

Aus dem Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin,

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

Modell eines neuen interaktiven Lern- und Lehrprogramms auf dem Gebiet der pädiatrischen Sonographie in Internet-basierter Technologie

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

dem Fachbereich Medizin der Universität Hamburg vorgelegt von

Sang-Il Kim

geboren in Seoul

Hamburg, 2002

Angenommen von dem Fachbereich Medizin
der Universität Hamburg am 13. Mai 2002

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs
Medizin der Universität Hamburg

Dekan: Prof. Dr. C. Wagener

Referent: Prof. Dr. H. Höhne

Koreferent: Prof. Dr. E. Richter

Zusammenfassung

Ein häufiges Problem beim Erlernen der Ultraschalldiagnostik ist die Schwierigkeit, die Lage der zweidimensionalen Schnittbilder im dreidimensionalen Raum zu verstehen. Fragen, die sich in diesem Zusammenhang oft ergeben, sind :

- *Welche Haltung und Position des Schallkopfes führt zu dieser Schicht ?*
- *Welche anatomischen Strukturen sind abgebildet ?*
- *Wie stelle ich die Strukturen dar, die mich interessieren ?*

In dieser Arbeit wird eine Methode entwickelt um diese Fragen beantworten zu können. Dabei werden moderne Methoden der digitalen Bildverarbeitung benutzt. Der Lösungsansatz besteht in der Erzeugung simulationsähnlicher Filmsequenzen, die interaktiv steuerbar sind.

Hierfür werden aus verschiedensten Datensätzen mithilfe des 3D-Atlas-Programms **VOXEL-MAN** die ultraschall-relevanten Schnittansichten extrahiert und zu Filmsequenzen verarbeitet.

Außer dem Ultraschalldatensatz werden auch andere Modalitäten bei der Erzeugung der Filmsequenzen verwendet, z.B. MRT- und Kryotom-Datensätze.

Diese interaktiven Simulationssequenzen werden ergänzt mit erklärenden Texten und interaktiv explorierbaren Bildern. Zur Verknüpfung der verschiedenen erzeugten multimedialen Elemente wird die Browser-Technologie des Internets verwendet.

In dem so erstellten Programm werden exemplarisch die Regionen Kopf und Abdomen dargestellt.

Eine interaktive Menüführung und eine einfache Programmstruktur erleichtern dabei die Benutzbarkeit des Programms.

Als Ergebnis steht ein interaktives multimediales Lehr- und Lernprogramm zur Verfügung, welches eine Einführung in die pädiatrische Ultraschall-Untersuchung des Kopfes und des Abdomens bietet. Das Programm heißt **PED-SONO**.

Die Anfangs gestellten Fragen werden durch die interaktiven Simulationssequenzen zum Teil beantwortet. Durch die direkte Gegenüberstellung von Ultraschallbild und 3D-Modell ist eine Zuordnung von Lage und Position des Schallkopfes zu dem angezeigten Ultraschallbild nun möglich.

Die zusätzliche Anzeige von MRT- oder Kryotom-Schnitten als Referenz erleichtert das Erkennen der anatomischen Strukturen im Ultraschallbild.

Die im Lehrprogramm integrierten interaktiven explorierbaren Einzelbildern helfen außerdem die gesehenen Strukturen zu benennen, wobei auch Bilder mit krankhaften Veränderungen abrufbar sind. Diese zeigen die klinische Relevanz der erlernten Ultraschall-Anatomie und ihre Anwendbarkeit bei der Diagnosefindung.

Die Verwendung der Browser-Technologie ermöglicht zusätzlich einen einfachen Aus- und Umbau des Programms (z.B. Einbindung neuer Simulationssequenzen) sowie einen einfachen Einsatz des Programms auf zahlreichen Computer-Plattformen.

Schließlich haben Simulations-Sequenzen, die in dieser Arbeit entwickelt wurden, Eingang gefunden in das Programm **VOXEL-MAN 3D-Navigator** [VOXEL-MAN 3D-Navigator, 2001], das als Lehr- und Lernwerkzeug inzwischen eine große Verbreitung erreicht hat.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
1.1	Problemstellung	4
1.2	Zielsetzung	6
2	Stand der Wissenschaft	8
3	Methoden	15
3.1	3D-Visualisierung	18
3.2	Erzeugung ultraschalltypischer Schnitte	21
3.3	Erstellung interaktiver Simulationssequenzen	23
3.4	Segmentation	28
3.5	Intelligente Volumen	29
3.6	interaktive Elemente im Internet	32
3.6.1	interaktive Menustrukturen	32
3.6.2	interaktiv explorierbare Bilder	35
3.6.3	interaktiv steuerbare Videosequenzen	36
4	Material	38
4.1	Volumendatensätze	39
4.1.1	experimentelle Datensätze	39
4.1.2	Patientendatensätze	42
4.2	Einzelbilder und Videosequenzen	47

5	Ergebnisse	48
5.1	interaktiv steuerbare Sequenzen	48
5.2	interaktiv explorierbare Bilder	53
5.3	Programm PED-SONO	55
6	Anwendungen	59
6.1	VOXEL-MAN 3D-Navigator	65
7	Diskussion	67
8	Schlußfolgerungen	73
8.1	Ausblick	74
A	CD-ROM	76
	Literaturverzeichnis	
	Danksagung	
	Lebenslauf	
	Erklärung	

Kapitel 1

Einleitung

Die Ultraschalldiagnostik¹ hat sich in den letzten Jahren zu einer der am meisten benutzten bildgebenden Verfahren entwickelt. Sie ist heutzutage nicht mehr aus dem klinischen Alltag wegzudenken. Insbesondere die rasante technische Entwicklung auf diesem Gebiet mit höheren Auflösungen und besserer Bildqualität sowie der guten Funktionsdiagnostik (z.B. Blutflußanalyse durch Dopplertechnik) haben ihr zu großem Durchbruch in der klinischen Anwendung verholfen. Die wichtigsten Vorteile gegenüber anderen bildgebenden Verfahren sind:

1. schnelle Verfügbarkeit (Geräte sind mobil, spezielle Abschirmung ist nicht notwendig)
2. keine Strahlenbelastung, Fehlen jeglicher Nebenwirkungen (weder für Patient noch Untersucher)
3. kostengünstiger als andere Verfahren (z.B. CT², MRT³, PET⁴), sowohl im Anschaffungspreis als auch im laufenden Betrieb
4. überlagerungsfreie Schichtaufnahmen (keine Überlagerung von Organstrukturen wie beim konventionellen Röntgen)
5. mögliche Bewegungs- und Funktionsdarstellung (z.B. Echokardiogramm⁵ mit Flußmessung)

¹Synonyme : Sonographie oder einfach nur Ultraschall

²CT=Computer-Tomografie, Schichtröntgenverfahren mit Hilfe eines Compters

³MRT=Magnet-Resonanz-Tomografie, Schichtaufnahmeverfahren unter Ausnutzung von Kernspins, ohne Röntgenstrahlen

⁴PET=Positronen-Emissions-Tomografie, Schichtaufnahmeverfahren unter Ausnutzung radioaktiv markierter Substanzen

⁵Echokardiogramm: Ultraschall-Untersuchung des Herzens und der großen Gefäße

Vor allem die Punkte 1, 2 und 5 haben zu einer weiten Verbreitung der Ultraschall-diagnostik im Kindes- und Jugendalter beigetragen. Kein anderes bildgebendes Verfahren wird in der Pädiatrie so universell eingesetzt.

Außer der Lunge und den knöchernen Strukturen gibt es im Prinzip kein Organ, das nicht per Sonographie untersucht werden kann.

In der Kinderheilkunde wird die Sonographie vor allem für die Untersuchung von Kopf/Gehirn, Abdomen, Herz und Hüftgelenken eingesetzt.

Heutzutage machen sogar schon fast alle Ungeborenen die Bekanntschaft mit dem Ultraschall. Die pränatale Vorsorgeuntersuchung in der Geburtshilfe ist mittlerweile zu einer Selbstverständlichkeit geworden. Insbesondere die seit einigen Jahren mögliche 3D-Darstellung des Föten hat für Aufmerksamkeit in der Öffentlichkeit und zu weiteren diagnostischen Möglichkeiten wie der Früherkennung und Darstellung von Fehl- und Mißbildungen geführt [Merz, 1997].

Die Ultraschalldiagnostik eignet sich hervorragend zum Screening sowie auch als unterstützende Untersuchung zum Röntgen oder Schichtbildverfahren (z.B. CT und MRT). Erwähnt sei hier auch die wichtige Rolle in der Nachsorgeuntersuchung (z.B. nach Organtransplantationen oder Ventrikeldrainageeinlagen [Hansen et al., 1996]).

Auf den ersten Blick erscheint die pädiatrische Ultraschalluntersuchung einfach in der Handhabung und einfach zu erlernen. In der Realität jedoch steht der Anfänger zum Teil vor großen Hürden. Auf die konkreten Probleme und die möglichen Lösungsansätze wird nun eingegangen.

1.1 Problemstellung

Die gedankliche Umsetzung der zweidimensionalen Schnittbilder aus dem Ultraschallgerät in die reale 3D-Welt ist für Anfänger eine erste große Hürde. Die überlagerungsfreien Schnittbildverfahren wie CT, MRT und Sonographie erfordern vom Untersucher mehr als nur anatomische Kenntnisse. Erst das Zusammenspiel von räumlichen Vorstellungsvermögen, Erfahrung und Phantasie ermöglicht das schnelle Erfassen der räumlichen Anordnung und Ausdehnung der anatomischen Objekte. Im Gegensatz zu den anderen Verfahren findet man in der Sonographie leider kaum an den Hauptachsen ausgerichtete Schnittbilder, vielmehr handelt es sich überwiegend um schräg im Raum liegende Schnittbilder. Weil in den meisten 'normalen' medizinischen Darstellungen und Atlanten diese schrägen Schnittbilder selten zu finden sind

und daher die Ansichten ungewohnt sind, fällt die anfängliche Orientierung schwer. Ein weiteres Problem stellt die oftmals unscharfe Darstellung der Strukturen auf einem Ultraschallbild dar. Obwohl die Ultraschallgeräte immer besser werden, so sind sie in Bezug auf Auflösung und Schärfe den anderen Schnittbildverfahren weit unterlegen.

Zusätzlich erschwerend kommt bei der pädiatrischen Sonographie hinzu, daß die von den Erwachsenen deutlich verschiedenen anatomischen Verhältnisse und auch andere Untersuchungstechniken (z.B. Ultraschalldiagnostik des Gehirns durch die Fontanellen⁶) ebenfalls sehr ungewohnt sind.

Das vorrangige Problem in der Ultraschalldiagnostik, die Orientierung im Raum, soll anhand eines Beispiels näher dargestellt werden:

Auf Abbildung 1.1 sieht man einen typischen schrägen Subcostalschnitt durch die Leber, erstellt mit einem Sektorschallkopf.

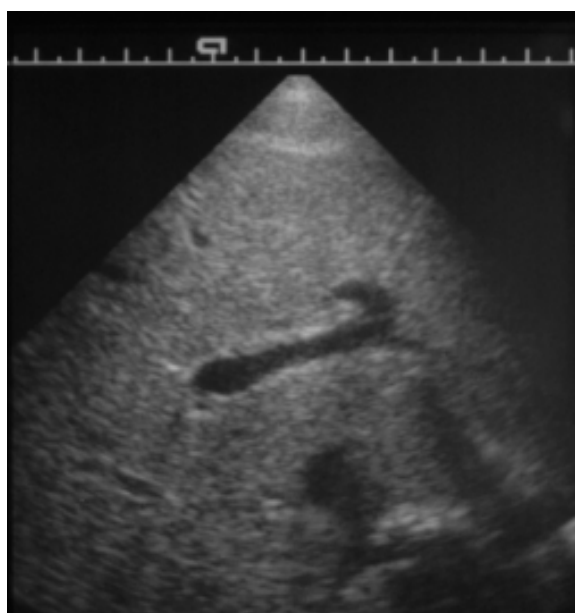


Abbildung 1.1: Typisches Schnittbild aus einer Ultraschallroutine-Untersuchung des Oberbauchs. Für einen erfahrenen Untersucher ist sofort erkennbar, daß es sich bei der schwarzen Struktur in Bumerang-Form um die großen Lebervenen handelt. Ein ungeübter Untersucher dagegen hat große Mühe die relevanten anatomischen Strukturen zu erkennen. Vor allem stellt er sich die Frage: Welche Haltung und Position des Schallkopfes führt zu dieser Schnittansicht ? Hier handelt es sich um einen subcostalen Standardschnitt durch die Leber. Der Schallkopf wird unterhalb des rechten Rippenbogens aufgesetzt und schräg nach oben gerichtet.

⁶natürliche Knochenlücken des Schädeldachs, die sich bis zum 2.Lebensjahr knöchern verschließen

Man erkennt auf dem Schnittbild Gefäßstrukturen und Leberparenchym. Nur ein erfahrener Ultraschalluntersucher weiß sofort die Strukturen in ihrem 3D-Kontext einzuordnen. Einem Ungeübten dagegen fällt die Orientierung wesentlich schwerer, weil er eine solche Perspektive aus den ihm bekannten Anatomie- und Schnittbild-Atlanten nicht kennt. Schräge Schichten wie beim Ultraschall findet er nur in ausgewiesenen Ultraschall-Atlanten (z.B. [Schmidt et al., 1999] oder [Braun et al., 1990]).

Somit bietet sich dem Unerfahrenen anfänglich ein Bild des Chaos. Schon mit der einfachen Orientierung wie re. oder li., oben oder unten gibt es Probleme.

Weitere wichtige Fragen in diesem Zusammenhang sind:

Wo und wie muß der Schallkopf angesetzt werden, damit man ein solches Schnittbild erhält ?

Die ungewohnte Sichtweise erschwert zusätzlich das Erkennen der abgebildeten Strukturen.

Ein einfacher, didaktisch gut aufgebauter Zugang zur Ultraschall-Diagnostik wäre also wünschenswert.

Bisherige Ansätze und Lösungswege sind im Kapitel 2 beschrieben.

1.2 Zielsetzung

Das Hauptziel dieser Arbeit ist ein eigener Lösungsansatz zu den Fragen :

- *Welche Haltung und Position des Schallkopfes führt zu dieser Schicht ?*
- *Welche anatomischen Strukturen sind abgebildet ?*
- *Wie stelle ich die Strukturen dar, die mich interessieren ?*

Dafür soll mit Hilfe neuer Methoden der Computertechnik eine Ultraschalluntersuchung simuliert werden. Hierfür werden interaktive Simulationssequenzen benutzt. Außer den Ultraschallbildern wird dabei immer ein dreidimensionales Referenzmodell mit Darstellung eines Schallkopfmodells mitangezeigt. Damit ist eine Orientierung über Lage und Position des Schallkopfes, zugehörig zu dem gerade angezeigten Ultraschallbild, möglich. Der Anwender soll also virtuell einen Schallkopf bewegen können und dabei die zugehörigen Ultraschallbilder angezeigt bekommen.

Eine zusätzliche Hilfestellung wird durch gleichzeitiges Anzeigen von anderen Modalitäten wie MRT- oder Kryotom-Schnitten erreicht. Da in diesen Modalitäten die Strukturen schärfer und besser dargestellt sind als im Ultraschall, ist das Erkennen der relevanten Strukturen auf dem Ultraschallbild erleichtert.

Um diese Simulationen in einen sinnvollen didaktischen Rahmen einzubinden, soll ein Lehrprogramm mit erklärenden Texten und anderen Multimedia-Elementen zusammengestellt werden.

Einfache Bedienung des Programms und klare Strukturen werden außerdem gefordert, um lange Einarbeitungszeiten zu vermeiden.

Besonders hilfreich ist in diesem Zusammenhang die Verwendung der Browser⁷ - Technologie des Internets.

Somit ist auch die Lauffähigkeit des Programms auf gängigen Computern (IBM-kompatible PC's und Apple Macintosh-Computer) gewährleistet.

Spezielle kostenintensive Hardware und Software ist demnach nicht mehr notwendig.

⁷Ein Browser ist ein Programm um Texte und Bilder des Internets betrachten zu können, wobei die Multimediafähigkeit interaktive Elemente zuläßt

Kapitel 2

Stand der Wissenschaft

Die in Kapitel 1.1 genannten Probleme beim Erlernen der Ultraschall-Untersuchung sind nicht neu. Die Methoden diese Probleme didaktisch anzugehen sind vielfältig, wobei sicherlich die direkte Auseinandersetzung mit der Materie die besten Erfolge liefert, also das Erlernen der Untersuchungstechnik direkt am Patientenbett und vor allem durch eigenes Üben. Aber natürlich ist dieses 'learning by doing' in den seltensten Fällen ausreichend möglich. Daher ist man auf der Suche nach Alternativen.

Die gängigste ist die Zuhilfenahme eines Buches. So erhält der Lernende die grundlegenden Anatomiekenntnisse weiterhin meistens auf klassischem Wege über die Anatomie-Atlanten (z.B. [Pabst and Putz, 1993],[Netter, 1996]). Auch die neueren Schnittbild-Atlanten mit Darstellungen aus CT und MRT eignen sich gut für das notwendige Anatomiestudium (z.B. [Romrell et al., 1996] oder [Möller and Reif, 1997]). Da sich die Anatomie des Säuglings oder Kindes sehr oft unterscheidet von der Anatomie des Erwachsenen, muß zum Erlernen der pädiatrischen Sonographie auch hier erst eine Basis geschaffen werden.

Ein spezieller Atlas für die Säuglings-Anatomie ist z.B. [Richter and Lierse, 1990]. Die Kinder-Anatomie ist z.B. in [Benz-Bohm, 1997] gut dargestellt.

Im Hinblick auf die Ausbildung in der Ultraschalldiagnostik sind diese Atlanten jedoch nur bedingt einsetzbar. Wären die Ultraschallbilder immer an den Hauptachsen ausgerichtet (transversal, coronar oder sagittal), dann könnte man diese Atlanten zu Hilfe ziehen. Da dies jedoch bei der Ultraschalluntersuchung selten vorkommt, sind deren Abbildungen nur teilweise hilfreich für das Verständnis der zweidimensionalen Ultraschallbilder. Hierfür eignen sich die speziellen Ultraschall-Atlanten und Lehrbücher besser (z.B. [Deeg et al., 1996], [Peters and Schumacher, 1996] und [Sommer, 1991]), in denen die ultraschallspezifischen Standardschnitte gezeigt und erläutert werden.

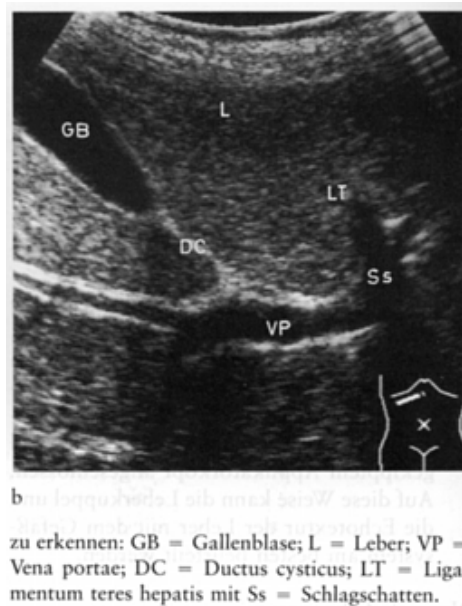


Abbildung 2.1: Typische Darstellung einer Standardschicht aus einem Lehrbuch mit Beschriftung der relevanten Strukturen. Hier handelt es sich um einen subcostalen Schrägschnitt durch die Leber aus [Sommer, 1991]

Abbildung 2.1 zeigt z.B. einen solchen typischen Standardschnitt aus einem Lehrbuch. Hier werden die interessanten und wichtigsten anatomischen Strukturen markiert und benannt. Die Orientierungshilfe über Lage und Position des Schallkopfes ist dagegen sehr knapp. Die stark stilisierte Schemazeichnung unten rechts im Bild läßt nur erahnen, wie der Schallkopf zu halten ist, um die abgebildete Standardschicht einzustellen.

Ein weiteres Medium für die Ausbildung in der Sonographie ist die Videotechnik. Anhand von Videosequenzen kann der dynamische Ablauf einer Sonographie-Untersuchung gezeigt werden, denn im Gegensatz zu den anderen bildgebenden Verfahren wie CT oder MRT ist die Sonographie eine dynamische Untersuchung. Der Vorteil der Dynamik wird z.B. besonders in der Echokardiographie deutlich, wo Bewegung des Blutflusses ein entscheidendes Diagnose-Kriterium darstellt [Hien, 1996]. Aber auch die Videosequenzen bieten keine echte Orientierungshilfe bezüglich der Schallkopfhaltung.

Seit einigen Jahren drängen vermehrt elektronische Medien auf den Markt, die medizinischen Wissen am Computer vermitteln wollen. So gibt es für das Anatomie-Studium inzwischen zahlreiche digitale Atlanten in Form von CD-ROMs, die meistens eine digitale Ausgabe ihrer Buchform darstellen, so z.B. [Putz and Pabst, 1997].

Aber es gibt auch ganz neuartige Atlanten, die die interaktiven Möglichkeiten eines Computers schon gut ausnutzen.

Zu nennen wäre da z.B. das Programm 'Interbrain' [Hirsch, 1998], welches mit grafisch hochqualitativen anatomischen Modellen einen sehr realitätsnahen Einblick in das Gehirn gewährt .

Abbildung 2.2 zeigt einen Screenshot¹ aus diesem Programm. Dargestellt ist ein fein modelliertes und plastisch wirkendes Ventrikelsystem, welches mit der Maus beliebig gedreht werden kann.

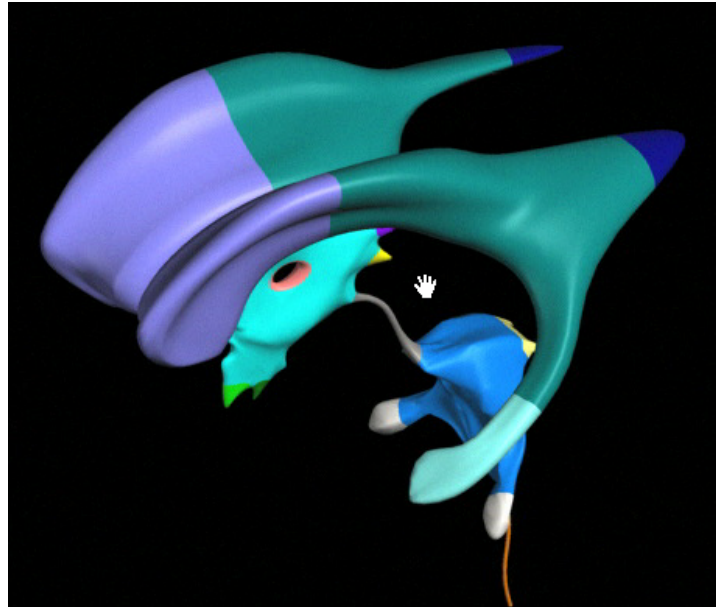


Abbildung 2.2: Screenshot aus dem Programm 'Interbrain'. 3D-Darstellung eines Hirn-Ventrikelsystems mit verschiedenfarbiger Markierung der einzelnen Ventrikelteilregionen. Das Ventrikelsystem liegt als 3D-Modell vor und kann interaktiv beliebig gedreht und betrachtet werden.

Spezielle Lernprogramme für die Ultraschalldiagnostik sind ebenfalls schon vorhanden. So gibt z.B. das Programm von Banholzer einen guten Überblick über die Ultraschalldiagnostik des Abdomens beim Erwachsenen ([Banholzer, 1996]).

In Abbildung 2.3 ist ein typischer Screenshot dieses Programms zu sehen. Man erkennt einen Standardschnitt durch die Leber. Wie in den Ultraschall-Lehrbüchern sind auch hier die wesentlichen Strukturen benannt und markiert.

¹Ein Screenshot ist ein Abbild des Computer-Bildschirms, entspricht also einer Momentaufnahme eines Programms

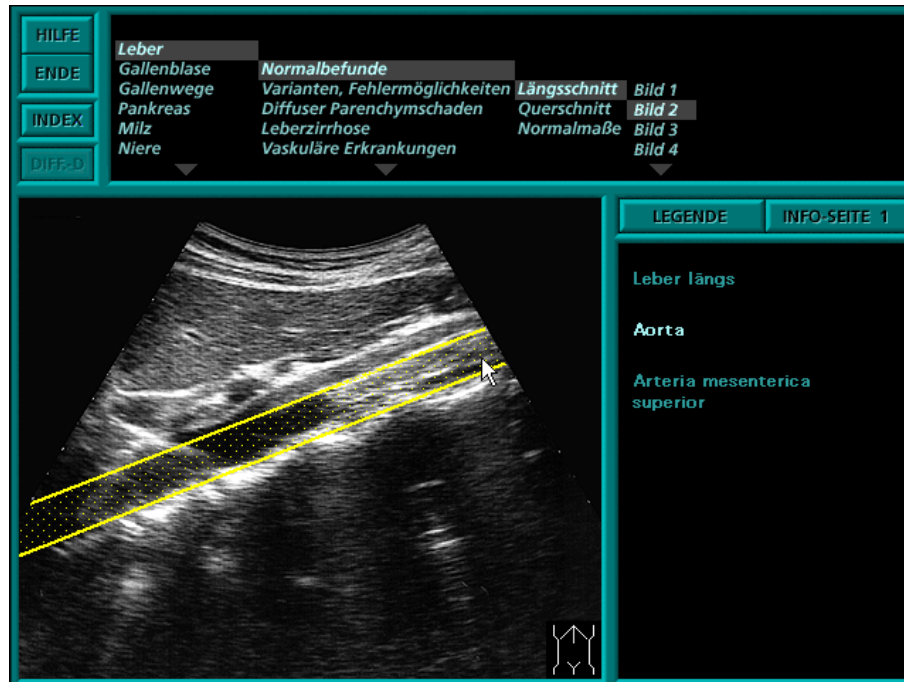


Abbildung 2.3: Screenshot aus dem Ultraschall-Lernprogramm von [Banholzer, 1996] mit interaktiver Markierung und Benennung der relevanten Strukturen auf dem Ultraschallbild. Hier ist ein sagittaler Längsschnitt durch die Leber dargestellt. Unten rechts im Bild zeigt eine stilisierte Schemazeichnung die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

Im Vergleich zu den 'statischen' Abbildungen aus einem Buch, besteht der Hauptunterschied in den zusätzlichen Interaktionsmöglichkeiten. Bewegt man die Maus auf eine interessante 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. Schematische Zeichnungen, Legenden und Differentialdiagnosen runden das Programm ab (siehe z.B. Abbildung 2.4).

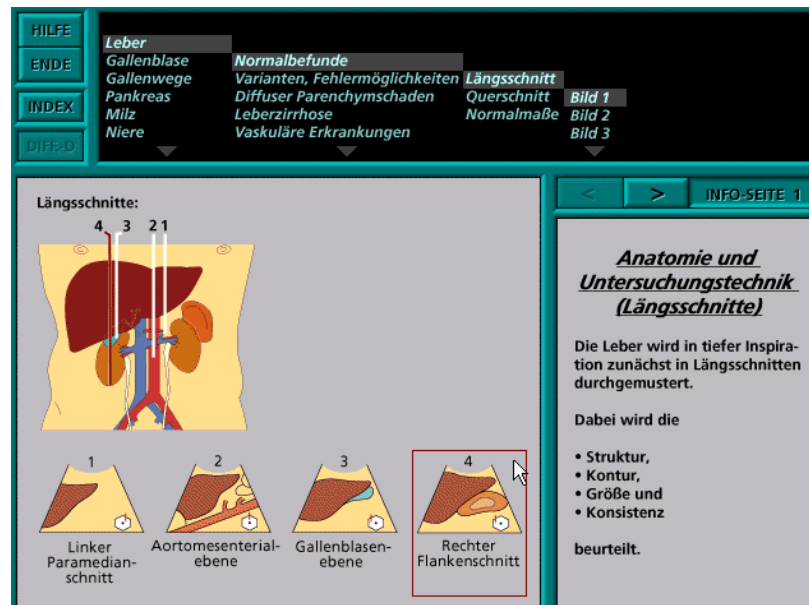


Abbildung 2.4: Screenshot aus dem Programm von [Banholzer, 1996]. Zusätzlich zum interaktiven Ultraschallbild kann man sich erklärende Schemazeichnungen anzeigen lassen. Die Haltung und Lage des Schallkopfes ist hier etwas genauer dargestellt als auf der stilisierten Zeichnung in Abbildung 2.3 unten rechts.

Andere interaktive Elemente als die oben genannten gibt es aber nicht. Auch bewegte dynamische Bilder sind bis auf ein paar kleine Videosequenzen nicht anzutreffen. Vor allem fehlt wiederum eine gut verständliche und visuell gezeigte Darstellung der Schallkopfhaltung.

Einen anderen Ansatz hat das Programm 'Pädiatrische Ultraschalldiagnostik, 3D-Sonographie' von [Leidig and Grunert, 1998]. 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 2.5 zeigt die interaktive Programmoberfläche, die leider nicht sehr intuitiv ist und ebenfalls nicht die Schallkopflage und -position anzeigt.

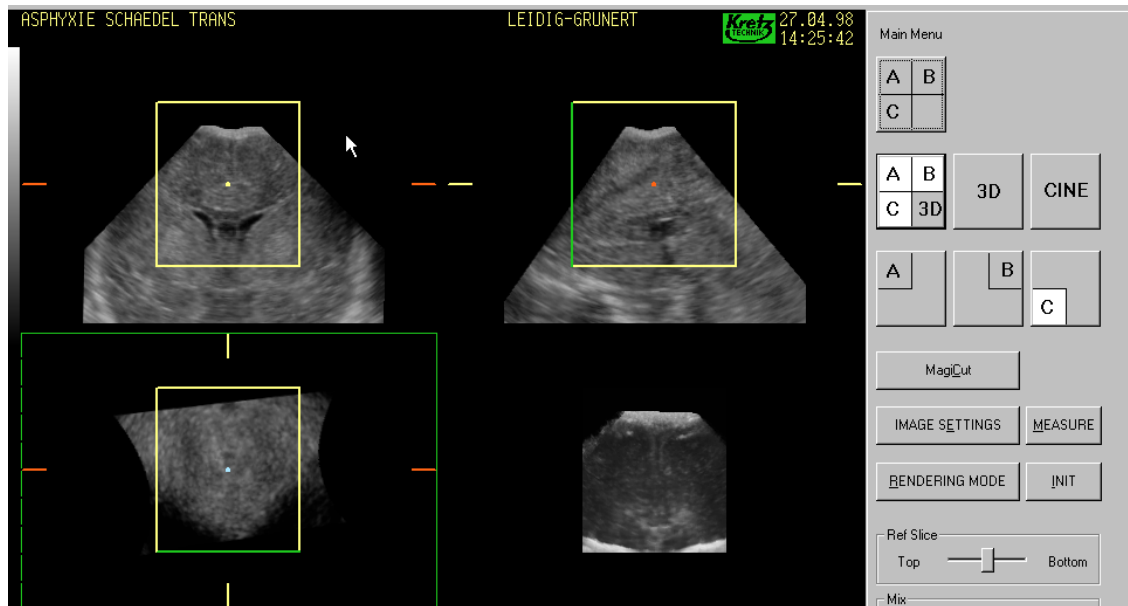


Abbildung 2.5: Screenshot aus dem Programm 'Pädiatrische Ultraschalldiagnostik, 3D-Sonographie'. Hier ist ein 3D-Ultraschall-Datensatz eines Säuglingsgehirns dargestellt, der interaktiv exploriert werden kann. Das Programm entspricht im wesentlichen der interaktiven Oberfläche eines 3D-Ultraschallgerätes der Firma 'Kretz'. Die Programm-Oberfläche ist nicht sehr intuitiv und Informationen zur Schallkopfhaltung fehlen gänzlich.

Insgesamt ist festzustellen, daß die elektronischen Medien in der Medizinausbildung bisher nur sehr selten anzutreffen sind. Im Vergleich zur Diagnostik und Therapie spielen Computer in der Lehre nur eine untergeordnete Rolle.

Gründe dafür sind oft die kostenintensiven Hard- und Softwareanforderungen. Ein häufiges Problem ist auch die lange Einarbeitungszeit in schwer bedienbare und komplexe Lernsoftware. Negativbeispiele für lange Einarbeitungsphasen sind z.B. das oben genannte Programm von [Leidig and Grunert, 1998] oder das Programm 'Neurotutor' von [Luft and Drews, 1997].

Abbildung 2.6 zeigt einen Screenshot aus dem Programm 'Neurotutor'.

Die Fülle von Informationen und die unübersichtliche Programmführung erschweren die intuitive Benutzung.

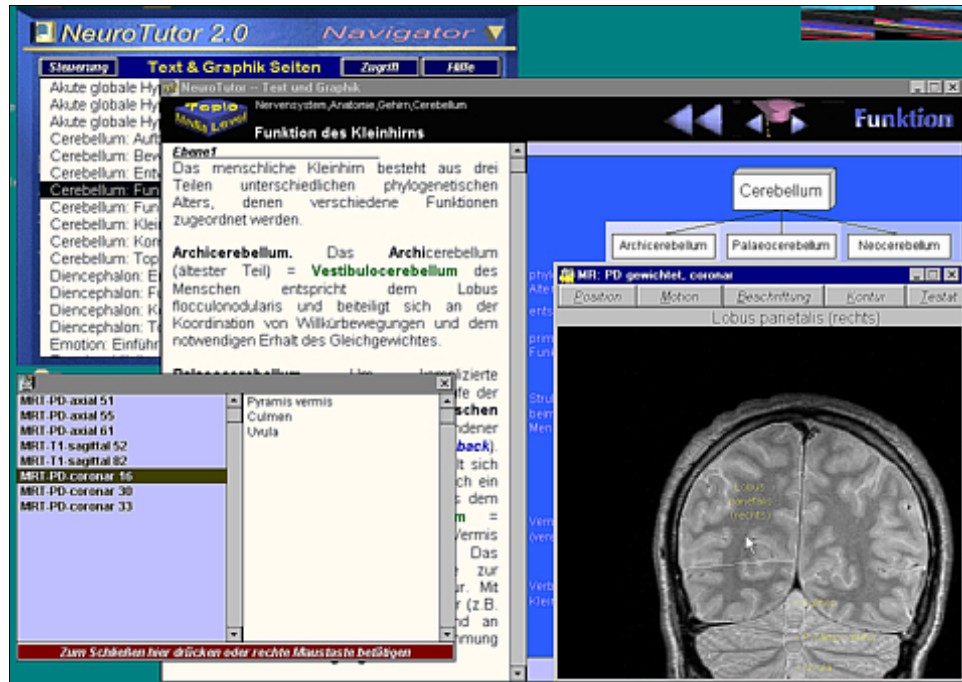


Abbildung 2.6: Screenshot aus dem Programm 'Neurotutor'. Die Programm-Oberfläche ist ein schlechtes Beispiel für intuitive Anwenderführung. Der Benutzer verliert sich schnell im Chaos der vielen überlappenden Fenster und der unübersichtlichen Menüführung.

Ein gutes Beispiel für gute Anwenderführung mit kurzer Einarbeitungszeit ist dagegen das Programm von [Banholzer, 1996].

Es zeigt sich, daß viele Programme die neuen interaktiven Möglichkeiten des Computers wenig oder kaum nutzen.

Ein 'gutes' Buch ist digitalisiert eben noch lange kein 'gutes' Programm.

Die bisher vorgestellten Programme haben viele gute didaktische Ansätze zum Erlernen der Ultraschalldiagnostik, aber z.T. auch deutliche Mängel.

Diese Arbeit versucht die guten Ansätze wie interaktiv explorierbare Ultraschallbilder und 3D-Modelle zu verbinden und weniger gute Ansätze wie die schlechte Menüführung oder fehlende Intuitivität zu vermeiden.

Wie schon im Unterkapitel 'Zielsetzung' erwähnt, soll vor allem eine neue Methode entwickelt werden, mit der die Haltung und Position des Schallkopfes im Kontext zum Ultraschallbild visualisiert wird.

Kapitel 3

Methoden

Wie schon im Kapitel 1.2 dargelegt, ist das vorrangige Ziel dieser Arbeit eine realitätsnahe Darstellung eines Schallkopfes mit Informationen zu seiner Lage und Position am Untersuchungskörper in Abhängigkeit zu dem gezeigten Ultraschallbild.

Dafür werden Körpermodelle benötigt, auf die ein Schallkopfmodell virtuell aufgesetzt werden kann.

Zum besseren Verständnis sollen diese Modelle nicht nur stilisierten Schemazeichnungen entsprechen, wie z.T. in Kapitel 2 gezeigt, sondern vielmehr wirklichkeitsnahe plastisch wirkende dreidimensionale Modelle sein.

Als nächstes werden Ultraschall-Schnittbilder gebraucht, die genau den virtuellen Schnittebenen entsprechen, die von dem virtuellen Schallkopfmodell in den oben genannten Körpermodellen erzeugt werden.

Da auf den Ultraschallbildern die anatomischen Strukturen nicht so scharf abgebildet sind, sollen Referenzschnittansichten mit genauerer Darstellung der relevanten Strukturen mitbenutzt werden. Hierfür werden Modalitäten wie MRT- oder Kryotom-Schnitte¹ benutzt.

¹Kryotomschnitte: anatomische Schnittbilddarstellungen, die durch Einfrieren und anschließendem Schneiden des Objekts in Dünnschichten erzeugt werden

Zur Verwirklichung der oben genannten Ziele werden Methoden benötigt, die zum Teil schon vorhanden sind und zum Teil speziell für diese Arbeit entwickelt wurden. Diese sind :

- Methode zur Visualisierung der Körpermodelle und des Schallkopfmodells
- Methode zur Generierung der ultraschalltypischen Schnittansichten aus einem Volumen-Datensatz
- Methoden zur Filmerstellung aus Einzelbildern und deren Umwandlung zu interaktiv steuerbaren Sequenzen

Zwei weitere spezielle Methoden werden ebenfalls kurz beschrieben, da diese bei Teilergebnissen dieser Arbeit zur Verwendung kommen und im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen und Möglichkeiten von großer Wichtigkeit sind. Hierbei handelt es sich um die methodischen Bereiche :

- Bestimmen von Objektgrenzen in einem 3D-Volumen durch 'Segmentation'
- Ausnutzung dieser Objektgrenzen für die Erstellung einer speziellen Datenstruktur, die ein räumliches Modell mit einem symbolischen Modell verbindet. ('intelligente Volumen')

Die Methoden der 3D-Visualisierung, einschließlich der Segmentation und der Datenstruktur des 'intelligenten Volumens', sowie die Methode zur Generierung der ultraschallspezifischen Schnittansichten sind implementiert in dem Programm **VOXEL-MAN**, welches aus dem IMDM² stammt. Das Programm **VOXEL-MAN** stellt die benötigten Module für die Füllung der speziellen Datenstruktur, der Segmentation und der Visualisierung von Volumendatensätzen zur Verfügung. Abbildung 3.1 zeigt einen Screenshot aus dem Programm mit Darstellung des Visualisierungsmoduls und dem Menu zur Erzeugung ultraschallspezifischer Schnittansichten.

²IMDM = Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin, Universitätsklinik Eppendorf, Hamburg

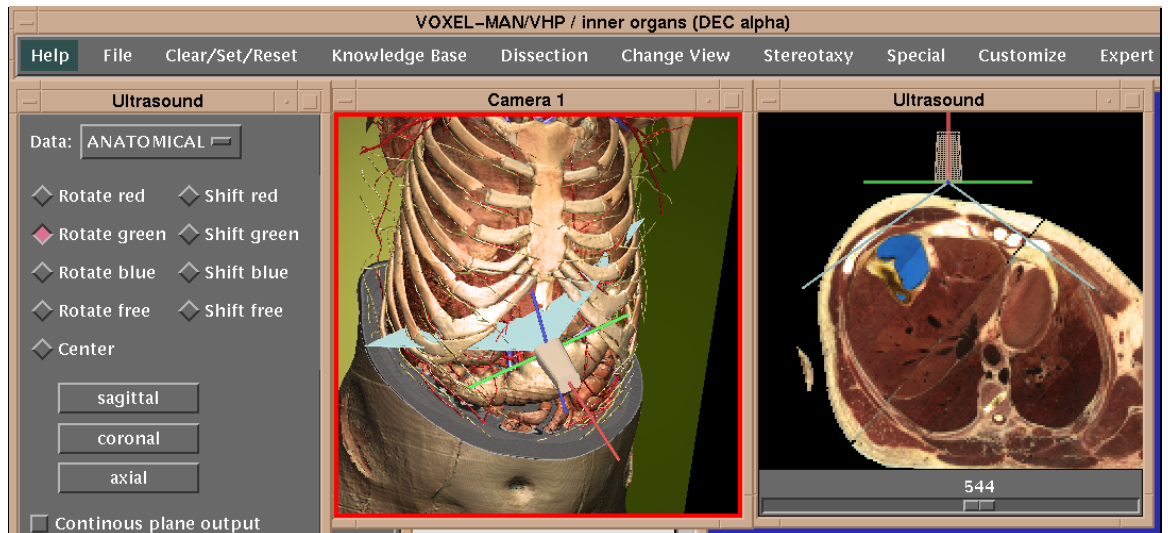


Abbildung 3.1: Screenshot aus dem Programm **VOXEL-MAN** mit Visualisierung und Bearbeitung eines 3D-Volumens. Ein Kryotomschnitt-Datensatz des Abdomens ist dreidimensional dargestellt durch das Visualisierungsmodul. Das mitabgebildete 'Ultrasound'-Menu stellt die Methode zur Erzeugung ultraschallspezifischer Schnitte zur Verfügung.

Das letztendliche Ziel, die Integration und Verwendung der gewonnenen interaktiven Simulationssequenzen in ein Multimedia-System mit Lehr- und Lerncharakter, wird mit Hilfe der Internet-Technologie erreicht. Die Browser-Technologie (auch Web-Technologie genannt) des Internets bietet dafür den vollen Funktionsumfang der verwendeten Quicktime-VR-Technologie durch ein sogenanntes Quicktime-PlugIn³, mit der die Simulationssequenzen interaktiv exploriert werden können. Im übrigen können Texte und Bilder sehr leicht eingebunden werden und vor allem besteht die Möglichkeit eigene interaktive Elemente in das Programm einzubauen.

Dabei geht es im besonderen um Methoden zur Erzeugung interaktiv explorierbarer Bilder und Videosequenzen sowie interaktiver Menustrukturen. Diese sollen am Ende dieses Kapitels beschrieben werden.

Weitere Vorteile der Internet-Technologie sind die Computer-Plattform übergreifende Systemunabhängigkeit und ein einfacher Aus- oder Umbau der Programme.

³ein 'PlugIn' ist ein kleines Unterprogramm des Browsers mit dem gewisse Daten bearbeitet oder angezeigt werden können, im Falle eines 'Quicktime-PlugIns' können Quicktimefilme angezeigt werden

3.1 3D-Visualisierung

Die 3D-Visualisierung bezeichnet die plastische Wiedergabe eines dreidimensionalen Objektes auf einer zweidimensionalen Bildebene, in unserem Fall die Bildfläche eines Monitors. Der dreidimensionale Eindruck entsteht durch Schattierungen und Reflexionen an den Oberflächen der dargestellten Objektvolumen.

Die Generierung dieser realitätsnahen Schattierungen und Reflexionen, abhängig vom Betrachtungsstandpunkt und der virtuellen Lichtquellen, ist die Hauptaufgabe der 3D-Visualisierung. Darauf wird weiter unten noch näher eingegangen.

An erster Stelle steht jedoch die Erzeugung eines geeigneten Volumens bevor die Visualisierungsmethoden angewendet werden können.

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.

Diese Einzelbilder werden aufeinandergestapelt und so zu einem 3D-Volumen zusammengepackt (siehe Abbildung 3.2).

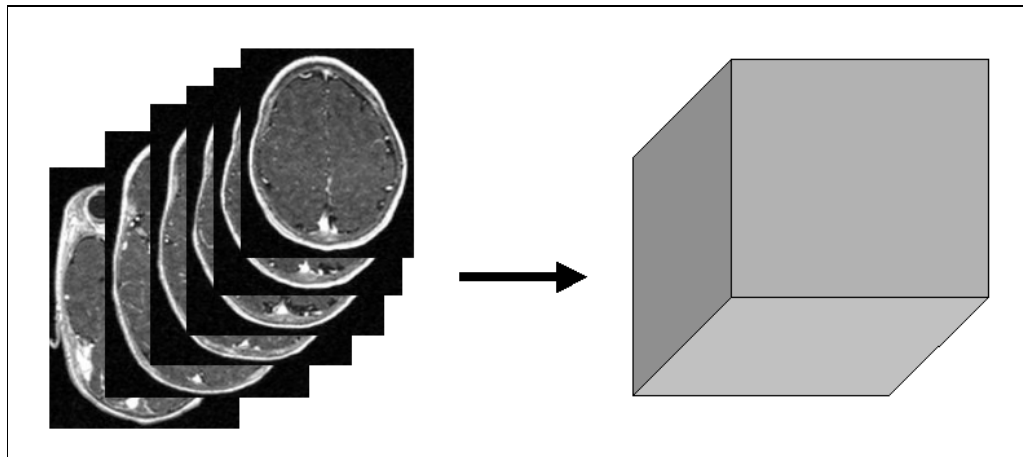


Abbildung 3.2: Die zweidimensionalen Schichtaufnahmen (hier MRT-Schichten) werden aufeinandergeschichtet und bilden somit einen Volumenblock, der als 3D-Volumen weiterbearbeitet werden kann.

Hierbei machte es keinen Unterschied, ob es sich um Grauwert-Bilder aus CT-, MRT- oder Ultraschall-Schichten oder um Farb-Bilder aus Kryotomschnitten handelt.

Je nach Datensatz kann es notwendig sein, aus einem nicht-isotropen⁴ Datensatz zuerst einen isotropen Datensatz zu gewinnen, da viele Algorithmen der Volumen-Visualisierung nur auf isotrope Datensätze anwendbar sind.

Hierbei werden die fehlenden Informationen durch Interpolationsverfahren rekonstruiert.

⁴isotrop= die Kantenlängen der einzelnen Volumenelemente sind in allen drei Hauptachsen gleich

Das so gewonnene 3D-Volumen kann nun den 3D-Visualisierungsmethoden zugänglich gemacht werden.

Das in dieser Arbeit benutzte Verfahren zur 3D-Visualisierung ist die volumenbasierte Visualisierung von Oberflächen, die durch vorhergehende 'Segmentation'(Methode wird später erklärt) des Volumens gewonnen werden.

Grundlage für dieses Verfahren ist die volumenbasierte Ray-Casting Methode.

Beim Ray-Casting findet eine Abtastung des Volumens statt, indem von jedem Punkt der Bildebene aus ein Sichtstrahl (ray) in das Volumen gesendet wird. Trifft dieser Strahl in dem Volumen auf ein Objektvoxel⁵, wird überprüft, ob dieses Objekt sichtbar sein soll. 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 3.3 zeigt schematisch die volumenbasierte Ray-Casting Methode.

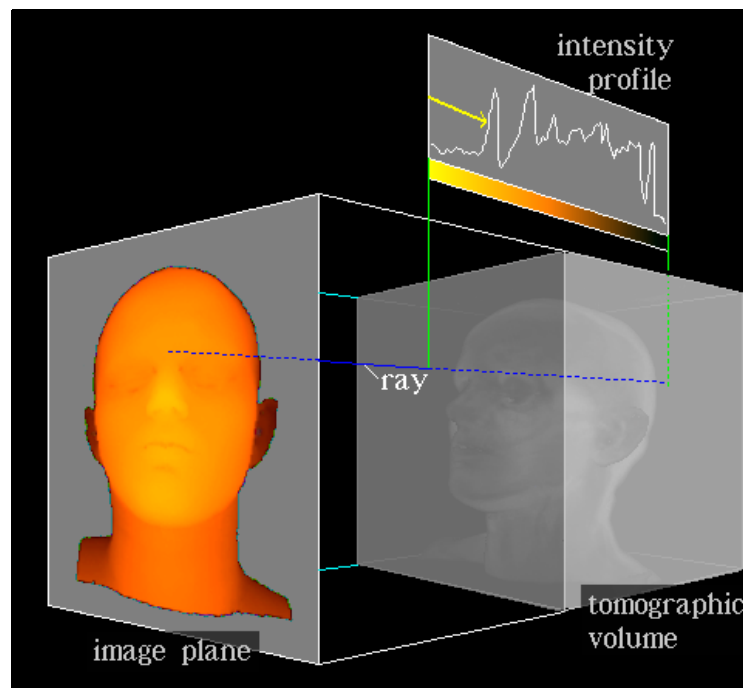


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Ray-Casting Methode zur volumenbasierten 3D-Visualisierung aus [Höhne et al., 1990]

Tiefergehende Informationen zu Technik und mathematische Grundlagen zu den am IMDM entwickelten 3D-Visualisierungsmethoden finden sich in [Höhne et al., 1990], [Pommert et al., 1992] und [Tiede, 1999].

⁵voxel= Kunstwort aus 'volume element'

Abbildung 3.4 zeigt exemplarisch ein 3D-Bild der inneren Organe eines totgeborenen Fötus. Insbesondere die Beleuchtung, Reflexion des Lichts auf den Organen und deren Schattierungen hinterlassen einen realistischen dreidimensionalen Eindruck. Der Betrachter hat dabei auch die Möglichkeit die Strukturen in allen Freiheitsgraden zu drehen und den Betrachtungspunkt beliebig zu wählen. Ein weiteres Beispiel

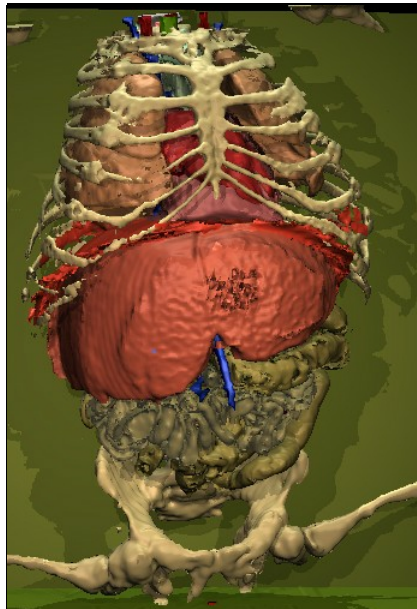


Abbildung 3.4: 3D-Visualisierung des Fötus-Datensatzes. Die realitätsnahen Schattierungen und Reflexionen durch virtuelle Lichtquellen ergeben einen sehr plastischen 3D-Eindruck der Organstrukturen.

der 3D-Visualisierung zeigt Abbildung 3.5 mit plastischer Darstellung der Kopf- und Gesichtsoberfläche eines Säuglings mit gleichzeitiger Darstellung eines ebenfalls dreidimensionalen Schallkopfmodells. Man kann die Haltung und Position des Schallkopfes im Kontext zum Kopf gut erkennen. Hier z.B. ist der Schallkopf auf der großen Fontanelle platziert.

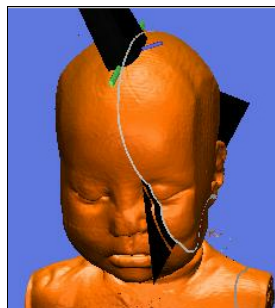


Abbildung 3.5: 3D-Visualisierung vom MRT-Datensatzes eines Säuglingsschädels mit Schallkopfmodell, das an der großen Fontanelle aufsetzt. Die Position des Schallkopfes im Kontext zum Kopf ist gut erkennbar.

3.2 Erzeugung ultraschalltypischer Schnitte

Außer der im vorherigen Abschnitt beschriebenen 3D-Visualisierung sind am IMDM auch Methoden entwickelt worden, um Schnittebenen beliebig in das 3D-Volumen legen zu können. Dabei können die Ebenen an den Hauptachsen ausgerichtet sein oder schräg im Raum liegen.

Die durch diese Schnittebenen erzeugten Schnittansichten lassen sich im 3D-Kontext visualisieren. Abbildung 3.6 zeigt eine solche Schnittansicht, die man z.B. bei einem schrägen Schnitt durch den Oberbauch eines Fötus-Datensatzes erhält.

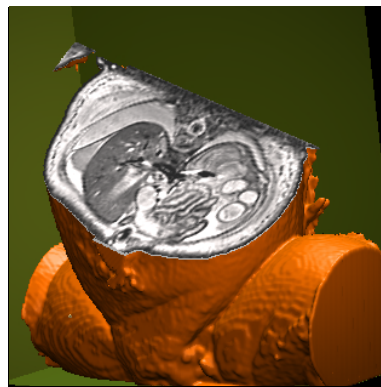


Abbildung 3.6: Schnittansicht einer schräg im Oberbauch liegenden Ebene innerhalb des Fötus-Datensatzes. Die Schnittfläche zeigt die angeschnittenen Organe, wobei auch die inneren Strukturen der Organe dargestellt sind. Der 3D-Kontext bleibt durch bleibende 3D-Darstellung der nicht entfernten Organstrukturen erhalten.

Eine ultraschalltypische Schnittansicht ist dadurch aber noch nicht erzeugt. Dafür ist ein Werkzeug mit dem Namen 'Ultrasound' entwickelt worden. Hierbei handelt es sich um ein Menu, mit dem eine Ultraschalluntersuchung ansatzweise simuliert werden kann. Es 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. Fließende Bewegungen des Schallkopfmodells erzeugen dabei fließend bewegte Schnitt-

bilder. Es entsteht somit ein sehr realitätsnaher Eindruck einer wirklichen Bewegung mit einem Schallkopf und deren Resultat. Abbildung 3.7 zeigt beispielhaft die zwei Fenster nebeneinander mit einem Coronarschnitt durch einen Säuglingskopf und dem resultierenden Schnittbild aus dem MRT-Datensatz.

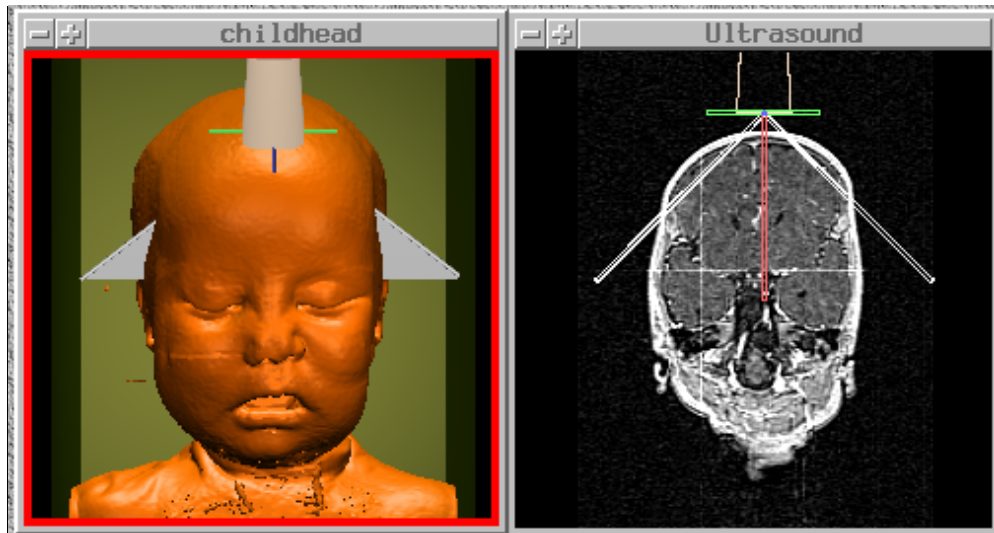


Abbildung 3.7: MRT-Kinderkopf-Datensatz mit dem 'Ultrasound'-Menu bearbeitet. Im linken Fenster ist eine plastische Darstellung des Kopfes mit dem Schallkopfmodell, im rechten Fenster die von dem Schallkopfmodell erzeugte Schnittebene innerhalb des MRT-Datensatzes angezeigt.

Abbildung 3.8 zeigt das 'Ultrasound'-Menu 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'-Menus kann somit eine Ultraschalluntersuchung nahezu imitiert werden, wobei jedoch die resultierenden Schnittbilder aus den MRT- und Kryotomdatensätzen nicht mit den wirklichen Ultraschallbildern direkt zu vergleichen sind, da hier unterschiedliche Datensätze zu Grunde liegen.



Abbildung 3.8: 'Ultrasound'-Menu mit mehreren Einstellmöglichkeiten zur Auswahl der Drehachsen und der Koordinaten des Aufsetzpunktes für die interaktive Bewegung des Schallkopfmodells.

3.3 Erstellung interaktiver Simulationssequenzen

Das mehrfach erwähnte Ziel, die Erstellung interaktiver Simulationssequenzen, ist im Grunde nur ein Zusammenfügen der Schnittansichten, die durch das 'Ultrasound'-Menu erzeugt werden.

Damit eine echte Ultraschalluntersuchung möglichst realistisch imitiert werden kann, bedarf es aber einiger Vorüberlegungen und Vorarbeiten.

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. Die verwendeten Datensätze werden im Kapitel Material näher erläutert.

Am Anfang steht die genaue Positionierung des Schallkopfmodells auf der Oberfläche des 3D-Volumens aus dem MRT-Datensatz. 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 in Wirklichkeit möglichen Schallkopf-Ausschlag gegeben ist. Abbildung 3.9 zeigt bei der coronaren Kopfuntersuchung die maximalen Ausschlagswinkel nach ventral und dorsal.

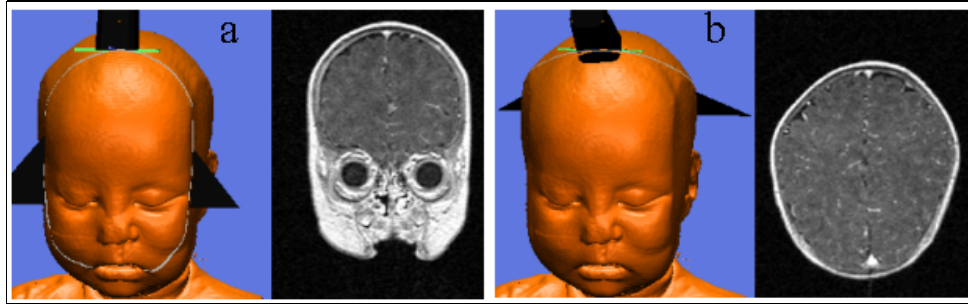


Abbildung 3.9: MRT-Kinderkopf-Datensatz mit Schallkopfmodell. Suchen und Festlegen des ersten und letzten Bildes einer typischen Ultraschall-Sequenz. a) zeigt maximalen Ausschlagswinkel nach vorne(ventral) und b) nach hinten(dorsal) bei einem Standarduntersuchungsgang coronar durch das Gehirn eines Säuglings. Der Schallkopf wird dabei auf die große Fontanelle aufgesetzt.

Anhand dieser gewonnenen Daten wird ein 'Skript' ⁶ erstellt, welches die einzelnen Schwenkbewegungen des Schallkopfes in kleinen Schritten automatisch ausführt und die resultierenden Bilder in einer Datei hintereinander aufzeichnet.

Im Prinzip werden nach jeder Teilbewegung des Schallkopfmodells die relevanten Fenster sequentiell aufgezeichnet. Als Ergebnis erhält man zwei Bildsequenzen, erstens die Oberflächendarstellung mit dem Schallkopfmodell und zweitens die dazugehörigen Schnitte im MRT-Datensatz. Abbildung 3.10 zeigt die Aneinanderreihung der MRT-Bilder zu einer Sequenz

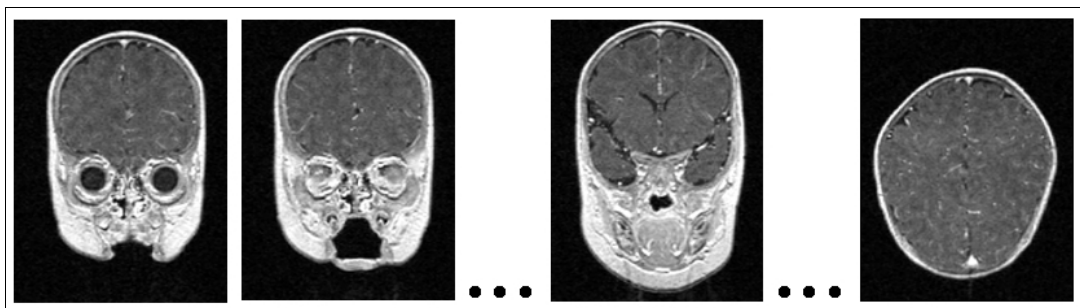


Abbildung 3.10: Aneinanderreihung von vielen einzelnen MRT-Bildern zu einer Sequenz, die die Grundlage zur späteren Filmerzeugung darstellt

Dasselbe 'Skript' wird auch auf den Ultraschall-Datensatz angewandt, so daß auch hier als Ergebnis zwei Bildsequenzen mit denselben Winkelgraden und derselben Anzahl von Einzelbildern entstehen wie beim MRT-Datensatz.

⁶Ein 'Skript' ist ein kleines Computer-Programm, meistens verwendet zur Automatisierung immer wiederkehrender Befehle

Ein besonderes Problem ist hierbei die richtige Positionierung des Schallkopfmodells auf den Ultraschall-Datensatz, denn dies ist entscheidend für den realitätsnahen Eindruck, der entstehen soll durch möglichst genaue Übereinstimmung der Ultraschallschnitte mit den MRT-Schnitten. Dieser Vorgang entspricht in etwa einer manuellen Registrierung⁷, die natürlich nur grob sein kann, für die Beurteilung der großen relevanten Strukturen jedoch ausreichend ist.

Insgesamt erhält man somit vier Bildsequenzen mit jeweils gleicher Anzahl von Einzelbildern und den jeweils entsprechenden Winkelschritten (siehe Abbildung 3.11).

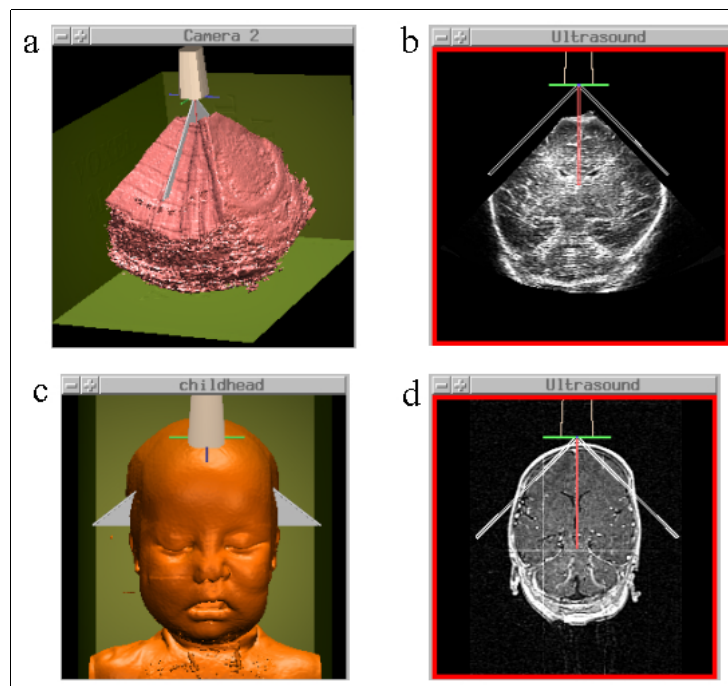


Abbildung 3.11: die 4 berechneten Einzelsequenzen : a) 3D-Ultraschall-Sequenz mit Schallkopfmodell (wird später verworfen, da hier die Lage und Position des Schallkopfes nicht ausreichend dargestellt ist). b) Sequenz mit Ultraschallschichten. Diese entspricht der Simulation einer Ultraschalluntersuchung. c) 3D-MRT-Sequenz mit Schallkopfmodell. Diese ist die Hauptreferenz zu den Ultraschallbildern und gibt die entsprechende Position und Lage des Schallkopfes wieder. d) Sequenz mit MRT-Schichten als zusätzliches Referenzmodell mit genauerer Darstellung der Strukturen als im Ultraschallbild.

⁷Registrierung nennt man den Vorgang verschiedene Bildmodalitäten aufeinander abzugleichen ('matchen'), damit gleiche Organstrukturen an denselben Positionen zu finden sind, z.B. 'matchen' von CT- und MRT-Datensatz

Der nächste Schritt bei der Erstellung der Simulationssequenzen ist das Zusammenfügen der einzelnen Bildsequenzen.

Die Bildsequenzen werden dafür, wenn möglich, zuerst verkleinert und gekürzt, um das Datenmaterial zu verringern, welches später die weitere Verarbeitung wesentlich beschleunigt. Mithilfe kleiner Hilfs-Programme aus der Tool-Sammlung des IMDM werden die verschiedenen Bildsequenzen horizontal zusammengefügt wie in Abbildung 3.12 gezeigt. Links ist das 3D-Körpermodell mit dem Schallkopfmodell, in der Mitte die MRT-Referenzsequenz und rechts die Ultraschall-Sequenz zu sehen.

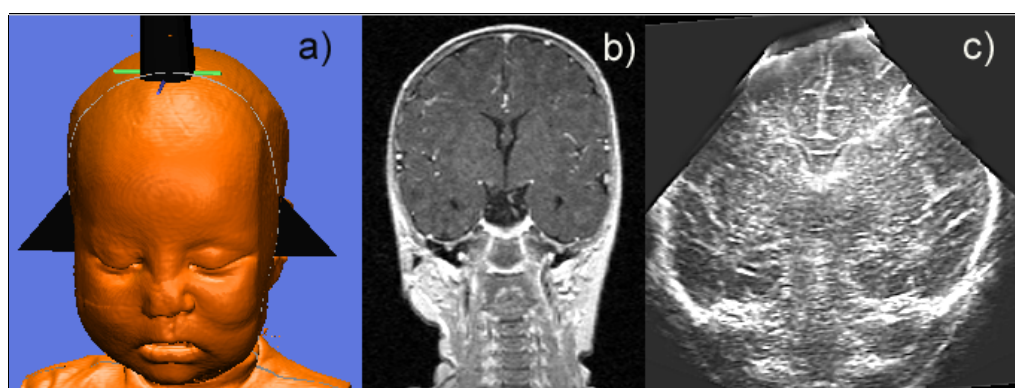


Abbildung 3.12: Zusammenfügen der einzelnen Sequenzen. a) 3D-Körpermodell mit Schallkopfmodell, b) MRT-Referenz-Sequenz, c) Ultraschall-Sequenz

Diese nun erhaltene neue Filmsequenz wird vom IMDM-eigenen Format in das Quicktime-Format⁸ konvertiert. Diese Konvertierung bringt gleich zwei Vorteile mit sich. Einerseits die Adaption an ein gängiges weitverbreitetes Filmformat in der grafischen Datenverarbeitung, welches zugleich auch in der Internet-Technologie verwendbar ist, andererseits die Integration einer interaktiven Technologie mit einfachen manuellen Steuerungs- und Navigationsmöglichkeiten innerhalb einer Filmsequenz. Diese Technologie nennt sich VR-Technologie⁹. Dabei wird ein sogenanntes VR-Atom in die Quicktime-Sequenz integriert. Nun kann mit einem Mauszeiger die Quicktime-Sequenz gesteuert werden. Innerhalb der Bildsequenz kann bildweise vorwärts oder rückwärts gegangen werden. Diese Navigation in der Bildsequenz kann bis zu zwei Freiheitsgrade einschließen.

Schematisch betrachtet bedeutet das: die Filmsequenz kann nicht nur eine eindimensionale Reihe von Folgebildern (Abbildung 3.13a), sondern auch eine zweidimensionale Matrix von Einzelbildern enthalten (Abbildung 3.13b). Eine Navigation

⁸das Quicktime-Format ist ein geschütztes Format der Firma Apple und ist ein Multimedia-Format für Film und Ton

⁹Virtuell Reality-Technologie: ebenfalls von Apple geschützte Technologie zur interaktiven Steuerung von Quicktimefilmen

innerhalb der Bild-Matrix ist durch horizontale und vertikale Bewegungen der Maus möglich. Somit ist eine Simulation von zwei Freiheitsgraden des Schallkopfes erreichbar, die z.B. bei der parasagittalen Ventrikeldarstellung notwendig ist (siehe Kapitel 2, Methoden, Simulationssequenz-Erstellung).

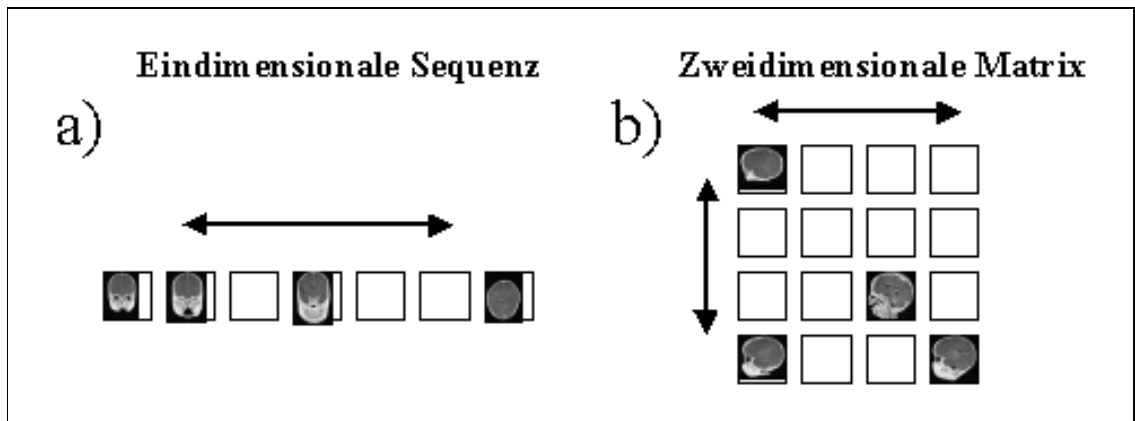


Abbildung 3.13: Simulationssequenzen können eindimensional (Reihe von Folgebildern) oder zweidimensional (Matrix von Einzelbildern) sein. D.h. es können ein oder zwei Freiheitsgrade eines Schallkopfes und somit die Bewegungen um bis zu zwei Drehachsen simuliert werden.

Weiterführende Literatur zu diesen Themen findet man im Internet z.B. unter 'www.quicktime.com' oder 'www.w3c.org'.

Um die VR-Technologie benutzen zu können werden außerdem noch gewisse Daten aus den 'Skripten' benötigt, die verwendet werden um die einzelnen Bildsequenzen zu erstellen. Genaugenommen handelt es sich dabei um Informationen über die genaue Anzahl der Winkelschritte innerhalb der Freiheitsgrade und die Bildanzahl pro Sequenz.

Die somit erhaltene interaktive Simulationssequenz ist nach zusätzlicher Datenkompression in einem Datenformat, das innerhalb von Multimedia-Umgebungen vielseitig genutzt werden kann. Insbesondere die Nutzung in der Internet-Technologie ist damit gewährleistet.

3.4 Segmentation

(Bestimmung von Objektgrenzen in einem 3D-Volumen)

Die Methoden der Segmentation und der 'intelligenten Volumen' sind in dieser Arbeit nicht direkt angewandt worden, aber aufgrund der herausragenden Bedeutung für die Gewinnung eines wichtigen Teilergebnisses werden die Methoden kurz erläutert.

Bei der Beschreibung der 3D-Visualisierung wurde schon erwähnt, daß die Segmentation des Volumens Voraussetzung für die volumenbasierte Visualisierungsmethode ist. Vereinfacht gesagt wird bei der Segmentation das Volumen in endlich viele Volumenelemente (Voxel) eingeteilt und dann jedem Voxel eine Organ- oder Objektzugehörigkeit zugewiesen.

So kann im Bereich einer Organgrenze, z.B. Niere, das eine Voxel noch zum Bauchfett gehören und das benachbarte Voxel schon der Nierenkapsel angehören.

Eine rein manuelle Zuweisung oder Kennzeichnung der vielen einzelnen Voxel zu Organen oder Objekten ist sehr zeitaufwendig und nicht praktikabel, wenn man bedenkt, daß die Größe eines Voxels meist 1 mm^3 beträgt.

Zur Vereinfachung dieses Arbeitsschrittes sind am IMDM halbautomatische interaktive Methoden entwickelt worden, die in einem Teilprogramm namens 'Interseg' [Schiemann et al., 1992] zusammengefaßt sind. Bei dem Segmentationsprogramm 'Interseg' werden punkt- und regionenbasierte Methoden benutzt, um die Objektgrenzen zu ermitteln und die innerhalb dieser Grenzen gefundenen Voxel zu diesem Objekt symbolisch zu verknüpfen.

Zusätzlich kommen auch morphologische Verfahren (Erosion und Dilatation) zur Anwendung, um unerwünschte Verbindungen zu anderen Strukturen aufzutrennen oder unrichtige Lücken zu schließen [Höhne and Hanson, 1992].

Die Automatisierung dieser Schritte bedeutet eine große Vereinfachung der Segmentation und ist für Objekte mit scharfer Abgrenzung zu den umgebenden Strukturen gut anwendbar, wie z.B. Segmentation von knöchernen Strukturen aus einem CT-Datensatz.

Diese scharfe Abgrenzbarkeit von Organstrukturen ist leider nicht immer der Fall, so daß eine manuelle Nachbearbeitung mit medizinischem Hintergrundwissen oftmals unumgänglich ist, um klare Objektgrenzen zu schaffen.

Daher nennt man das Verfahren ein 'halbautomatisches Verfahren', weil manuelle Korrekturen innerhalb der automatisierten Verfahren möglich und oft noch notwendig sind. Im ungünstigsten Fall haben die zu segmentierenden Objekte keine signifikanten Intensitätsgradienten an ihren Grenzen, so daß die Objektgrenzen Schicht für Schicht manuell bestimmt werden müssen.

Genauere und detailliertere Informationen zu diesem Thema findet man z.B. in den Arbeiten von [Krämer, 1998] und [Nuthmann, 1998]. In diesen Arbeiten ist die 'Segmentation' ein zentrales Thema.

3.5 Intelligente Volumen

Es wird die Methode zur Erstellung einer speziellen Datenstruktur beschrieben, die ein räumliches Modell mit einem symbolischen Modell verbindet. Diese Datenstruktur ist Basis für die 'intelligente' Visualisierung, welche bei der Erstellung von Teilergebnissen (siehe später) benutzt wird.

Bei der 'intelligenten' Visualisierung kann zu jedem Bildpunkt eines 3D-Bildes z.B. die Organzugehörigkeit und weitere Informationen abgerufen werden. Die Datenstruktur des 'intelligenten' Volumens setzt sich aus Intensitätsvolumen, Attributvolumen und einer Wissensbasis zusammen. Voraussetzung dafür ist die vorherige Segmentation des Daten-Volumens [Höhne et al., 1995]; [Schiemann et al., 1994].

Die bei der Segmentation ermittelten Organ- und Objektgrenzen werden in erster Linie für die 3D-Visualisierung benutzt.

Dafür werden die Intensitätswerte der einzelnen Voxel genutzt (Grauwerte bei CT-, MRT- und Ultraschall-Datensätzen; Farbwerte bei Kryotomschnitt-Datensätzen). Diese werden zu einem Intensitätsvolumen zusammengefaßt.

Zusätzlich zur Kennzeichnung der einzelnen Voxel zu Organen können auch weitere Attribute den Voxeln zugewiesen werden. Mögliche Attribute sind Informationen zur Morphologie, zu Funktionssystemen, zur Blutversorgung oder auch Organbezeichnungen in verschiedenen Sprachen. Die jeweiligen Attribute werden zu Attributvolumenzusammengefaßt .

Zu jedem dieser Attributvolumen gibt es eine Domäne, die medizinisches Wissen in einem semantischen Netzwerk gespeichert hat, in dem die Objekte in bestimmten Relationen zueinander stehen wie z.B. 'Teil von'. Auch Verknüpfungen zwischen verschiedenen Domänen sind möglich. Dieses komplexe Netzwerk ist im Grunde eine medizinische Wissensbasis auf Symbolebene. 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. Eine Leber wird z.B. immer Teil des Oberbauchs bleiben.

Abbildung 3.14 zeigt den schematischen Aufbau der Datenstruktur des 'intelligenten' Volumens [Höhne et al., 1995]. Man erkennt das Gesamtvolumen in mehrere Einzelvolumina aufgeteilt und die Verknüpfungen im semantischen Netzwerk innerhalb der Wissensbasis.

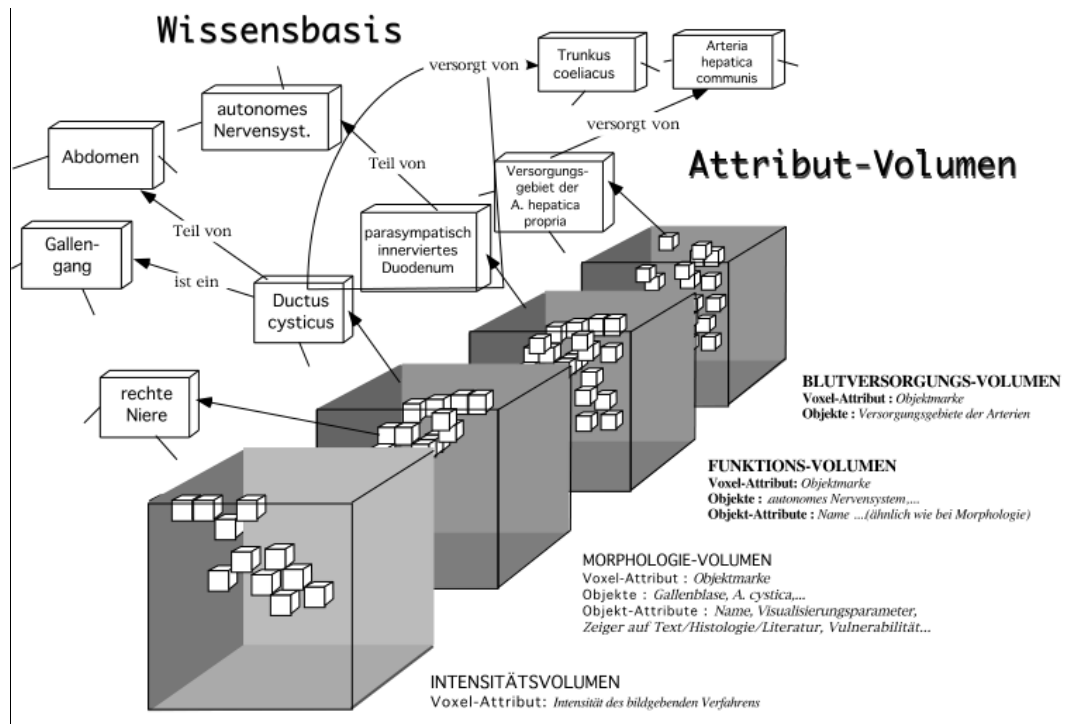


Abbildung 3.14: schematischer Aufbau der Datenstruktur des 'intelligenten' Volumens mit Aufteilung des Gesamtvolumens in die Teilvolumina und Darstellung der Wissensbasis mit seinem semantischen Netzwerk

Die Beziehungen zwischen den Objekten innerhalb einer Domäne werden am Beispiel der rechten Niere und der Domäne Morphologie gezeigt.

Für die rechte Niere gilt: rechte Niere ist Teil von Nieren; Nieren sind Teil von Bauchraum; usw. (siehe Abbildung 3.15 und Abbildung 3.16)

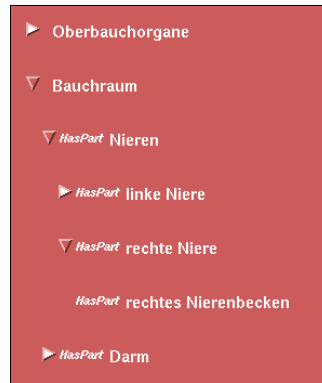


Abbildung 3.15: exemplarische Darstellung der Domäne Morphologie am Beispiel der rechten Niere. Innerhalb der Wissensbasis sind hierarchische Strukturen durch Relationen wie 'Vater-Kind-Beziehungen' aufgebaut. So ist die rechte Niere Teil von den Nieren und diese Teil des Bauchraums.

Der multiattributive Ansatz ermöglicht vor allem voxelspezifische Abfragen in den 3D-Bildern. Auch die hierarchischen Strukturen lassen sich direkt im Bild darstellen. Abbildung 3.16 zeigt die inneren Organe des Fötus-Datensatzes, wobei hier die hierarchische Struktur der Domäne Morphologie am Beispiel der markierten rechten Niere dargestellt ist.

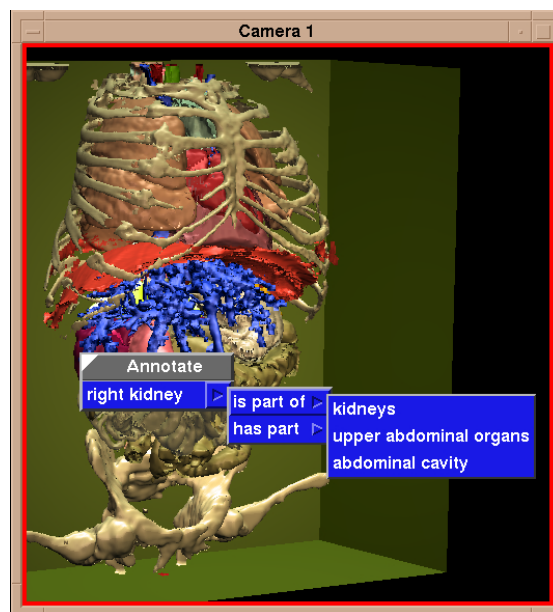


Abbildung 3.16: Screenshot aus dem Programm **VOXEL-MAN**. 3D-Darstellung der inneren Organe des Fötus-Datensatzes mit Markierung der rechten Niere und deren Eingliederung in die hierarchische Ordnung der Domäne Morphologie.

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

3.6 interaktive Elemente im Internet

Die isolierte Anzeige der interaktiven Simulationssequenzen ohne Kontextbezug ist zwar möglich, aber nicht sinnvoll. Daher sollen diese Sequenzen in einen Lehrkontext eingebunden werden. Wie oben schon erwähnt, geschieht dies mit Hilfe der Internet-Technologie, die eine einfache Verbindung von Texten und Bildern zuläßt. Hierfür wird HTML¹⁰ benutzt. Eine besondere Funktionalität bieten in HTML die sogenannten 'Links' (Sprungmarken), die es ermöglichen auf einen Mausklick zu anderen Textstellen oder Seiten zu springen. Dabei können Textstellen, Grafiken oder Bilder solche Sprungmarken darstellen. Verknüpfungen von sogenannten HTML-Seiten über solche 'Links' ergeben dann ein Programm.

Außerdem bietet die Internet-Technologie die Möglichkeit eigene interaktive Elemente zu programmieren.

In unserem Fall handelt es sich dabei um interaktive Menustrukturen, interaktiv explorierbare Bilder und interaktiv steuerbare Videosequenzen.

In [Kobert, 1998] oder [Campbell and Darnell, 1998] können genauere Details über HTML nachgelesen werden.

3.6.1 interaktive Menustrukturen

Auf mangelnde Intuitivität und schlechte Benutzerführung durch unübersichtliche Menüs in bestehenden Lehrprogrammen wurde schon im Kapitel 2 (Stand der Forschung) hingewiesen.

Ein Lösungsversuch für diese Probleme sind interaktive Menustrukturen.

Einerseits sollen diese dem Anwender klar machen, wo er sich gerade im Programm befindet, damit er den Überblick nicht verliert und bei Bedarf schnell zu den Hauptteilen des Lehrprogramms zurückkehren kann.

Andererseits sollen die automatisch aufklappbaren Menüs und Untermenüs die Intuitivität fördern. Die Idee ist, daß die Navigation für den Anwender erleichtert wird, wenn automatisch passende Wahlmöglichkeiten geliefert werden.

Ein Beispiel : Es wird nach einer bestimmten Gehirnblutungsform in einer Datenbank mit pathologischen Fällen gesucht. Der Anwender ist innerhalb des Suchbaums bei dem Punkt 'Gehirnblutung' angelangt. Wenn jetzt automatisch alle in der Datenbank gespeicherten Gehirnblutungsformen angezeigt werden, fällt es leichter, die Richtige auszuwählen.

¹⁰HTML='Hypertext Markup Language' ist eine Beschreibungssprache, die von den Browsern interpretiert wird. Dabei werden Texte und Bildquellen mitsamt den zugehörigen Formatierungsbefehlen in eine Datei geschrieben, welche später vom Browser ausgewertet wird.

Die interaktiven Menustrukturen lassen sich mit einer Script-Sprache¹¹ namens JavaScript erstellen.

JavaScript ist integraler Bestandteil der Browsertechnologie und wird im WorldWideWeb (WWW) für interaktive anwendergesteuerte Aktionen benutzt. In unserem Fall wird vor allem ein sogenannter 'Event-Handler' (Ereignis-Verwalter) benutzt. Dieser 'Event-Handler' kontrolliert, welche Mausektionen gerade ausgeführt werden, z.B. ob der Mauszeiger sich gerade in einem bestimmten Bereich des Bildschirms befindet oder ob eine Maustaste gedrückt wurde. Im ersten Fall wird der Script-Befehl 'on mouseover' und im zweiten Fall der Script-Befehl 'on mousedown' verwendet.

Auf bestimmte Mausektionen kann das Programm nun spezifisch reagieren. Bei dem interaktiven Menu wird das Anwählen eines Menupunktes automatisch das jeweilige Untermenu anzeigen, wie z.B. in Abbildung 3.17 dargestellt.

Gleichzeitig wird der angewählte Menueintrag gegenüber den anderen Menupunkten farblich hervorgehoben, damit der Menupfad schnell und eindeutig erkannt werden kann.

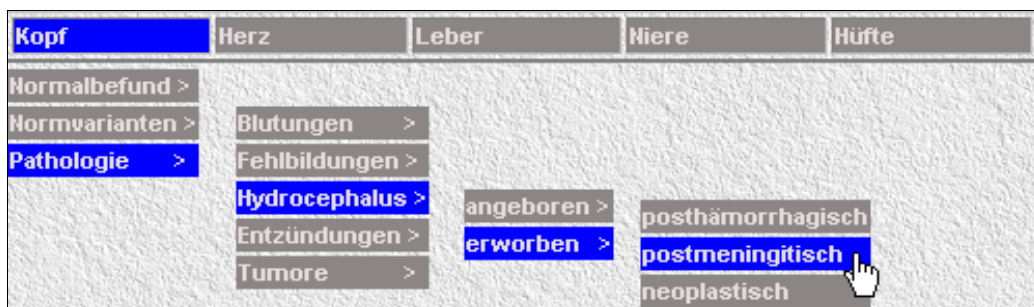


Abbildung 3.17: Interaktive Menustruktur am Beispiel einer Klassifikation pathologischer Fälle. Der Menupfad ist farblich eindeutig erkennbar, jedes Untermenu wird automatisch angezeigt, wenn sich der Mauszeiger über dem jeweiligen Oberbegriff befindet. Z.B. 'angeboren/erworben' wird angezeigt, wenn auf 'Hydrocephalus' gezeigt wird.

¹¹Eine Script-Sprache ist vereinfacht gesagt eine weniger funktionelle Programmiersprache, mit der kleine Programmroutinen geschrieben werden können

Es folgt auszugsweise ein Script-Code zur Generierung einer interaktiven Menustruktur. Funktionen werden in Java-Script definiert, die dann später aus HTML aufgerufen werden können, z.B. mit dem Befehl 'on mouseover'.

```
<html><title>menu</title>

<script language=javascript1.1>
    .
    .
    .
function loesche_tab(x) {
    document.all[x].style.visibility="hidden"; }

function zeige_tab(x) {
    document.all[x].style.visibility="visible"; }

function do_submenu2(x){
    if(subold2){
        loesche_tab(subold2); do_submenu3();
        subold2="";}
    if(x){
        zeige_tab(x);
        subold2=x;}}
</script>
<body>
<table class=tab1_pos id=tab1 border=2 width=500>
<tr> <td id=a > <a href="" onmouseover="do_submenu('tab2_a') ;
unlight_tab1() ;mach_blau('a') ; mem_light_tab1='a';
unlight_tab2(); " > </a> </td>
    .
    .
    .
</body></html>
```

Auch hier wird für Detailfragen auf die umfangreiche weitergehende Literatur verwiesen wie z.B. [Seebörger-Weichselbaum, 1998].

3.6.2 interaktiv explorierbare Bilder

Anlehnend an die Wissensvermittlung in den medizinischen Lehrbüchern und diversen medizinischen Lehrprogrammen (siehe Kapitel 2) wird auch in diesem Lehrprogramm die klassische Gegenüberstellung von Bildinformationen und erklärenden Texten benutzt. Im Gegensatz zu den Bildern in den Lehrbüchern wird die statische Darstellung durch eine interaktive abgelöst. Die anatomischen oder pathologischen Strukturen im Bild sind also nicht direkt benannt, sondern werden erst auf Anwenderkommando angezeigt. Dieses Kommando entspricht in der Regel einer Mausektion.

Solche interaktiv explorierbaren Bilder haben einen hohen didaktischen Wert, weil damit Selbstabfragen und Lernkontrollen möglich sind.

Die interaktive Funktionalität wird wie bei der interaktiven Menüstruktur durch Java-Script bereitgestellt. Auch hier werden bestimmte Mausektionen vom 'Event-Handler' abgefangen, die dann entsprechende Aktionen auslösen.

Abbildung 3.18 zeigt dies am Beispiel eines coronaren Ultraschall-Standardschnittes bei einer Kopfuntersuchung.

Befindet sich der Mauszeiger innerhalb des Ultraschall-Bildes über einer relevanten

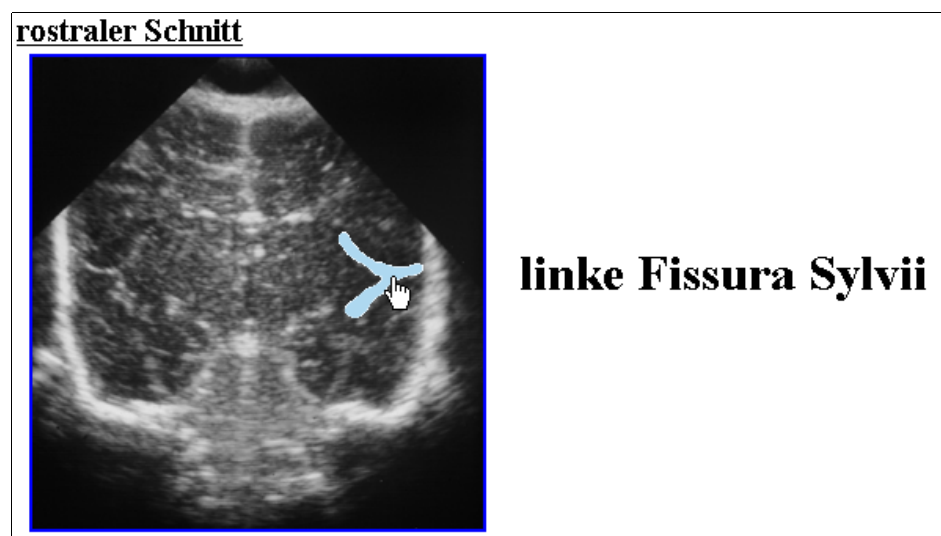


Abbildung 3.18: Beispiel für interaktiv explorierbares Ultraschallbild : typisches Bild aus einer coronaren Gehirnuntersuchung. Beim Überfahren wichtiger und relevanter Strukturen mit dem Mauszeiger wird die Struktur farbig dargestellt und nebenan benannt.

anatomischen Struktur, wird rechts davon der Name der Struktur und gleichzeitig die zugehörige Region im Bild angezeigt.

Dasselbe lässt sich auch umkehren, d.h. beim Zeigen auf den Namen erscheint die Struktur umrandet oder schraffiert auf dem Ultraschall-Bild.

Um diese interaktiv explorierbaren Bilder zu erstellen bedarf es einer wichtigen Vorarbeit. Es müssen zuerst sogenannte 'Image-Maps' (Bild-Landkarten) erstellt werden. Dafür werden Bild für Bild die einzelnen Regionen der zu erkennenden anatomischen Strukturen markiert wie auf Abbildung 3.19 und dann benannt.

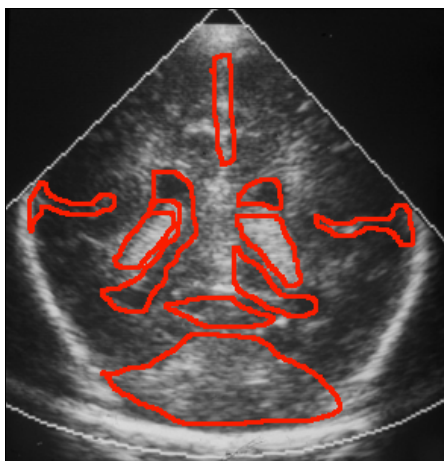


Abbildung 3.19: Image-Map eines Ultraschallbildes. Die relevanten Strukturen werden auf einer virtuellen durchsichtigen Folie markiert und benannt. Dies ist die wichtigste Vorarbeit zur Erstellung der interaktiv explorierbaren Bilder. Hierfür wird medizinisches Fachwissen benötigt.

Dieser Schritt ist die eigentliche Extraktion der medizinischen Information und erfordert medizinisches Fachwissen.

Als nächstes müssen die vordefinierten Regionen mit einer Bildbearbeitungssoftware nachgezeichnet und in einem speziellen Datenformat abgelegt werden. Dieses Datenformat kann man sich wie eine durchsichtige Folie vorstellen, auf der eine Region des 'Image-Maps' eingezeichnet ist. Dieses Format wird auch 'Layer' (Schicht) genannt. Würde man also alle einzelnen 'Layer' über das nackte Ultraschallbild legen, dann käme die anfängliche 'Image-Map' heraus.

Diese 'Layer' werden durch Java-Script-Code aufgerufen. Somit können bestimmte Regionen angezeigt werden, abhängig von der Mausektion, wie oben im Beispiel beschrieben.

3.6.3 interaktiv steuerbare Videosequenzen

Bewegung von Organstrukturen kann bei einer Ultraschalluntersuchung zu einem entscheidendem Diagnosekriterium werden, so z.B. bei der Echokardiografie. Aber auch bei anderen Organuntersuchungen ist der Stellenwert von Organbewegungen nicht zu unterschätzen, z.B. bei der Darmdiagnostik.

Das ist ein großer Vorteil der Ultraschalldiagnostik gegenüber den anderen Schnittbildverfahren wie CT oder MRT.

Damit der wichtige Bewegungseindruck einer Ultraschalluntersuchung nicht verloren geht, sind Videosequenzen von Standarduntersuchungen in das Lehrprogramm mit eingebunden. Dafür müssen diese nach Aufzeichnung am Ultraschallgerät noch digitalisiert werden.

Für eine bessere und intuitivere Benutzbarkeit wird auch hier die schon erwähnte VR-Technologie angewandt, um die Videosequenz interaktiv steuerbar zu machen. Letztendlich entspricht die Videosequenz einer eindimensionalen Filmsequenz für die ein eindimensionales VR-Atom benötigt wird.

Abbildung 3.20 zeigt eine interaktiv steuerbare Videosequenz einer coronaren Kopfuntersuchung. Durch horizontale Bewegungen mit dem Mauszeiger innerhalb der Sequenz kann man sich vorwärts und rückwärts bewegen.

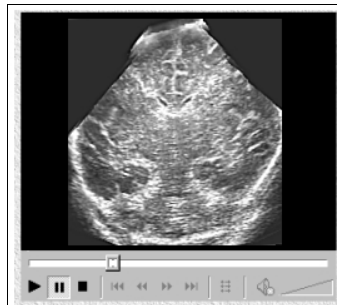


Abbildung 3.20: Beispiel einer interaktiv steuerbaren Videosequenz einer coronaren Kopfuntersuchung. Durch horizontale Bewegungen mit dem Mauszeiger kann man sich innerhalb der Videosequenzen vorwärts und rückwärts bewegen.

Kapitel 4

Material

Das wichtigste Ausgangsmaterial für die Erstellung der interaktiven Simulationssequenzen, die die zentralen interaktiven Elemente des Lehrprogramms darstellen, bilden die 3D-Volumen-Datensätze, welche mit dem Programm **VOXEL-MAN** bearbeitet werden. Diese 3D-Datensätze basieren allesamt auf zweidimensionalen Schichtaufnahmen. Die Erzeugung der 3D-Volumen aus den Einzelschichten ist im Methodenteil beschrieben.

Nachfolgend werden alle verwendeten Datensätze und ihre Besonderheiten beschrieben.

Grundsätzlich ist eine Einteilung in experimentelle, postmortal gewonnene Datensätze und Patienten-Datensätze, die im klinischen Alltag angefertigt wurden möglich.

Bei den experimentellen Datensätzen handelt es sich um einen Kryotomschnitt-Datensatz aus dem 'Visible Human Project' und einem MRT-Datensatz eines totgeborenen Föten.

Die Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht der benutzten Volumendatensätze.

Zusätzlich zu den 3D-Datensätzen sind Bilder und Videos aus dem Archiv der Kinderradiologie der Universitätsklinik Eppendorf, Hamburg, benutzt worden. Auf dieses Archiv wird abschließend in diesem Kapitel eingegangen.

experimentelle Datensätze	Patienten-Datensätze
• Kryotomschnitt-Datensatz aus dem VHP • MRT-Datensatz eines totgeborenen Föten	• MRT-Datensatz einer Kopfuntersuchung beim Kleinkind mit und ohne Kontrastmittel • Ultraschall-Datensatz einer Kopfuntersuchung beim Säugling • Ultraschall-Datensatz einer Bauchuntersuchung beim Erwachsenen

Tabelle 4.1: Auflistung der verwendeten 3D-Volumendatensätze

4.1 Volumendatensätze

4.1.1 experimentelle Datensätze

4.1.1.1 Visible Human Datensatz, Kopf und Abdomen

Der verwendete 'Visible Human Male'-Datensatz ist ein Teil des 'Visible Human Projects' der 'National Library of Medicine, U.S.A.', in dem Forschern in aller Welt kostenlos umfangreiche digitale Datensätze eines männlichen und weiblichen Menschen in verschiedenen Modalitäten (Röntgen, CT, MRT, Kryotomschnitte) zur Verfügung gestellt werden.

Diese von einem männlichem Leichnam gewonnenen Datensätze wurden erstmals 1994 den Forschungsgruppen bereitgestellt [Spitzer et al., 1996].

Bei dem Leichnam handelte es sich um einen wegen Mordes rechtskräftig Verurteilten, der seinen Körper der medizinischen Forschung zur Verfügung gestellt hatte.

Nach aufwendigen Vorbereitungen zur Konservierung des Leichnams wurden die verschiedenen radiologischen Aufnahmen gemacht. Zur Erstellung der Kryotomschnitte wurde der Leichnam eingefroren und danach in dünne Schichten geschnitten. Jeder Kryotomschnitt wurde mittels einer hochauflösenden digitalen Kamera aufgezeichnet.

Im Einzelnen besteht der 'Visible Human Male'–Datensatz aus:

1. Kryotomschnitten als transversale Photographien mit einer Pixelgröße von 0.32 mm bei 24-bit Farbauflösung und einem Schichtabstand von 1 mm (Abbildung 4.1 unten links)
2. MRT des frischen Leichnams in hauptsächlich coronaren Schnitten in unterschiedlichen Gewichtungen (T1, T2, PD). Die Pixelgröße variiert zwischen 1 und 2 mm bei Schichtabständen von bis zu 5 mm (Abbildung 4.1 unten rechts)
3. CT des frischen Leichnams mit Pixelgrößen zwischen 0.5 und 1 mm bei Schichtabständen zwischen 1 und 5 mm (Abbildung 4.1 oben links)
4. CT des gefrorenen Leichnams mit Pixelgrößen zwischen 0.5 und 1 mm und einem Schichtabstand von 1 mm (Abbildung 4.1 oben rechts)

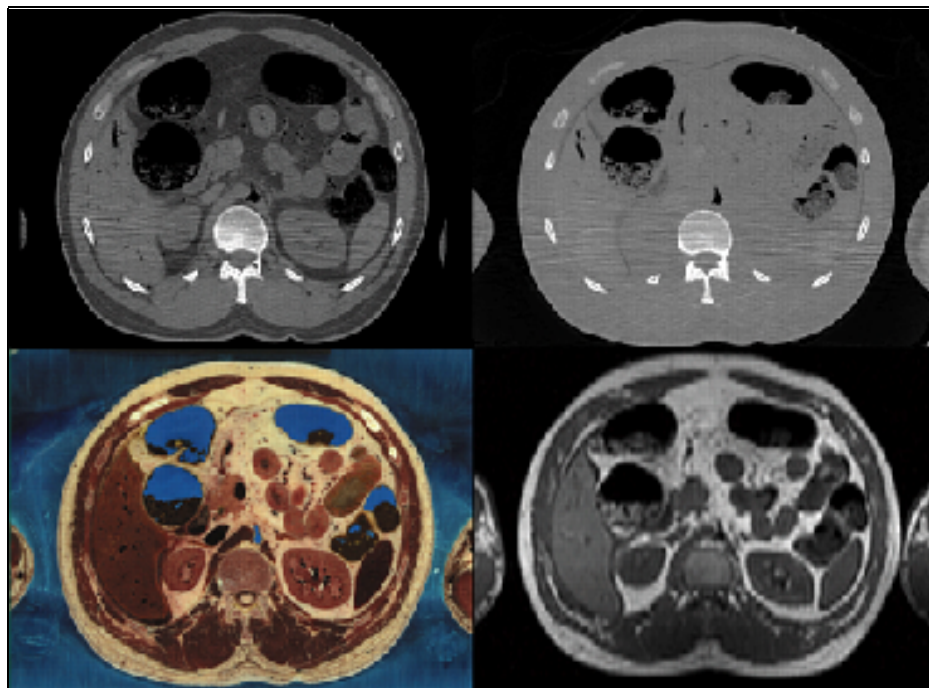


Abbildung 4.1: Die vier unterschiedlichen Datensätze des Visible Human Male, exemplarisch ist ein Schnitt durch den Bauch gezeigt. Man erkennt Leber, Nieren und Darm angeschnitten. CT-Schnittbild des frischen Leichnams (oben links); CT-Schnittbild des gefrorenen Leichnams (oben rechts); Kryotom-Schnittbild des gefrorenen Leichnams (unten links); MRT-Schnittbild des frischen Leichnams (unten rechts)

In dieser Arbeit werden nur die Datensätze der Kryotomschnitte und MRT-Aufnahmen verwendet, wobei nur die Kopf- und Bauchregion von Interesse sind.

Diese Datensätze sind schon segmentiert, so daß die Erstellung von 'intelligenten' Simulationssequenzen aus diesen Datensätzen möglich ist. Eine Erläuterung zu den

‘intelligenten’ Simulationssequenzen findet sich im Ergebnisteil, da diese Teilergebnisse darstellen. (siehe Unterkapitel **VOXEL-MAN 3D-Navigator** im Kapitel Anwendungen)

Eine Besonderheit stellt der Kryotom-Datensatz aufgrund seiner hohen Pixel-Auflösung von 2048 x 1216 Pixeln und der Schichtdicke von nur 1 mm dar. Dadurch sind viele morphologische Strukturen identifizierbar, die in den radiologischen Datensätzen nicht zu erkennen sind. Außer der hohen Auflösung sind auch die erhöhten Kontrastunterschiede, bedingt durch verschiedene Farbwerte, eine ideale Voraussetzung zur digitalen Weiterverarbeitung in einem 3D-Anatomie-Atlas.

Einziger Nachteil der hohen Detailauflösung stellt die hohe Anforderung an die Hardware dar, insbesondere der Bedarf an Arbeitsspeicher und Prozessorleistung zur Bearbeitung der großen Datenmengen.

4.1.1.2 Fötus-Datensatz

Bei diesem Datensatz handelt es sich um die Kernspintomographie-Aufnahmen des Rumpfes eines totgeborenen Föten, dessen Gestationsalter 32 Wochen betrug.

Als vorbereitende Maßnahme zur besseren Darstellung der Gefäße wurde durch die Nabelvene Gadolinium (MRT-Kontrastmittel) injiziert. Außer der stärkeren Kontrastierung erreichte man damit auch eine zusätzliche Aufweitung der Gefäße. Abbildung 4.2 zeigt z.B. die aufgeweitete Umbilicalvene im MRT-Schnitt.

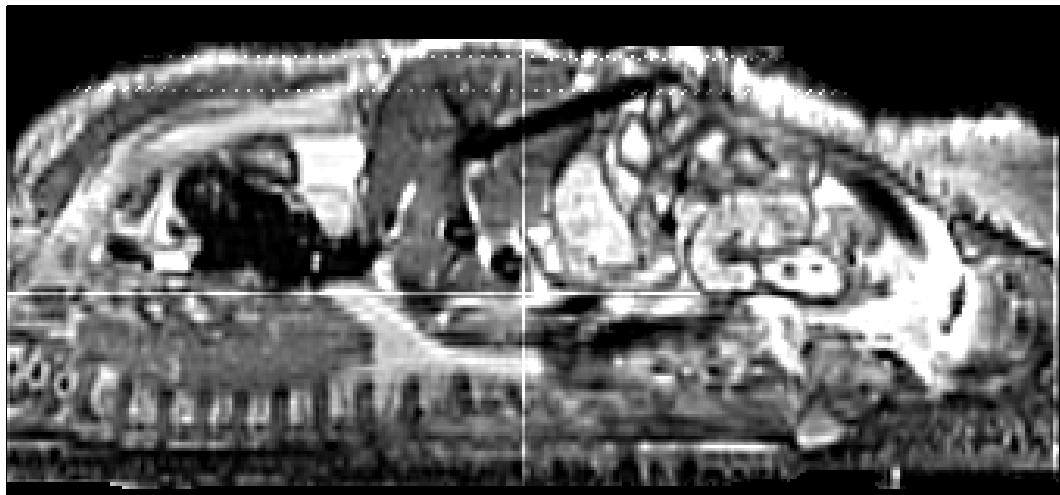


Abbildung 4.2: Rekonstruierter sagittaler Längsschnitt durch den MRT-Fötusdatensatz. Links erkennt man den Thorax mit Herz-Lungen-System, in der Mitte die Leber und rechts die angeschnittenen Darmschlingen. Unten ist die Wirbelsäule mit ihren einzelnen Wirbelkörpern gut zu erkennen. Die breite längliche Struktur von der Mitte der Leber schräg nach oben zur Bauchdecke ziehend, entspricht der durch das Kontrastmittel aufgeweiteten Nabelvene (Umbilicalvene).

Die kernspintomographischen Aufnahmen sind in der radiologischen Klinik des Universitäts-Krankenhauses Eppendorf, Hamburg, erstellt worden. Mit einem 'Gyroscan S15' (Philips, 1.5 Tesla) wurde eine T2-gewichtete Spin-Echo-Sequenz (TE/TR=100/2000 ms) in 3D-Mode durchgeführt. Daraus wurden 64 coronare Schichten mit einer Auflösung von 256x256 Pixeln und einem FOV (field of view) von 150x150 mm² aufgenommen. Die resultierende Pixelgröße betrug demnach 0.59 mm². Die Schichtdicke betrug 1 mm bei einem Gap (Schichtabstand) von 0 mm. Im Gegensatz zum Visible Human Male-Datensatz, der keine wesentlichen pathologischen Veränderungen enthält, sind bei diesem Fötus-Datensatz erhebliche pathologische Veränderungen anzutreffen. Es bestand ein Hydrops congenitus mit ausgeprägten Ödemen, massivem Pleura- und Pericarderguß, sowie reichlich Aszites, wie in Abbildung 4.3 zu erkennen ist.

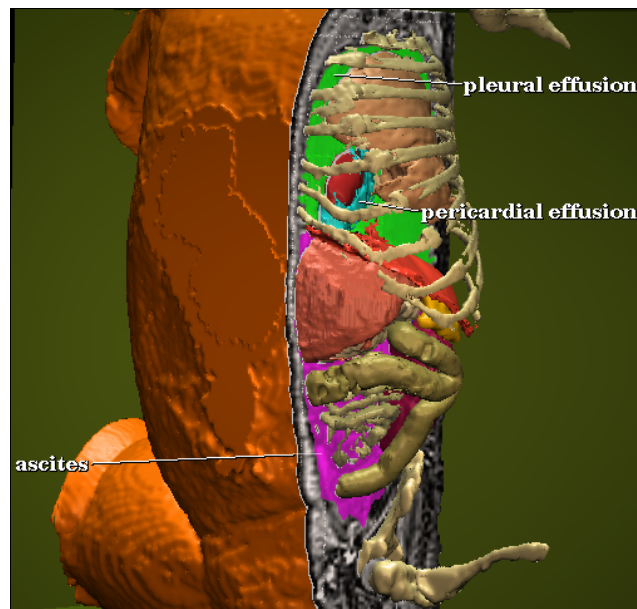


Abbildung 4.3: 3D-Bild aus dem Fetus-Atlas mit anschaulicher Darstellung der pathologischen Wasseransammlungen in den verschiedenen Körperhöhlen. Im Herzbeutel als Pericard-Erguß, im Brustkorb als Pleura-Erguß und im Bauchraum als Aszites.

Trotz der sehr kleinen Ausmaße des Fötus (ca. 15 cm Gesamtlänge) sind alle wichtigen Organstrukturen des Abdomens in diesem 3D-Atlas enthalten. Auch dieser Datensatz liegt segmentiert vor.

4.1.2 Patientendatensätze

Außer den oben genannten zwei experimentellen Datensätzen werden auch Patientendatensätze aus dem klinischen Alltag benutzt. Durch die naturgemäß nicht

ständig gegebenen optimalen Untersuchungsbedingungen, z.B. Bewegung des Kopfes bei der Ultraschalluntersuchung eines Säuglings, sind die Patientendatensätze zum Teil in ihrer Qualität gemindert. Insgesamt sind sie aber gut genug um die gewünschten Bilder und Sequenzen für das Lehrprogramm in ausreichender Qualität erstellen zu können. Die Patientendatensätze sind noch nicht segmentiert worden.

4.1.2.1 MRT-Datensatz vom Kopf eines Kleinkindes, mit und ohne Kontrastmittel

Diese Datensätze sind im Pädiatrischen Zentrum in Stuttgart unter der Leitung von PD 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 beurteilbar sind. Bei dem verwendeten Gerät handelt es sich um ein 'VISION'-Gerät der Firma Siemens mit 1.5 Tesla Magnetfeldstärke. Es sind zwei Sequenzen in sagittaler Richtung aufgenommen worden, beide mit einer Matrix von 256x256 Pixeln und einem FOV von 180x180 mm² und einem Gap von 0 mm. Die erste Meßsequenz ist nativ und die zweite nach intravenöser Gabe von Gadolinium (MRT-Kontrastmittel) aufgenommen worden.

Abbildung 4.4 zeigt zwei sagittale Einzelschichten aus den Datensätzen. Links eine Aufnahme ohne Kontrastmittel und rechts mit Kontrastmittel.

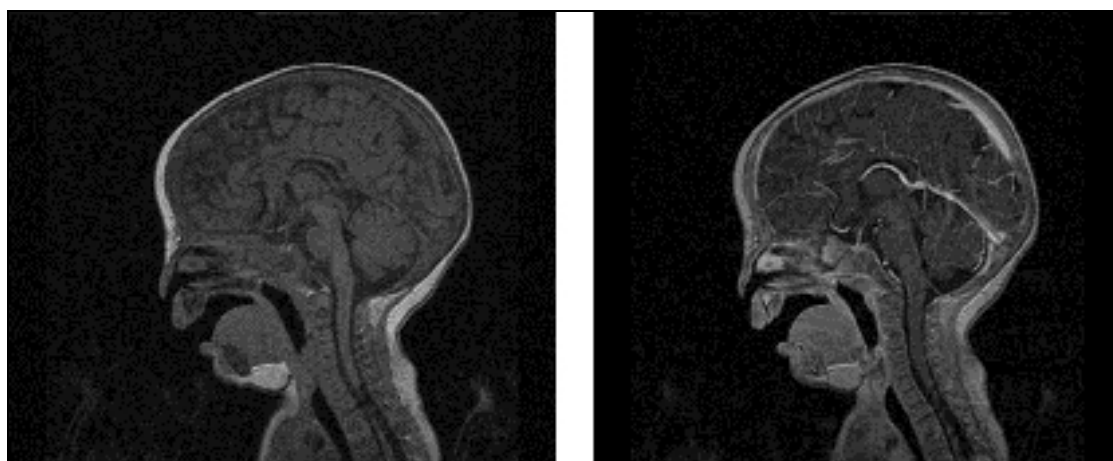


Abbildung 4.4: sagittale MRT-Einzelschichten aus den MRT-Aufnahmen eines Kinderkopfes, links ohne Kontrastmittel und rechts mit Kontrastmittel.

4.1.2.2 Ultraschalldatensatz einer Kopfuntersuchung beim Säugling

Vor ein paar Jahren war es noch nicht denkbar einen Volumendatensatz aus Ultraschalldaten zu erhalten, aber 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 Einzelschichten der Ultraschalldiagnostik 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 anfänglich 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 nannte man dann 3D-Schallköpfe (z.B. im Ultraschallgerät 'Dornier A-I-3200')[Umgelter, 1997]. So konnten die Einzelschichten zu bestimmten Positionen des Schallkopfes während einer Ultraschalluntersuchung zugeordnet werden.

Heutzutage hat sich eine neue Methode etabliert, um die genaue Raum- und Ortsposition 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 4.5 erkennt man das Tracking-System der Firma '3D-Echotec'. Der Quader links erzeugt das Magnetfeld und rechts sind drei Magnetfeld-Sensoren abgebildet. Der kleinste davon ist auf einem Schallkopf montiert.



Abbildung 4.5: 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 dessem Stil aufgesetzt erkennt man einen kleinen Magnetfeld-Sensor. Rechts nebendran sind noch zwei weitere, etwas größere Magnetfeld-Sensoren abgebildet.

Allen Systemen gleich ist die Notwendigkeit einer Orthogonalisierung (Umwandlung in ein kartesisches Koordinatensystem) der fächerförmig auseinanderweichenden schrägen Schnittbilder, da normalerweise für die Erzeugung eines Volumenblocks orthogonal liegende Einzelschichten verwendet werden.

Diesen Vorgang nennt man 'post-image-processing'.

Letztendlich werden aus dem gewonnenen Datenblock parallele Schnittbilder errechnet, die dann weiterverwertet werden können. In unserem Fall werden die parallelen Schnittbilder wieder zu einem 3D-Volumen zusammengepackt, um im Programm **VOXEL-MAN** weiterbearbeitet zu werden.

In Abbildung 4.6 ist die Orthogonalisierung schematisch dargestellt.

Der abgetastete Volumenkörper entspricht theoretisch einem Thorusstumpf, wie die spätere Visualisierung im **VOXEL-MAN** bestätigt (Siehe Abbildung 4.7).

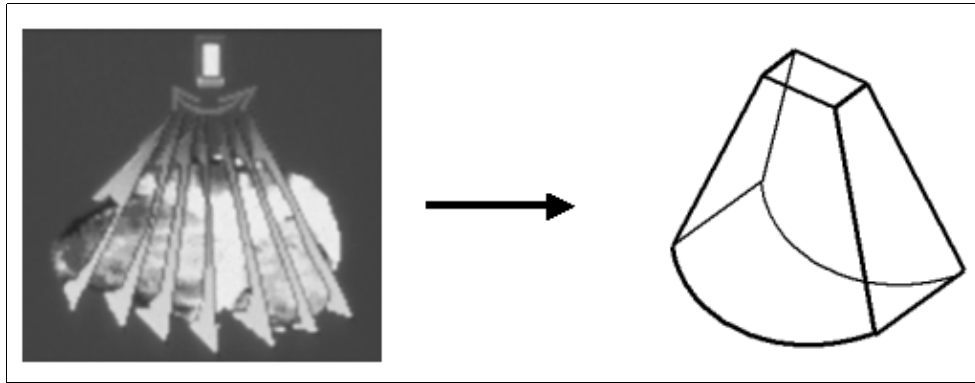


Abbildung 4.6: Orthogonalisierung der Einzelschichten: Die fächerförmig auseinander weichenden Schichten aus einer Schallkopfbewegung werden zu einem 3D-Volumenblock umgeformt. Im Falle eines Sektorschallkopfes erhält man damit einen Thorusstumpf.

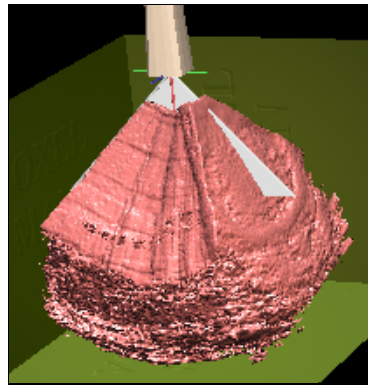


Abbildung 4.7: Visualisierung eines 3D-Sono-Datensatzes im **VOXEL-MAN**. Der gewonnene Thorusstumpf läßt sich z.B. mit dem Ultraschall-Werkzeug bearbeiten. Hiermit können beliebige schräge 2D-Ansichten erzeugt werden.

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.

4.1.2.3 Ultraschalldatensatz einer Leberuntersuchung beim Erwachsenen

Für Referenzzwecke ist auch ein Ultraschalldatensatz einer Leber erstellt worden. Hier handelt es sich um eine Routineuntersuchung ohne pathologischen Befund.

Zur Verfügung stand diesmal ein Bildbearbeitungs-System der Firma 'Tomtec' und ein Ultraschallgerät der Firma 'ATL', Modell 'HDI 3000'. Es wurde ein Linearschallkopf mit einer Schallfrequenz von 3 Mhz verwendet.

4.2 Einzelbilder und Videosequenzen

Außer den oben genannten Datensätzen, die zur Erstellung der interaktiven und der 'intelligenten' Simulationssequenzen benutzt werden, sind auch viele einzelne Bilder aus der Röntgen-, MRT-, CT- und Sono-Diagnostik und einige Videosequenzen in das Programm eingeflossen, die fast ausschließlich aus dem Datenarchiv der Kinder-radiologie der Universitätsklinik Eppendorf, Hamburg stammen.

Das Archiv umfaßt eine langjährige große Sammlung klinischer Kasuistiken. Diese wird unter anderem für die Zusammenstellung von Vorträgen und Vorlesungen benutzt. Die Einbindung unterschiedlichster pathologischer Fälle in das Lehrprogramm ist damit ebenfalls erleichtert worden.

Unauffälliges Befundmaterial aus dem klinischen Alltag wird benutzt, um die normale Anatomie darzustellen.

Die Videosequenzen entstammen Routineuntersuchungen durch direktes Aufzeichnen des Monitorbildes auf ein S-VHS-Band. Diese Video-Aufzeichnungsmöglichkeit ist mittlerweile standardmäßig in allen Ultraschallgeräten zu finden. Aufgrund wesentlich besserer Auflösung und Bildschärfe ist die S-VHS-Norm der alten VHS-Norm vorzuziehen. Insbesondere die spätere Digitalisierung zeigt bei S-VHS-Norm deutlich bessere Ergebnisse.

Es sei noch erwähnt, daß vielfältiges Bildmaterial bereits in digitalisierter Form vorlag, da im Rahmen einer allgemeinen digitalen Umstellung innerhalb der kinderradiologischen Abteilung diese Sammlung klinischer Kasuistiken digitalisiert und archiviert wird.

Kapitel 5

Ergebnisse

Der interaktive Ansatz zur Vermittlung von Basiswissen und Basisfähigkeiten für eine Ultraschalluntersuchung in der Kinderheilkunde benötigt neue interaktive Elemente.

Mit den im Kapitel 3 beschriebenen Methoden ist es nun möglich solche didaktisch sinnvollen interaktiven Elemente für ein Lehrsystem zu erstellen.

Im folgenden werden die Ergebnisse und ihre Funktionalität beschrieben. Das sind zum einen die interaktiv steuerbaren Sequenzen und zum anderen die interaktiv explorierbaren Einzelbilder.

Das Gesamtziel, ein multimediales Lehrsystem welches die interaktiven Elemente integriert, wird am Ende des Kapitels vorgestellt.

5.1 interaktiv steuerbare Sequenzen

Eine Auflistung der erzeugten interaktiv steuerbaren Sequenzen findet sich in Tabelle 5.1.

Hierunter fallen sowohl die Simulationssequenzen als auch die Videosequenzen. Die Auswahl der Simulationssequenzen richtet sich an den üblichen Standarduntersuchungen bei der Ultraschalldiagnostik in der Pädiatrie. So sind dies z.B. die Kopfuntersuchungen bei Säuglingen und Kleinkindern in coronarer und sagittaler Richtung, eine Leberuntersuchung mit Darstellung der großen Lebervenen und eine Nierenuntersuchung im Längsschnitt.

Für die Videosequenzen gilt im Prinzip die gleiche Auswahl.

Untersuchungsart	Sequenztyp	Freiheitsgrad
coronare Kopfuntersuchung	Simulation	1
coronare Kopfuntersuchung	Video	1
sagittale Kopfuntersuchung	Simulation	2
sagittale Kopfuntersuchung	Video	1
subcostale Lebruntersuchung	Simulation	1
subcostale Leberuntersuchung	Video	1
sagittale Nierenuntersuchung	Simulation	1
sagittale Nierenuntersuchung	Video	1

Tabelle 5.1: Auflistung der interaktiv steuerbaren Simulationssequenzen und Videosequenzen

Eine Besonderheit stellen die Simulationssequenzen des Bauchraums dar, bei denen die Datenstruktur des 'intelligenten' Volumens ausgenutzt wurde. Diese sind als Teilergebnisse in ein anderes Programm eingeflossen (siehe Unterkapitel **VOXEL-MAN 3D-Navigator** im Kapitel Anwendungen).

interaktiv steuerbare Simulationssequenzen wurden erstellt von:

- transfontanelläre coronare Standarduntersuchung mit 1 Freiheitsgrad.

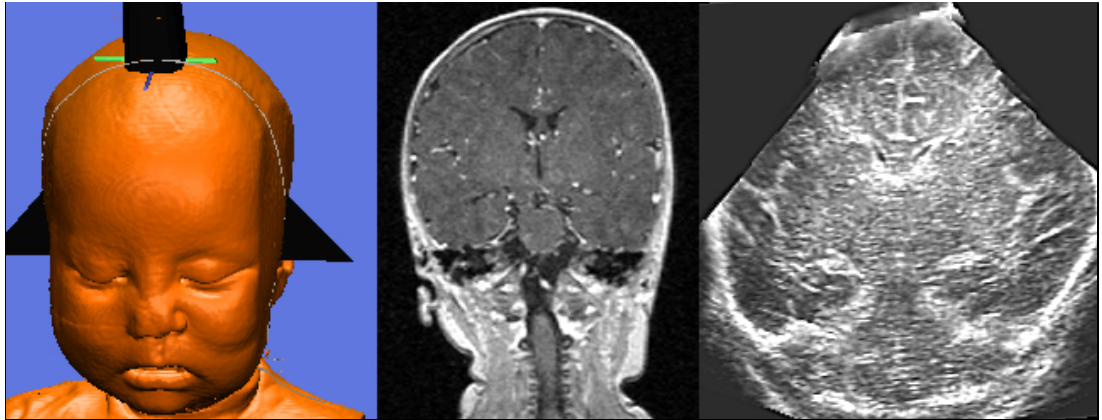


Abbildung 5.1: Screenshot aus der Simulationssequenz einer transfontanellären coronaren Standarduntersuchung des Kopfes. Der Schallkopf ist auf der großen Fontanelle aufgesetzt (linkes Bild). Die entsprechende Schnittebene im Ultraschall ist im rechten Bild dargestellt. In der Mitte ist ein MRT-Referenzbild. Diese Sequenz hat einen Freiheitsgrad mit Drehung um die horizontale Achse (grüne Achse links im Bild).

Mit dieser Sequenz kann eine coronare Standarduntersuchung durch die große Fontanelle simuliert werden. Die vertikale Mausbewegung entspricht hier der Bewegung des Schallkopfmodells nach ventral und dorsal bei einer horizontal gedachten Drehachse an der Schallkopfspitze (grüne Achse).

Die im Ultraschall-Schnitt erkannten Strukturen können im MRT-Schnitt gut

reproduziert werden. Durch das 3D-Referenzmodell mit Darstellung des Schallkopfmodells und der Kopfoberfläche behält man eine Orientierung über die momentane Position des Schallkopfes.(siehe Abbildung 5.1)

- transfontanelläre sagittale Standarduntersuchung mit 2 Freiheitsgraden.



Abbildung 5.2: Screenshot aus der Simulationssequenz einer transfontanellären sagittalen Standarduntersuchung des Kopfes. Linkes Bild zeigt Haltung und Position des Schallkopfes auf der großen Fontanelle und das rechte Bild wieder das entsprechende Ultraschallbild. MRT-Referenz in der Mitte. Gerade hier ist das Referenzbild sehr hilfreich, weil das Ultraschallbild stark verrauscht ist. In dieser Sequenz sind Bewegungen in zwei Freiheitsgraden möglich, Schwenk um grüne Achse und Rotation um Längsachse des Schallkopfes.

Die Simulation der sagittalen transfontanellären Standarduntersuchung des Gehirns zeichnet sich durch einen weiteren Freiheitsgrad aus. Die horizontale Bewegung der Maus entspricht einer Schallkopfbewegung nach links oder rechts, wodurch ein sagittaler Schwenk um eine schräg sagittal liegende Drehachse (grüne Achse) erreicht wird.(Abbildung 5.3)

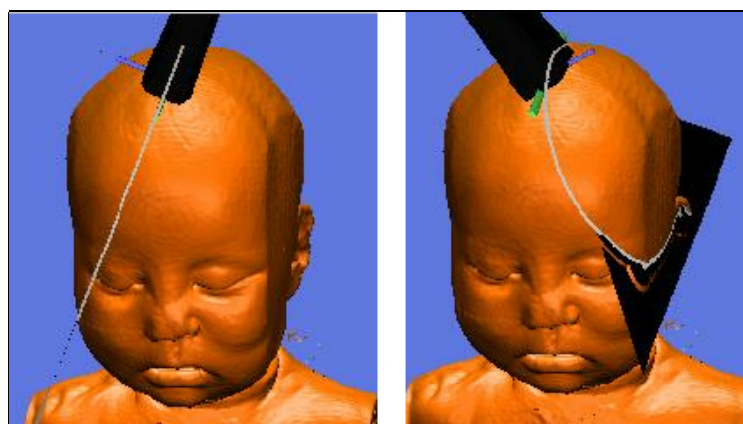


Abbildung 5.3: Screenshot aus der Simulationssequenz einer transfontanellären sagittalen Standarduntersuchung des Kopfes. max. Ausschlagswinkel bei sagittalem Schwenk, Bewegungen des Schallkopfes nach rechts und links durch horizontale Mausebewegungen.

Eine zusätzliche Drehung um die Längsachse des Schallkopfes kann durch eine vertikale Bewegung der Maus ausgelöst werden.(Abbildung 5.4)

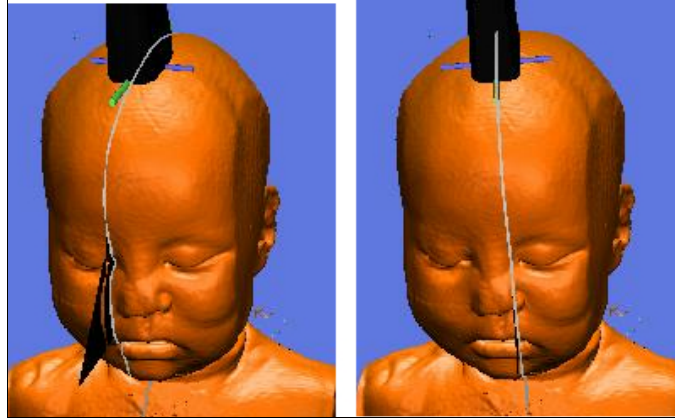


Abbildung 5.4: Screenshots aus der Simulationssequenz einer transfonanellären sagittalen Standarduntersuchung des Kopfes. max. Ausschlagswinkel bei Rotation um Schallkopfachse, virtuelle Drehung des Schallkopfes durch vertikale Mausbewegungen.

Diese Drehbewegung wird z.B. bei der klinischen Betrachtung der Seitenventrikel benötigt. Nach Auffinden des Seitenventrikels durch einen sagittalen Schwenk wird durch Drehung um die Längsachse die maximale Längsdarstellung des Seitenventrikels eingestellt (vom Vorderhorn bis zum Hinterhorn). Diese Einstellung ist mit dieser Simulationssequenz ebenfalls möglich.

Der Vorteil einer gleichzeitig angezeigten MRT-Referenz-Schicht zeigt sich hier besonders deutlich, da die sagittalen Ultraschall-Schichten relativ unscharf sind und somit die verschiedenen anatomischen Strukturen schlechter zu bestimmen sind als bei den coronaren Schichten. Grund dafür sind die höheren Qualitätseinbußen bei der Berechnung der sagittalen Schichten aus dem 3D-Datensatz (post-image-processing), der ursprünglich im coronaren Modus aufgezeichnet wurde.

- subcostale Standard-Leber-Untersuchung mit 1 Freiheitsgrad.

Bei der Simulation der subcostalen Standard-Leber-Untersuchung wird ein Freiheitsgrad benutzt. Es ist lediglich ein Schwenk um die grüne Achse möglich, die schräg horizontal im Raum liegt.

Eine vertikale Mausbewegung ermöglicht ein 'Durchfahren' der wichtigsten großen Gefäßstrukturen in und an der Leber sowie eine Beurteilung des Leberparenchyms.(Abbildung 5.5)

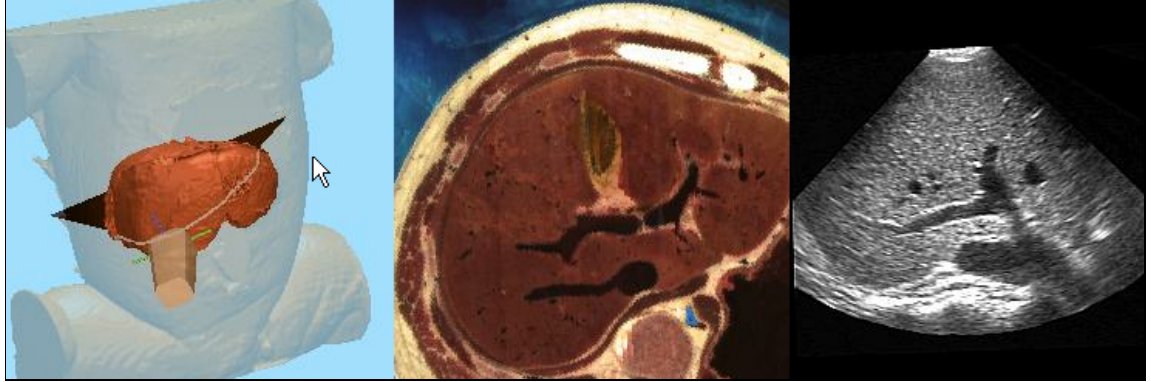


Abbildung 5.5: Screenshot aus der Simulationssequenz einer subcostalen Standard-Leberuntersuchung. Das linke Bild zeigt Haltung und Position des Schallkopfes am rechten Oberbauch, das mittlere Bild den Kryotom-Schnitt. In der Mitte als Referenzbild ein Kryotom-Schnitt. Die Sequenz hat einen Freiheitsgrad mit Bewegung um die grüne schräg horizontale Achse.

- Standard-Nieren-Untersuchung im Längsschnitt mit 1 Freiheitsgrad.

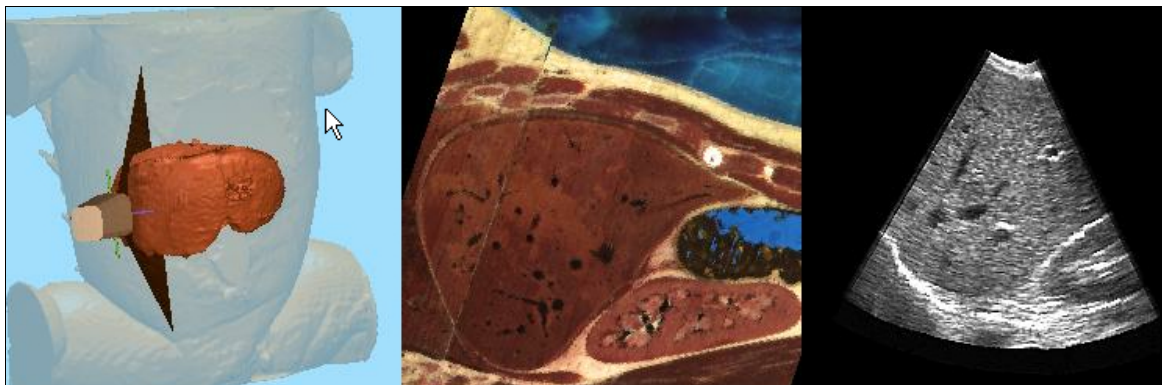


Abbildung 5.6: Screenshot aus der Simulationssequenz einer Standard-Nieren-Untersuchung im Längsschnitt. Linkes Bild mit Haltung und Position des Schallkopfes, in der Mitte Kryotom-Schnitt als Referenz und rechts der entsprechende Ultraschallschnitt. Die Sequenz hat einen Freiheitsgrad mit Bewegung um die grüne schräg vertikale Achse.

Die Simulation dieser Nieren-Standard-Untersuchung mit Längsschichtung der Niere hat ebenfalls nur einen Freiheitsgrad. Mittels horizontaler Mausbewegung kann die Niere von lateral nach medial 'durchfahren' werden. Man erkennt z.B. die Unterschiede zwischen Nierenrinde und Nierenmark gut.

Video-Sequenzen wurden erstellt von:

- coronare Standarduntersuchung des Kopfes
- sagittale Standarduntersuchung des Kopfes
- subcostale Standarduntersuchung der Leber
- sagittale Standarduntersuchung der Niere

Abbildung 5.7 zeigt beispielhaft die Video-Sequenz einer coronaren Standarduntersuchung des Kopfes. Die Steuerung geschieht durch horizontale Mausbewegungen.

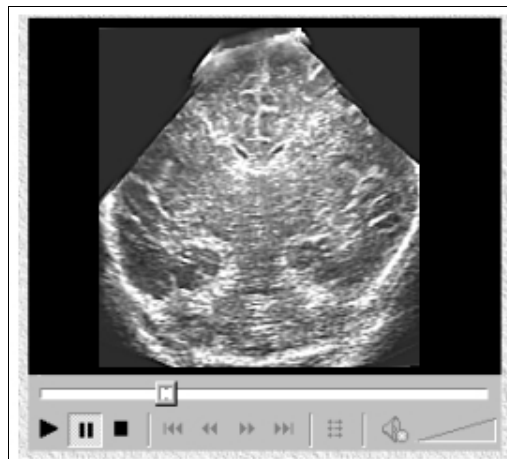


Abbildung 5.7: Screenshot aus der interaktiv steuerbaren Video-Sequenz einer coronaren Standarduntersuchung am Kopf. Durch horizontale Mausbewegungen kann innerhalb der Videosequenz vorwärts und rückwärts navigiert werden.

5.2 interaktiv explorierbare Bilder

Um die Simulationssequenzen besser begreifen zu können, werden typische Schnitte aus den Standarduntersuchungen genutzt, in denen die erkennbaren anatomischen Strukturen erklärt werden. Dies geschieht durch eine Gegenüberstellung von erklärendem Text (Legende) und dem Bild. Im Gegensatz zu einem Lehrbuch soll das aber nicht statisch, sondern interaktiv passieren. Der Benutzer hat am Ende die Wahl zwischen Bilddarstellung mit und ohne erklärenden Text.

Abbildung 5.8 zeigt ein Beispiel mit Text. Hier wird die entsprechende anatomische Region im Bild farbig herausgestellt, sobald man mit der Maus einen Begriff

auswählt. Der dritte Ventrikel wird also erst dann markiert, wenn mit der Maus der Eintrag '3.Ventrikel' angeklickt wird.

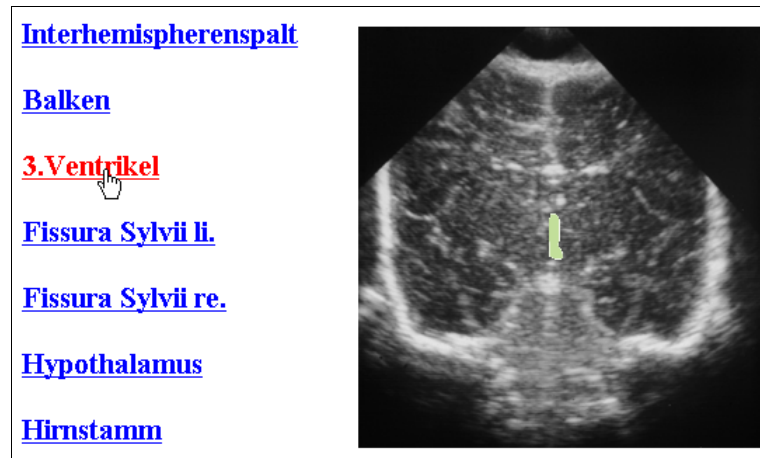


Abbildung 5.8: Beispiel für interaktiv explorierbares Ultraschallbild. Das Bild wird mit Text gezeigt. Wenn mit der Maus ein Texteintrag angeklickt wird, so wird die entsprechende Region im Bild markiert.

Abbildung 5.9 zeigt ein Beispiel ohne Text. Im Unterschied zum vorigen Beispiel erscheint der erklärende Text erst bei Auswahl der Struktur im Bild selbst.

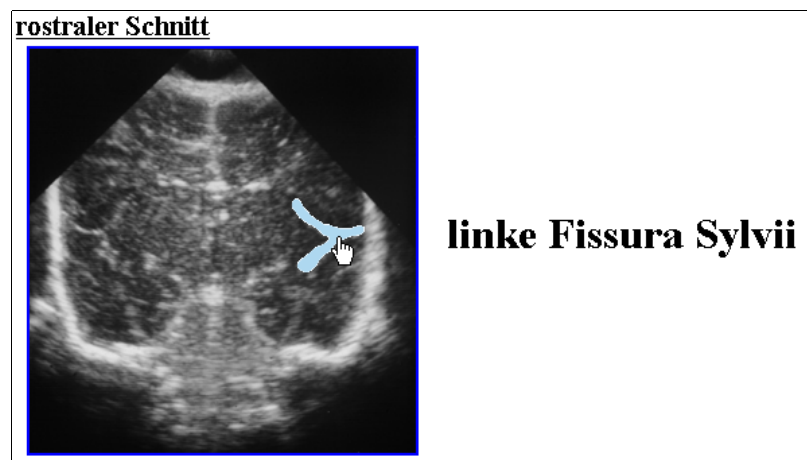


Abbildung 5.9: Beispiel für interaktiv explorierbares Ultraschallbild. Das Bild wird ohne Text gezeigt. Legende wird erst sichtbar, wenn mit der Maus die entsprechende Struktur im Bild angewählt wird. Die Struktur wird außerdem noch farbig markiert.

Beide Arten der Bilddarstellung eignen sich auch für eine Selbstabfrage, die eine hilfreiche Lernkontrolle sein kann.

Eine Auflistung der interaktiv explorierbaren Schnittbilder findet sich in der Tabelle 5.2.

Untersuchungsart	Schnittführung	benannte Strukturen
transfonatelläre coronare Kopfuntersuchung	vordere Coronarebene	5
	mittlere Coronarebene	6
	hintere Coronarebene	4
transfonatelläre sagittale Kopfuntersuchung	mediane Sagittalebene	5
	Parasagittalebene I	5
	Parasagittalebene II	4
Leberuntersuchung	Längsschnitt in der vorderen Axillarlinie	4
	subcostaler Schrägschnitt	5
Nierenuntersuchung	Längsschnitt	5
	Querschnitt	4

Tabelle 5.2: Auflistung der interaktiv explorierbaren Standardeinzelschichten

pathologische Fälle	benannte Strukturen
Ventrikelblutung	5
Hydrocephalus	5
Lebertumor	4
Wilmstumor	4

Tabelle 5.3: Auflistung der interaktiv explorierbaren pathologischen Fälle

Die Tabelle 5.3 zeigt eine Auswahl verschiedener pathologischer Fälle, die für die Fallsammlung angefertigt wurden.

5.3 Programm PED-SONO

Um die bisher geschilderten Ergebnisse anwenden zu können, ist eine Programmoberfläche nötig, die alle Elemente zusammenfügt.

Dafür wird die Browser-Technologie des Internets benutzt. Innerhalb der Browser-Oberfläche lassen sich alle interaktiven Funktionen der Sequenzen und Bilder in einfacher Weise benutzen.

Für die Verknüpfung der verschiedenen Elemente werden die Programmiersprachen des Internets, HTML und Java-Script, verwendet (siehe Methoden)

Das entwickelte Programm heißt **PED-SONO**.

PED-SONO gliedert sich in zwei Hauptbereiche auf. Einerseits in das Tutorium, welches dem Anfänger einen Überblick und eine Einführung in die pädiatrische

Ultraschall-Diagnostik geben soll und andererseits in den Atlas-Teil, der einer Fallsammlung mit anatomischen und pathologischen Bildern entspricht.

Der Atlas-Teil gilt mehr als Referenz für die ultraschalltypischen Veränderungen bei Krankheiten.

Wie schon mehrfach erwähnt ist das Ziel der Oberflächengestaltung eine möglichst intuitive und einfache Anwenderführung.

Dafür werden die im Methodenteil beschriebenen interaktiven Menüstrukturen benutzt.

Exemplarisch werden nicht die gesamten Menubaum-Strukturen, sondern nur Teile davon dargestellt.

Im Tutoriumsteil sieht der Teilbaum des Kopfes wie folgt aus :

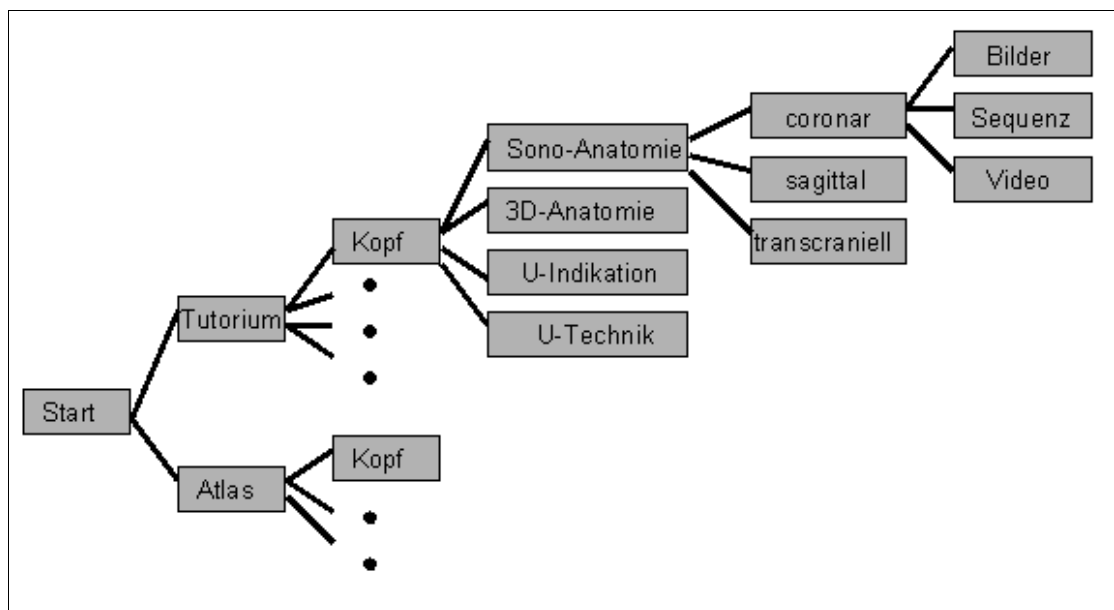


Abbildung 5.10: Ausschnitt aus dem Menubaum des Tutoriums.

Der Atlas-Teil hat einen wesentlich größeren Teilbaum für den Kopfbereich :

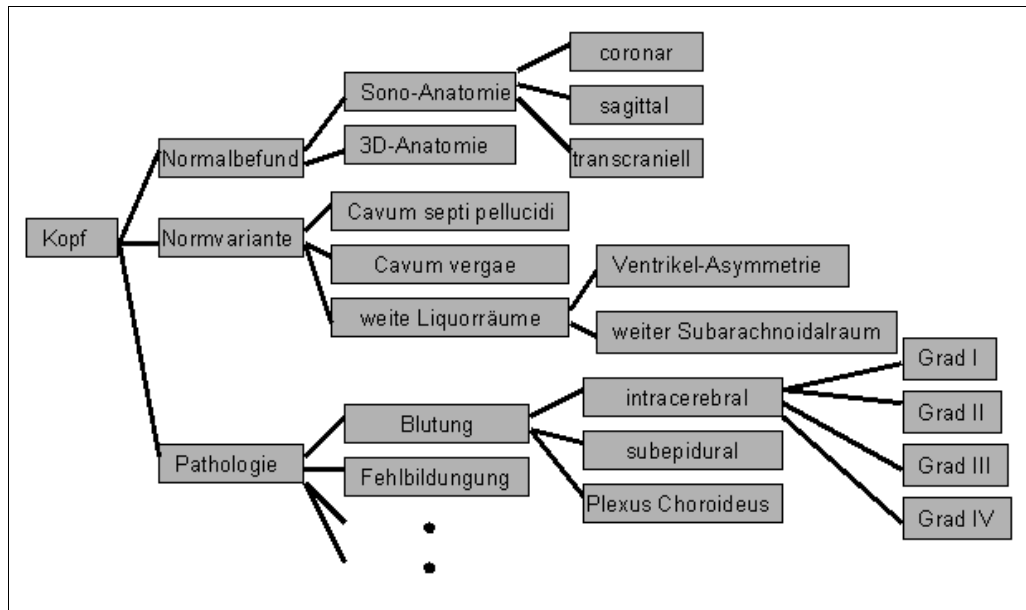


Abbildung 5.11: Ausschnitt aus dem Menubaum des Atlas-Teils.

Die logische Struktur des Tutoriumsmenus basiert auf der Frage, wie ein Anfänger der Ultraschall-Diagnostik am besten an die neue Materie herangeführt werden kann. So sind einführende Texte und Informationen zur Technik sicherlich sinnvoll, ebenso die genaue Darstellung der einzelnen Standarduntersuchungen und der Untersuchungs-Indikationen.

Am Ende soll der Anwender wissen, wann eine Ultraschalluntersuchung angebracht ist, wie sie ablaufen soll und was man erkennen soll.

Abbildung 5.12 zeigt einen Menupfad innerhalb des Tutoriums.

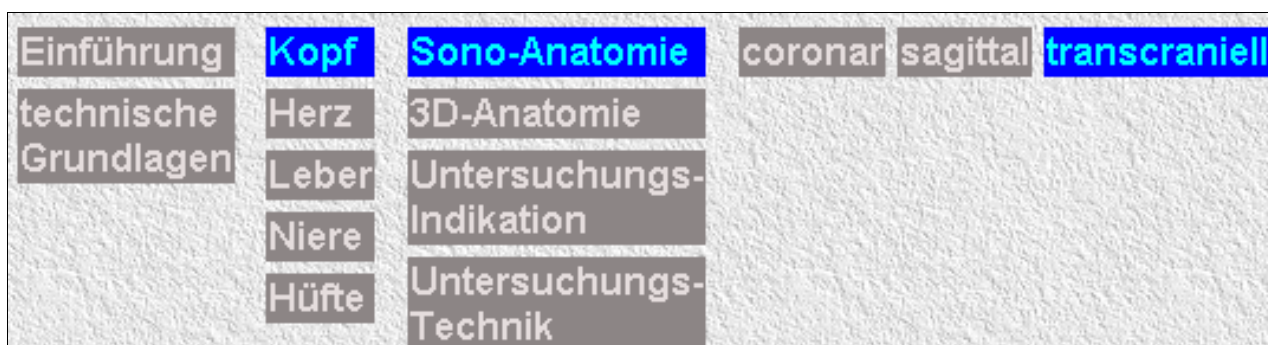


Abbildung 5.12: Menupfad im Tutorium

Die Menustruktur des Atlas-Teils entspringt dagegen einer anderen Zielsetzung. Hier soll der Anwender eine möglichst umfassende Zusammenstellung der Pathologie bekommen, die durch die Ultraschalltechnik diagnostiziert werden kann.

Es werden nicht alle möglichen Erkrankungen aufgelistet, sondern nur die Häufigsten. Doch auch diese Auflistung ist schon sehr verzweigt und groß.

Abbildung 5.13 zeigt einen Menupfad aus dem Atlas-Teil.

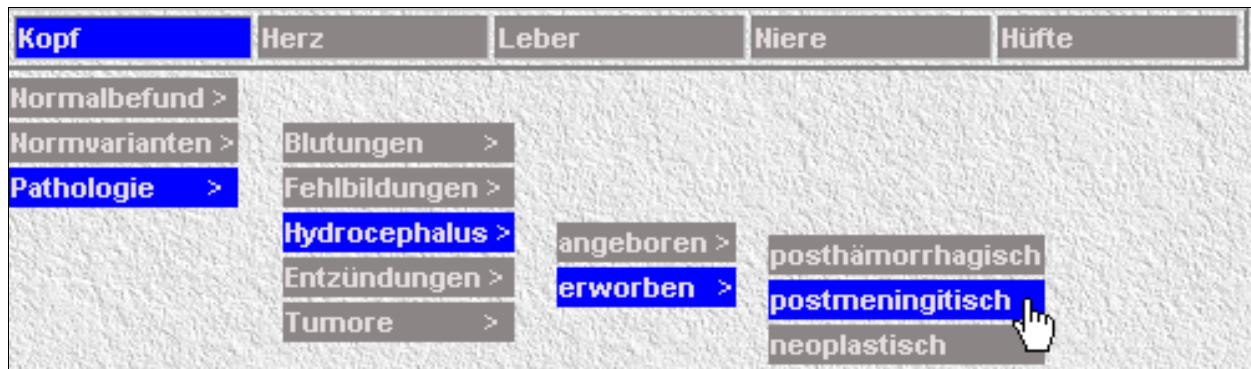


Abbildung 5.13: Menupfad im Atlas-Teil

Kapitel 6

Anwendungen

In erster Linie soll das entwickelte Lehrprogramm eine Einführung in das Gebiet der Ultraschalldiagnostik bei Säuglingen und Kleinkindern sein. Das Programm ist eindeutig ausgerichtet auf Medizin-Studenten und junge Ärzte in Ausbildung, die ein Interesse an der Sonographie bei Säuglingen und Kleinkindern haben. Bei späterer Einbindung einer größeren Fallsammlung kann es jedoch auch einem erfahrenen Arzt dienlich sein, etwa zur Differentialdiagnose oder zur Auffrischung seines Wissens.

Anhand eines Beispiels soll nun exemplarisch eine medizinische Fragestellung mit dem Programm erarbeitet werden.

Zuerst möchte ein Anwender die grundlegenden Schritte einer Ultraschall-Routineuntersuchung eines Säuglingsgehirns erklärt bekommen. Danach soll der klinischen Fragestellung *Verdacht auf Plexusblutung* nachgegangen werden.

Der Anwender wird auf der Startseite des Programms **PED-SONO** beginnen (siehe Abbildung 6.1).

Hier kann er auswählen zwischen einem Tutorium und einem Atlas-Teil.



Abbildung 6.1: Screenshot aus dem Programm **PED-SONO**. Startseite des Programms mit Hauptmenu-Leiste links. Hier kann zwischen Tutorium und Atlas-Teil ausgewählt werden. Das Tutorium wendet sich an Anfänger der Sonografie und gibt eine Einführung in die Materie. Der Atlas-Teil zeigt eine Zusammenstellung der wichtigsten Krankheitsbilder, die sonografisch erfaßt werden können.

Innerhalb des Tutoriums wird Schritt für Schritt eine Einführung in die pädiatrische Sonographie geboten. Falls allgemeine Fragen zur Technik der Ultraschalldiagnostik oder spezielle organspezifische Fragen zur Untersuchungstechnik oder Untersuchungsindikation bestehen, so können diese durch Anwahl der Menüpunkte geklärt werden. Bei Anwahl eines Organs werden die zugehörigen Standard-Einstellungen angezeigt und kurz erläutert. In Abbildung 6.2 z.B. wurde das Organ 'Kopf' ausgewählt.

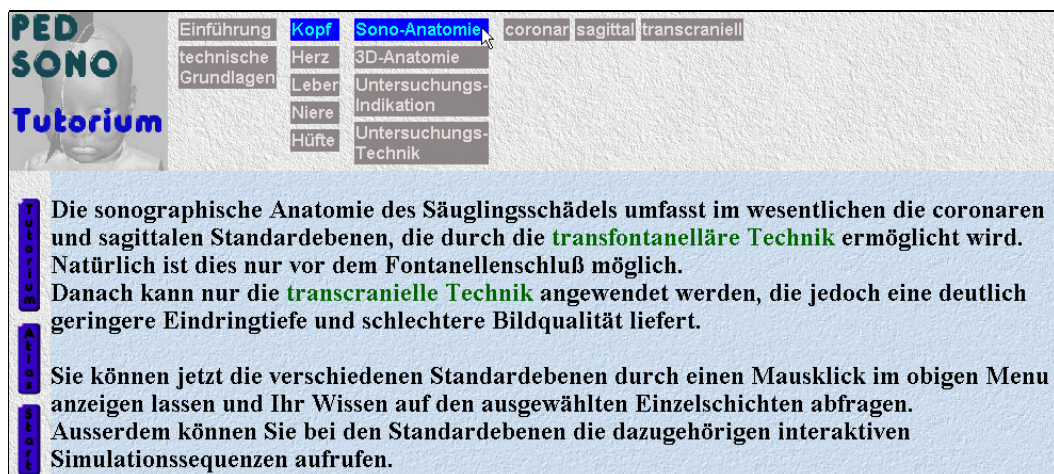


Abbildung 6.2: Screenshot aus dem Programm **PED-SONO**. Das interaktive Menu des Tutoriums erleichtert die Orientierung innerhalb der Programmseiten durch farbige Hervorhebungen des Menupfades. Hier ist die Seite 'Kopf:Sono-Anatomie' ausgewählt, die allgemeine Informationen zur sonografischen Anatomie des Säuglingsschädels enthält.

Nun kann man sich für eine Standardebene entscheiden und diese anzeigen lassen.

In Abbildung 6.3 wird die coronare Standardeinstellung bei der Kopfuntersuchung kurz schematisch erläutert.

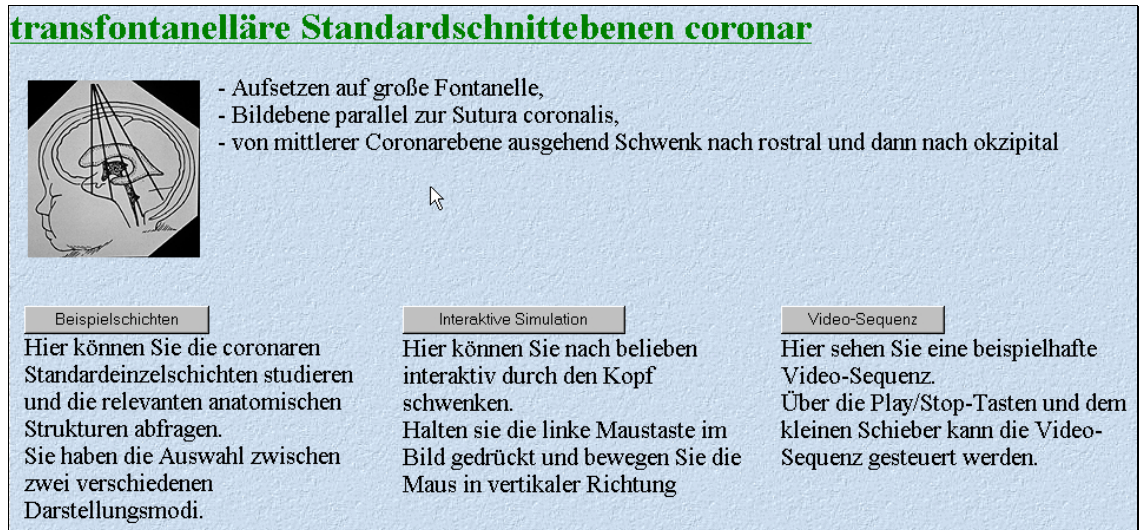


Abbildung 6.3: Screenshot aus dem Programm **PED-SONO**. Einstiegsseite zur coronaren Schädel-diagnostik mit kurzen Erläuterungen zur Technik und weiterführenden Bildbeispielen in Form von interaktiv explorierbaren Bildern (Knopf links), interaktiven Simulationssequenzen (Knopf in der Mitte) und Videosequenzen (Knopf rechts)

Jetzt kann man zwischen den interaktiv explorierbaren Standard-Einzelschichten oder der interaktiven Simulationssequenz oder einer Videosequenz auswählen. Bei den Standard-Einzelschichten hat man grundsätzlich die Auswahl zwischen zwei verschiedenen Modi der Legendenanzeige. (siehe Abbildung 6.4)

Dadurch ergeben sich für den Anwender mehr Selbstabfrage-Möglichkeiten.

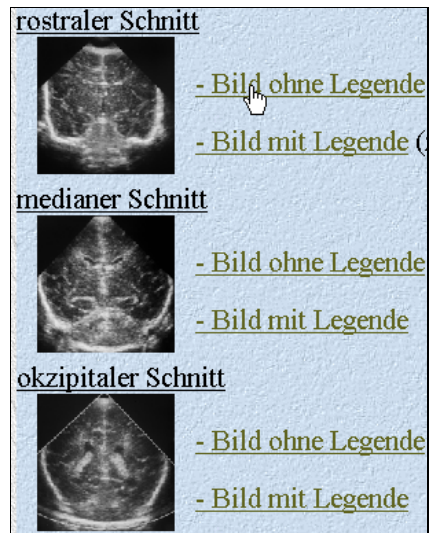


Abbildung 6.4: Screenshot aus dem Programm **PED-SONO**. Kurzdarstellung der möglichen Standard-Einzelschichten, die dann interaktiv exploriert werden können. Bei jedem Bild hat man die Auswahl zwischen zwei Darstellungsmodi, entweder mit oder ohne Legende (siehe Methoden)

Anstatt der Einzelschichten ist auch die interaktive Simulationssequenz aufrufbar. Dabei wird ein neues Programmfenster geöffnet, indem die Sequenz interaktiv exploriert werden kann. Abbildung 6.5 zeigt ein solches Fenster.



Abbildung 6.5: Screenshot aus dem Programm **PED-SONO**. Die coronare Simulationssequenz kann mit der Maus interaktiv exploriert werden. Hier lassen sich z.B. die vorher angeschauten Standardschnitte aufsuchen und wiedererkennen.

Schließlich gibt es noch die Möglichkeit eine entsprechende Video-Sequenz aufzurufen, die den dynamischen Aspekt der Ultraschalluntersuchung zeigt. Darüber hinaus kann die realitätsnahe Video-Aufzeichnung als Lernkontrolle dienen. Auch hier hat der Anwender eine interaktive Steuerungsmöglichkeit durch horizontale Bewegungen mit der Maus.

Natürlich gibt es beim 'Kopf' auch die entsprechenden Einzelschichten und interaktiven Simulationssequenzen in sagittaler Schnittrichtung.

Somit ist ein umfassendes Studium der normalen (Sono-)Anatomie eines Säuglingsgehirns in Ruhe möglich. Man kann sich intensiv mit den ungewohnten Sichtweisen ohne Zeitdruck auseinandersetzen.

Die Fragestellung *Verdacht auf Hirnblutung* führt nun zu der klinischen Fallsammlung, die nicht im Tutorium sondern im Atlas-Teil des Programms zu finden ist.

Hier können über den Menüpunkt 'Normalbefunde' nochmals die Standardschichten angezeigt werden, aber der Schwerpunkt liegt hier in der Darstellung der 'Pathologie'. In Abbildung 6.6 z.B. ist das Gebiet der Hirnblutungen angewählt worden. Die farbliche Markierung innerhalb des Menüs erleichtert dabei wieder die Navigation und Orientierung im Programm. Bei Anwahl eines Menüpunktes wird die dazugehörige Information im Hauptfenster angezeigt. So wird bei 'Kopf » Pathologie » Blutungen » des Plexus choroideus' ein Ultraschallbild mit einer Plexusblutung angezeigt. Natürlich handelt es sich hierbei um ein interaktiv explorierbares Bild mit erläuternden Texten und Annotationen.

Grundsätzlich besteht immer die Möglichkeit auch aus der Pathologie heraus die entsprechende interaktive Simulationssequenz aufzurufen. In diesem Beispiel kann der Anwender nach Betrachten der krankhaften Veränderung in coronarer Schnittführung die coronare Simulationssequenz oder eine entsprechende Videosequenz aufrufen (in Abbildung 6.6 sind unten 'Knöpfe' für die Simulationssequenz und Videosequenz dargestellt). Damit hat man den direkten Vergleich zwischen Anatomie und Pathologie, was das Verständnis für die Unterschiede fördert.

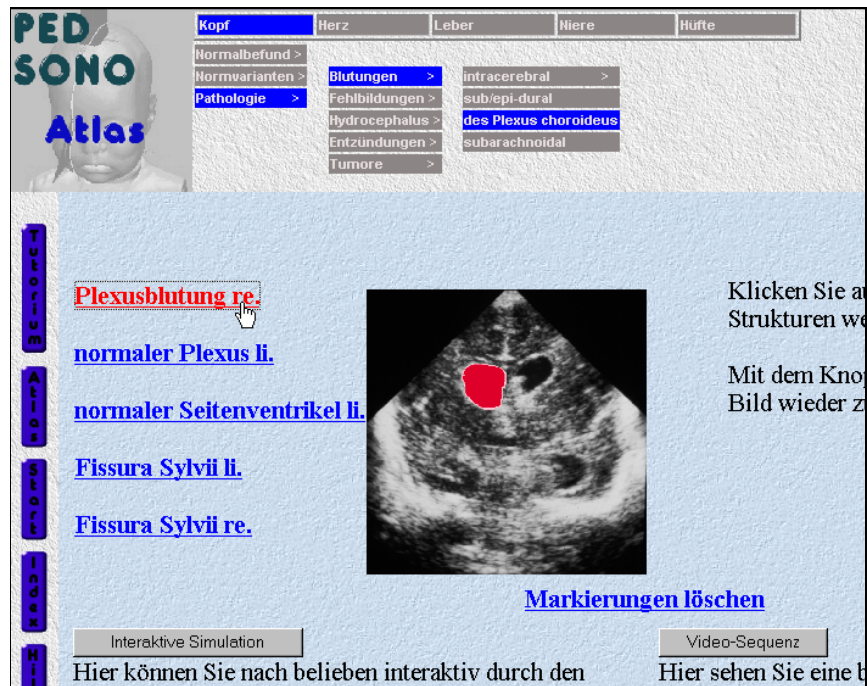


Abbildung 6.6: Screenshot aus dem Programm **PED-SONO**. Beispiel der Plexusblutung aus dem Atlas-Teil. Das interaktive Menu zeigt den Menupfad zu dem Krankheitsbild. Bei Auswahl wird das interaktiv explorierbare Bild mit Darstellung der krankhaften Veränderungen gezeigt, wobei man auch hier die entsprechende Simulationssequenz oder Videosequenz anzeigen lassen kann. Damit ist ein besseres Verständnis für die Unterschiede zwischen normalen anatomischen Strukturen und krankhaften pathologischen Veränderungen möglich.

Das Beispiel zeigt, daß die gute Strukturierung des Programms den Anwender schnell und unkompliziert zu den gewünschten Informationen bringen kann. Die interaktiven Elemente steigern den Lerneffekt und helfen bei der schwierigen gedanklichen Umsetzung der zweidimensionalen Ultraschall-Schnittbilder in die 3D-Realität. Die Möglichkeit, sich die ungewohnten Sichtweisen immer wieder vor Augen zu führen, ist ebenfalls sehr hilfreich. Der direkte klinische Bezug wird durch die Einbettung einer klinischen Fallsammlung erreicht.

6.1 VOXEL-MAN 3D-Navigator

Dem schon erwähnten Programm **VOXEL-MAN 3D-Navigator** ist ein Extrakapitel gewidmet, weil Teilergebnisse dieser Arbeit in diesem Programm verwendet werden.

VOXEL-MAN 3D-Navigator ist im Prinzip ein kleiner Ableger des großen Programms **VOXEL-MAN**. Es besteht aus einer Sammlung von interaktiven Sequenzen, die die Funktionalität von **VOXEL-MAN** demonstrieren.

Vor allem die 3D-Visualisierung und die vielfältigen Manipulationsmöglichkeiten von Volumendatensätzen durch **VOXEL-MAN** werden dargestellt.

In diesem Fall geht es um den Einsatz von interaktiven Simulationssequenzen, die eine zusätzliche Funktionalität innerhalb der Programmoberfläche von **VOXEL-MAN 3D-NAVigator** bieten. Hier ist es möglich, auf jedem Bild der Sequenz die gerade angezeigten anatomischen Strukturen benennen und farbig markieren zu können. Wird z.B. mit der Maus innerhalb der Ultraschallschicht auf eine unbekannte Struktur gezeigt und die rechte Maustaste gedrückt, dann wird diese benannt und falls der Markiermodus aktiviert ist auch andersfarbig hervorgehoben.

Diese Sequenzen werden 'intelligente' Sequenzen genannt. Abbildung 6.7 zeigt dies am Beispiel einer Untersuchungssequenz der Leber.

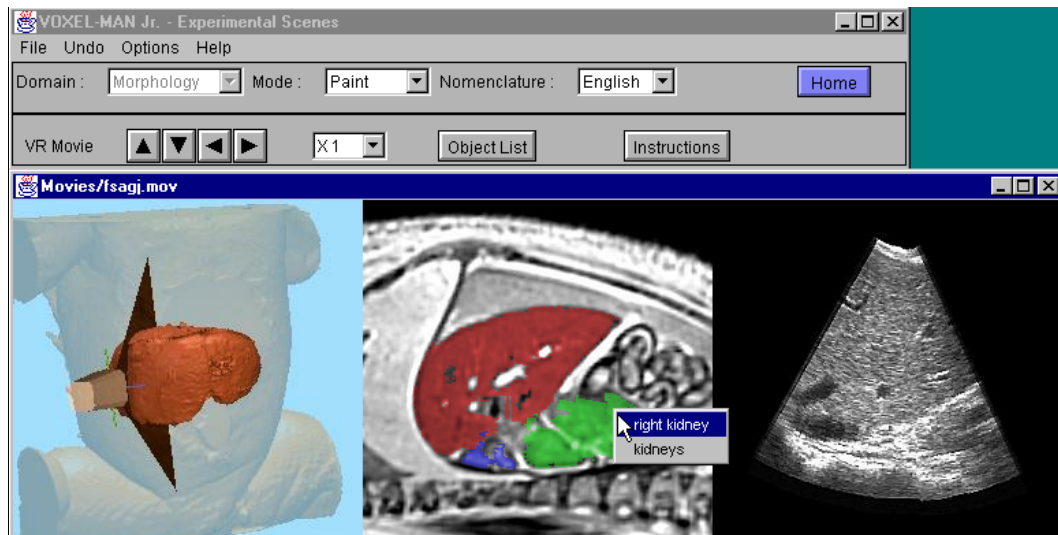


Abbildung 6.7: Screenshot aus dem Programm **VOXEL-MAN Junior**, einem Vorläufer des Programms **VOXEL-MAN 3D-Navigator**. Hier das Beispiel einer 'intelligenten' Simulationssequenz. Zusätzlich zur interaktiven Steuerung der Simulationssequenz kann mit einem Mausklick die gerade sichtbare Struktur auf der Einzelschicht benannt und farbig markiert werden. Dies ist aber nur bei segmentierten Datensätzen möglich. In diesem Beispiel also nur im linken und mittlerem Bild. Innerhalb der Ultraschallschichten rechts im Bild ist eine Abfrage nicht möglich.

Es wird dieselbe Simulationssequenz benutzt wie bei dem Lehrprogramm **PED-SONO**. Der einzige Unterschied ist, daß bei der Generierung der 'intelligenten' Sequenzen aus dem Programm **VOXEL-MAN** die symbolischen Informationen des 'intelligenten' Volumens mitabgespeichert werden. Voraussetzung dafür ist aber eine vorherige Segmentation des Datensatzes. (siehe Methoden)

Diese Zusatzinformationen, wie Organzugehörigkeit oder Organbezeichnungen in anderen Sprachen, können durch das Programm **VOXEL-MAN 3D-Navigator** interaktiv abgerufen werden. Leider hat das Lehrprogramm **PED-SONO** diese Funktionalität noch nicht.

Kapitel 7

Diskussion

Ausgehend von der Zielsetzung, Simulation einer pädiatrischen Ultraschalluntersuchung am Computer, ist ein Modell für ein interaktives Lehr- und Lernprogramm entstanden.

Für die Erstellung des Programms sind zum Teil vorhandene und zum Teil neue Methoden und Materialien benutzt worden. Die Vorteile und Nachteile, sowie mögliche Verbesserungen werden im folgenden diskutiert.

Ausgangspunkt war das Programm **VOXEL-MAN**. Die vielfältigen Möglichkeiten, die das Programm bietet, haben die Erstellung der interaktiven Simulationssequenzen erst ermöglicht. Insbesondere das 'Ultrasound'-Menu vereinfachte die Gewinnung von ultraschallspezifischen Schnittansichten erheblich. Leider ist der Zeitaufwand zum Erlernen der Handhabung von **VOXEL-MAN** aufgrund der zahlreichen Funktionen relativ hoch. Ein direkter Einsatz des Programms in der Studenten- oder Mediziner-Ausbildung wird durch die relativ hohen Hardwareanforderungen zusätzlich erschwert (mind. Workstation mit schnellem Prozessor (300 MHz mind.) und großem Arbeitsspeicher (256 MB RAM mind.)).

Ein weiteres Manko stellt das zum Teil aufwendige Einlesen von verschiedenen Datensätzen in das Programm dar. Vieles muß z.B. von Hand angepaßt werden, was die Bearbeitungszeit natürlich verlängert.

Hier wäre ein automatisches Einlesen von Datensätzen in einem Standardformat wünschenswert.

Ein konzeptionelles Problem stellte die fehlende Oberflächendarstellung in den Ultraschall Datensätzen dar, da bei der Aufnahme des Ultraschall-Datenblocks die Körperhülle und -oberfläche nicht mitberücksichtigt wird. Abbildung 7.1 zeigt die zwei resultierenden Fenster des 'Ultrasound'-Menus nebeneinander. Man erkennt, daß jetzt

mit dem linken Referenzbild wegen fehlender Darstellung einer Körperoberfläche auch eine Orientierung über Lage und Position des Schallkopfes nicht möglich ist.

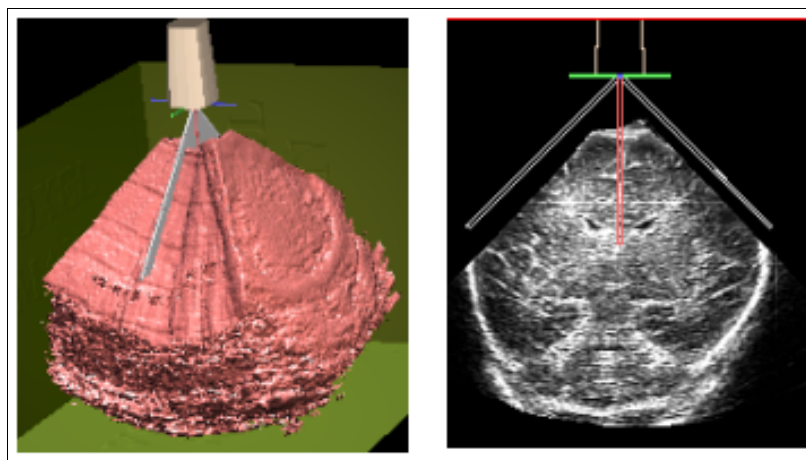


Abbildung 7.1: Ultraschall-Kopfdatensatz im Programm **VOXEL-MAN**. Im linken Fenster ist die 3D-Ansicht des erzeugten 3D-Volumens in Form eines Thorusstumpfes. Auch hier ist ein Schallkopfmodell mit seiner virtuellen Schnittebene dargestellt. Wegen fehlender Körperoberflächendarstellung ist ein Aussage über die wirkliche Lage und Position des Schallkopfes, die die Ultraschallschicht rechts im Bild erzeugt, nicht möglich.

Eine Lösung für dieses Problem ist die Benutzung eines anderen Datensatzes, der über eine Körperoberfläche verfügt, z.B. ein MRT- oder Kryotomdatensatz. Den Ultraschallbildern aus dem Ultraschall-Datensatz wird also ein 3D-Körpermodell aus MRT- oder Kryotom-Daten gegenübergestellt.

Das Problem hierbei ist, daß es sich nun um Datensätze von verschiedenen Körpern handelt. Die Strukturen innerhalb der verschiedenen Sequenzen sind nicht mehr identisch und nicht hundertprozentig vergleichbar. Dafür müßte eine aufwendige 'Registrierung'¹ erfolgen. Eine totale Übereinstimmung der Organstrukturen wäre aber auch dann nicht gegeben. Außerdem ist eine 'Registrierung' eines Ultraschalldatensatzes mit einem MRT- oder Kryotomdatensatz sehr aufwendig und die resultierende Bildqualität nicht sicher verwertbar.

Daher ist die praktikabelste Lösung eine getrennte Berechnung und Aufzeichnung der Teilsequenzen in den verschiedenen Modalitäten und danach die Verknüpfung der geeigneten Teilsequenzen zu einer Simulationssequenz, wie im Methodenteil beschrieben. Durch geschickte Wahl der Schnitte und Grenzen ist ein ausreichender Abgleich der verschiedenen Modalitäten möglich, so daß der Anwender kaum bemerkt, daß die Teilsequenzen von unterschiedlichen Ausgangskörpern stammen.

¹'Registrierung' nennt man den Vorgang verschiedene Bildmodalitäten aufeinander abzugleichen ('matchen'), damit gleiche Organstrukturen an den selben Positionen zu finden sind, z.B. 'matchen' von CT- und MRT-Datensatz

Besser als das manuelle Abgleichen der verschiedenen Datensätze könnte hier ein genaueres Registrierungsverfahren hilfreich sein, welches über sogenannte 'Landmarks', ein Matching (Abgleich) zwischen dem MRT-Datensatz und dem Ultraschall-Datensatz bewerkstelligt [Frantz et al., 1999]. Am besten dafür wäre es, verschiedene Modalitäten von ein und dem selben Probanden oder Patienten zu haben.

Ein weiteres Problem bei der Erzeugung der Teilsequenzen stellt die mögliche Bewegung des Schallkopfes in mehreren Freiheitsgraden dar. In der Realität ist es möglich den Schallkopf in 3 Freiheitsgraden zu bewegen (Drehung um die Längsachse (rote Achse) und Schwenken in alle Richtungen (grüne und blaue Achse) siehe Abbildung 7.2).

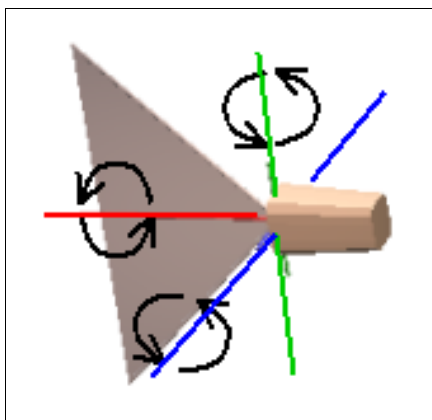


Abbildung 7.2: Schallkopfmodell mit entsprechender Schnittebene. Es stehen in Realität drei mögliche Bewegungsachsen zur Verfügung. Rot – Längsachse zum Schallkopf ; grün und blau – horizontale und vertikale Achsen für Schwenkbewegungen.

Bei den allermeisten Untersuchungen per Ultraschall werden jedoch maximal nur zwei Freiheitsgrade benutzt. Dies wird beispielsweise bei der sagittalen Untersuchung des Gehirns benötigt, um die maximale Ausdehnung der Seitenventrikel darzustellen. Zuerst wird mit dem sagittalen Schwenk der Seitenventrikel aufgesucht und dann durch Drehung innerhalb der Längsachse des Schallkopfes die maximale Längsausdehnung des Ventrikels dargestellt.(siehe Ergebnisse)

Damit dies ebenfalls nachgeahmt werden kann, müssen bei der Generierung der Einzelschichten etwas aufwendigere geometrische Berechnungen durchgeführt werden. Diese Berechnungen werden von dem 'Skript'-Programm ausgeführt. (siehe Methoden).

Die Teilanwendung der Ergebnisse im Programm **VOXEL-MAN 3D-Navigator**

hat gezeigt, daß die interaktive Abfragemöglichkeit innerhalb von Schnittansichten und 3D-Bildern für ein besseres Verständnis sehr sinnvoll ist. Leider ist diese Funktionalität im Lehrprogramm **PED-SONO** nicht vorhanden. Hier sind durch die Browser-Technologie Grenzen gesetzt. Aber selbst bei einer Unterstützung der Abfragefunktion durch die Browser-Technik ist diese Funktionalität nur möglich, wenn die benutzten Datensätze segmentiert vorliegen. Erst dann lassen sich die 'intelligenten' Simulationssequenzen erstellen. Daher ist eine Segmentation der verwendeten Datensätze wie dem MRT-Datensatz des Kopfes oder der Ultraschall Datensätze wünschenswert. Wobei die relative Unschärfe der verschiedenen Organstrukturen und der hohe Rauschanteil innerhalb der Schnitte beim Ultraschall eine vernünftige Segmentierung sehr erschweren.

Abbildung 7.3 zeigt den erheblichen Unterschied zwischen MRT-Bild und Ultraschallbild bezüglich Detailgenauigkeit der Strukturen. Es ist sofort erkennbar, daß im MRT-Bild eine Segmentierung von Organstrukturen gut möglich und im Ultraschallbild äußerst aufwendig ist.

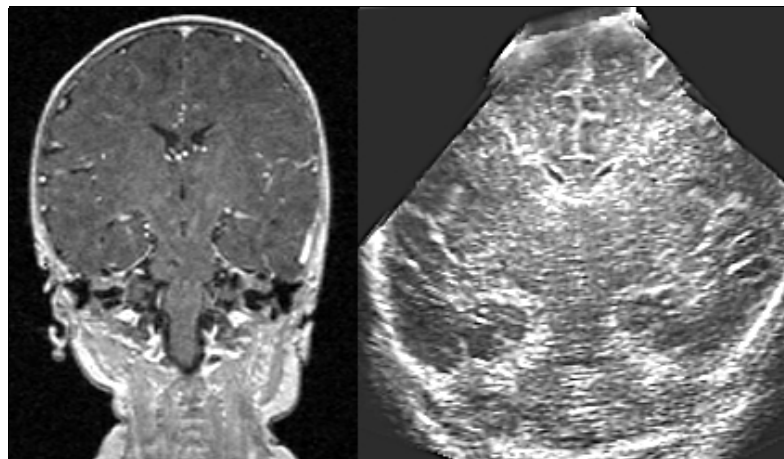


Abbildung 7.3: Qualitätsunterschiede in der Organdarstellung zwischen MRT-Bild (links) und Ultraschallbild (rechts). Die wesentlich schärfere Abgrenzung der Organstrukturen im MRT-Bild erleichtert eine Segmentation. Beim Ultraschallbild ist eine Segmentation durch hohen Rauschanteil und schlecht abgrenzbare Organgrenzen sehr erschwert.

Die verwendeten Datensätze entsprechen überwiegend dem Stand der Kunst, d.h. qualitativ sind sie zum Teil auf dem höchstmöglichen Niveau.

Besonders die MRT-Datensätze des Kopfes und die Kryotom-Datensätze vom 'Visible Human Project' haben eine hohe Detailgenauigkeit.

Lediglich der Fetus-MRT-Datensatz hat eine relativ geringe Auflösung. Wenn man jedoch bedenkt, daß der Fetus-Rumpf nur ca. 15 cm lang war, dann ist die tatsächliche Auflösung dennoch bemerkenswert (z.B. gute Darstellung der kleinen Leberve-

nen).

Ein anderes, etwas gewichtigeres Problem mit dem Fetus-MRT-Datensatz sind die deutlichen pathologischen Veränderungen aufgrund des Hydrops congenitus mit Ausbildung erheblicher Erguß- und Aszitesbildungen.

Auch die Ultraschalldatensätze sind in ihrer Auflösung für unsere Zwecke ausreichend. Die Qualitätsunterschiede zwischen den Datensätzen können jedoch erheblich sein. Entscheidend hierfür ist außer dem Untersucher das Ultraschallgerät selbst. In den letzten Jahren gab es viele Verbesserungen bezüglich Auflösung und Signal-Rausch-Abstand. Ein direkter Vergleich zwischen einem alten und neuen Datensatz zeigen die erheblichen Qualitätsunterschiede.

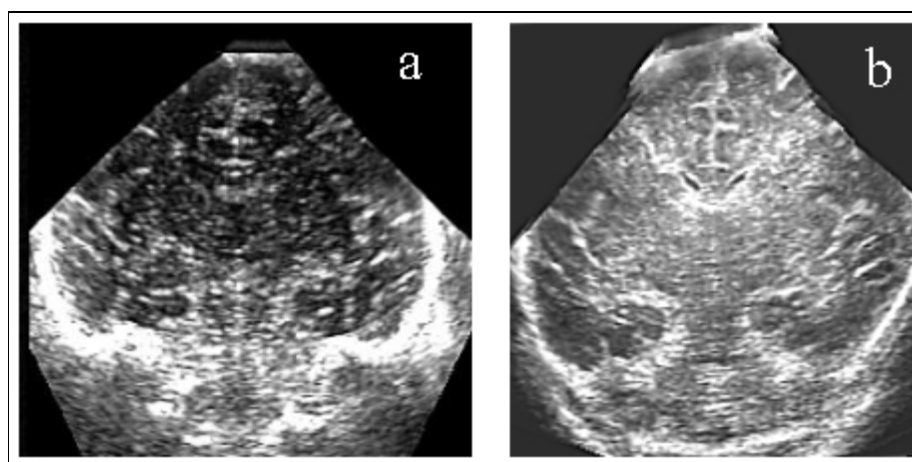


Abbildung 7.4: Qualitätsunterschiede zwischen alten und neuen Ultraschall-Datensätzen. Das linke Bild stammt von einem Gerät aus dem Jahr 1996, das rechte Bild wurde mit einem neuen Gerät aus dem Jahr 1999 erstellt. Die großen Unterschiede bezüglich Auflösung und Schärfe sind unverkennbar.

In Abbildung 7.4a sind z.B. feine Strukturen, die auf Abbildung 7.4b wesentlich besser dargestellt sind, nicht abzugrenzen.

Leider muß man bei dem unvermeidlichen 'image-post-processing' der Ultraschalldatensätze (siehe Methoden) eine deutliche Qualitätsminderung in Kauf nehmen, daher sind bestmögliche Originalaufnahmen für die 3D-Nachbearbeitung zu fordern.

Bei der Erstellung der interaktiv explorierbaren Einzelbilder ist die notwendige Markierung der relevanten Strukturen relativ zeitaufwendig. Ansonsten gibt es aber hierbei keine nennenswerten Probleme. Auch die Digitalisierung der Videosequenzen ist bei adäquater Software und Hardware unproblematisch.

Die verwendete Internettechnologie ist gut geeignet, um die verschiedenen multimedialen Daten zu verbinden. Entscheidend ist die Nutzbarkeit der VR-Technologie der

Quicktime-Filme, die den Einsatz der interaktiven Simulationssequenzen ermöglicht. Ein großer Vorteil liegt außerdem in der Verwendung einer bekannten standardisierten Benutzeroberfläche, wie die Browser-Technologie des Internets. Ein neuer Anwender findet sich in dem bekannten Internet-Browser leichter zurecht und mögliche Hemmschwellen werden somit schneller beseitigt.

Ein möglicher Nachteil des Internets ist bei Verwendung der Browser-Technik aber ebenso zu bedenken : die multiplen Sprungmöglichkeiten (Links oder Hyperlinks) können im Internet schnell dazu führen, daß der Überblick verloren geht. Man nennt das auch 'lost in the web'. Deshalb ist bei der Erstellung des Lehrprogramms darauf geachtet worden, daß ein klares Layout eine gute Orientierung und Navigation innerhalb des Programms gewährleistet und es nicht zu einem 'lost in the program' kommt.

Leider konnte mit den bisherigen Methoden die Funktionalität der 'intelligenten' Filme noch nicht in die Browser-Technologie eingebunden werden. Lediglich in der Programmumgebung des **VOXEL-MAN 3D-Navigator** ist es möglich innerhalb der 'intelligenten' Filmsequenzen Strukturen abzufragen. Eine Portierung dieser Funktionalität in die 'Browser-Technologie' wäre sehr wünschenswert.

Kapitel 8

Schlußfolgerungen

Das Hauptziel, eine Hilfestellung bei der Orientierung innerhalb einer Ultraschalluntersuchung zu geben, konnte erreicht werden. Durch die Zusammenschau von Ultraschallbildern mit einem 3D-Modell bekommt der Anwender einen Überblick über die jeweilige Haltung des Schallkopfes und kann so innerhalb der Simulationssequenzen die typischen Ultraschall-Standardschichten nachempfinden. Das Erfassen der anatomischen Strukturen mit ihrer räumlichen Ausdehnung und Lage wird dadurch erleichtert. Dafür sind auch die mitdargestellten anderen Modalitäten wie MRT- oder Kryotomschnitte hilfreich, da hier die anatomischen Strukturen besser dargestellt sind.

Die benutzten interaktiven Simulationssequenzen sind die herausragenden Elemente des Lehrprogramms **PED-SONO**. Damit ist es gelungen bisherige statische Darstellungen einer Ultraschalluntersuchung durch eine dynamische Darstellung abzulösen. Der direkt manipulative Ansatz mit interaktiver Steuerbarkeit der Simulation ist neu und erhöht den didaktischen Wert dieser Methode. Dadurch hebt es sich von den herkömmlichen Lehrmedien ab.

Der Computer ermöglicht also ein 'aktives' Lernen am Modell.

Der direkte Nutzen und eine Quantifizierung des Lerneffektes durch Computerbasiertes Training (CBT) sind in dieser Arbeit nicht untersucht worden, aber die Arbeiten von [Kallinowski et al., 1997] und [Lyon et al., 1992] zeigen, daß multimediale Lernprogramme einen höheren Lerneffekt haben können als konventionelle Methoden. Die didaktische Wirksamkeit von CBT scheint somit bewiesen. Auch unsere eigenen Erfahrungen weisen in diese Richtung ([Richter et al., 1998] und [Kim et al., 1999]).

Das Programm erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit oder Marktreife. Dafür müssten noch viele weitere Simulationssequenzen, Bilder und Texte hinzugefügt wer-

den. Es zeigt jedoch modellhaft, was mit den zur Verfügung stehenden Mitteln machbar ist, um komplexe Sachverhalte besser und verständlicher zu erklären.

Dem Programm kommt auch die Authentizität durch Benutzung von ausschließlich humanem Datenmaterial zugute, was das Lehrprogramm realitätsnäher als andere Programme macht (keine Modelle wie z.B. im Programm von [Hirsch, 1998]).

Ein weiterer Vorteil ist die Unabhängigkeit von oftmals schlechten Untersuchungsbedingungen (unruhige Kinder, Luftüberlagerungen, etc). Jetzt hat der Lernende die Möglichkeit ohne Zeitdruck in Ruhe die Ultraschall-Anatomie zu studieren und durch Simulation von Ultraschall-Untersuchungen die Handhabung dieses wichtigen Diagnoseinstruments der Kinderradiologie zu üben.

Die bewußt gering gehaltenen Hardware- und Software-Anforderungen zur Benutzung des Programms sollen eine weite Verfügbarkeit ermöglichen. Die Anschaffung teurer spezieller Hardware zur Grafikbearbeitung wie in früheren Tagen ist nicht mehr notwendig.

Ebenso soll die Übersichtlichkeit mit einfach gehaltenem Layout den Anwender ermutigen das Programm zu nutzen. Viele bisher veröffentlichten Multimedia-Programme vernachlässigen leider diesen Punkt der Software-Ergonomie.

8.1 Ausblick

Die wirkliche Anwendbarkeit eines solchen Lehrprogramms wird sich erst noch zeigen müssen. Die bisherigen Erfahrungen mit neuen interaktiven Lehrmethoden geben jedoch insgesamt Anlaß zur Hoffnung, daß damit ein neuer effektiver Weg in der Lehre eröffnet wird [Richter et al., 1998]. Der intelligente Einsatz von Multi-Media-Komponenten (MMK) kann durchaus zu einer erhöhten Lernmotivation führen. Voraussetzung dafür ist natürlich eine didaktisch durchdachte Darstellung des Lernstoffes.

Einen Anfang in diese Richtung bildet sicherlich die routinemäßige Benutzung von **VOXEL-MAN 3D-Navigator** im Studentenunterricht, indem die interaktiven 'intelligenten' Filmsequenzen enthalten sind. Für die Fortbildung in der Kinderradiologie fehlen dem Programm **VOXEL-MAN 3D-Navigator** aber die Kinderradiologie-spezifischen Sequenzen und Texte. Hier könnte das erstellte Lehrprogramm **PED-SONO** eine Lücke schließen.

Vorstellbar wäre auch das Szenario, daß ein solches Lehrprogramm zusammen mit einem Ultraschallgerät ausgeliefert wird, damit Anfängern ein leichter Einstieg in

das schwierige Feld der Sonographie ermöglicht wird.

Es gibt vielfältige Ansätze das Programm zu verbessern. Hinsichtlich des in dieser Arbeit verwendeten Datenmaterials sind Verbesserungen vor allem in der Qualität der Schnittbilddaten zu erwarten. Die rasante Entwicklung innerhalb aller bildgebenden Verfahren wird hier besseres Ausgangsmaterial mit schärferer Abbildung der Anatomie oder Pathologie zur Verfügung stellen.

Damit 'intelligente' Simulationssequenzen auch von den MRT- und Ultraschall-Datensätzen des Kopfes erstellt werden können, wären in erster Linie bessere Datensätze zur einfacheren Segmentierung wünschenswert. Die genaue Segmentierung eines Ultraschalldatensatzes ist heute noch ein Problem, aber für Lehrzwecke wäre eine grobe Segmentation, z.B. nur der großen Hirnareale, zunächst ausreichend.

Wegen den unterschiedlichen Verhältnissen zwischen Erwachsenen-Anatomie und Säuglings-/Kleinkind-Anatomie wäre ein Kleinkind-Datensatz mit ähnlich hochauflösenden Bildern wie bei dem Visible-Human-Male Datensatz wünschenswert. Das geplante *Visible-Human-Child* Projekt könnte diese Bilder liefern.

Eine weitere Vereinfachung bei der Erweiterung des Programms könnte durch Automatisierung vieler Einzelschritte in der Erstellung der Simulationssequenzen und der interaktiv explorierbaren Bilder erreicht werden.

Die fehlende Einsatzmöglichkeit von 'intelligenten' Simulationssequenzen in dem Programm **PED-SONO** wird in Zukunft möglicherweise ausgeräumt werden können. Neuere Entwicklungen [Schubert et al., 2000] machen es nun auch möglich die Funktionalität der 'intelligenten' Filmsequenzen innerhalb der 'Browser-Technologie' zu nutzen.

Unter der Voraussetzung, daß die Datensätze segmentiert vorliegen, könnten also 'intelligente' Filmsequenzen aus den Kinderkopf-Datensätzen erstellt und in das Programm **PED-SONO** eingebunden werden.

Einen wesentlichen Schritt zu mehr Realität erhoffen wir uns durch den baldigen Einsatz von Virtual-Reality-Technologie in Form eines 3D-Zeigegerätes zusammen mit dem Programm **PED-SONO**. Die Maus-Steuerung der interaktiven Sequenzen soll durch ein echtes Schallkopfmodell und einem Simulationsdummy ersetzt werden. Zur Lagebestimmung des Schallkopfmodells soll ein Tracking-System¹ verwendet werden. Ein solches 3D-Zeigegerät wird z.B. in einem Simulationsprogramm für Echokardiographie schon benutzt [Grunst et al., 1995].

¹Die Orientierung des Schallkopfmodells im Raum wird ähnlich wie bei den 3D-Sonogeräten durch Magnetfeldlinienbestimmungen erreicht

Anhang A

CD-ROM

Der Arbeit ist eine CD-ROM beigelegt mit dem Programm **PED-SONO** und einer experimentellen Version von **VOXEL-MAN Junior**, die im Studentenunterricht der Kinderradiologie benutzt wird. Dieses Programm ist ein Vorläufer des **VOXEL-MAN 3D-Navigator** und enthält ebenfalls 'intelligente' Simulationssequenzen.

Das Programm **PED-SONO** muß mit dem 'Internet Explorer 5' von 'Microsoft' ausgeführt werden. Empfehlenswert ist eine Bildschirmauflösung von mindestens 1024x768 Pixeln.

Für andere Browser-Plattformen wurden die HTML-Seiten noch nicht optimiert. Eine Portierung auf den 'Netscape Navigator' ist für die Zukunft geplant.

Literaturverzeichnis

- [Banholzer, 1996] Banholzer, P. (1996). *Abdominelle Sonographie, interaktiver Atlas*. Urban & Schwarzenberg-Verlag. CD-ROM.
- [Benz-Bohm, 1997] Benz-Bohm, G. (1997). *Kinderradiologie*. Thieme-Verlag.
- [Braun et al., 1990] Braun, B. et al. (1990). *Ultraschalldiagnostik*. ecomed.
- [Campbell and Darnell, 1998] Campbell, B. and Darnell, R. (1998). *Dynamic HTML—Ein 7-Tage-CrashKurs*. Markt & Technik-Verlag.
- [Deeg et al., 1996] Deeg, K. et al. (1996). *Die Ultraschalluntersuchung des Kindes*. Springer-Verlag.
- [Frantz et al., 1999] Frantz, S., Rohr, K., Stiehl, H., Kim, S., and Weese, J. (1999). Validating point-based mr/ct registration based on semi-automatic landmark extraction. In *CARS 99, Paris*. Elsevier.
- [Grunst et al., 1995] Grunst, G., Fox, T., Quast, K., and Redel, D. (1995). *Szenische Enablingsysteme-Trainingsumgebungen in der Echokardiographie*. In GLOWALLA et al., editors, *Auffahrt zum Information Highway*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.
- [Hansen et al., 1996] Hansen, H., Helmke, K., and Kunze, K. (1996). Fast non-invasive estimation of intracranial pressure by means of optic nerve ultrasound studies. *Intensive Care Medicine*, 22 Suppl.3:363.
- [Hien, 1996] Hien, P. (1996). *Echokardiographie-Handbuch*. Springer-Verlag, Berlin.
- [Hirsch, 1998] Hirsch, M. (1998). *Interbrain : topographische Anatomie des ZNS des Menschen*. CD-ROM.
- [Höhne et al., 1990] Höhne, K. H., Bomans, M., Pommert, A., Riemer, M., Schiers, C., Tiede, U., and Wiebecke, G. (1990). 3D-visualization of tomographic volume data using the generalized voxel-model. *Visual Comput.*, 6(1):28–36.

- [Höhne and Hanson, 1992] Höhne, K. H. and Hanson, W. A. (1992). Interactive 3D-segmentation of MRI and CT volumes using morphological operations. *J. Comput. Assist. Tomogr.*, 16(2):285–294.
- [Höhne et al., 1995] Höhne, K. H., Pflessner, B., Pommert, A., Riemer, M., Schiemann, T., Schubert, R., and Tiede, U. (1995). A new representation of knowledge concerning human anatomy and function. *Nature Med.*, 1(6):506–511.
- [Kallinowski et al., 1997] Kallinowski, F. et al. (1997). Computer-basiertes training : Ein neuer weg der chirurgischen aus- und weiterbildung. *Der Chirurg*, 68:433–438.
- [Kim et al., 1999] Kim, S., Höhne, K., Schubert, R., and Richter, E. (1999). Neue interaktive 3d-lernmethoden auf dem gebiet der pädiatrischen sonographie auf pc-basis. *Der Radiologe*, 39:734.
- [Kobert, 1998] Kobert, T. (1998). *HTML4–Das Einsteigerseminar*. bhv-Verlag.
- [Krämer, 1998] Krämer, H. (1998). *Interaktiver volumenbasierter 3D Atlas eines menschlichen Föten auf der Basis einer Kernspintomographie*. Doktorarbeit, Fachbereich Medizin, Universität Hamburg.
- [Leidig and Grunert, 1998] Leidig and Grunert (1998). *Pädiatrische Ultraschalldiagnostik*. 3D-Sonographie: Trainings-CD-ROM.
- [Luft and Drews, 1997] Luft, A. and Drews, U. (1997). *Neurotutor*. CD-ROM.
- [Lyon et al., 1992] Lyon, H. et al. (1992). Significant efficiency findings from research on computerbased interactive medical education programs for teaching clinical reasoning. In *MEDINFO 92*, Amsterdam. Elsevier.
- [Merz, 1997] Merz, E. (1997). *Sonographische Diagnostik in Gynäkologie und Geburtshilfe; Lehrbuch und Atlas in 2 Bänden*. Georg Thieme-Verlag, Stuttgart, 2. Ausgabe.
- [Möller and Reif, 1997] Möller, T. and Reif, E. (1997). *Taschenatlas der Schnittbildanatomie (CT und KST)*. Georg Thieme-Verlag, Stuttgart, 2. Ausgabe.
- [Netter, 1996] Netter, F. (1982-1996). *Farbatlanten der Medizin: Bd. 1-9*. Georg Thieme-Verlag, Stuttgart New-York.
- [Nuthmann, 1998] Nuthmann, J. (1998). *Erstellung und Anwendung volumenbasierter Anatomieatlanten des Oberbauches*. Doktorarbeit, Universität Hamburg ; Fachbereich Medizin.

- [Pabst and Putz, 1993] Pabst, R. and Putz, R. (1993). *Atlas der Anatomie des Menschen ; Bd. 1+2*. Urban & Schwarzenberg-Verlag, 20. Ausgabe.
- [Peters and Schumacher, 1996] Peters, H. and Schumacher, R. (1996). *Sonographische Untersuchungstechnik bei Kindern: ein Handbuch für die Praxis*. Biermann-Verlag, Zülrich.
- [Pommert et al., 1992] Pommert, A., Bomans, M., and Höhne, K. H. (1992). Volume visualization in magnetic resonance angiography. *IEEE Comput. Graphics Appl.*, 12(5):12–13.
- [Pommert et al., 1994] Pommert, A., Schubert, R., Riemer, M., Schiemann, T., Tiede, U., and Höhne, K. H. (1994). 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, Darmstadt. Zentrum für Graphische Datenverarbeitung.
- [Putz and Pabst, 1997] Putz, R. and Pabst, R. (1997). *Sobotta-Atlas der Anatomie des Menschen*. CD-ROM.
- [Richter et al., 1998] Richter, E., Kim, S.-I., Schubert, R., Maas, R., and Höhne, K. H. (1998). 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.
- [Richter and Lierse, 1990] Richter, E. and Lierse, W. (1990). *Radiologische Anatomie des Neugeborenen für Röntgen, Sonographie, CT und MRI*. Urban & Schwarzenberg-Verlag.
- [Romrell et al., 1996] Romrell et al. (1996). *Der menschliche Körper (Schnittanatomie und Tomographie)*. Ullstein-Mosby-Verlag, 2. Ausgabe.
- [Schiemann et al., 1992] Schiemann, T., Bomans, M., Tiede, U., and Höhne, K. H. (1992). Interactive 3D segmentation of MRI volume data. In *Society of Magnetic Resonance in Medicine: Book of Abstracts, Vol. 2*, page 4203, Berlin.
- [Schiemann et al., 1994] Schiemann, T., Höhne, K. H., Krämer, H., Pommert, A., Riemer, M., Schubert, R., and Tiede, U. (1994). “Intelligent volumes”: A new concept for representing spatial knowledge. *Pat. Rec. Letters*, 15:519–526.
- [Schmidt et al., 1999] Schmidt, G. et al. (1999). *Ultraschall-Kursbuch*. Thieme-Verlag.

- [Schubert et al., 1993] Schubert, R., Höhne, K. H., Pommert, A., Riemer, M., Schiemann, T., and Tiede, U. (1993). 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.
- [Schubert et al., 2000] Schubert, R., Priesmeyer, K., Wulf, H., and Höhne, K. H. (2000). Voxel-man web : Basistechnologie zur modellbasierten multimedialen representation von komplexen rumlichen strukturen. *Kunstliche Intelligenz*, 1:44–47.
- [Seebörger-Weichselbaum, 1998] Seebörger-Weichselbaum, M. (1998). *JavaScript–Das Einsteigerseminar*. bhv-Verlag.
- [Sommer, 1991] Sommer, B. (1991). *Pädiatrische Ultraschalldiagnostik in der Praxis*. Walter de Gruyter-Verlag, Berlin New-York.
- [Spitzer et al., 1996] Spitzer, V., Ackerman, M. J., Scherzinger, A. L., and Whitlock, D. (1996). The Visible Human male: A technical report. *J. Am. Med. Inf. Ass.*, 3(2):118–130.
- [Tiede, 1999] Tiede, U. (1999). *Realistische 3D-Visualisierung multiattributierter und multiparametrischer Volumendaten*. Doktorarbeit, Fachbereich Informatik, Universität Hamburg.
- [Umgelter, 1997] Umgelter, A. (1997). *Dreidimensionale Sonographie: Grundlagen, experimentelle Untersuchungen zur planimetrischen Volumetrie in vitro, sowie erste in vivo Anwendungen*. Doktorarbeit, Universität München ; Fachbereich Medizin.
- [VOXEL-MAN 3D-Navigator, 2001] Höhne, Petersik, Pflesser, Pommert, Priesmeyer, Riemer, Schiemann, Schubert, Tiede, Urban, Frederking, Lowndes, Morris (2001). *VOXEL-MAN 3D-Navigator: Gehirn und Schdel Topographische, funktionelle und radiologische Anatomie* . 2 CD-ROMs für Windows 95/98/NT/2000/ME in Deutsch und Englisch, Springer-Verlag Heidelberg / New York, ISBN 3-540-14910-4, 2001.

Danksagung

Zuerst möchte ich Prof.Dr. K.H. Höhne danken für die Bereitstellung des Themas und der Betreuung meiner Arbeit. Insbesondere die an seinem Institut entwickelten Methoden zur 3D-Visualisierung und Filmsequenzerstellung sind Grundlage für den neuen interaktiven Lehransatz.

Dann gebührt vor allem Prof.Dr. E. Richter aus der Kinderradiologie mein Dank für die Bereitstellung des Datenmaterials, sowie der langjährigen Unterstützung und Beratung bei der Erstellung dieser Arbeit. In diesem Zuge möchte ich auch der gesamten Abteilung der Kinderradiologie des UKE für die unkomplizierte Kooperation danken, insbesondere Prof.Dr. K. Helmke für die Aufnahme der Ultraschalldatensätze.

Auch allen Mitarbeitern des Instituts für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin danke ich für die Unterstützung und Geduld, insbesondere meinen Betreuern A. Pommert und T. Schiemann, aber auch K. Priesmeyer, M. Riemer, R. Schubert und U. Tiede. Nicht zu vergessen meine Doktoranten- und Diplomanten-Kollegen N. Scheller, M. Urban und H.C. Wulff.

Schließlich bin ich meinen Eltern und meiner Frau Claudia Sutter-Kim für ihre geduldige Unterstützung sehr dankbar.

Lebenslauf

- geb. 1966 in Seoul / Süd-Korea
- von 1973 bis 1977 Besuch der Anne Frank-Grundschule in Freiburg i.Br.
- von 1977 bis 1986 Besuch des Wenzinger-Gymnasiums in Freiburg i.Br. mit dem Abschluß der Allgemeinen Hochschulreife
- von 1986 bis 1994 Studium der Humanmedizin an der Albert-Ludwig Universität in Freiburg i.Br. mit Erlangung der Teilapprobation
- von 1995 bis 1996 'Arzt im Praktikum' in der radiologischen Gemeinschaftspraxis Pressler/Fünsterer in Hamburg/Othmarschen
- seit 1996 Informatik-Studium an der Hamburger Universität

Erklärung

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

Sang-Il Kim