Ende dieses Prozesses, wenn der Verlauf einer Struktur über alle Datensatzschichten, auf denen diese Struktur abgebildet wird, mit Kugeln markiert wurde, erhält man eine Kette von Kugeln. Diese Kette von Kugeln gibt, in einer dreidimensionalen Übersichtsdarstellung betrachtet, schon eine ganz gute Vorstellung von der abzubildenden Struktur (siehe Abbildung 3.2.6 links). Realistisch wird die Darstellung jetzt dadurch gemacht, dass die Kugeln miteinander verbunden werden. Dazu wird mit Hilfe des Tube-Editors von der ersten Kugel in der Kette der Kugeln zur zweiten Kugel ein Schlauch gezeichnet. Dieser Schlauch entspricht am Anfang dieses Teilstücks dem Durchmesser der ersten Kugel, an seinem Ende dem Durchmesser der zweiten Kugel, zwischen Anfang und Ende des Teilstücks wird die Weite des Schlauches interpoliert. Das Zeichnen dieses Schlauches wird dann von der zweiten Kugel zur dritten Kugel weitergeführt usw., bis alle Kugeln, die eine bestimmte Struktur wie z. B. eine Arterie repräsentieren, miteinander verbunden sind. Man erhält als Resultat einen durchgängigen Schlauch, der eine Arterie mit allen Kurven, Drehungen und Änderungen im Durchmesser der Arterie (Lumenweite) darstellt (siehe Abbildung 3.2.6 rechts).

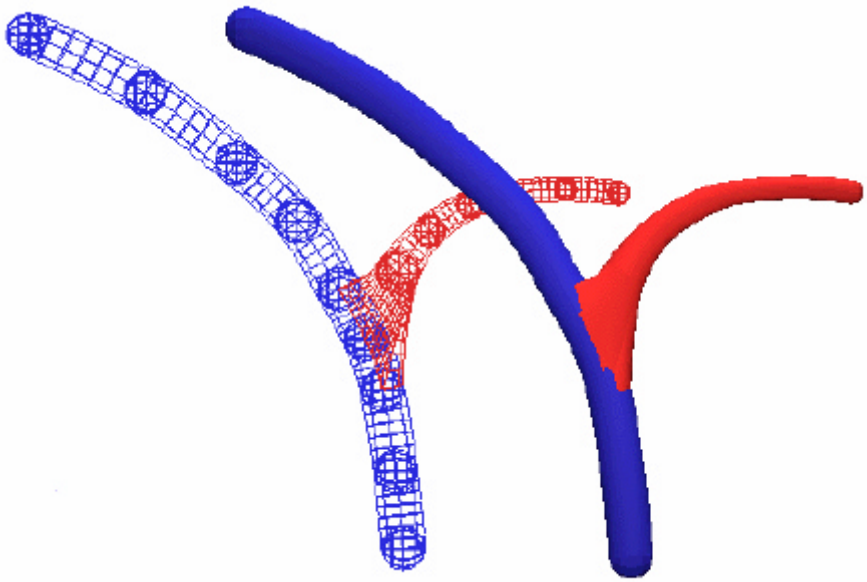


Abbildung 3.2.6: *Einige Strukturen wie z. B. die Arterien konnten nicht mit der Methode der Segmentation dargestellt werden. Sie wurden daher mit Hilfe eines Tube(Schlauch)-Editor modelliert. Die Schläuche wurden mit Hilfe von Kugeln definiert, die interaktiv in das Volumen gesetzt wurden, in der Abbildung links zu sehen. Rechts die Darstellung der Arterien als geschlossener Schlauch. Schematische Darstellung aus Pommert et al [2001].*

An Arterienabzweigungen wird in der Praxis mit der Modellierung einer neuen Arterie begonnnen. So erhält man viele Teilstücke des Arteriensystems, die sich einzeln klassifizieren lassen. Später lassen sich diese Einzelteile des Arteriensystems wieder als eine einzige, durchgängige Struktur darstellen.
Tiefergehende Informationen zu Technik und mathematischen Grundlagen der am Institut für Medizinische Informatik entwickelten 3D-Visualisierungsmethoden finden sich in Höhne et al. [1990], Pommert et al. [1992] und Tiede [1999].

3.2.6 3D-Visualisierung

Auf das 3D-Volumen, das wie oben beschrieben erzeugt wurde, können nun die 3D-Visualisierungsmethoden angewendet werden. 3D-Visualisierung ist die Bezeichnung für die plastische Darstellung von dreidimensionaler Grafik auf eine zweidimensionale Fläche (Umwandlung von Voxelgrafik in Rastergrafik). Diese zweidimensionale Fläche kann ein Ausdruck der Voxelgrafik auf ein Blatt Papier sein. In den meisten Fällen ist die zweidimensionale Fläche, auf die dreidimensionale Grafik projiziert wird, der Computerbildschirm. Die Darstellung von zweidimensionaler Grafik erscheint für das menschliche Auge plastisch, da die Reflexion von künstlichen Licht und die Darstellung von Schatten abhängig von virtuellen Materialeigenschaften und dem Betrachtungswinkel simuliert wird. Grundlage der 3D-Visualisierung ist das volumenbasierte Strahlwurfverfahren (Ray-Casting). Beim Strahlwurfverfahren findet eine Abtastung des Volumens statt, indem von jedem Punkt der Bildebene aus ein Sichtstrahl (Ray) in das Volumen gesendet wird (siehe Abbildung 3.2.7). Trifft dieser Strahl in dem Volumen auf ein Objektvoxel, wird überprüft, ob dieses Objekt sichtbar sein soll. Voxel ist ein Kunstwort, das sich aus den Begriffen "Volumen" und "Pixel" zusammensetzt. Für jedes sichtbare Objektvoxel wird dann ein Wert berechnet, der die Farbe, Helligkeit und das Reflexionsverhalten des Voxels bestimmt. Neigung der Oberflächen, Anzahl, Position und Helligkeit der vorhandenen Lichtquellen haben dabei entscheidenden Einfluss auf diesen Wert. Durch Überabtastung werden auch Werte für Bildpunkte im Subvoxelbereich berechnet, wodurch eine sehr realistische Darstellung der Oberflächen erreicht wird.

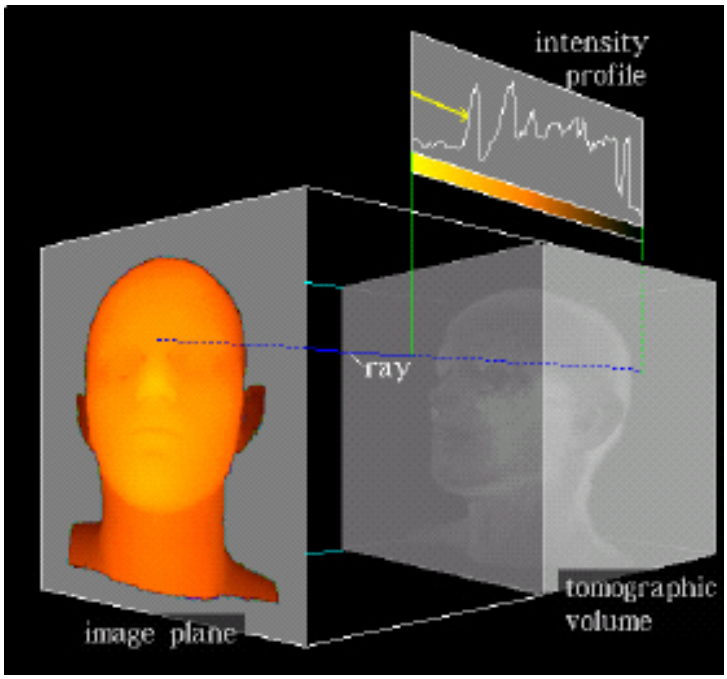


Abbildung 3.2.7: *Schematische Darstellung der Strahlwurfmethode (Ray-Casting) zur volumenbasierten 3D-Visualisierung aus Höhne et al. [1990]*

3.2.7 Intelligente Volumen

Um das räumliche Modell mit jederzeit abrufbaren Informationen zu den dargestellten Strukturen zu versehen, wurde das räumliche Modell mit einem symbolischen Modell verbunden. Dieses besteht aus einem zum Datenvolumen kongruenten „Attributvolumen“, dem Volumen der Objektmarken. Die Objektmarken dienen als Zeiger auf die Organnamen in einer Wissensbasis, die nach der Methode der semantischen Netzwerke aufgebaut ist. Diese Methode erlaubt die Beschreibung von Relation zwischen den Organen, wie „ist Teil von“ oder „wird versorgt von“. Es kann auch verschiedene Attributvorkommen geben, z. B. wenn ein Datensatz nach morphologischen und nach funktionellen Kriterien segmentiert worden ist.

Eine einmal angelegte Wissensbasis hat zudem den großen Vorteil, dass sie auch auf verschiedene Daten-Volumen angewendet werden kann, da die medizinischen Relationen immer gleich bleiben. Der Kleinhirnwurm ist z. B. immer ein Teil des Kleinhirns. Abbildung 3.2.8 zeigt den schematischen Aufbau der Datenstruktur des ’intelligenten’ Volumens [Höhne et al., 1995]. Man erkennt, dass das Gesamtvolumen in mehrere Einzelvolumina aufgeteilt ist. Außerdem werden die Verknüpfungen im semantischen Netzwerk innerhalb der Wissensbasis sichtbar.

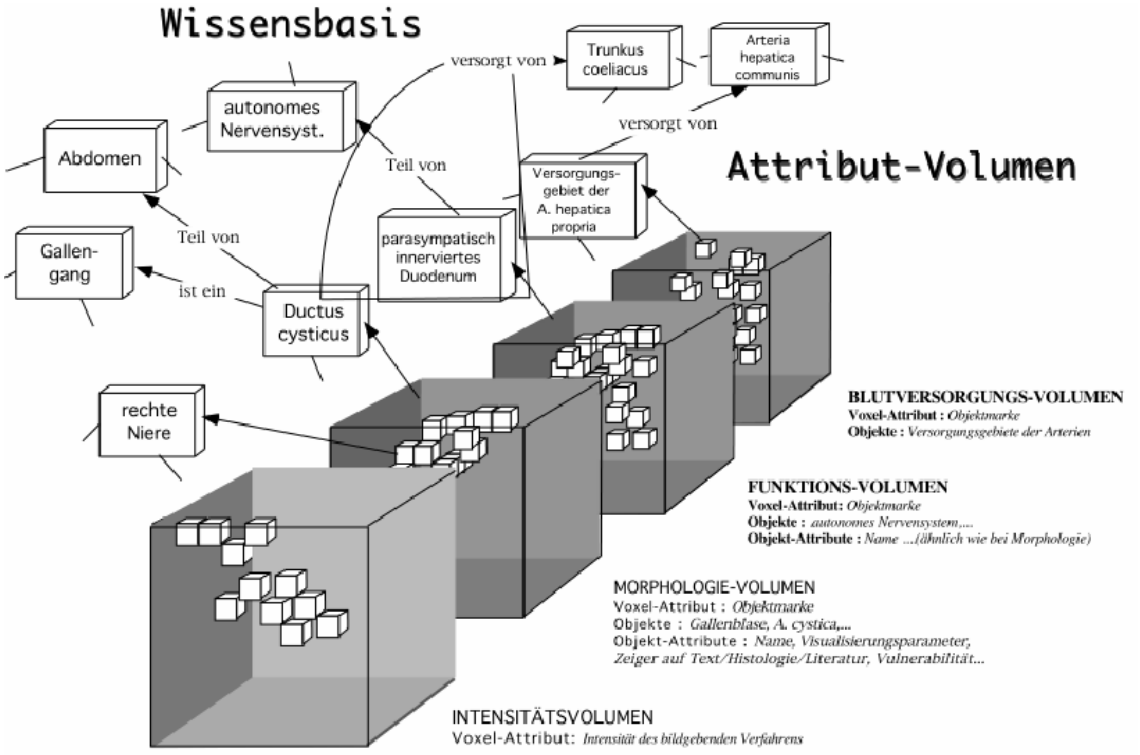


Abbildung 3.2.8: Schematischer Aufbau der Datenstruktur des 'intelligenten' Volumens mit Aufteilung des Gesamtvolumens in die Teilvolumina und Darstellung der Wissensbasis mit seinem semantischen Netzwerk.

Detailliertere Darstellungen zu Wissensbasis und dem multiattributiven Volumen finden sich in Pommert et al. [1994] oder Schubert et al. [1993].

3.2.8 Auswahl der bildlichen Darstellung

Grundsätzlich können auf der Basis der segmentierten Datensätze unterschiedliche Arten von Bildern erzeugt werden: Schnittbildaufnahmen, wie sie z. B. bei MRT- oder Ultraschalluntersuchungen auftreten oder eine dreidimensionale plastische Darstellung des Datensatzes. Die dazu notwendigen Verfahren werden im folgenden Abschnitt dargestellt:
Schnittebenen können beliebig in das 3D-Volumen gelegt werden. Dabei können die Ebenen an den drei Hauptachsen (oben/unten, links/rechts, vorne/hinten) ausgerichtet sein oder schräg im Raum liegen. Die durch diese Schnittebenen erzeugten Schnittansichten lassen sich im 3D-Kontext visualisieren. Abbildung 3.2.9 zeigt eine solche Schnittansicht, die man z. B. bei einem schrägen Schnitt durch das Vorderhirn im Säuglings-MRT-Datensatz erhält.

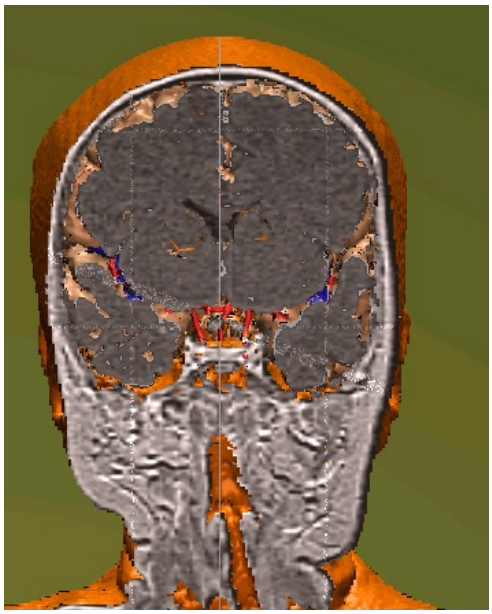


Abbildung 3.2.9: *Schnittansicht einer schräg im Vorderhirn liegenden Ebene innerhalb des in dieser Arbeit verwendeten MRT-Datensatzes. Die Schnittfläche zeigt die angeschnittenen Hirnteile.*

Eine Schnittansicht, welche die Schnittfläche als Ultraschallbild anzeigt, ist dadurch noch nicht erzeugt. Dafür bietet das Programm VOXEL-MAN ein Werkzeug mit dem Namen Ultraschall (Ultrasound), mit dem eine Ultraschalluntersuchung ansatzweise simuliert werden kann. Dieses Ultraschall-Werkzeug ist eine Kombination aus den beliebig wählbaren Schnittebenen innerhalb eines Volumens und einem Schallkopfmodell mit seiner Schnittebene. Das Schallkopfmodell wird auf die dargestellte Oberfläche des Volumens aufgesetzt. Nun können ultraschalltypische Schwenk- und Drehbewegungen ausgeführt werden. Die Bewegungen des Schallkopfmodells und der resultierenden Schnittebenen werden in zwei separaten Programmfenstern ausgegeben. Durch die gleichzeitige Darstellung des 3D-Körpermodells mit dem Schallkopfmodell ist eine Orientierung über die Lage der angezeigten Schnittebene jederzeit möglich. Bei ausreichender Verkleinerung und nicht zu hoher Auflösung werden die Schallkopfbewegungen und die resultierenden Schnitte sogar in Echtzeit berechnet (die Arbeitsgeschwindigkeit wird hier maßgeblich durch die verwendete Computerhardware bestimmt, je schneller der Rechner, desto schneller die Berechnung und Darstellung der Schnittbilder). Fließende Bewegungen des Schallkopfmodells erzeugen dabei fließend bewegte Schnittbilder. Es entsteht somit ein sehr realitätsnaher Eindruck einer wirklichen Bewegung eines Schallkopfes und des resultierenden Schnittbildes.
Abbildung 3.2.10 zeigt das Ultraschall-Menü mit den möglichen Einstellungen zur Bewegung des Schallkopfmodells. Es können z. B. die einzelnen Drehachsen und der Aufsetzpunkt separat gewählt werden. Mit Hilfe dieses Ultraschall-Menüs kann somit eine Ultraschalluntersuchung simuliert werden.

Abbildung 3.2.10: *Ultraschall-Menü mit mehreren Einstellmöglichkeiten zur Auswahl der Drehachsen und der Koordinaten des Aufsetzpunktes für die interaktive Bewegung des Schallkopfmodells.*

Der Datensatz lässt sich außerdem in einer 3D-Ansicht betrachten. In dieser Ansicht können einzelne Teile des Datensatzes entfernt werden, um sich so z. B. nur einen bestimmten Hirnteil wie das Kleinhirn anzeigen zu lassen. Die erstellte 3D-Szene läst sich um alle Achsen frei drehen und vergrößern bzw. verkleinern. Eine auf diese Weise definierte Szene dient als Ausgangsszene einer 3D-Simulationssequenz.

3.2.9 Erzeugung von intelligenten Filmen

Wie bereits erwähnt, wurde zur Bearbeitung der Datensätze in dieser Arbeit das VOXEL-MAN Autorensystem verwendet. Dieses System gibt dem Benutzer die Möglichkeit, sich in allen Freiheitsgraden innerhalb des Modells zu bewegen, das Modell zu drehen, nach Belieben zu vergrößern oder zu verkleinern, Teile des Modells zu entfernen, Schnittbilder in allen gewünschten Ebenen zu erstellen usw. Dieses hohe Maß an Flexibilität wird mit einer aufwendigen Berechnung jedes einzelnen Bildes erreicht. Diese Berechnung kann je nach Komplexität der dargestellten Strukturen einige Sekunden dauern. Diese Einzelbildberechnung ist natürlich zu langsam, um die Simulation einer realitätsnahen Ultraschalluntersuchung darzustellen. Daher wurden sogenannte virtuelle Szenen erstellt. Diese virtuellen Szenen nutzen das Apple Quicktime-VR Format. Diese Szenen werden wie ein Trickfilm erstellt. Es werden einzelne Bilder aneinandergereiht, die schnell genug hintereinander abgespielt das Drehen eines Objektes, eine virtuelle Kamerafahrt durch eine Struktur oder das Hinzufügen oder Entfernen von Strukturen in einem Film darstellen. Der Nachteil eines üblichen Trickfilmes ist, dass er nur vorwärts bzw. rückwärts abgespielt werden kann.

Das Quicktime-VR Format hingegen erlaubt es, eine Matrix von Bildern zu erstellen (siehe Abbildung 3.2.11).

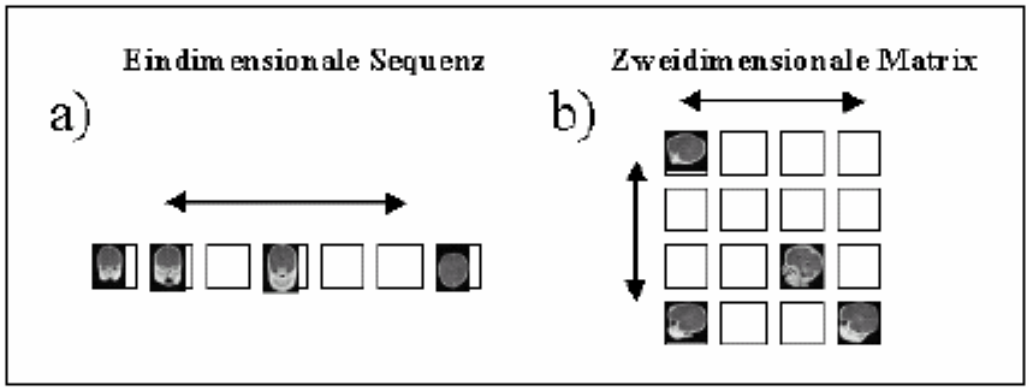


Abbildung 3.2.11: *Simulationssequenzen können eindimensional (Reihe von Folgebildern) oder zweidimensional (Matrix von Einzelbildern) sein. D.h. es können ein oder zwei Freiheitsgrade eines Schallkopfes und somit die Bewegungen um bis zu zwei Drehachsen simuliert werden.*

Dies bedeutet, dass von einer Anfangsszene ausgehend nun Bilder in 2 Achsen berechnet werden. So kann ein Objekt nicht nur nach links oder rechts, sondern auch nach oben und unten rotiert werden. Diese Berechnungen sind miteinander kombinierbar, so dass z. B. die Drehung eines Objektes mit dem Entfernen von Teilstrukturen dieses Objektes verbunden werden kann. Das Konzept der in dieser Arbeit erstellten `intelligenten Filme` wurde zuerst von Schubert et al. [1999] vorgestellt.
Um interaktive Simulationssequenzen zu erstellen, ist ein Zusammenfügen der Schnittansichten, die durch das Ultraschall-Menü erzeugt werden, nötig. Anhand einer schrittweisen Darstellung der Erzeugung einer Simulationssequenz für die coronare Standarduntersuchung bei Säuglingsgehirnen wird die Methode beschrieben. Dafür werden ein MRT-Datensatz eines Säuglingskopfes und ein Ultraschall-Datensatz eines Säuglingskopfes benötigt, diese wurden in den Schritten 3.2.1 bis 3.2.5 erzeugt. Dann folgt die genaue Positionierung des Schallkopfmodells auf der Oberfläche des 3D-Volumens aus dem MRT-Datensatz. Dieser Schritt wird über das in Kapitel 3.2.6 beschriebene Ultrasound-Werkzeug durchgeführt. Bei der Hirn-Sonographie des Säuglingskopfes muss z. B. die ungefähre Position der großen Fontanelle gesucht werden. Danach geht es darum, die maximalen Ausschlagswinkel zu bestimmen, so dass eine realistische Annäherung an den bei einer realen Untersuchung möglichen Schallkopf-Ausschlag gegeben ist. Dies wird in Abbildung 3.2.12 exemplarisch gezeigt.

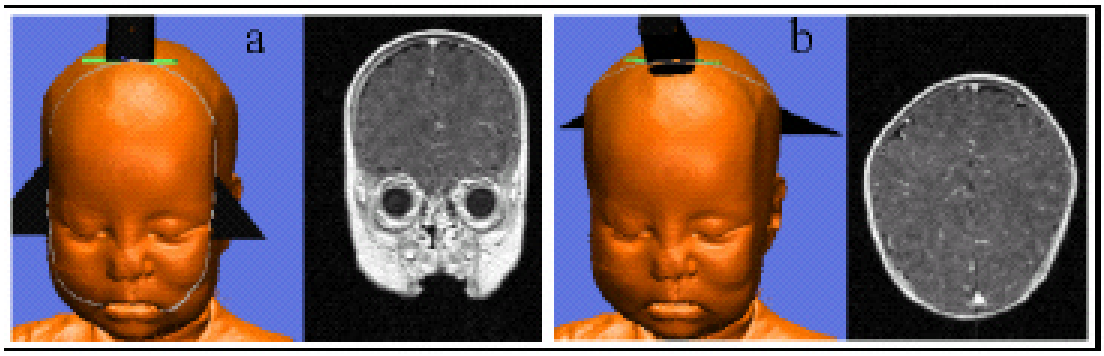


Abbildung 3.2.12: *MRT-Kinderkopf-Datensatz mit Schallkopfmodell. Suchen und Festlegen des ersten und letzten Bildes einer typischen Ultraschall-Sequenz. a) zeigt maximalen Ausschlagswinkel nach vorne (ventral) und b) nach hinten (dorsal) bei einem Standarduntersuchungsgang coronar (Schnitt durch die Frontalebene) durch das Gehirn eines Säuglings. Der Schallkopf wird dabei auf die große Fontanelle aufgesetzt.*

Anhand der gewonnen Daten wird ein Skript erstellt. Ein Skript ist ein kleines Computer-Programm zur Automatisierung immer wiederkehrender Befehle. In diesem Fall führt es die einzelnen Schwenkbewegungen des Schallkopfes in kleinen Schritten automatisch aus und zeichnet die resultierenden Bilder in einer Datei hintereinander auf. Im Prinzip werden nach jeder Teilbewegung des Schallkopfmodells die relevanten Fenster sequentiell aufgezeichnet (siehe Abbildung 3.2.13). Als Ergebnis erhält man zwei Bildsequenzen:

1. Die Oberflächendarstellung mit dem Schallkopfmodell
2. Die dazugehörigen Schnitte im MRT-Datensatz

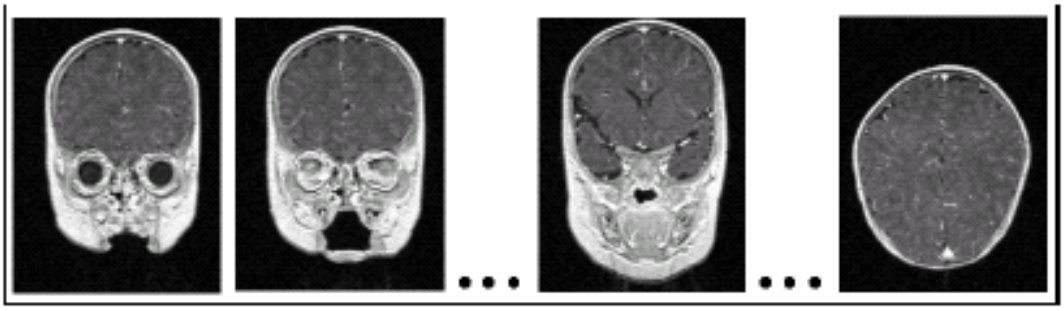


Abbildung 3.2.13: *Aneinanderreihung von vielen einzelnen MRT-Bildern zu einer Sequenz, die die Grundlage zur späteren Filmerzeugung darstellt.*

Dasselbe Skript wird auch auf den Ultraschall-Datensatz angewandt. Das bedeutet, dass die einzelnen Schwenkbewegungen des Schallkopfes von genau der gleichen Schallkopfposition (in diesem Beispiel von der Großen Fontanelle aus) in genau den gleichen Abständen wie im MRT-Datensatz berechnet werden. Als Ergebnis erhält man eine Bildsequenz mit denselben Winkelgraden und derselben Anzahl von Einzelbildern wie bei der Anwendung des Skripts auf den MRT-Datensatz (siehe Abbildung 3.2.14).

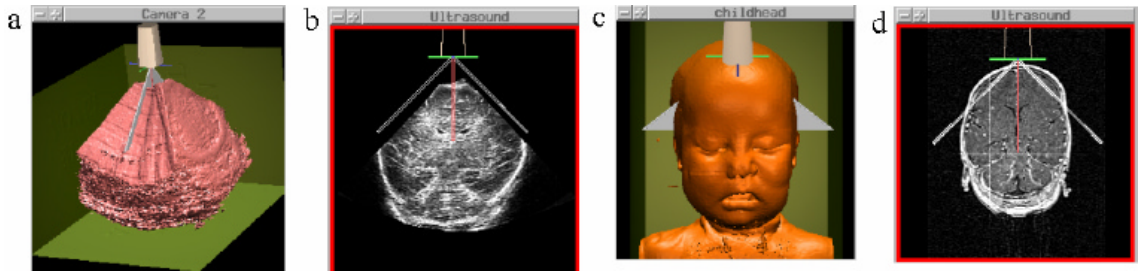


Abbildung 3.2.14: *Die vier berechneten Einzelbilder :*
a) 3D-Ultraschall-Bild mit Schallkopfmodell. Dieses enthält keine wesentlichen Aussagen und wird nicht weiter verwendet.
b) Ultraschallschnittbild, dieses entspricht der Simulation einer Ultraschalluntersuchung.
c)3D-MRT-Bild mit Schallkopfmodell als Hauptreferenz zu den Ultraschallbildern, es gibt die entsprechende Position und Lage des Schallkopfes wieder.
d)MRT-Schnittbild als zusätzliches Referenzmodell mit genauerer Darstellung der Strukturen als im Ultraschallbild.

Der nächste Schritt bei der Erstellung der Simulationssequenzen ist das Zusammenfügen der einzelnen Bildsequenzen. Die Bildsequenzen werden dafür, wenn möglich, zuerst mit mathematischen Verfahren komprimiert, um die Datenmenge zu verringern, welches die weitere Verarbeitung wesentlich beschleunigt. Mit Hilfe des Programmes „Edit-HC“ aus der Tool-Sammlung des IMI werden die verschiedenen Bildsequenzen zu einem Bild zusammengefügt (so wie man drei Blätter Papier mit Hilfe von Klebestreifen zu einem einzigen, breiten Blatt zusammenfügen kann) wie in folgender Abbildung gezeigt. Abbildung 3.2.15 zeigt links das 3D-Körpermodell mit dem Schallkopfmodell, in der Mitte das MRT-Schnittbild und rechts das Ultraschall-Schnittbild.

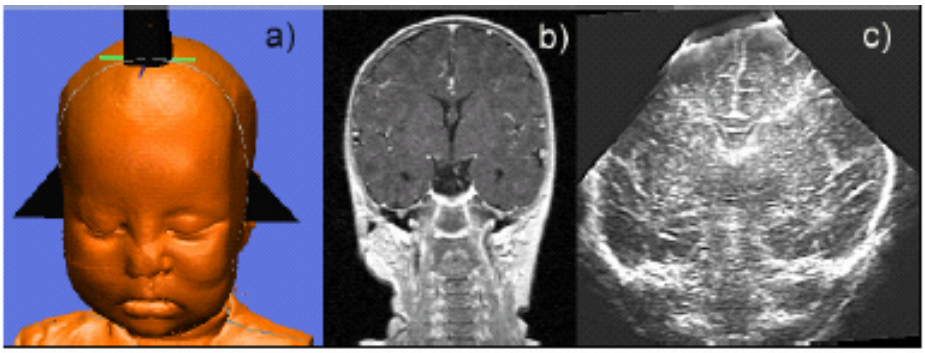


Abbildung 3.2.15: Zusammenfügen der einzelnen Bilder.
a) 3D-Schädelmodell mit Schallkopfmodell
b) MRT-Referenz-Schnittbild
c) Ultraschall-Schnittbild
Die Bilder werden nebeneinander dargestellt und bilden somit ein einzelnes, zusammenhängendes Bild.

Die Skripte, die hier verwendet wurden, berechnen folgende Animationen:

- Das Drehen eines Objektes um zwei Achsen.
- Das Drehen eines Objektes um eine Achse und das Hinzufügen oder Entfernen von Objekten.
- Das Drehen um eine Achse und vertikale bzw. horizontale Verschieben der Draufsicht auf eine Schnittachse.
- Das schräge Drehen um zwei Schnittachsen, wie es z. B bei einer Ultraschalluntersuchung durchgeführt wird, um bestimmte Hirnareale zu untersuchen.

4. Ergebnisse

Das Ziel dieser Arbeit ist es, einen interaktiven Atlas zu erstellen, der die Darstellung der Gehirnanatomie im Säuglingsalter im natürlichen Kontext darstellt.

4.1 Modell eines Säuglingsschädels

Zum Erreichen dieses Zieles sind zwei Datensätze segmentiert worden: Der Nativ- und der MRT-Datensatz eines Säuglings. Das kindliche Gehirn setzt sich aus sehr viel feineren und kleineren Strukturen zusammen als das Gehirn eines Erwachsenen. Es ist daher schwieriger, den Datensatz eines Kindes zu segmentieren als den eines Erwachsenen, da die einzelnen Strukturen nicht so deutlich voneinander zu unterscheiden sind. Trotzdem boten die Datensätze die Grundlage, um über 30 Hirnteile zu segmentieren. Es wurde besonderer Wert darauf gelegt, dass diese Hirnteile wichtige Leitstrukturen in der klinischen Untersuchung des Säuglings darstellen. Unter anderem wurden folgende Strukturen segmentiert:

- Großhirnrinde mit allen Lappen und dem Insellappen (Cortex cerebri, Insula)
- Rechte und Linke Kleinhirnhemisphäre und Kleinhirnwurm (Hemipheria cerebellum sinistra et dextra, Vermis cerebelli)
- Verlängertes Mark (Medulla oblongata)
- Brücke (Pons)
- Venöse System (Sinus sagittalis superior und inferior, Sinus rectus, Sinus transversus, Confluens sinuum)
- Ventrikelsystem mit Seitenventrikel und III. Ventrikel (Ventriculus lateralis cornu frontale, laterale, occipitale, Ventriculus tertius)
- Augapfel (Bulbus oculus)
- Hautoberfläche

Einige für die Simulation der Ultraschalluntersuchung wichtige Strukturen wie z. B. die Arterien (die abstrakt gesehen dünne Schläuche darstellen, siehe Abbildung 4.1) inklusive des Circulus arteriosus willisii oder Thalamus und Nucleus caudatus (die eher langgezogene, kegelförmige Objekte darstellen) konnten mit der Methode der Segmentation nicht zufriedenstellend dargestellt werden. Die Arterien sind gerade beim Säugling sehr feine Strukturen und werden selbst im MRT mit Kontrastmittelzugabe nicht durchgängig dargestellt.

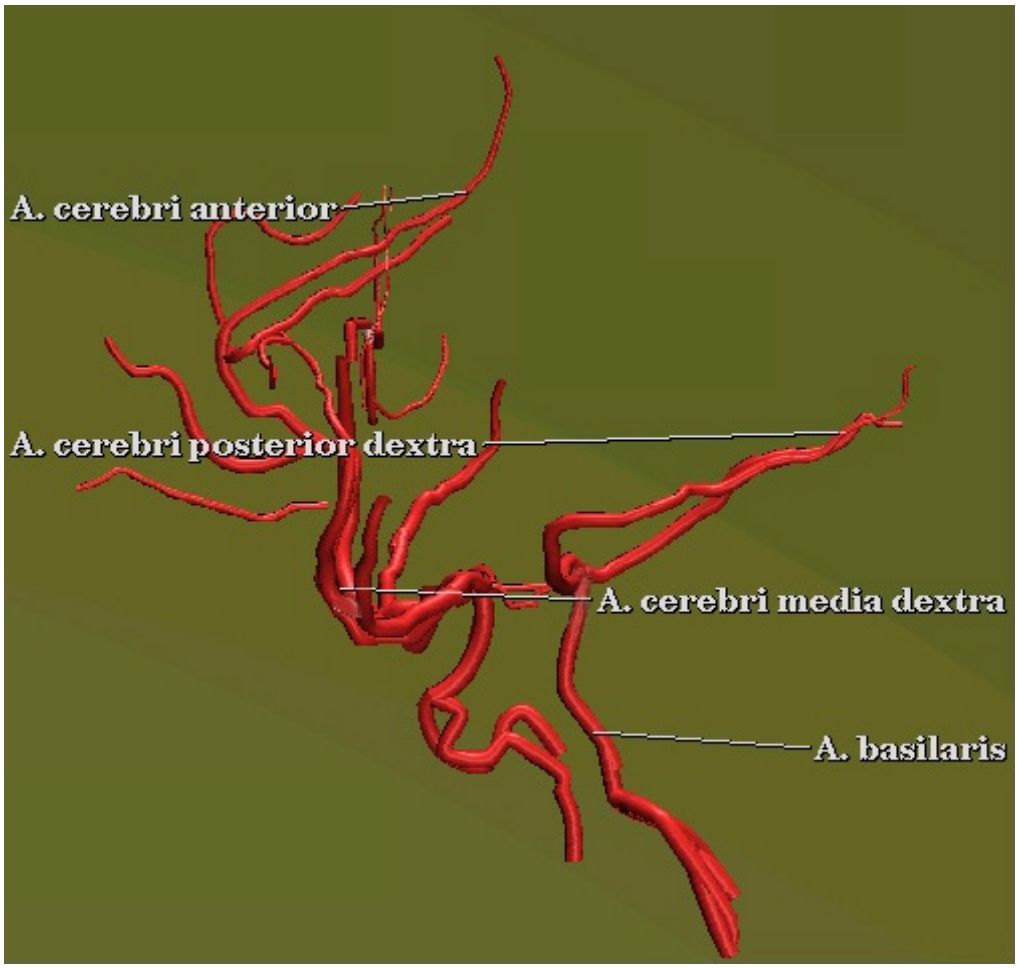


Abbildung 4.1: *Seitenansicht der in dieser Arbeit dargestellten Arterien. Diese Strukturen im Gehirn eines Säuglings besitzen einen sehr geringen Durchmesser und konnten daher nicht segmentiert werden. Sie wurden mit Hilfe des VOXEL-MAN Tube-Editor modelliert.*

Es wurde daher ein anderer Weg gewählt, um diese Strukturen in das Modell des Säuglingsschädels zu implementieren.
Die Wände dieser Strukturen wurden mit dem VOXEL-MAN Tube-Editor (siehe Kapitel 3.2.5) aus Polygonen (flache Vielecke) erzeugt. Diese Polygone stellen nur die Wand des modellierten Objektes dar. Die Objekte sind daher von innen hohl. Bei Schnittbildern wirkt es unnatürlich, wenn ein Objekt, dass in der Realität eine solide Struktur besitzt, als leerer Hohlkörper dargestellt wird. Zudem würden diese Hohlkörper in einer Schnittbilddarstellung des dreidimensionalen Modells als nicht definierte Flächen abgebildet werden, so dass hier keine Informationen über die dargestellte Struktur vorhanden gewesen wäre. Dieser Effekt wiegt umso schwerer, je größer der Durchmesser eines Objektes ist, da dann in einem Schnittbild ein Hohlraum mit dem Durchmesser des modellierten Objektes abgebildet wird. Dieser Hohlraum würde von einer dünnen Wand aus Polygonen umgeben sein. Es würde außerdem sehr schwierig sein, die dünne Wand eines solchen Objektes mit dem Mauscursor anzuklicken, um Informationen zu diesem Objekt abzufragen.

Daher wurden diese modellierte Objekte mit einem großen Durchmesser wie z. B. der Thalamus anschließend in voxelbasierte Objekte transformiert, deren gesamtes Volumen mit Voxeln ausgefüllt ist, so dass man ein solides Objekt erhält.
Dieses Verfahren wurde bei Objekten, die eher eiförmig wie der Thalamus sind oder eine langgezogene, gewundene Kegelform wie der Nucleus caudatus besitzen, angewendet, wie Abbildung 4.2 zeigt.

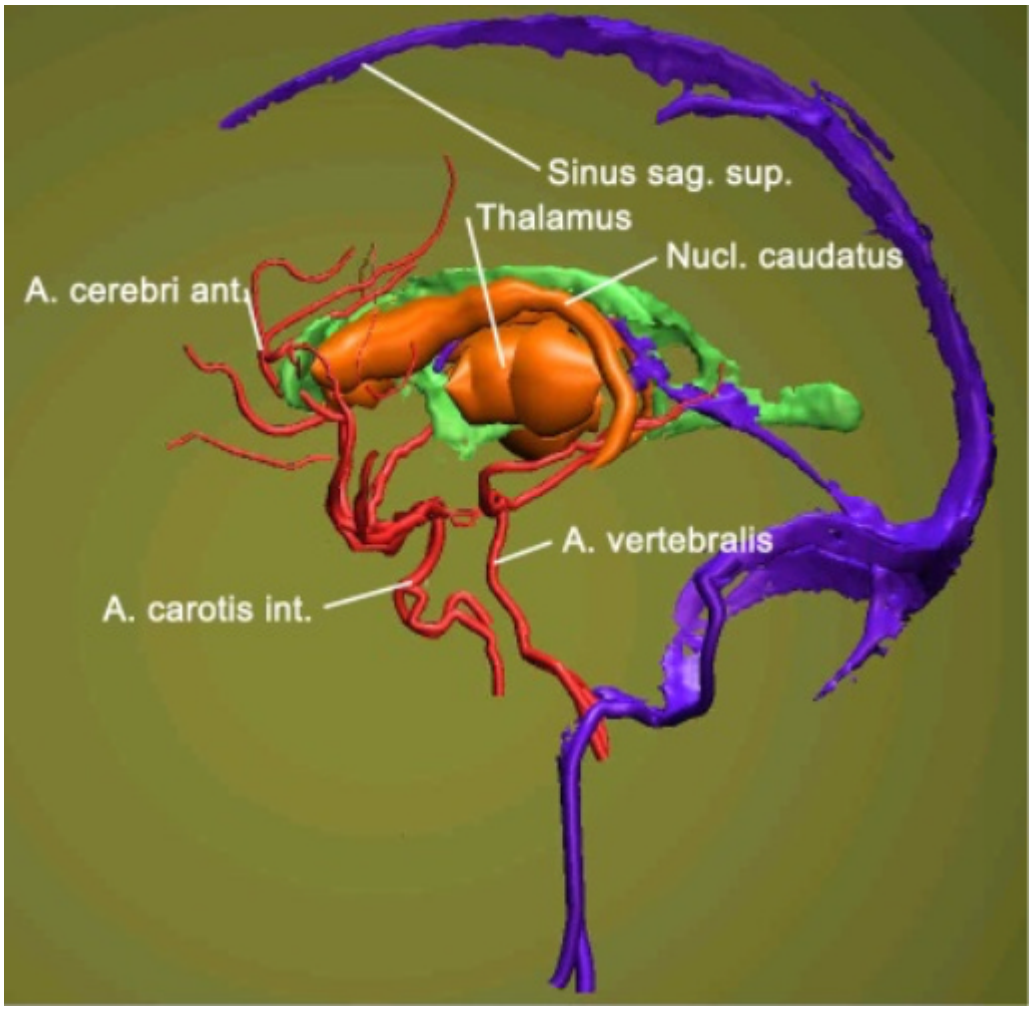


Abbildung 4.2: *Auch schlauchförmige Hirnorgane wie der Nucleus caudatus oder der Thalamus können modelliert werden. Hier eine Ansicht aus dem in dieser Arbeit erstellten Modell. Die modellierten Objekte können im ersten Arbeitsschritt nur als polygonbasierte Objekte erstellt werden. Die Polygone stellen nur die Oberfläche des Objektes dar. Diese Polygon-Objekte würden, wenn quer angeschnitten, auf Schnittbildern hohl erscheinen, daher werden diese anschließend in solide (d.h. mit Bildpunkten aufgefüllte) Voxel-Objekte transformiert.*

Folgende modellierten Strukturen wurden erstellt und in den Datensatz eingefügt:

- Vordere, Mittlere und Hintere Hirnschlagader, Basisschlagader (Arteria cerebri anterior, Arteria cerebri media, Arteria cerebri posterior, Arteria basilaris), alle Arterien werden jeweils mit ihren Seitenästen dargestellt

- Arterienring (Circulus arteriosus Willisii)
- Teile des venösen Systems mit Innerer Drosselvene (Vena jugularis interna)
- Schweifkern (Nucleus caudatus)
- Thalamus

4.1.1 Erzeugung der Wissensbasis

Alle segmentierten und modellierten Teilstrukturen wurden in einer Wissensbasis mit ihrem Namen erfasst. Auch die Beziehung der Strukturen untereinander wird beschrieben. Die Wissensbasis wurde erzeugt, indem umfangreiche Textbeschreibungen der Organe und der Beziehungen zueinander erstellt wurden. Diese Textdateien wurden dann in den Datensatz eingebunden. Die Beziehungen zwischen den Objekten innerhalb einer Domäne, d.h. innerhalb eines Bereiches, in dem die Objekte in einer bestimmten Beziehung zueinander stehen, werden am Beispiel der rechten Kleinhirnhemisphäre und der Domäne Alle Organe gezeigt. Für die Rechte Kleinhirnhemisphäre gilt: Die Rechte Kleinhirnhemisphäre (Cerebellum, hemispheria dextra) ist Teil von Kleinhirn (Cerebellum); Cerebellum ist Teil von „Alle Organe“ (siehe Abbildung 4.3) .

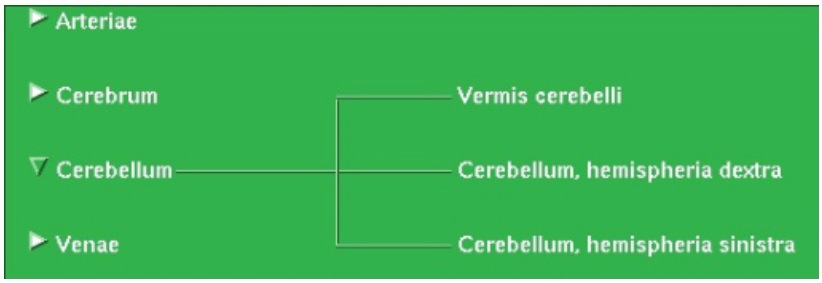


Abbildung 4.3: *Exemplarische Darstellung der in dieser Arbeit erstellten Wissensbasis am Beispiel des Kleinhirns (Cerebellum). Innerhalb der Wissensbasis sind hierarchische Strukturen durch Relationen wie ’Vater-Kind-Beziehungen’ aufgebaut. So kann die ’Vater-Struktur’ Kleinhirn geteilt werden in die ’Kind-Strukturen’ rechte Kleinhirnhemisphäre, linke Kleinhirnhemisphäre und Kleinhirnwurm.*

Die jedem Bildpunkt zugeordneten und in der Wissensbasis gespeicherten Informationen ermöglichen vor allem voxelspezifische Abfragen in den 3D-Bildern und den Schnittbildern. Auch die hierarchischen Strukturen lassen sich direkt im Bild darstellen. Abbildung 4.4 zeigt das Gehirn des Säuglings-MRT-Datensatzes in 3D-Darstellung, wobei hier die hierarchische Struktur der Domäne Kleinhirn am Beispiel der markierten rechten Kleinhirnhemisphäre dargestellt ist.

Abbildung 4.4: *Eine Darstellung des in dieser Arbeit erstellten Modells. Im Programm VOXEL-MAN besteht die Möglichkeit, sich die in der Wissensbasis erstellten Informationen zu den einzelnen dargestellten Strukturen anzeigen zu lassen. 3D-Darstellung des Gehirns im Säuglings-MRT-Datensatz mit Markierung der rechten Kleinhirnhemisphäre und deren Eingliederung in die hierarchische Ordnung der Domäne Kleinhirn.*

Auf der Grundlage der segmentierten Datensätze konnte somit ein detailliertes 3D-Modell entwickelt werden. Dieses Modell enthält alle hier vorgestellten segmentierten und modellierten Strukturen sowie die in de Wissensbasis gespeicherten Strukturen. welches mit der VOXEL-MAN-Visualisierungssoftware betrachtet werden kann. Die VOXEL-MAN-Software erlaubt die Betrachtung des Modells in allen erdenklichen Blickwinkeln, Vergrößerungsstufen, in Einzelteilen des Modells oder als Gesamtheit aller Strukturen. Außerdem können mit der VOXEL-MAN-Software beliebige Schnittebenen in den Datensatz gelegt werden. Auch ultraschalltypische Schwenk- und Drehbewegungen können an dem Modell ausgeführt werden. Abbildung 4.5 zeigt beispielhaft die zwei Fenster nebeneinander mit einem Coronarschnitt (Schnitt durch die Frontalebene) durch einen Säuglingskopf und dem resultierenden Schnittbild aus dem MRT-Datensatz.

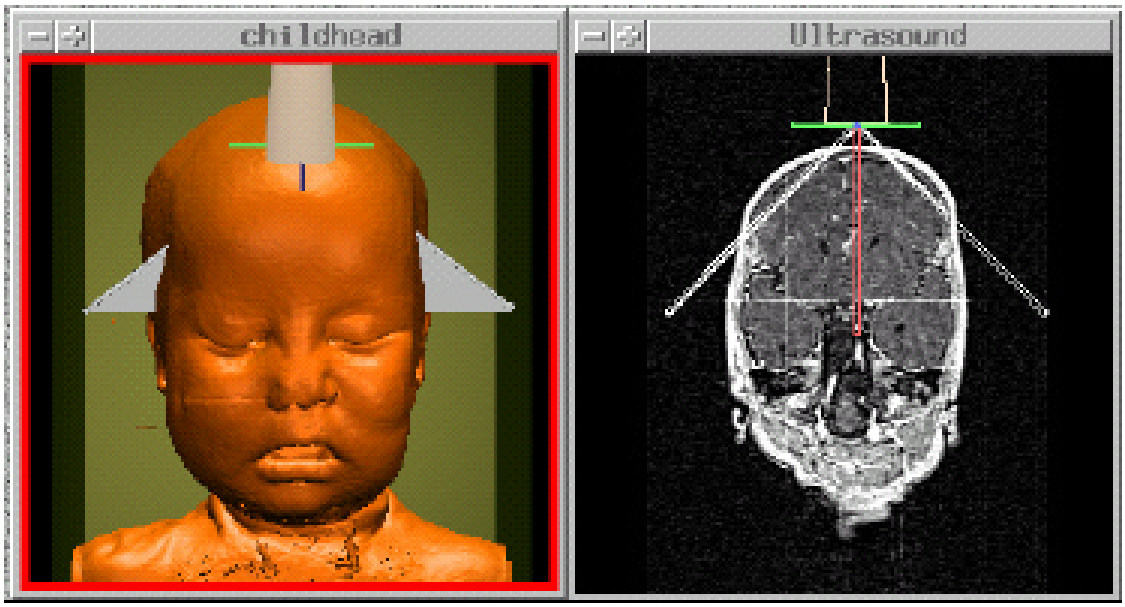


Abbildung 4.5: *Der in dieser Arbeit verwendete MRT-Kinderkopf-Datensatz: Die Kombination der beliebig wählbaren Schnittebenen innerhalb eines Volumens mit dem Schallkopfmodell wird in dieser Abbildung demonstriert. Im linken Fenster ist eine plastische Darstellung des Kopfes mit dem Schallkopfmodell, im rechten Fenster die durch das Ultraschall-Werkzeug erzeugte Schnittebene innerhalb des MRT Datensatzes zu sehen. Der Verlauf der Schnittebene wird durch die Schallkopfdarstellung im linken Bild deutlich: Die Schnittebene verläuft fächerförmig vom Aufsetzpunkt des Schallkopfes zu den Schläfen, wo die jeweils untere linke und untere rechte Begrenzung des Ultraschallfeldes durch die weißen Dreiecke angezeigt werden. Der Rest des Ultraschallfeldes befindet sich im Inneren des Schädels und ist durch den Kopf verdeckt. Im rechten Bild wird die Darstellung des resultierenden Schnittbildes dargestellt. Die Schnittebene läuft entlang des Ultraschallfeldes.*

4.2 Intelligente Szenen

Die im Rahmen dieses Projektes erzeugten intelligenten Szenen bieten einige Vorteile gegenüber der Betrachtung des 3D-Modells mit dem interaktiven Autorensystem VOXEL-MAN. Zum einen wird der Benutzer bei der Betrachtung des Modells geführt. Das bedeutet, dass bei der Erstellung der virtuellen Szenen Wert auf ein bestimmtes didaktisches Ziel gelegt wird, welches dem Betrachter der Szene später vermittelt werden soll. So kann in einer Szene ein spezieller Ultraschall-Untersuchungsgang simuliert werden oder ein bestimmtes Organsystem dargestellt werden. Eine virtuelle Szene stellt zwar immer nur einen Teil des erstellten Modells dar. Innerhalb dieser virtuellen Szene bieten sich dem Benutzer aber vielfältige Interaktionsmöglichkeiten. So kann z. B. ein virtueller Schallkopf geschwenkt werden, das Ultraschall-Schnittbild wird dabei dynamisch dargestellt. Es können auch dreidimensionale Modelle frei gedreht werden. In diesen Szenen können Teile des Modells entfernt werden und wieder

hinzugefügt werden, um die Sicht auf bestimmte Teile des Modells zu ermöglichen. Außerdem können die einzelnen Teile des Modells interaktiv abgefragt werden.
Die Darstellung der im Format Quicktime-VR erstellten intelligenten Szenen belastet den Hauptprozessor eines Computers vergleichsweise gering, so dass die Szenen auf durchschnittlichen Personal-Computern ohne Qualitätsverluste betrachtet werden können.
Im Gegensatz dazu erfordert das VOXEL-MAN Autorensystem mit seinen frei darstellbaren Modellen eine leistungsfähige und damit leider auch kostspielige Workstation als Computerplattform.
In der folgenden Tabelle werden die erstellten virtuellen Szenen aufgelistet:

Virtuelle Szenen in 3D-Darstellung	**Virtuelle Szenen „Ultraschallsimulation“**
Film 1: Rotation um zwei Achsen	Film 3: Coronare Ultraschalluntersuchung
• Darstellung des Säuglingsgehirns ohne Großhirnrinde • Modell kann um die vertikale und horizontale Achse rotiert werden	• Der virtuelle Schallkopf kann in zwei Freiheitsgraden bewegt werden: Schwenk nach vorne/hinten um horizontale Achse, Schwenk nach links/rechts um vertikale Achse
Film 2: Rotation um eine Achse, Entfernen/Hinzufügen	Film 4 : Sagittale Kopfuntersuchung
• Darstellung des Säuglingsgehirns mit allen Teilen des Modells • die einzelnen Bestandteile des Schädels können aus der Darstellung entfernt und wieder hinzugefügt werden	• Virtuelle Schallkopf kann in zwei Freiheitsgraden bewegt werden: Schwenk nach links/rechts um sagittale Achse, Schwenk nach links/rechts um vertikale Achse

Abbildung 4.6 zeigt die erste 3D-Szene. Die Großhirnrinde wird in dieser Szene nicht dargestellt, so dass tiefer liegende Strukturen sichtbar werden. Das 3D-Modell kann um zwei Achsen rotiert werden. Wird die Maus nach links oder rechts bewegt, rotiert das Modell nach links bzw. rechts. Wird die Maus nach oben oder unten bewegt, rotiert das Modell nach oben bzw. unten.

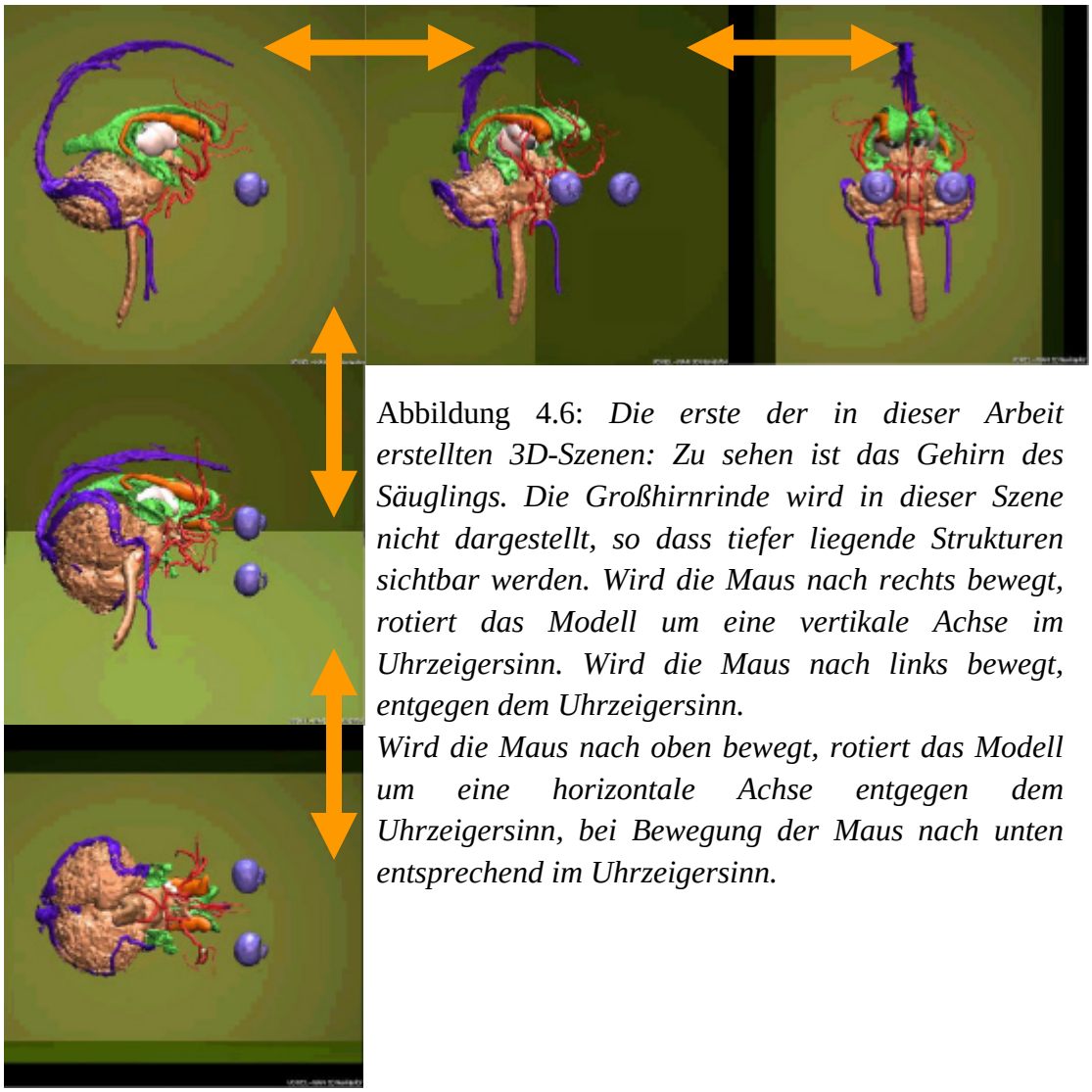


Abbildung 4.6: *Die erste der in dieser Arbeit erstellten 3D-Szenen: Zu sehen ist das Gehirn des Säuglings. Die Großhirnrinde wird in dieser Szene nicht dargestellt, so dass tiefer liegende Strukturen sichtbar werden. Wird die Maus nach rechts bewegt, rotiert das Modell um eine vertikale Achse im Uhrzeigersinn. Wird die Maus nach links bewegt, entgegen dem Uhrzeigersinn.*
Wird die Maus nach oben bewegt, rotiert das Modell um eine horizontale Achse entgegen dem Uhrzeigersinn, bei Bewegung der Maus nach unten entsprechend im Uhrzeigersinn.

In der zweiten 3D-Szene (siehe Abbildung 4.7) können alle Teile des Säuglingsschädels dargestellt werden. Wird die Maus horizontal bewegt, rotiert das Modell nach links bzw. rechts, wird die Maus vertikal bewegt, werden einzelne Teile des Modells entfernt, um einen Blick auf tiefer liegende Strukturen zu ermöglichen. Die entfernten Strukturen können durch vertikale Mausbewegung auch wieder sichtbar gemacht werden.

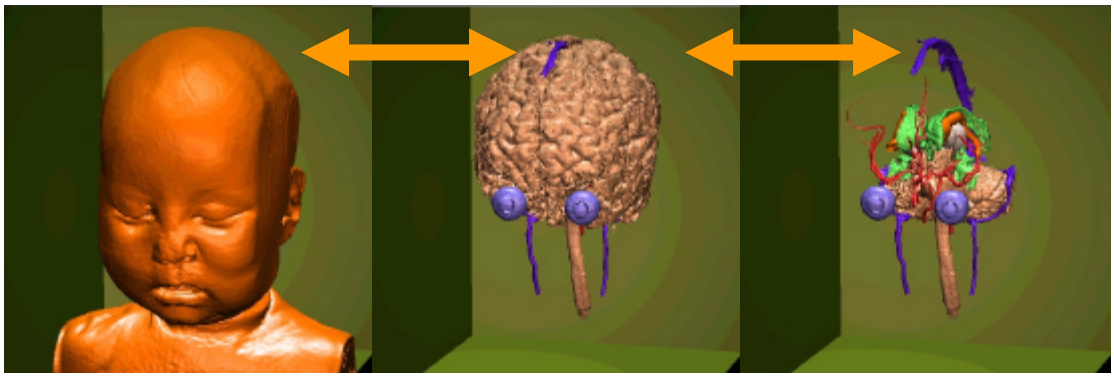


Abbildung 4.7: *Die zweite der in dieser Arbeit erstellten 3D-Szenen: Alle Teile des Säuglingsschädels können dargestellt werden. Durch Mausbewegung können Teile des Modells unsichtbar gemacht werden, um die darunter liegenden Strukturen zu betrachten. Außerdem kann das Modell um eine vertikale Achse rotiert werden.*

Abbildung 4.8 zeigt einen Ultraschallschnitt aus dem hier vorgestellten Modell, wie er bei der transfontanellären coronaren Ultraschalluntersuchung des Säuglings typischerweise vorkommt. Durch horizontale Mausbewegung schwenkt der virtuelle Schallkopf nach ventral bzw. dorsal. Bei vertikaler Mausbewegung schwenkt der Schallkopf nach links bzw. rechts. MRT- und Ultraschallbild werden in dieser Szene nebeneinander dargestellt. Dadurch ist es möglich, die beiden Bildmodalitäten miteinander zu vergleichen. Die in den Schnittbildern dargestellten Strukturen können interaktiv abgefragt werden. Durch Mausklick auf eine Struktur (siehe Abbildung 4.9) wird diese farbig hervorgehoben. Außerdem können per Mausklick die anatomischen Namen der dargestellten Strukturen eingeblendet werden.
Einige der Ergebnisse dieser Arbeit wurden auch schon an anderer Stelle [Arkhurst et al. 2001] vorgestellt.

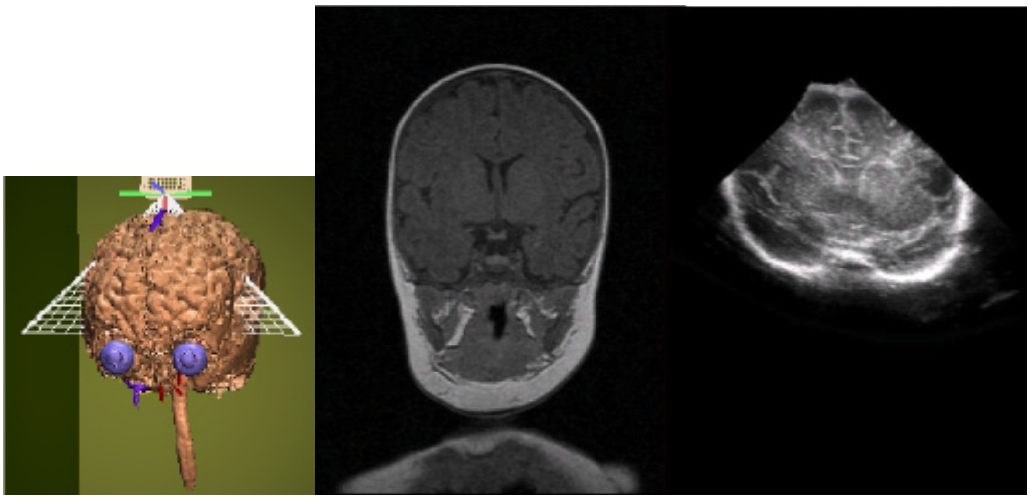


Abbildung 4.8: *Diese Schnittbilddarstellung aus dem in dieser Arbeit erstellten Modell zeigt ein Bild aus einer Sequenz von Schwenkbewegungen des Ultraschallkopfes, wie er bei der transfontanellären coronaren Ultraschalluntersuchung des Säuglings*

durchgeführt wird. Der virtuelle Schallkopf kann in zwei Freiheitsgraden (Schwenk nach vorne/hinten um horizontale Achse, Schwenk nach links/rechts um vertikale Achse) bewegt werden. Auf dem linken Bild kann die Position des Schallkopfes an einem 3D-Modell des Säuglingsschädels abgelesen werden. Das Bild in der Mitte zeigt das MRT-Schnittbild als Referenz zu dem rechts dargestellten Ultraschallschnittbild.

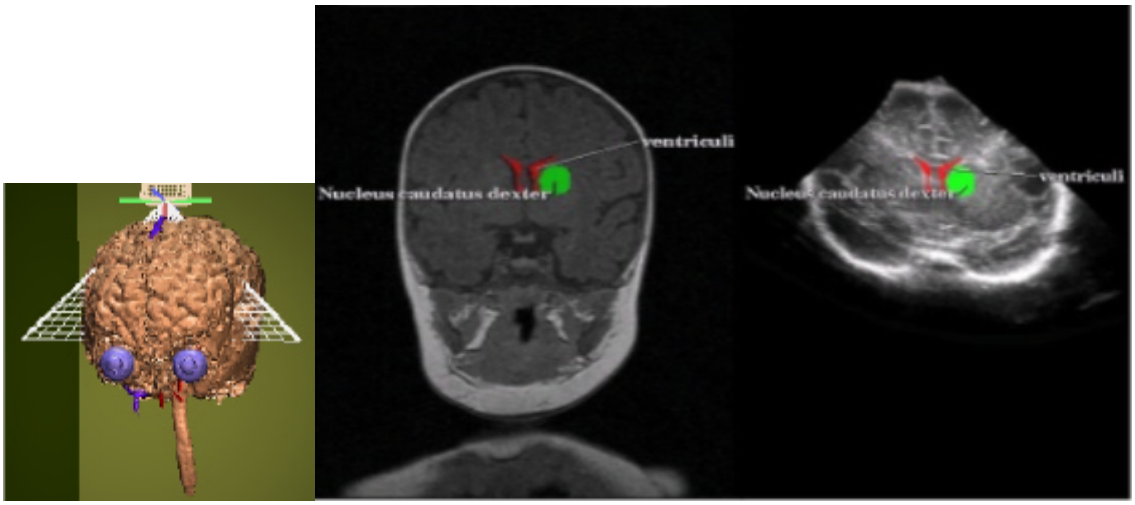
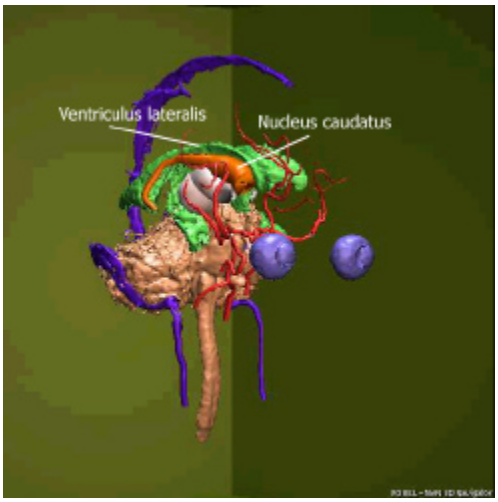
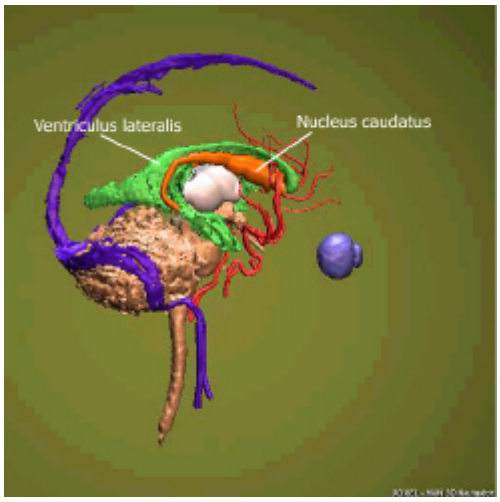


Abbildung 4.9: *Die gleiche Schnittbildeinstellung aus dem in dieser Arbeit erstellten Modell, diesmal mit Hervorhebung von anatomischen Strukturen. Außerdem können per Mausklick die anatomischen Namen der dargestellten Strukturen eingeblendet werden.*

5. Anwendungen

Der in dieser Arbeit erstellte interaktive Atlas richtet sich in erster Linie an Studenten und junge Ärzte, die eine bessere Vorstellung von der Anatomie des Säuglingsgehirns erhalten wollen. Die Anatomie des Gehirns zu verstehen ist für jeden angehenden Mediziner eine schwierige Aufgabe. Sich die räumliche Anordnung der zahlreichen Hirnteile vorzustellen, die auf dichtestem Raum aufeinander, nebeneinander und ineinander verschachtelt gelegen sind, ist dabei wahrscheinlich am schwierigsten. Häufig kann nur auf traditionelle zweidimensionale Anatomieatlanten mit „flacher" Darstellung des Gehirns zurückgegriffen werden. Zum Beispiel kann die Form des Seitenventrikels, der den Hauptwachstumsrichtungen des Gehirns nach vorn, hinten und unten folgt, anhand des hier vorgestellten Modells sehr gut vermittelt werden. Auch die räumliche Beziehung von Seitenventrikel (Ventriculus lateralis) und Schweifkern (Nucleus caudatus), der dem Seitenventrikel eng anliegt, kann mit Hilfe dieses Modells, welches das Gehirn dreidimensional, also räumlich darstellt, besser verstanden werden. Das Modell kann beliebig gedreht werden, um die Strukturen aus verschiedenen Blickwinkeln betrachten zu können und so ein besseres Verständnis für die räumliche Lage zu vermitteln, wie Abbildung 5.1 zeigt.
Beim Säuglingsgehirn kommt erschwerend hinzu, dass alle Strukturen im Vergleich zum Gehirn des Erwachsenen erheblich kleiner und feiner sind oder sich komplett vom Gehirn des Erwachsenen unterscheiden. Das in dieser Arbeit erstellte Modell bietet dem Benutzer die Möglichkeit, alle für die Ultraschalluntersuchung wesentlichen Hirnteile und ihre räumliche Beziehung untereinander zu betrachten.
Der Benutzer kann die Anatomie mit Hilfe der virtuellen Szenen erkunden. Diese virtuellen Szenen werden mit dem Programm VOXEL-MAN 3D-Navigator geöffnet. Der Benutzer hat die Möglichkeit, dass Modell in alle Richtungen zu drehen oder einzelne Objekte zu entfernen, um hinter dem Objekt gelegene Strukturen sichtbar zu machen. Der Benutzer kann jederzeit auf die Wissensbasis zurückgreifen, die mit dem dreidimensionalen Modell verknüpft ist. So kann er z. B. nach einem bestimmten Objekt suchen. Der Benutzer wählt dazu dieses Objekt aus einer Auswahlliste aus. Das Modell wird nun automatisch in diejenige Position gedreht, in der das gewünschte Objekt am besten sichtbar ist.





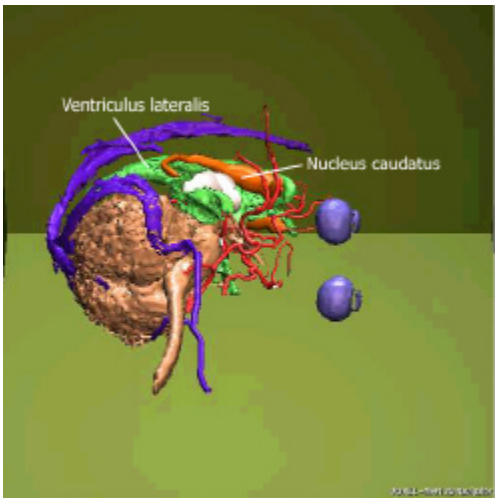


Abbildung 5.1*: Die räumliche Lage und Beziehung von Ventriculus lateralis (Seitenventrikel) und Nucleus caudatus (Schweifkern) kann anhand des entwickelten dreidimensionalen Modells sehr gut vermittelt werden.*
Es kann beliebig gedreht werden, damit die Strukturen aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet werden können.

Gleichzeitig kann das gewählte Objekt auf Wunsch mit seiner anatomischen Bezeichnung versehen werden. Objekte können vom Benutzer auch unterschiedlich eingefärbt werden, um sehr nah beieinander liegende Hirnteile besser voneinander unterscheiden zu können.
Das tiefe Verständnis des Normalbefundes, d.h. die Vorstellung zu besitzen, wie ein gesundes, der Altersnorm entsprechenden Gehirn aussieht, ist für den Mediziner die Voraussetzung, um durch Krankheiten oder Missbildungen hervorgerufene Veränderungen zu erkennen.
Zu nennen wären hier unter anderem:

- Hydrocephalus (Wasserkopf), der zu einer Erweiterung des Ventrikelsystems (Hirnkammern, die das Hirnwasser (Liquor) transportieren) und zur Deformation des kindlichen Schädels führen kann
- Entzündungen wie z. B. die Hirnhautentzündung (Meningitis)
- gutartige und bösartige Raumforderungen (Tumore)
- intrakranielle (im Schädelinneren gelegene) Blutungen
- Entwicklungsstörungen, die zu Hirnmissbildungen führen wie z. B. die Holoprosencephalie (Entwicklungsstörung des Vorderhirns)

Gleichzeitig bietet das in dieser Arbeit erstellte dreidimensionale Modell die Möglichkeit, dem interessierten Laien medizinische Sachverhalte und Zusammenhänge besser vermitteln zu können als dies ein Buch könnte. So kann z. B. ein Kinderarzt den Angehörigen eines Patienten bei dem Verdacht auf eine Erweiterung der Hirnkammern (Hydrocephalus) mit Hilfe des hier vorgestellten Modells zeigen, welche Gehirnregion untersucht werden soll und welche Gehirnteile von einer Krankheit betroffen sein könnten.

Der zweite wesentliche Bestandteil dieser Arbeit ist die virtuelle Ultraschalluntersuchung. Die virtuelle Ultraschalluntersuchung bietet dem wenig erfahrenen Mediziner die Möglichkeit zum Training dieser Untersuchungstechnik. Das virtuelle Untersuchungstraining steht unabhängig von räumlichen und zeitlichen Umständen jederzeit zur Verfügung. Im klinischen Alltag besteht die Möglichkeit zum Erlernen der Kunst der Ultraschalluntersuchung nämlich häufig nur dann, wenn ein Patient von einem erfahrenen Kinderarzt untersucht wird und der in der Ausbildung befindliche Mediziner bei dieser Untersuchung anwesend sein kann. In der Realität kommt es außerdem häufig vor, dass die kindlichen Patienten nach kurzer Zeit unruhig werden, was die Untersuchung durch Kopfbewegungen des Patienten erheblich erschwert.

Der in der Sonographie wenig erfahrene Benutzer hat beim Training mit dem hier vorgestellten Modell immer die Möglichkeit, einen virtuellen „Tutor“ hinzuzuziehen. Dies wird dadurch erreicht, dass die wesentlichen Strukturen auch im Ultraschallbild farblich hervorgehoben und mit ihrer anatomischen Bezeichnung versehen werden können. So werden für den Anfänger in dem im ersten Eindruck durch Bildrauschen, schräge Betrachtungswinkel und niedrige Auflösung chaotisch wirkenden Ultraschallbild Umrisse der Hirnteile und ihre räumlichen Zusammenhänge erkennbar (siehe Abbildung 5.2)

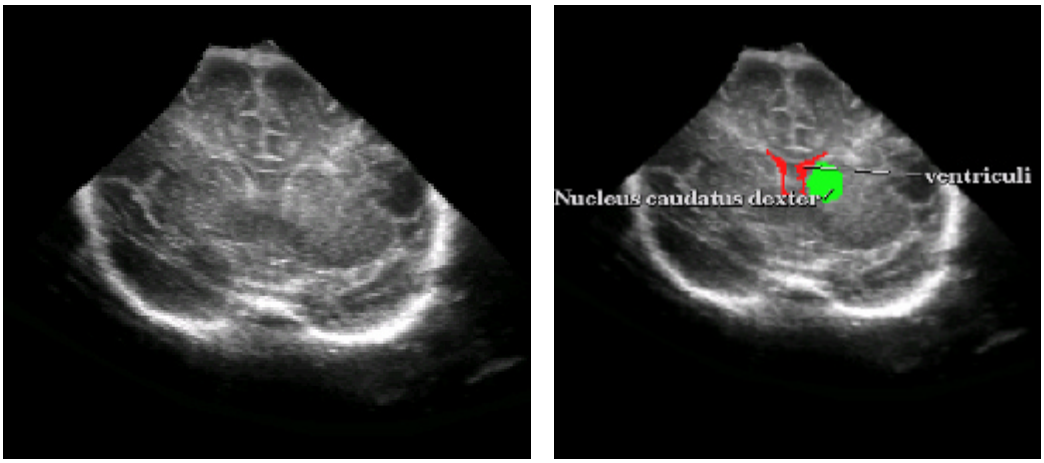


Abbildung 5.2: Der in der Sonographie wenig erfahrene Benutzer hat beim Training mit dem in dieser Arbeit vorgestellten Modell immer die Möglichkeit, die wesentlichen Strukturen im Ultraschallbild anzuklicken. Diese werden daraufhin farblich hervorgehoben und mit ihrer anatomischen Bezeichnung versehen.

Zudem kann die virtuelle Ultraschalluntersuchung von Lehrenden als Werkzeug z. B. im Studentenunterricht eingesetzt werden. Anhand der dynamisch dargestellten Ultraschallbilder kann den Lernenden die Ultraschalluntersuchung sehr viel realistischer vermittelt werden, als dies anhand von statischen Ultraschallbildausdrucken oder mit Ultraschallatlanten möglich ist.
Der Benutzer bewegt z. B. in der Simulation des coronaren Untersuchungsganges eine virtuelle Ultraschallsonde mit der Maus. Das Modell stellt dann je nach Stellung des Ultraschallkopfes das resultierende Ultraschallschnittbild und daneben das der Untersuchungsschicht exakt entsprechende Magnetresonanztomographie (MRT)-Schnittbild dar. Die Ultraschallsonde kann dabei in dieser virtuellen Szene in zwei Freiheitsgraden bewegt werden. So kann die Ultraschallsonde nach vorn und hinten um die horizontale Achse und nach links und rechts um die vertikale Achse geschwenkt werden. Die Objekte können sowohl im Ultraschallschnitt als auch im MRT-Schnittbild mit der Maus angeklickt und beschriftet werden. Durch die gleichzeitige Darstellung von MRT- und Ultraschallschnittbild nebeneinander wird die Neugeborenanatomie gerade für Anfänger leichter verständlich, da ein MRT-Bild eine leichtere Orientierung als ein Ultraschallbild erlaubt. Außerdem gibt es eine Übersichtsaufnahme des gesamten Schädels, auf dem die relative Position der Ultraschallsonde dargestellt wird. Auch in der Ultraschallsimulation kann die integrierte Wissensbasis dazu genutzt werden, nach bestimmten Objekten zu suchen. Das Modell zeigt dann automatisch den Schnitt, auf dem das Objekt am besten sichtbar ist.
Die Datensätze können von erfahrenen Benutzern natürlich auch mit der Visualisierungs-Software VOXEL-MAN betrachtet und bearbeitet werden. So können z. B. spezielle Einstellungen vorgenommen werden, um ein ganz bestimmtes Hirnteil aus einem speziellen Blickwinkel betrachten zu können. Außerdem können weitere virtuelle Szenen erstellt werden, der Kreativität sind dabei kaum Grenzen gesetzt. Auf diese Weise können z. B. für den Studentenunterricht weitere interessante Themengebiete mit einem eigens berechneten Film behandelt werden.

6. Diskussion

In dieser Arbeit wurde ein interaktiver Atlas erstellt, der als Übungs- und Lernhilfe für die Ultraschalluntersuchung des Säuglingsschädels dient.
Dazu wurde zunächst die Problemstellung beim Erlernen der pädiatrischen Ultraschalluntersuchung erfasst und anschließend eine Zielsetzung zum Lösen dieser Probleme entwickelt.
Dann wurde der vielfältige und schwer zu überblickende Stand der Forschung untersucht und hinsichtlich der drei großen Gruppen von Lernmitteln für die Ultraschalldiagnostik gegliedert: Lehrbücher und Anatomieatlanten, elektronische Bücher sowie Multimediaprogramme.
Mit Hilfe moderner Bildverarbeitungsmethoden wurde der interaktive Atlas mit der Autorensoftware VOXEL-MAN erstellt. Als Ergebnisse herauszustellen sind insbesondere:

- Die komplette Segmentation der MRT-Volumen-Aufnahmen eines Säuglingsschädels mit seinen sehr feinen Strukturen. Außerdem wurden die Blutgefäßen und wichtige Nervengebiete modelliert. Auf diese Weise können die wichtigsten für eine Ultraschalluntersuchung relevanten Strukturen dargestellt werden.
- Die Zusammenführung (Registrierung) des Ultraschall- mit den MRT-Datensätzen. Auf diese Weise ist es möglich, die im Ultraschallbild und MRT-Bild dargestellten Strukturen interaktiv abzufragen.
- Die Benennung der Strukturen in einer Wissensbasis.
- Die Erstellung von interaktiven Simulationssequenzen, die Schnittbilder in allen Ebenen – auch in schräg geführten Schnittebenen - darstellen können.
- Als Datenmaterial wurden ausschließlich die Aufnahmen von Säuglingen verwendet. Bisher mussten bei der Interpretation von radiologischen Bildern häufig Bücher und Programme als Referenz hinzugezogen werden, welche die Anatomie des Erwachsenen darstellen.

Der Lernende kann ohne Zeitdruck und ohne erschwerte Untersuchungsbedingungen (Luftüberlagerung, unruhiges Kind) die Ultraschalluntersuchung üben sowie ein tieferes Verständnis für die Anatomie des Kindes gewinnen.
Die Interaktion mit dem Benutzer und die nahezu unbegrenzten Möglichkeiten beim Anzeigen von unterschiedlichen Schnittebenen und dreidimensionalen Ansichten heben das Modell von herkömmlichen Büchern und anderen computergenerierten Modellen ab. Abbildung 6.1 zeigt noch einmal eine Sequenz, in der Bild für Bild die äußeren Strukturen des Modells entfernt werden, um die tiefer gelegenen Hirnteile sichtbar zu machen. Einige Ergebnisse dieser Arbeit wurden schon in Arkhurst et al. [2001] vorgestellt.

Abbildung 6.1: *Sequenz aus dem in dieser Arbeit vorgestellten Modell, in der Bild für Bild die äußeren Strukturen entfernt werden, um die tiefer gelegenen Hirnteile sichtbar zu machen* .

6.1. Ausblick

Bei der Simulation einer Ultraschalluntersuchung werden MRT- und Ultraschallschnittbild nebeneinander präsentiert. Da die dazugehörenden Datensätze von unterschiedlichen Patienten stammen, musste der Ultraschalldatensatz auf den MRT-Datensatz registriert werden (siehe Kapitel Methoden). Da eine Registrierung nie eine vollständige Übereinstimmung der Datensätze herstellen kann, gibt es auch bei den verwendeten Datensätzen Regionen, die sehr gut miteinander korrelieren und andere Regionen, in denen die Patientendatensätze teilweise Unterschiede in Größe und Lage der Organe aufweisen. Für viele Hirnstrukturen wie z. B. das Kleinhirn oder die Vorderhörner des Seitenventrikels funktioniert die Registrierung so gut, dass die dargestellten Strukturen im Ultraschalldatensatz mit dem MRT-Datensatz orientierend abgefragt werden können und dem Benutzer bei der Interpretation des Ultraschallbildes

eine große Hilfe sind. Es wäre für die Zukunft wünschenswert, dass die verschiedenen Bildmodalitäten von einem einzigen Patienten gewonnen werden. Auf diese Weise könnte eine noch bessere Korrelation zwischen den Datensätzen erreicht werden.
Weiterhin wäre es wünschenswert, noch besser aufgelöste Datensätze als Ausgangsmaterial für die Segmentation verwenden zu können. Solche Datensätze werden in den nächsten Jahren durch die enormen Fortschritte in der medizinischen Bildgebung sicherlich erhältlich sein.
Eine Möglichkeit, den Realitätsgrad der simulierten Untersuchung zu erhöhen, wäre die Steuerung des Modells mit einer Modell-Ultraschallsonde, die Bewegungen und die räumliche Lage an den Computer übermitteln kann. Diese Modellsonde könnte an einem Modell des Kopfes des Säuglings geführt werden. Hier ergeben sich interessante Kombinationen aus bereits vorliegenden Trainingssystemen [Grunst et al., 1995] und den in dieser Arbeit entwickelten Methoden.

7. Zusammenfassung

Die Sonographie ist in der Kinderradiologie die Untersuchungsmethode der Wahl: Sie kann durch den Einsatz mobiler Geräte zeitlich und räumlich völlig flexibel durchgeführt werden. Die Untersuchung des Schädels und des Gehirns eines Säuglings wird dabei ohne den Einsatz von potenziell gesundheitsschädlicher Röntgenstrahlung durchgeführt. Für den ungeübten Betrachter ist es allerdings sehr schwierig, Ultraschallbilder richtig zu interpretieren. Dies hat verschiedene Gründe: Ultraschallbilder zeigen Artefakte wie Rauschen oder Schallschatten und besitzen im Vergleich zu vielen anderen Aufnahmeverfahren eine geringere Auflösung. Außerdem sind die Zugangswege zum Untersuchungsgebiet begrenzt, z. B. auf die Große Fontanelle. Die Bildebene liegt deshalb oft beliebig im Raum, was die Orientierung sehr erschwert. Die Säuglingsanatomie unterscheidet sich zudem erheblich von der des Erwachsenen.

Zur Interpretationshilfe herangezogene Radiologie- und Anatomieatlanten oder Multimediaprogramme mit vorberechneten Bildsequenzen bieten wenig Hilfe bei beliebig im Raum liegenden Bildebenen und beschränken sich außerdem häufig auf die Erwachsenenanatomie.

In dieser Arbeit wurde daher ein computerbasierter, interaktiver Atlas erstellt, welcher als Übungs- und Lernhilfe für die Ultraschalldiagnostik dienen soll und besonderen Wert auf die Darstellung von beliebig im Raum liegenden Schnittbildebenen legt.

Hierzu wurde ein Magnetresonanztomographie (MRT)-Volumendatensatz mit dem Autorensystem VOXEL-MAN und modernen Bildverarbeitungsmethoden wie z. B. Segmentation und Modellierung bearbeitet. Der MRT-Datensatz wurde daraufhin mit einem passenden Ultraschall-Volumendatensatz zusammengeführt (Registrierung).

Das Ergebnis dieser Arbeit ist ein detaillierter interaktiver Atlas mit einem räumlichen Modell des Säuglingsschädels, welcher alle für die Ultraschalluntersuchung wesentlichen Gehirnteile umfasst. Diese wurden in einer Wissensbasis klassifiziert und können interaktiv abgefragt werden. Auf Basis des erstellten Modells wurden intelligente Filmsequenzen erstellt, in denen die Ultraschalluntersuchung des Schädels in Echtzeit simuliert wird. In weiteren Filmsequenzen wird durch räumliche Darstellung des Schädels und Gehirns ein besseres Verständnis für die Säuglingsanatomie vermittelt.

Der interaktive Atlas soll dabei helfen, die Kunst der Ultraschalluntersuchung zu erlernen und kann dazu im Selbststudium oder im Studentenunterricht genutzt werden.

Literaturverzeichnis

3B Scientific (2002) NEUROtrainer. CD-ROM, Hamburg, 2002

Arkhurst et al. (2001) William Arkhurst, Andreas Pommert, Ernst Richter, Hans Frederking, Sang-Il Kim, Rainer Schubert, Karl Heinz Höhne: A virtual reality training system for pediatric sonography. In Heinz E. Lemke et al. (eds.): Computer Assisted Radiology and Surgery, Proc. CARS 2001, Excerpta Medica International Congress Series 1230, Elsevier, 453-457, Amsterdam, 2001

Banholzer (1996) Peter Banholzer: Abdominelle Sonographie, interaktiver Atlas. Urban & Schwarzenberg-Verlag, CD-ROM, München,1996

Benz-Bohm (1997) Gabriele Benz-Bohm: Kinderradiologie. Thieme-Verlag, Stuttgart 1997

Berrington und Darby (2004) Amy Berrington de González, Sarah Darby: Risk of cancer from diagnostic X-rays: estimates for the UK and 14 other countries. Lancet ; 363: 345–51, Elsevier, Amsterdam, 2004

Cedzich und Wießner (2003) Cedzich , C., Wießner, A.:
Die Behandlung des kindlichen Hydrocephalus mit hydrostatischen Ventilen.
Zentralblatt für Neurochirurgie, 02, Thieme–Verlag, Stuttgart, 2003

Dittrich et al.(2001); Dittrich, M.; Franz, I.; Gutjahr, P.; Faber, J.; Schumacher, R.:
Beziehung zwischen Kopfumfang und sonographischer Morphometrie der Ventrikelstrukturen im Neugeborenen- und Säuglingsalter.
Ultraschall in der Medizin; 05, Thieme-Verlag, Stuttgart 2001

ECMUS (2003) European Committee for Medical Ultrasound (ECMUS): Clinical Safety Statement for Diagnostic Ultrasound. Newsletter Vol. 17 Issue 1, Copenhagen, 2003

Grunst et al. (1995) Gernoth Grunst, Thorsten Fox, Klaus-Jürgen Quast, Dierk A. Redel: Szenische Enablingsysteme-Trainingsumgebungen in der Echokardiographie. In Glowalla et al., editors, Auffahrt zum Information Highway, Springer-Verlag, Heidelberg Berlin,1995

Höhne et al. (1990) Karl-Heinz Höhne, Michael Bomans, Andreas Pommert, Martin Riemer, Carsten Schiers, Ulf Tiede, Gunnar Wiebecke: 3D-visualization of tomographic volume data using the generalized voxel-model. Visual Comput., 6(1):28–36, Springer-Verlag, Heidelberg Berlin, 1990

Höhne et al. (1995) Karl-Heinz Höhne, Bernhard Pflesser, Andreas Pommert, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Rainer Schubert, Ulf Tiede: A new representation of knowledge concerning human anatomy and function. Nature Med., 1(6):506–511, New York, 1995

Höhne et al. (2001) Karl Heinz Höhne, Andreas Petersik, Bernhard Pflesser, Andreas Pommert, Kay Priesmeyer, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Rainer Schubert, Ulf Tiede, Markus Urban, Hans Frederking, Mike Lowndes, John Morris: VOXEL-MAN

3D Navigator: Brain and Skull. Regional, Functional and Radiological Anatomy. Springer-Verlag Electronic Media (2 CD-ROMs, ISBN 3-540-14910-4), Heidelberg, 2001

Höhne et al. (2003) Karl Heinz Höhne, Bernhard Pflesser, Andreas Pommert, Kay Priesmeyer, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Rainer Schubert, Ulf Tiede, Hans Frederking, Sebastian Gehrmann, Stefan Noster, Udo Schumacher: VOXEL-MAN 3D Navigator: Inner Organs. Regional, Systemic and Radiological Anatomy. Innere Organe. Topographische, Systematische und Radiologische Anatomie. Springer-Verlag Electronic Media (DVD-ROM, ISBN 3-540-40069-9), Heidelberg, 2003

Hofmann et al. (1996) Volker Hofmann, Peter Fr Deeg, Karl-Heinz Deeg u. a.: Ultraschalldiagnostik in Pädiatrie und Kinderchirurgie. 2. Auflage, Thieme-Verlag, Stuttgart, 1996

Kim et al. (1999) Sang-Il Kim, Karl Heinz Höhne, Rainer Schubert, Ernst Richter: Neue interaktive 3D-Lernmethoden auf dem Gebiet der pädiatrischen Sonographie auf PC-Basis. Der Radiologe, 39:734, Springer-Verlag, Heidelberg, 1999

Krämer (1998) Henning Krämer: Interaktiver volumenbasierter 3D Atlas eines menschlichen Föten auf der Basis einer Kernspintomographie. Doktorarbeit, Fachbereich Medizin, Universität Hamburg, 1998

Leidig und Grunert (1998) Eberhard Leidig, Detlef Grunert: Pädiatrische Ultraschalldiagnostik. 3D-Sonographie: Trainings-CD-ROM, Landsberg, 1998

Luft und Drews (1997) Andreas Luft, Ulrich Drews: Neurotutor. CD-ROM, Thieme-Verlag, Stuttgart, 1997

Möller und Reif (1997) Torsten Möller, Emil Reif: Taschenatlas der Schnittbildanatomie (CT und KST). Georg Thieme-Verlag, 2. Ausgabe, Stuttgart, 1997

Netter (1996) Frank Netter: Farbatlanten der Medizin: Bd. 1-9. Thieme-Verlag, Stuttgart New-York, 1996

Pommert et al. (1992) Andreas Pommert, Michael Bomans, Karl Heinz Höhne: Volume visualization in magnetic resonance angiography. IEEE Comput. Graphics Appl., 12(5):12–13, Washington, 1992

Pommert et al. (1994) Andreas Pommert, Rainer Schubert, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Ulf Tiede, Karl Heinz Höhne: Modellierung anatomischen Wissens in einem interaktiven dreidimensionalen Atlas. In Englert, G. et al., editors, Proc. Visual Computing: Integration und Harmonisierung von Bildanalyse und -Synthese, pages 1–14. Zentrum für Graphische Datenverarbeitung, Darmstadt, 1994

Pommert et al. (2001) Andreas Pommert, Karl Heinz Höhne, Bernhard Pflesser, Ernst Richter, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Rainer Schubert, Udo Schumacher, Ulf Tiede: Creating a high-resolution spatial/symbolic model of the inner organs based on the Visible Human. Medical Image Analysis 5, 3, 221-228, Elsevier, Amsterdam, 2001

Putz und Pabst (1993) Reinhard Putz, Reinhard Pabst: Atlas der Anatomie des

Menschen. Band 1+2, Urban & Schwarzenberg-Verlag, 20. Ausgabe, München, 1993

Putz und Pabst (1997) Reinhard Putz, Reinhard Pabst: Sobotta-Atlas der Anatomie des Menschen. CD-ROM. Urban & Schwarzenberg-Verlag, München, 1997

Richter und Lierse (1990) Ernst Richter, Werner Lierse: Radiologische Anatomie des Neugeborenen für Röntgen, Sonographie, CT und MRI. Urban & Schwarzenberg-Verlag, München, 1990

Richter et al. (1994) Ernst Richter, Henning Krämer, Werner Lierse, Rainer Maas, Karl Heinz Höhne: Visualization of neonatal anatomy and pathology with a new computerized three-dimensional model as a basis for teaching, diagnosis and therapy. Acta Anatomica, 150(1):75–79, Basel, 1994

Richter et al. (1998) Ernst Richter, Sang-Il Kim, Rainer Schubert, Rainer Maas, Karl Heinz Höhne: How to teach pediatric imaging anatomy - an old and new challenge. In Theodoropoulos, B. J., editor, Lectures, 35th Congress of the European Society of Pediatric Radiology, pages 43–45, Rhodos, 1998

Romrell et al. (1996) Lynn J. Romrell et al. : Der menschliche Körper (Schnittanatomie und Tomographie). Ullstein-Mosby-Verlag, 2. Ausgabe. Berlin Wiesbaden, 1996

Schiemann et al. (1992) Thomas Schiemann, Michael Bomans, Ulf Tiede, Karl Heinz Höhne: Interactive 3D segmentation of MRI volume data. In Society of Magnetic Resonance in Medicine: Book of Abstracts, Vol. 2, page 4203, Berlin, 1992

Schubert et al. (1993) Rainer Schubert, Karl Heinz Höhne, Andreas Pommert, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Ulf Tiede: Spatial knowledge representation for visualization of human anatomy and function. In Barrett, H. H. and Gmitro, A. F., editors, Information Processing in Medical Imaging, Proc. IPMI ’93, volume 687 of Lecture Notes in Computer Science, pages 168–181. Springer-Verlag, Berlin, 1993

Schubert et al. (1999) Rainer Schubert, Bernhard Pflesser, Andreas Pommert, Kay Priesmeyer, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Ulf Tiede, Paul Steiner, Karl Heinz Höhne: Interactive volume visualization using “intelligent movies”. In J. D. Westwood, H. M. Hoffman, R. A. Robb, and D. Stredney, editors, Medicine meets Virtual Reality, Proc. MMVR ’99, volume 62 of Health Technology and Informatics, pages 321–327. IOS Press, Amsterdam, 1999.

Schuster und Färber (1996) Schuster, W.; Färber, D. (Hrsg.): Kinderradiologie Bildgebende Diagnostik. 2. erg. Aufl., Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 1996

Tiede (1999) Ulf Tiede: Realistische 3D-Visualisierung multiattributierter und multiparametrischer Volumendaten. Doktorarbeit, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg, 1999

Umgelter (1997) A. Umgelter: Dreidimensionale Sonographie: Grundlagen, experimentelle Untersuchungen zur planimetrischen Volumetrie in vitro, sowie erste in vivo Anwendungen. Doktorarbeit, Fachbereich Medizin, Universität München, 1997

Anhang A

Abkürzungsverzeichnis

CD-ROM 57, 58, 59
Compact Disc Read Only Memory

CT 1, 2, 7, 19, 58, 59
Computertomographie

IMI 13, 24, 35
Institut für Medizinische Informatik

MHz 16, 22
Megahertz

MRT i, 2, 5, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 22, 23, 24, 25, 26, 30, 31, 33, 34, 35, 37, 40, 41, 42, 45, 46, 50, 51, 52, 55
Magnetresonanztomographie

Anhang B

Danksagung

Als erstes möchte ich mich bei Prof. Dr. Karl-Heinz Höhne für die Bereitstellung des Themas und für die Betreuung meiner Doktorarbeit bedanken. Die am Institut für Medizinische Informatik entwickelten Methoden zur 3D-Visualisierung und Filmsequenzerstellung sind die Grundlagen für das in meiner Arbeit vorgestellte interaktive Modell.

Besonders bedanken möchte ich mich bei Prof. Dr. Ernst Richter aus der Kinderradiologie des Universitätsklinikums Eppendorf. Er stellte das Datenmaterial zur Verfügung und hat mich bei der Erstellung und Verbesserung des Modells mit seiner langjährigen klinischen Erfahrung unterstützt.

Allen Mitarbeitern des Instituts für Medizinische Informatik danke ich für Ihre Unterstützung. Ganz besonders herzlich möchte ich mich bei Dr. Andreas Pommert bedanken, dem Betreuer meiner Arbeit. Er hat mich mit Geduld und großem Fachwissen langjährig bei der Erstellung dieser Arbeit begleitet. Bedanken möchte ich mich auch bei Martin Riemer und Dr. Ulf Tiede, bei Silke Hacker und Hans-Christian Frederking sowie bei Dr. Sang-Il Kim.

Meinen Eltern und meinen Geschwistern möchte ich danken für ihre Unterstützung und den großen Rückhalt, den sie für mich darstellen.

Anhang C

Lebenslauf

- 20.05.1974 Geburt in Kiel
- 1980-1984 Besuch der Fehrs-Grundschule in Itzehoe
- 1984-1993 Besuch des Gymnasiums Auguste-Viktoria-Schule in Itzehoe
- 6/1993 Abitur an der Auguste-Viktoria-Schule in Itzehoe
- 1993-1994 Zivildienst in der Altenpflege im Haus am Bornbusch in Itzehoe
- 1995-2001 Studium der Humanmedizin am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
- 1998-1999 Aufnahme in das Microsoft Studenten-Förderprogramm und Erwerb des Zertifikates „Microsoft Certified Systems Engineer“
- 1999-heute Freier Mitarbeiter im Bereich Systemadministration und User-Helpdesk für die hanseConcept GmbH und arvato systems GmbH (Bertelsmann AG)
- 11/2001 III. Staatsexamen am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
- 2002-heute Studium der Medizinischen Informatik an der Technischen Fachhochschule Berlin

Anhang D

EIDESSTATTLICHE VERSICHERUNG:

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

William Albert Arkhurst