

Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg
Fakultät für Informatik



Diplomarbeit

Evaluierung und Modifikation von
Methoden
zur Generierung von Liniengrafiken in der
medizinischen Visualisierung

Christian Tietjen

Institut für Simulation und Graphik

Evaluierung und Modifikation von Methoden zur Generierung von Liniengrafiken in der medizinischen Visualisierung

Diplomarbeit

an der
Fakultät für Informatik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

von: CHRISTIAN TIETJEN
geb. am: 22. März 1976
in: Bremen
Matrikelnummer: 15 42 00

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. BERNHARD PREIM
2. Gutachter: Dr.-Ing. TOBIAS ISENBERG

Betreuer: Prof. Dr.-Ing. BERNHARD PREIM
Dr.-Ing. TOBIAS ISENBERG

Zeit der Diplomarbeit: 17.11.2003 - 17.05.2004

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, Christian Tietjen (Matrikel-Nr. 154200), die vorliegende Arbeit allein und nur unter Verwendung der angegebenen Quellen angefertigt zu haben.

Christian Tietjen

Magdeburg, 17.04.2004

Danksagung

Mein Dank gilt in erster Linie meinen Betreuern Prof. Dr. Bernhard Preim und Dr. Tobias Isenberg, die mich während dieser Arbeit nicht nur hervorragend fachlich unterstützt haben, sondern auch stets aufmunternde Worte fanden. Angela Brennecke möchte ich für die stundenlangen Diskussionen danken, ohne die OPENNPAR und ILAB wahrscheinlich heute noch nicht zusammen arbeiten würden. An dieser Stelle sei auch Johannes Zander erwähnt, auch wenn seine Bemühungen, mir bei der Integration seines Hatching-Verfahrens behilflich zu sein, letztendlich nicht ganz erfolgreich waren. Der Fragebogen wäre ohne die gute Zusammenarbeit mit Sebastian Mirschel nie so professionell geworden. Auch ohne die Mithilfe von Jeanette Cordes und Prof. Dr. Karl J. Oldhafer wäre er nicht zustande gekommen. Nicht zu vergessen sind natürlich auch all die Korrekturleser, Fragebogenausfüller und Kaffeepausierer. Meiner Freundin Sabine möchte ich für ihre Engelsgeduld und moralische Aufbauarbeit in den letzten Monaten danken. Nicht zuletzt möchte ich mich ganz besonders bei meinen Eltern bedanken, die mich all die Jahre unterstützt haben, sodass ich heute diese Danksagung schreiben kann.

Christian Tietjen, 17. Mai 2004

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen & Verwandte Arbeiten	5
2.1	Visualisierung in medizinischen Atlanten und Lehrbüchern	5
2.1.1	Handzeichnungen	7
2.1.2	Analyse der Illustrationen	8
2.1.3	Zusammenfassung	13
2.2	Linienhafte Darstellung	16
2.2.1	Wahrnehmungspsychologischer Hintergrund	17
2.2.2	Silhouetten und Merkmalslinien	18
2.2.3	Schraffurgenerierung	20
2.2.4	Probleme beim interaktiven NPR	25
2.3	Medizinische Volumen-Visualisierung	27
2.3.1	Direktes Volume-Rendering (DVR)	27
2.3.2	Indirektes Volume-Rendering (Iso-Surface-Rendering)	29
2.3.3	NPR Volumen-Rendering	31
2.4	Anwendungen und Kombinationen	33
2.4.1	Ausbildungsprogramme	34
2.4.2	Therapieplanungs- und Trainingsprogramme	35
2.4.3	Visible Human	36
2.5	Zusammenfassung	37
3	Entwurf von NPR-Methoden für medizinische Visualisierungen	39
3.1	Motivation & Analyse	39
3.1.1	Vorteile computergestützter Rendering-Methoden	41
3.1.2	Anforderungen an das neue Verfahren	41
3.2	Parametrisierung der Effekte und Stile	44
3.2.1	Klassifizierung der Parameter	44
3.2.2	Parameter für die Nutzerinteraktion	46
3.2.3	Automatische Vorgaben	47
3.2.4	Parametereinstellung durch die 3D-Interaktion	52
3.3	Das Rendering-Verfahren	56
3.4	Konstruktion des Szenengraphen	58
3.4.1	Szenengraph zur flächenhaften Visualisierung	58

3.4.2	Volumen-Rendering	58
3.4.3	NPR Szenengraph	60
3.4.4	Kombinierung der drei Darstellungsarten	61
3.4.5	<i>Level-of-Detail</i>	62
3.4.6	Transparente Liniengrafiken	62
3.5	Zusammenfassung	63
4	Implementierung	67
4.1	Werkzeuge zur Implementierung	67
4.1.1	OPEN INVENTOR	67
4.1.2	ILAB	68
4.1.3	OPENNPAR	69
4.2	Umstrukturierung von OPENNPAR	71
4.2.1	Flexibilisierung von OPENNPAR	72
4.2.2	Verwaltung mehrerer Pipelines	73
4.3	Konkrete Umsetzung der gesteckten Ziele	77
4.3.1	Umsetzung der Rendering-Pipeline	78
4.3.2	Generierung und Modifizierung des z -Buffers	79
4.3.3	Umsetzung der Parametrisierung	80
4.3.4	Fokussierung	80
4.4	Zusammenfassung	80
5	Evaluierung	83
5.1	Hypothesen	83
5.2	Methodik	84
5.2.1	Ziel der Befragung	84
5.2.2	Zielgruppe	84
5.2.3	Erwartete Probleme	85
5.3	Aufbau des Fragebogens	85
5.3.1	Anordnung der Fragen	86
5.3.2	Bildaufbau	87
5.4	Auswertung	92
5.4.1	Mediziner	92
5.4.2	Computergrafiker	94
5.4.3	Potentielle Patienten	94
5.5	Schlussfolgerungen	95
6	Zusammenfassung und Ausblick	97
6.1	Fortführungs- und Verbesserungsvorschläge	98
	Abbildungsverzeichnis	101
	Literaturverzeichnis	103
	A Symbole	111

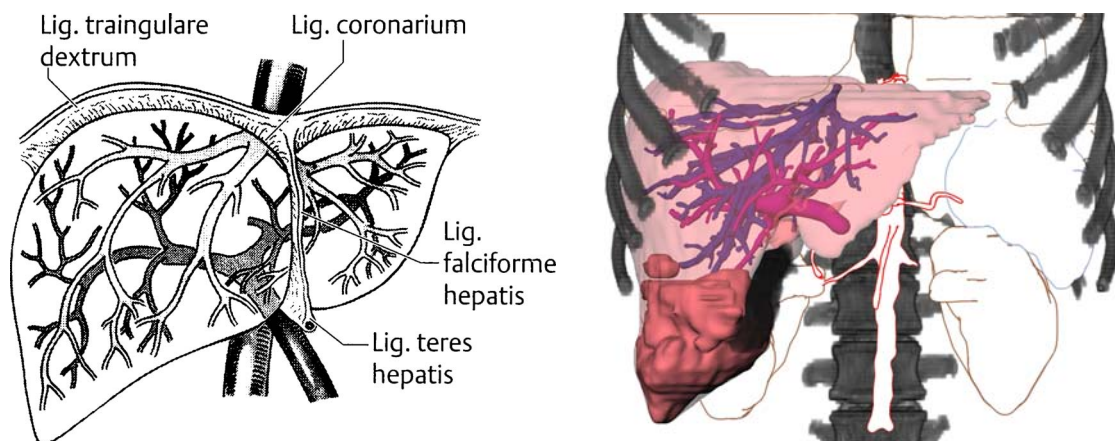
B Szenengraphen	113
C Fragebogen	117
D Auswertungsdaten	133

1 Einleitung

In der Computergrafik gibt es seit etwa 1990 die Entwicklung, bewusst von der fotorealistischen Darstellung von 3D-Modellen abzuweichen. Stattdessen wird u.a. versucht, die 3D-Modelle linienhaft darzustellen bzw. linien- und flächenhafte Darstellungen zu kombinieren. Diese Entwicklung wurde frühzeitig von der AG Graphik und Interaktive Systeme an der Universität Magdeburg aufgegriffen und weiterentwickelt [STROTHOTTE und SCHLECHTWEG, 2002].

Bisher wurde jedoch der Fokus auf die Entwicklung der nicht-realistischen Rendering-Stile gelegt. Eine praktische Anwendung dieser Stile war meist nicht Ziel der Bestrebungen. Als mögliche Anwendung für diese Darstellungsform wurde wiederholt auch die medizinische Illustration genannt. In medizinischen Atlanten werden häufig Illustrationen genutzt, welche zwar nicht der Realität entsprechen, jedoch leichter verständlich sind (Abbildung 1.1(a)).

Die entwickelten Rendering-Verfahren wurden allerdings nie ernsthaft für die medizinische Illustration angewendet, und es wurde auch nie überprüft, ob damit ein Nutzen verbunden ist und ob der Nutzen den Aufwand rechtfertigt.



(a) Darstellung der Leber in einem Anatomie-Atlas. Quelle SCHUMPELICK et al. [2003].

(b) Diese Darstellung wurde mit Hilfe der in dieser Arbeit entstandenen Methoden generiert.

Abbildung 1.1: Vergleich einer herkömmlichen und einer computergenerierten Darstellung

Ziel dieser Diplomarbeit ist es daher, nicht-realistische Rendering-Methoden, insbesondere Liniengrafiken, für die Darstellung patientenindividueller Daten zu erpro-

1 Einleitung

ben. Es ist der Versuch, erstmals NPR-Techniken in Bezug auf ihre Anwendbarkeit auf medizinische Volumendaten zu testen. Da für die medizinische Visualisierung das Volumen-Rendering zur Darstellung von Rohdaten aus der medizinischen Bildgebung wesentlich ist, muss dieses ebenfalls in die Darstellung integriert werden. In dieser Arbeit wird also zum ersten Mal die Kombination von linienhaften und flächenhaften Darstellungen mit Volumen-Rendering vorgestellt, wie es in Abbildung 1.1(b) zu sehen ist.

Für die verschiedenen Strukturen im menschlichen Körper (z.B. Organe, Gefäßsysteme und pathologische Veränderungen) werden vordefinierte Visualisierungsparameter empirisch bestimmt, um den Interaktionsaufwand zu reduzieren und die Reproduzierbarkeit zu verbessern. Zu diesem Zweck wird der Einsatz der Techniken in medizinischen Atlanten eingehend untersucht und eine empirische Studie mit einigen Ärzten durchgeführt, welche die Nützlichkeit der Parameter beurteilen sollen. Zugleich werden ihnen verschiedene Darstellungen präsentiert, aus denen sie die ihnen am sinnvollsten erscheinende auswählen sollen. Aufgrund der vordefinierten Parameter kann mit geringem Aufwand eine angemessene didaktische Visualisierung erzeugt werden.

Die erzeugten Visualisierungen sind in einem weiten Feld anwendbar. Die Visualisierungstechniken werden vorrangig für die Lehre entwickelt. Es werden patientenindividuelle Daten verwendet, um die Lernenden auf die Anomalien der anatomischen Strukturen der Patienten vorzubereiten. Diese Verfahren können jedoch auch für die Operationsplanung genutzt werden. Auch der Einsatz dieser Methoden im Rahmen der Patientenaufklärung ist möglich.

Um diese Aufgaben realisieren zu können, werden die Bibliotheken OPENNPAR und ILAB zusammenggeführt. ILAB ist eine Bildverarbeitungsbibliothek, die speziell für die medizinische Bildanalyse und Visualisierung entwickelt wurde und mit deren Hilfe patientenindividuelle Daten visualisiert werden können. Die nicht-realistischen Rendering-Methoden sind wiederum Teil der Bibliothek OPENNPAR, die von der AG Computergrafik und Interaktive Systeme entwickelt wurden.

Die vorliegende Arbeit ist folgendermaßen gegliedert:

Kapitel 2 – In diesem Kapitel werden die Illustrationen in medizinischen Atlanten ausführlich analysiert. Weiterhin werden die beiden in dieser Arbeit verwendeten Rendering-Verfahren zur Erstellung von Liniengrafiken und zur Volumenvisualisierung vorgestellt. In der Volumenvisualisierung gibt es bereits Verfahren zum Einsatz von nicht-fotorealistischem Rendering, sodass diese ebenfalls beschrieben werden. Bisher eingesetzte Visualisierungsmethoden bei computergestützten Anwendungen in der Medizin werden zum Abschluss diskutiert.

Kapitel 3 – Hier wird untersucht, welche Parametrisierungen zur Visualisierung notwendig sind und inwieweit diese automatisch gesetzt werden können. Im

Anschluss daran wird ein Rendering-Verfahren erarbeitet, dass die erforderliche Parametrisierung und die Kombination der Rendering-Stile ermöglicht.

Kapitel 4 – Das Rendering-Verfahren wird am Beispiel der Zusammenführung von OPENNPAR und ILAB realisiert. Bei beiden Bibliotheken sind dazu erhebliche Anpassungen notwendig. Die erforderlichen Umstrukturierungen sowie die Abweichungen von dem im Entwurf vorgestellten Verfahren werden ausführlich geschildert.

Kapitel 5 – Um zu analysieren, ob die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur medizinischen Visualisierung tatsächlich eine sinnvolle Weiterentwicklung der bisher existierenden Verfahren ist, werden die Ergebnisse in Form einer Evaluierung diskutiert. Zusätzlich werden in diesem Kapitel die Parameter bestimmt, für die keine eindeutige Initialisierung ermittelt werden konnte.

Kapitel 6 – Abschließend werden die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit zusammengefasst. Die noch offenen Probleme werden beschrieben, und es werden einige Vorschläge zur Weiterführung dieser Arbeit vorgebracht.

2 Theoretische Grundlagen & Verwandte Arbeiten

In dieser Arbeit wird die Darstellung medizinischer Bilddaten mit Hilfe von Methoden des nicht-photorealistischen Renderings (NPR) untersucht. Aus diesem Grund wird auf die bisherigen Möglichkeiten und Umsetzungen in der Visualisierung eingegangen. Am meisten ausgereift ist die medizinische Visualisierung bis heute in medizinischen Atlanten, welche im folgenden Abschnitt untersucht werden.

In der Computergrafik sind mittlerweile eine Vielzahl von Methoden erarbeitet worden, mit denen die Darstellungen aus den medizinischen Atlanten nachgestellt werden können. Zum einen gibt es die NPR-Techniken, welche Polygonnetze als Liniengrafiken dargestellt. Ein anderes Gebiet der Computergrafik ist das Volumen-Rendering, mit dem die in der medizinischen Bildgebung gewonnenen Daten direkt visualisiert werden. Anschließend werden bisherige Kombinationen von medizinischen Bilddaten mit NPR erläutert und das Pro und Kontra dieser Methoden abgewogen. Es wird gezeigt, warum nicht einfach apparative Aufnahmen anstelle von Zeichnungen verwendet werden und wann NPR-Methoden auch in 3D-Darstellungen dem normalen Rendering vorzuziehen sind.

Abschließend wird auf die Probleme in der bisherigen computergestützten Visualisierung in der Medizin eingegangen, bei der fast vollständig auf NPR verzichtet wird. Fazit ist, dass es zwar technisch möglich ist, die in den medizinischen Atlanten eingesetzten NPR-Techniken in interaktiven, computergestützten Systemen zu verwenden, davon aber bisher kaum oder unzureichend Gebrauch gemacht wird.

2.1 Visualisierung in medizinischen Atlanten und Lehrbüchern

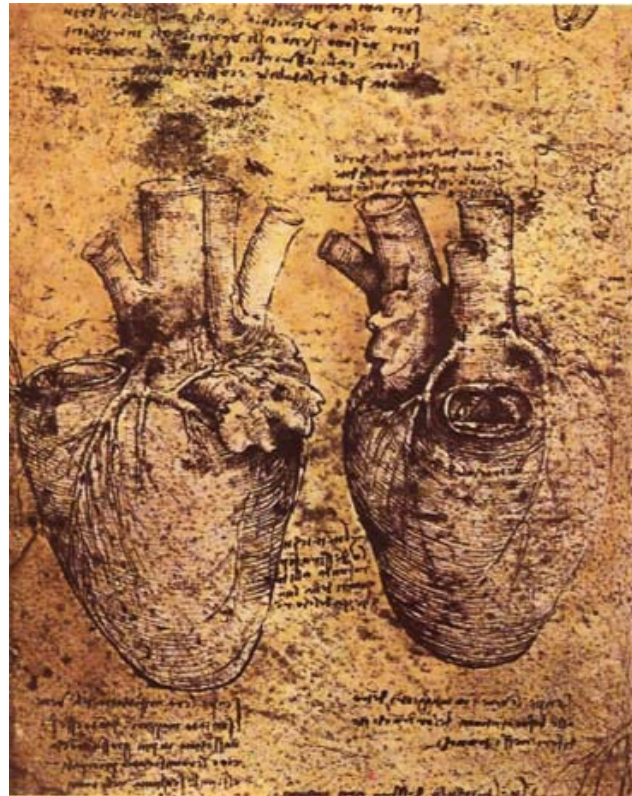
Im 15. und 16. Jahrhundert entstand das weitgehend heute noch gültige Bild von der makroskopischen Anatomie des Menschen. Den wichtigsten Erkenntnisfortschritt auf dem Gebiet der Anatomie hat Andreas Vesalius (1514-1564) mit seinem Werk *De Humani Corporis Fabrica* [VERSALIUS, 1543] erreicht (Abbildung 2.1(a)). Damals mussten die Zeichnungen mit Holzschnitt oder Kupferstich erstellt werden, um sie vervielfältigen zu können. Diese Drucktechniken erforderten die Anwendung von

2 Theoretische Grundlagen & Verwandte Arbeiten

Schraffur oder Punktierung, um die Zeichnung auf die Druckplatten gravieren zu können. Vorteil der Schraffur ist, dass sie nicht nur Informationen über die Helligkeit liefert, sondern auch Form und Oberflächenstruktur des gezeichneten Objektes hervorhebt. Heutzutage wird bei dem Druck von Graustufen in Bildern meist nur noch das *Halftoning* verwendet, wobei die Vorteile der Schraffur verloren gehen. Die Techniken sind deshalb bis heute als Stilmittel erhalten geblieben.



(a) Erste anatomisch korrekte Darstellung der Muskulatur. Quelle: VERSALIUS [1543].

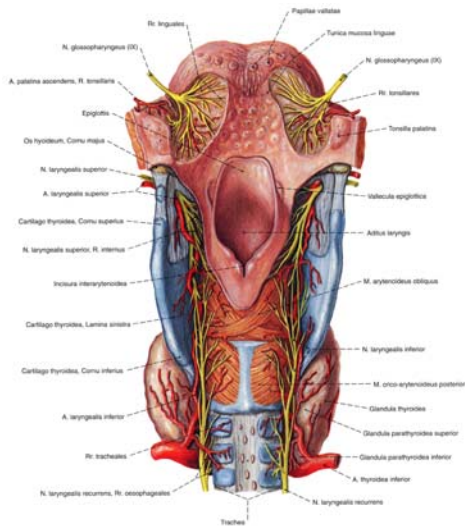


(b) Menschliches Herz mit seinen Venen. Quelle: DA VINCI [1510].

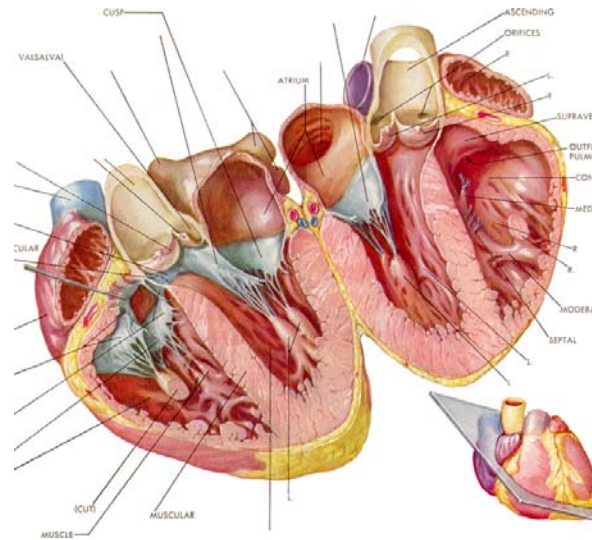
Abbildung 2.1: Antike Zeichnungen der menschlichen Anatomie.

Heutzutage werden neben den Schwarz-Weiß-Zeichnungen auch „reale“ farbige Zeichnungen veröffentlicht. Zu den anerkanntesten Werken zählen die Atlanten von Johannes Sobotta und Frank H. Netter (Abbildung 2.2). Ihre Illustrationen gelten als Inbegriff visueller medizinischer Informationsvermittlung. Die große Schwierigkeit beim Erstellen solcher Zeichnungen besteht darin, sie hochgradig klar, präzise und trotzdem so informationsdicht wie möglich zu gestalten. Sie folgen dabei keinem festgelegten Schema wie etwa bei einer technischen Zeichnung. Die Zeichner wählen aus verschiedenen Darstellungsmöglichkeiten diejenige aus, die ihnen am günstigsten erscheint, sodass die Qualität der Bilder stark von der künstlerischen Begabung des Zeichners abhängt.

2.1 Visualisierung in medizinischen Atlanten und Lehrbüchern



(a) Arterien und Nerven des Kehlkopfes (*Larynx*), und der Zungenwurzel (*Radix linguae*); Schleimhaut an der Zungenwurzel teilweise entfernt; von hinten. Quelle: PUTZ und PABST [1993].



(b) Aufgeschnittenes Herz mit Blick in das Innere. Die Schnittebene wird unten rechts angezeigt. Quelle: NETTER [1998].

Abbildung 2.2: Aufwändige farbige Handzeichnungen aus zwei verschiedenen medizinischen Atlanten.

Während in Atlanten meistens Handzeichnungen abgebildet sind, werden in Lehrbüchern auch apparative Aufnahmen (Fotos, Röntgen, Ultraschall etc.) verwendet. Allerdings werden diese nur ergänzend zu den Zeichnungen dargestellt, um den Leser in diesen Aufnahmeverfahren zu schulen. Es gibt auch rein fotografische Atlanten, bei denen die anatomischen Strukturen anhand von präparierten menschlichen Leichen gezeigt werden [THIEL, 2002].

2.1.1 Handzeichnungen

Apparative Bilder sind nicht immer leicht zu interpretieren. Insbesondere Ultraschallbilder sind für den Laien nur schwer verständlich (siehe Abbildung 2.8(a) auf Seite 13). Bei solchen Aufnahmen sind meistens Pfeile oder Umrandungen notwendig, die dem ungeübten Auge zeigen, auf welche Stelle hingewiesen werden soll. In CT- oder MRT-Aufnahmen beispielsweise heben sich Lebertumoren nur durch geringe Intensitätsschwankungen von dem gesunden Gewebe ab.

Auch Fotografien, die während einer Operation aufgenommen werden, sind selten aussagekräftig genug, um die zu klärenden Sachverhalte gut wiedergeben zu können. Für die Problemstellung irrelevante Strukturen, wie Bindegewebe, Blut oder andere Organe, lenken den Betrachter ab oder versperren die Sicht. Eine Ausnahme bilden

dermatologische Fotoaufnahmen, da aufgrund des persönlichen Vorwissens gesunde Haut von krankhaften Veränderungen differenziert werden kann.

Durch Zeichnung von Hand kann sichergestellt werden, dass alle Visualisierungsparameter auf die Problemstellung abgeglichen sind:

- Es sind keine störenden Artefakte durch das Aufnahmeverfahren vorhanden,
- störende oder überflüssige Strukturen werden einfach nicht gezeichnet, anstatt sie mühsam ausblenden zu müssen (Abstraktion),
- der Blickwinkel kann optimal gewählt werden und
- interessante Strukturen können besonders hervorgehoben werden.

Die beiden Illustrationsmöglichkeiten – farbige und s/w Liniengrafiken – sind nicht strikt voneinander getrennt. Auch bei der farbigen Illustration wird zur Differenzierung von Strukturen auf Schraffur etc. zurückgegriffen.

Beide Varianten haben ihre Vorzüge. Während in der kolorierten Abbildung mit verschiedenen Farben und Texturen zur Differenzierung gearbeitet werden kann, werden bei der Liniengrafik Vorteile durch die abstraktere Zeichenweise erzielt. Der Vorteil der Liniengrafiken wird in Abschnitt 2.2 näher erläutert.

2.1.2 Analyse der Illustrationen

Anhand der folgenden repräsentativen Beispiele für medizinische Illustrationen werden die Möglichkeiten der Zeichnungen von Hand erläutert. Im Anschluss daran werden die Gemeinsamkeiten der verschiedenen Arten der Darstellung erläutert, da diese auf den ersten Blick nicht immer offensichtlich sind.

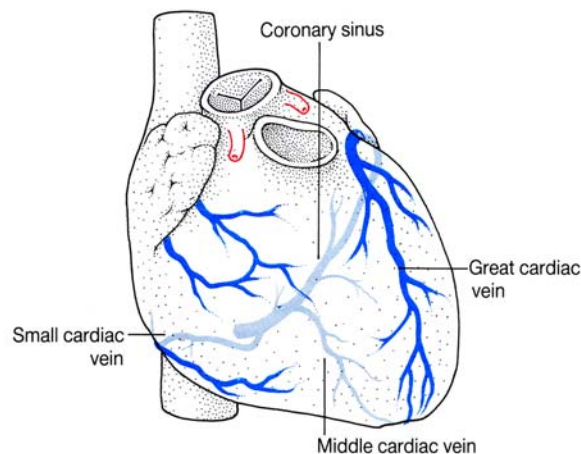
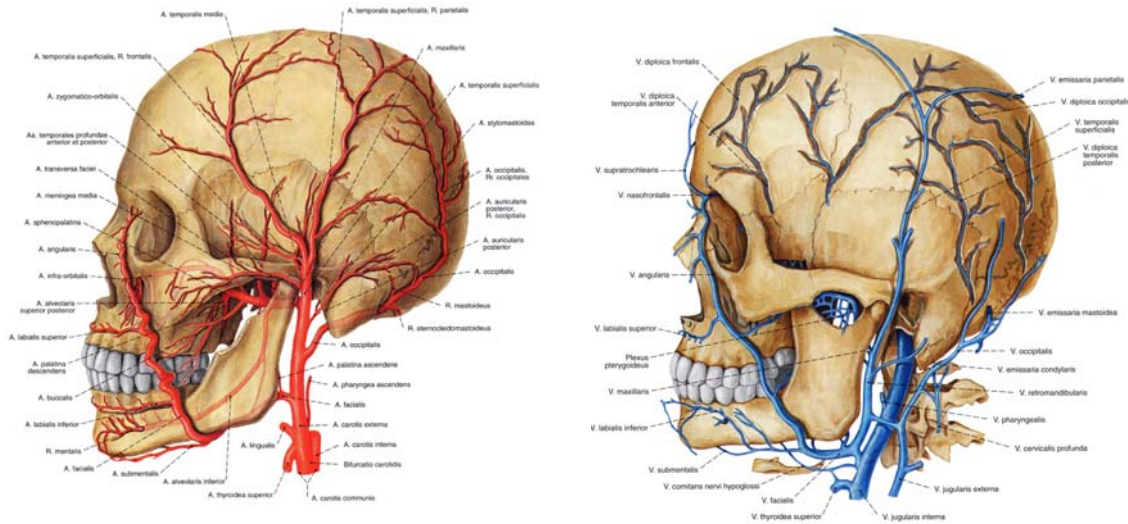


Abbildung 2.3: Die Blutversorgung des Herzens. Die koronaren Venen werden blau eingefärbt und bei Verdeckung transparent überzeichnet. Quelle: ROGERS [1992]

In Abbildung 2.3 werden die koronalen Venen des Herzens beschrieben. Das Herz selbst wird dabei mittels Silhouette und Punktieretechnik dargestellt. Die großen Gefäßstämme wurden abgeschnitten, da nur das Herz selbst sichtbar sein muss. Um die verdeckten Venen sichtbar zu machen, wurde nicht etwa das Herz durchsichtig gezeichnet, sondern die verdeckten Gefäße wurden transparent auf dem Herz angedeutet. Die Ansätze der koronalen Arterien wurden nur grob mittels Silhouetten angedeutet. In dem verwendeten Atlas [ROGERS, 1992] ist neben der in Abbildung 2.3 gezeigten Darstellung eine weitere vorhanden, die die Arterien beschreibt und dafür die Venen nicht anzeigt.



(a) Äußere Halsschlagader (*Aorta carotis externa*), und ihre Äste; von lateral.

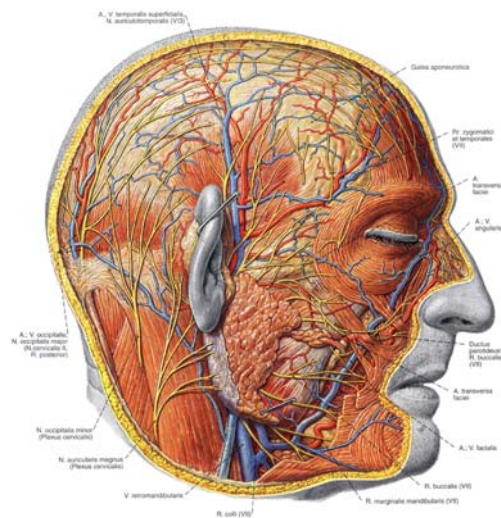
(b) Innere Drosselvene (*Vena jugularis interna*), und ihre extrakraniellen Zuflüsse; von lateral.

Abbildung 2.4: Darstellung der Blutversorgung des Schädels. Verdeckte Gefäße werden auch hier transparent überzeichnet. Zu feine Gefäße werden abgetrennt. Beide Illustrationen sind aus der gleichen Quelle: [PUTZ und PABST, 1993].

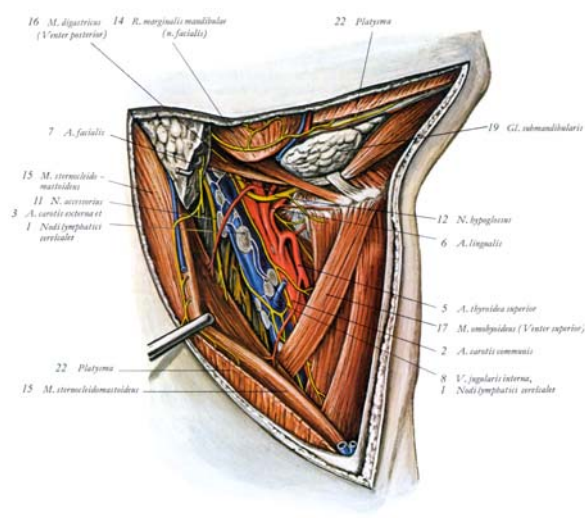
In Abbildung 2.4 werden ebenfalls Gefäßverläufe gezeigt. Neben den Gefäßen werden hier die Schädelknochen und Nackenwirbel dargestellt, um den Aderverlauf besser zu verdeutlichen. Um nur den ungefähren Gefäßverlauf bestimmen zu können, hätte eine abstrakte Darstellung der Schädelknochen, ähnlich wie in Abbildung 2.3, ausgereicht. Durch die detaillierte Darstellung der Unebenheiten des Knochens können jedoch genauere Aussagen über den Verlauf gemacht werden. Da die Knochen also ebenfalls wichtig zur Erfassung der Problemstellung sind, werden sie auch detailliert dargestellt. Die hellbraune Darstellung der Knochen verleiht der Illustration zudem ein authentischeres und eingängigeres Aussehen. Zur Darstellung der Gefäße wird auf dieselben Techniken zurückgegriffen. In Abbildung 2.4(a) werden verdeckte Arterien transparent überzeichnet. Die Venen in Abbildung 2.4(b) werden entfernt und offensichtlich abgeschnitten, sobald sie zu fein werden und keine

2 Theoretische Grundlagen & Verwandte Arbeiten

zuverlässige Aussage über den typischen Verlauf mehr möglich ist.



(a) Gefäße und Nerven des Kopfes; oberflächliche Schicht; von lateral. Quelle: PUTZ und PABST [1993].



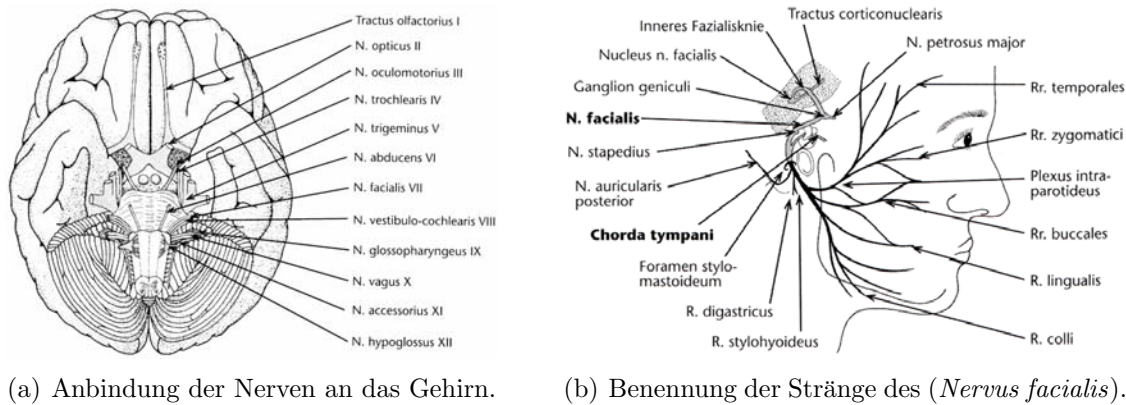
(b) Lymphknotenresektion am Hals. Haut und Platysma teilweise abgetragen. *Musculus sternocleidomastoideus* nach dorsal gezogen. Quelle: WALDEYER und MAYET [1987].

Abbildung 2.5: Gleichbleibende Farbwahl für gleiche Strukturen bei verschiedenen Körperteilen trotz unterschiedlicher Quellen.

Um den Blick auf Strukturen hinter dem Ohr freizumachen, wurde die Ohrmuschel in Abbildung 2.5(a) mit einem Haken beiseite gezogen, ähnlich dem Vorgehen während einer Operation. Damit Strukturen durch das Werkzeug selbst nicht verdeckt werden, wird nur der vordere Teil gezeichnet und der Griff weggelassen. Die gleiche Technik wird auch in Abbildung 2.5(b) angewendet. Auf diese Art bleibt das Ohr als Landmarke erhalten. Außer dem Ohr werden die Kopfhaut sowie Teile des Gesichts farblos und dadurch unauffällig dargestellt. Die restliche Haut und das Fettgewebe wurden entfernt und die darunterliegenden Strukturen in den typischen Farben dargestellt. Durch die unterschiedlichen Einfärbungen der Gefäßsysteme lassen sich diese gut voneinander unterscheiden (Arterien rot, Venen blau und Nerven gelb). Bei einer reinen s/w-Zeichnung wäre eine Trennung nur schwer möglich gewesen.

Um einen zukünftigen Chirurgen auf eine Lymphknotenresektion am Hals vorzubereiten, wurden in Abbildung 2.5(b) die Lymphknoten freigelegt. Verdeckende Strukturen wurden herausgetrennt (klare Schnittlinien) oder wurden mit Haken beiseite gezogen. Die großflächige Entfernung der Haut dient dem besseren Einblick in das Halsinnere. Auch hier weisen alle Strukturen die schon bekannten Farben und Zeichenstile auf, die in den vorhergegangenen Bildern verwendet wurden. Während Gefäße und Haut glatt gezeichnet wurden, wurde für Muskeln und Sehnen eine Schraffur eingesetzt. Dadurch kommt die Darstellung dem natürlichen Aussehen näher und bietet gleichzeitig zusätzliche Informationen über die Kontraktions- bzw. Dehnungsrichtung. Das Fettgewebe hat zudem ein gallertartiges Aussehen.

2.1 Visualisierung in medizinischen Atlanten und Lehrbüchern



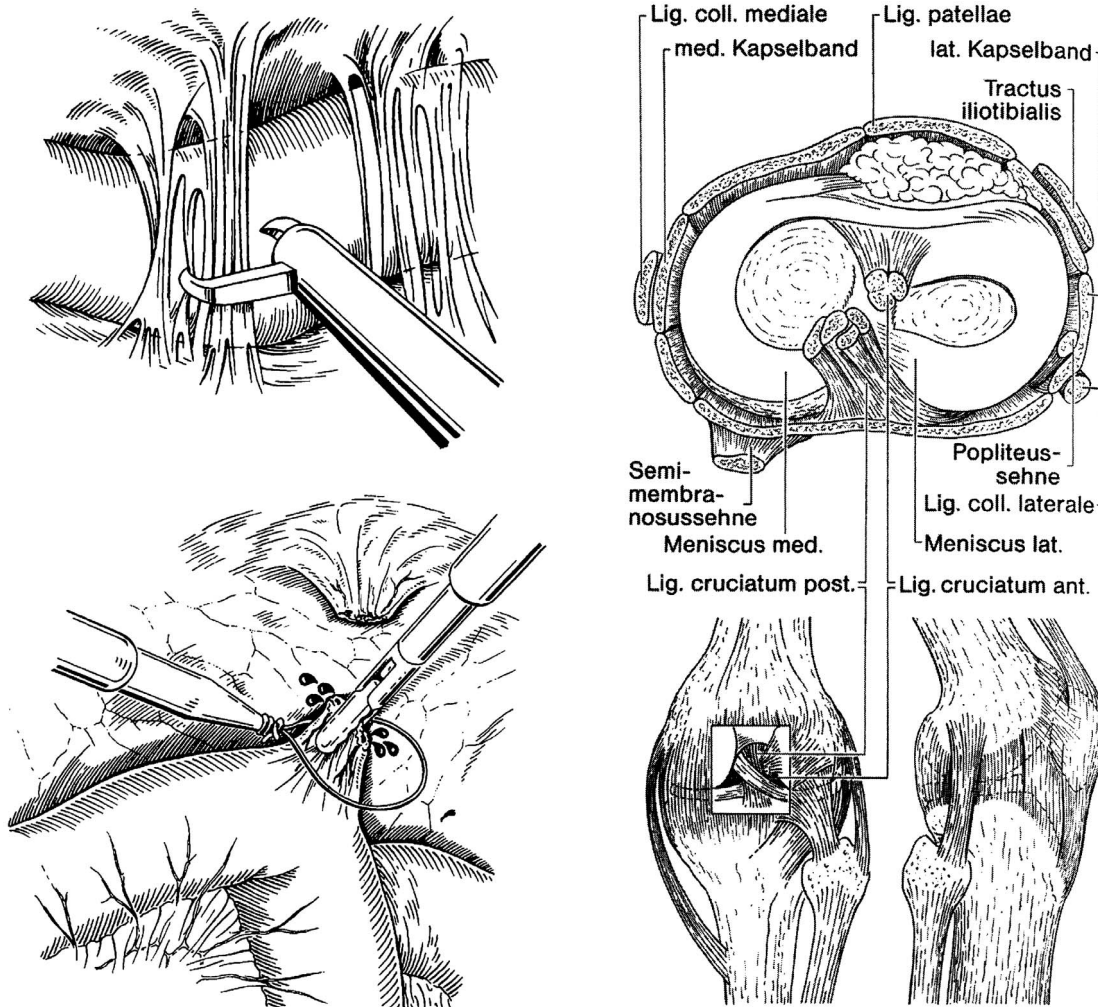
(a) Anbindung der Nerven an das Gehirn. (b) Benennung der Stränge des (*Nervus facialis*).

Abbildung 2.6: Ansatz und Verlauf von Nervenbahnen im Kopf. Quelle: MOLL und MOLL [2000].

In Abbildung 2.6(a) werden die Ansätze der Hirnnerven illustriert. Alle Objekte im Bild sind mit einer leichten Punktierung versehen. Die Nervenbahnen hingegen sind glatt dargestellt. Alle Strukturen werden durch Silhouetten voneinander abgetrennt. Durch den geringen Helligkeitsunterschied heben sich die Nerven jedoch kaum visuell vom Kontext ab. Eine leichte Einfärbung oder ein stärkerer Helligkeitskontrast würden hier Abhilfe schaffen. In Abbildung 2.6(b) wird der Weg des *Nervus facialis* vom Stammhirn zum Gesicht gezeigt. Ein grober Kontext wird dabei durch die Silhouette des Gesichtes hergestellt. Störend wirken bei dieser Zeichnung die vielen Pfeile, die auf die verschiedenen Nervenbahnen zeigen, da sie sich in ihrem Stil kaum vom Rest der Zeichnung differenzieren lassen.

In den Illustrationen in Abbildung 2.7(a) wird das intraoperative Vorgehen und der Einsatz verschiedener Werkzeuge erläutert. Aus diesem Grund sind die Werkzeuge komplett eingezeichnet und nicht schon am Rumpf abgetrennt. Ungewöhnlich ist die Darstellung blutender Stellen durch Tröpfchen, welche hier als Begründung für den Einsatz der Werkzeuge dienen. Dominierend in diesen Bildern ist der Einsatz von Schraffur, um Form und Schattierung wiederzugeben. Außerdem findet ein unauffälliger Einsatz von Silhouetten statt, welcher kaum ins Auge sticht. Tatsächlich sind aber an allen Objektgrenzen Silhouetten vorhanden.

Abbildung 2.7(b) zeigt eine Kombination aus einem schematisierten Schnittbild und einer räumlichen Darstellung. Im Schnittbild wurden dabei nicht alle Strukturen auf gleicher Höhe durchtrennt. In diesem Fall wird dadurch der Verlauf der Kreuzbänder (*Ligament Cruciate*) veranschaulicht. In der räumlichen Darstellung wird außerdem ein umrahmtes Sichtfenster verwendet, um eine freie Sicht auf die Bänder zu geben (*Cut-Away-View*). Während in der gesamten Illustration die Knochen gestrichelt und die Bänder durchgehend schraffiert sind, werden in dem Fenster nur die Kreuzbänder schraffiert und der Rest mittels Silhouette angedeutet. Außerdem variiert die Dichte der Schraffierung je nach Beleuchtung. Die Knochen werden an den verdeckten Stellen transparent überzeichnet.



(a) Durchtrennung der Verwachsungsstränge mittels Schere und Versorgung von blutenden Enden mittels Schlingenligatur.

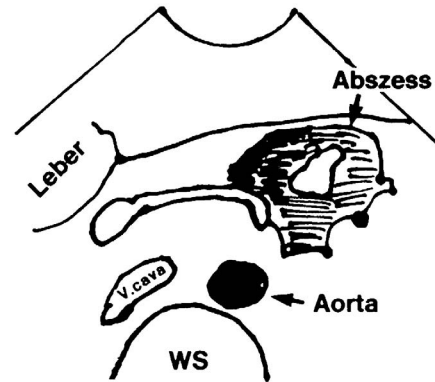
(b) Anatomischer Aufbau des Kniegelenks.

Abbildung 2.7: Einsatz von Schraffur und Silhouetten zur Illustration. Quelle: SCHUMPELICK et al. [2003].

Bei allen abstrahierten Illustrationen (Abbildungen 2.3, 2.6, 2.7 und 2.8(b)) werden grundsätzlich alle Objekte durch Silhouetten voneinander abgegrenzt. Zur Differenzierung dienen verschiedene Zeichenstile wie Punktiertechnik, Schraffur und Schattierung sowie eine leichte Einfärbung der Arterien. Bei der Anwendung der Zeichenstile auf die verschiedenen Strukturen gibt es auch hier weitgehend Übereinstimmungen (siehe Tabelle 2.1).



(a) Ultraschallaufnahme des Unterleibs.



(b) Abstrakte Handzeichnung zur Erläuterung.

Abbildung 2.8: Sonographie bei intraabdominalem Abszess. WS = Wirbelsäule. Quelle SCHUMPELICK et al. [2003].

In Abbildung 2.8 wird eine Sonographie eines Abszesses im Unterleib erläutert. Störungsartefakte sind in Ultraschallaufnahmen prinzipiell sehr dominant. Während die Aorta noch gut als schwarzer Fleck auf der Sonographie zu erkennen ist, ist die Hohlvene (Lat.: *Vena cava*) auch mit der Hilfestellung kaum von dem umliegenden Gewebe zu unterscheiden.

Die einfach gehaltene Handzeichnung hilft hierbei, die Ultraschallaufnahme besser zu verstehen. Beide Aufnahmen für sich gesehen haben keinen großen Wert, da das Ultraschallbild nur mit großem Fachwissen interpretierbar ist und die Zeichnung wiederum zu abstrakt ist.

2.1.3 Zusammenfassung

Die Problemstellungen, die sich beim Generieren medizinischer Illustrationen ergeben, lassen in sich zwei Bereiche kategorisieren. Zum einen muss entschieden werden, ob ein Objekt gezeichnet wird oder nicht. Zum anderen muss entschieden werden, welcher Zeichenstil mit welcher Parametrisierung auf die darzustellenden Objekte angewendet wird.

Ob und wie ein Objekt ausgeblendet wird, hängt davon ab, ob es sich bezogen auf eine konkrete Fragestellung um eine irrelevante Struktur handelt, oder ob die

Struktur wichtig für das Verständnis ist, aber in bestimmten Bildbereichen störend wirkt. Strukturen, die für die Problemstellung unwichtig sind, werden entweder ganz ausgespart oder mit sehr geringer Komplexität bzw. Farbsättigung dargestellt. Ein Beispiel für das Aussparen sind Haut und Muskulatur in Abbildung 2.7(b). Objekte, die wichtig für das Verständnis sind, aber andere wichtige Strukturen überdecken, werden so modifiziert, dass die dahinter liegenden Strukturen sichtbar werden. Um eine Struktur hinter anderen sichtbar zu machen, gibt es verschiedene Möglichkeiten, die davor liegenden Strukturen zu entfernen. Bei der Sichtung der medizinischen Atlanten wurde festgestellt, dass die Methoden zum Entfernen der störenden Strukturen mit unterschiedlichen Prioritäten angewendet werden. Die Häufigkeit ist in absteigender Reihenfolge wie folgt verteilt:

Die störende Struktur wird

1. per Schnitt entfernt,
2. mit einem Haken etc. beiseite gezogen (bei weichen Strukturen),
3. von der dahinter liegenden Struktur transparent überzeichnet (bei steifen Objekten wie etwa Knochen) oder
4. transparent gezeichnet (nur eine Anwendung in Atlanten bei Abbildung 2.7(b) gefunden).

Bei den abstrakten Zeichnungen wird bei verschiedenen Strukturen im Bild auf unterschiedliche Zeichenstile zurückgegriffen. Folgende Stile kommen zum Einsatz: Schraffur, Punktiertechnik, Silhouette und Schattierung. Bei s/w-Zeichnungen sind alle Strukturen mit einer Silhouette versehen, wohingegen bei farbigen Zeichnungen weitgehend auf Silhouetten verzichtet wird. Ausgewählt wird dabei möglichst ein Stil, der dem realen Aussehen der zugrunde liegenden Struktur am ähnlichsten ist. Die Schraffur wird daher nur selten bei anderen Strukturen als Muskeln, Sehnen oder Bändern eingesetzt. Bei diesen Strukturen verläuft sie in Längs- bzw. Wirkungsrichtung. Da die Schraffur zudem eingesetzt werden kann, um die Form von Oberflächen zu beschreiben, wird sie z.B. auch bei der vergrößerten Darstellung von Gefäßen verwendet (Abbildung 2.7(a)). Die Punktiertechnik kommt dagegen vorwiegend bei Objekten zum Einsatz, denen keine eindeutige Richtung für die Schraffur zugewiesen werden kann (siehe Abschnitt 2.2.3), die aber trotzdem eine Krümmung aufweisen, wie etwa das Herz in Abbildung 2.3.

In vielen Illustrationen werden Punktiertechnik und Schraffur nicht gemeinsam verwendet, um der Zeichnung ein eleganteres Aussehen zu verleihen. Durch einen ausgeglichenen Einsatz beider Zeichentechniken werden jedoch bessere Kontraste zwischen den einzelnen Strukturen geschaffen. Zur Darstellung der anatomischen Verhältnisse gibt es bevorzugte Farben und Zeichenstile für die verschiedenen Strukturen (Tabelle 2.1).

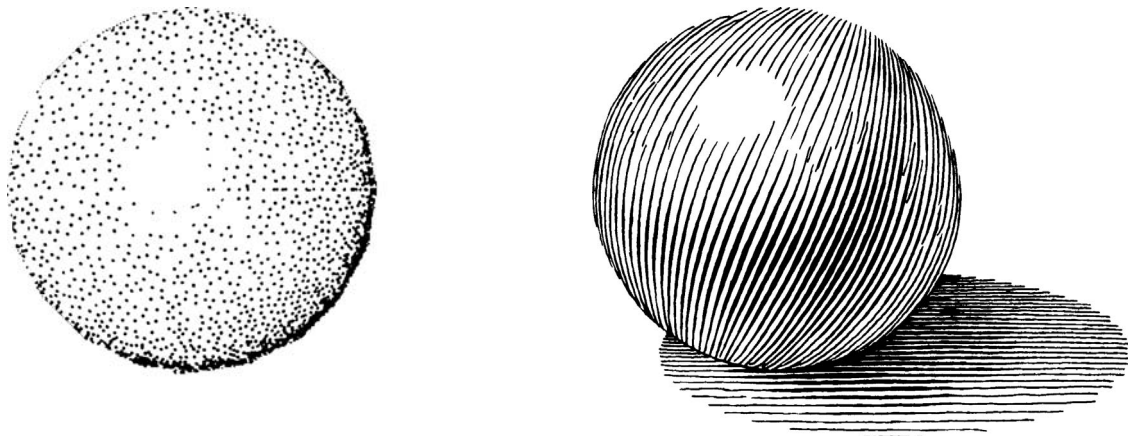
Tabelle 2.1: Anatomische Strukturen und Darstellungsparameter

Struktur	farbige Darstellung	s/w Darstellung
Nerven	gelb glatt	glatt
Fett	gelb gallertartig	gallertartig
Venen	blau glatt	glatt
Arterien	rot glatt	glatt
große Gefäße	farbig	Schraffur in axialer/radialer Richtung
Haut als Kontext	grau rau	grau rau
Muskeln	rot glänzend Schraffur in Kontraktionsrichtung	Schraffur in Kontraktionsrichtung
Sehnen Bänder	beige Schraffur in Kontraktionsrichtung	Schraffur in Kontraktionsrichtung
Bindegewebe	braungelb strähnig	strähnig
Speiseröhre	blaugrau glatt	glatt
Zähne	hellgrau glatt	glatt
Knochen	hellbraun rau oder glatt	rau, glatt oder gestrichelt
Organe	Farbe je nach Organ rau oder glatt	rau oder glatt

2.2 Linienhafte Darstellung

In der Computergrafik gibt es seit einigen Jahren die Entwicklung, bewusst von der fotorealistischen Darstellung von 3D-Modellen abzuweichen. Stattdessen wird versucht, traditionelle Mal- und Zeichenwerkzeuge zu simulieren. Für diese Entwicklung hat sich der Begriff NPR (*Non-Photorealistic Rendering*) eingebürgert. Ein Teilgebiet beschäftigt sich damit, die 3D-Modelle linienhaft darzustellen bzw. linien- und flächenhafte Darstellungen zu kombinieren.

Dabei wird zwischen drei Klassen von Linien unterschieden, der Silhouette, den Merkmalslinien (*Feature Lines*) und der Schraffur (*Hatching*). Die Silhouette ist sichtabhängig und trennt den sichtbaren von dem verdeckten Teil eines Objektes. Bei den Merkmalslinien handelt es sich um eine Gruppe von Linien, die die charakteristischen Eigenschaften der Oberfläche eines Objektes wiedergeben. Mit Hilfe der Schraffur können die lokale Krümmung, die Oberflächenstruktur und die Beleuchtung eines Objektes hervorgehoben werden. Die Darstellung eines Kreises kann in 3D eine Kugel oder eben einen Kreis beschreiben. Mit Hilfe der Schraffur wird die Form des Objektes verdeutlicht (Abbildung 2.9(b)).



(a) Die Form der richtungsunbestimmten Kugel kann durch Punktierung gut hervorgehoben werden. Quelle: PASTOR und STROTHOTTE [2002].

(b) Auch die Schraffur kann verwendet werden, um die Form richtungsunbestimmter Objekte zu beschreiben. In der medizinischen Visualisierung wird hiervon jedoch selten Gebrauch gemacht. Quelle: HODGES [1989].

Abbildung 2.9: Einsatz der Punktierungs- und Schraffierungstechnik.

Ebenfalls zu den NPR-Techniken gehört die Punktieretechnik (*Stippling*). Bei dieser Methode werden die Zeichnungen mittels unterschiedlich dicht verteilter Punkte dargestellt. Da Punkte keine Richtung aufweisen, eignen sie sich besonders gut, um Objekte ohne eindeutig ausgeprägte Krümmung wiederzugeben (Abbildung 2.9(a)). In der medizinischen Illustration findet sie daher vor allem bei der Darstellung von Organen Anwendung, deren Form richtungsunbestimmt ist. In dieser Arbeit wird

jedoch nur die Anwendung von Liniengrafiken näher beleuchtet, weswegen hier nicht näher auf die Punktieretechnik eingegangen wird.

2.2.1 Wahrnehmungspsychologischer Hintergrund

Nicht-fotorealistische Grafiken eignen sich für die Darstellung von Informationszusammenhängen. Durch den gezielten Einsatz von Abstraktionsstufen können sie Teile einer Szene hervorheben und andere Bereiche abschwächen. Außerdem ist es mit ihrer Hilfe möglich, die Form von Objekten deutlicher darzustellen.

Silhouetten und Merkmalslinien

Das menschliche Gehirn ist in der Lage, Bilder auf sehr abstrakte Art und Weise zu erfassen. Um ein beliebiges Objekt begreifen zu können, reichen wenige Linienzüge aus, um Form und Aussehen verständlich zu machen. Objekte in linienhaften Darstellungen werden oft schneller erkannt und interpretiert als Fotografien [RYAN und SCHWARTZ, 1956]. HALPER et al. [2003b] begründen dieses Phänomen damit, dass in einer linienhaften Darstellung deutlich weniger Informationen im Bild vorhanden sind. Die Informationen werden auf das Wesentliche reduziert. Da pro Zeiteinheit nur eine gewisse Menge an Informationen aufgenommen werden kann, wird durch diese Art der Abstraktion mehr erfasst. Hinzu kommt, dass bei realistischen Aufnahmen Fehlinterpretationen bei der Trennung von Objekt und Hintergrund auftreten können. Bei dem NPR charakterisiert die Liniendarstellung genau diese Trennung.

Auch WARE [2000] hat die Verwendung von Silhouetten untersucht. Er hat festgestellt, dass in Zeichnungen von Kindern die Objekte meistens mittels Silhouette gemalt werden. Diese Tatsache spricht dafür, dass wir die Formerkennung der Objekte aus Silhouetten nicht über die Jahre hinweg erlernen müssen. Vielmehr scheint unsere Objekterfassung auf diesem Prinzip zu beruhen.

WARE weist darauf hin, dass die simplifizierten Darstellungen nur dann angebracht sind, wenn eine schnelle Informationsverarbeitung erforderlich ist. Viele Informationen gehen gegenüber der fotorealistischen Darstellung verloren. Problematisch ist es auch, wenn die Extraktion der relevanten Informationen automatisch vonstatten geht. In diesem Fall ist es nicht auszuschließen, dass wesentliche Informationen verloren gehen. Im Hinblick auf die medizinische Visualisierung kann aber dagegen gehalten werden, dass aufgrund der Menge an Informationen eine Vereinfachung notwendig ist. Dies gilt natürlich nur in Bereichen, in denen keine Befundung durchgeführt wird. In diesen Bereichen kann der Informationsgehalt gar nicht hoch genug sein, um eine sichere Diagnose stellen zu können.

Schraffierung

In der Arbeitsgruppe um Victoria Interrante sind diverse Arbeiten entstanden, die versuchen, den Vorteil des Einsatzes von Schraffur für die korrekte Interpretation von 3D-Darstellungen zu belegen [INTERRANTE, 1997; GIRSHICK et al., 2000; INTERRANTE und KIM, 2001; KIM et al., 2003a,b].



Abbildung 2.10: Texturunterstützte Wiedergabe der Objektoberfläche. Quelle: INTERRANTE [1997]. Die Bilder wurden zur besseren Darstellung modifiziert.

In INTERRANTE und KIM [2001] wurden zur Evaluierung künstliche unebene Flächen generiert. Diese Flächen wurden mit verschiedenen Schraffurrichtungen versehen. Probanden mussten für die verschiedenen Bilder angeben, in welche Richtung die Krümmung der Teilflächen verläuft. Bei der Auswertung wurde festgestellt, dass die Krümmung auf den Flächen besser erkannt wird, wenn die Schraffur an der größeren Hauptkrümmungsrichtung (*Principal Curvature*) ausgerichtet wird. Signifikant ist der Unterschied jedoch nicht, was auf eine ungünstige Versuchsmethodik zurückgeführt wird. Festgestellt wurde auch, dass eine Schraffur in Hauptkrümmungsrichtung nur dann sinnvoll ist, wenn nur eine der beiden Hauptkrümmungen stärker ausgeprägt ist. In [KIM et al., 2003b] wurden in einer ähnlichen Versuchsreihe bessere Ziele durch die Verwendung von Kreuzschraffur (*Cross Hatching*) erreicht, welche hier an beiden Hauptkrümmungsrichtungen ausgerichtet wurde.

Diese Arbeit orientiert sich an der Erkenntnis von INTERRANTE und KIM [2001], wonach die Verwendung von Schraffur dann sinnvoll ist, wenn die Oberfläche eine charakteristische Krümmung in eine Richtung besitzt, da dies auch in medizinischen Atlanten so gehandhabt wird.

2.2.2 Silhouetten und Merkmalslinien

SOUSA und PRUSINKIEWICZ [2003] unterscheiden in ihrer Arbeit vier Typen von Linien. Dabei handelt es sich um Silhouetten, welche abhängig von der Kameraposition sind, und um drei weitere sichtunabhängige *Feature Lines*:

- **Silhouetten**

Die Silhouette ist als Linienzug definiert, der den sichtbaren Teil eines Objektes von dem nicht Sichtbaren trennt. Je nach Berechnungsansatz wird die Silhouette auf verschiedene Art und Weise berechnet. Eine Beschreibung von Algorithmen zur Silhouetten-Generierung wird von ISENBERG et al. [2003] gegeben.

- **Ränder**

Als Rand gelten alle Kanten, die an nur ein Polygon grenzen.

- **Falten/Kanten**

Sie beschreiben Bereiche mit starker Krümmung. Durch die Detektion und Markierung solcher Bereiche wird es z.B. ermöglicht, das Bild eines schräggestellten Würfels von einem Sechseck zu unterscheiden.

- **Vertiefungen/Ausbeulungen**

Diese Linien deuten konvexe und konkave Regionen auf der Oberfläche an.

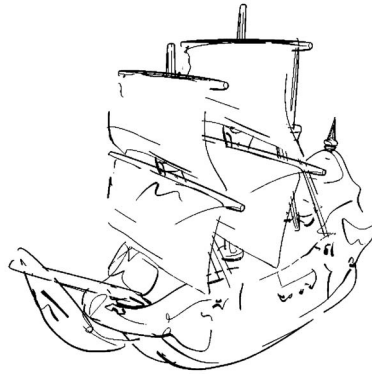


Abbildung 2.11: Computergenerierte Darstellung einer Gallone. Bei dieser Darstellung wurde zusätzlich ein geschwungener Zeichenstil verwendet. An den Segeln wurden Ausbeulungslinien gezeichnet. Quelle: SOUSA und PRUSINKIEWICZ [2003].

Es kann eine weitere Hilfestellung beim Erfassen des Bildinhaltes gegeben werden, indem Linien, die die Unterseite eines Objektes beschreiben, etwas dicker gezeichnet werden. Dabei wird ausgenutzt, dass der Rezipient an der Unterseite schattige Bereiche erwartet.

Es gibt sehr verschiedene Ansätze, mit denen Silhouetten und Merkmalslinien aus einer Szene extrahiert werden, welche im Wesentlichen alle das gleiche Ergebnis liefern. Da die Implementierung nicht in den Rahmen in dieser Arbeit fällt, wird hier nur eine kurze Einführung in die Verfahren gegeben.

Zur Extraktion der Linien gibt es drei Ansätze. Zum einen gibt es den bildbasierten Ansatz, bei dem mit Hilfe der *G-Buffer* Silhouetten und Merkmalslinien detektiert werden [HERTZMANN, 1999]. Vorteil dieser Methode ist, dass die Berechnung nur

anhand der erzeugten *G-Buffer* stattfindet, und damit auch bei sehr großen Modellen eine sehr hohe Frame-Rate erreicht wird. Da die Linien nur aus einzelnen Pixeln zusammengesetzt werden, können den Linien keine weiteren Attribute wie Texturierungen in Linienrichtung zugewiesen werden.

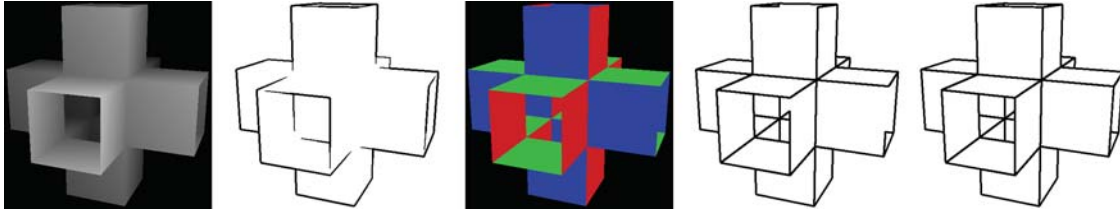


Abbildung 2.12: Silhouetten-Extraktion anhand der *G-Buffer*. Quelle: HERTZMANN [1999].

Zum anderen gibt es die objektbasierten Ansätze, bei denen die Merkmalslinien direkt auf dem polygonalen Modell anhand der Krümmungseigenschaften berechnet werden. Bei diesem Verfahren können die Linien auch mit Sub-Pixel-Genauigkeit bestimmt oder mit Attributen versehen werden. Nachteilig ist, dass die Laufzeiten zur Berechnung der Linien abhängig von den Modellen sind und bei großen Modellen nicht mehr zur interaktiven Visualisierung verwendet werden können [BUCHANAN und SOUSA, 2000]. Um die Laufzeit zu verbessern, kann dieses Verfahren auch mit der bildbasierten Methode kombiniert werden. So können z.B. die Linien objektbasiert generiert werden, wodurch die beschriebenen Vorteile entstehen, und die Sichtbarkeit der Linien über den *z-Buffer* bestimmt werden, wodurch eine höhere Geschwindigkeit bei der Darstellung erzielt wird [ISENBERG et al., 2002].

Als Drittes gibt es die hybriden Verfahren. Hierbei wird beispielsweise zuerst die Drahtgitterdarstellung des Modells mit einer breiteren Linienstärke gerendert. In einem zweiten Schritt wird das Modell normal gerendert, wobei die breiteren Linien des Drahtgitters als Silhouette erhalten bleiben.

2.2.3 Schraffurgenerierung

Es gibt mittlerweile eine Vielzahl von Ansätzen, mit denen Schraffurlinien anhand von 3D-Objekten erzeugt werden können. Struktur, Krümmung und Beleuchtung des zugrunde liegenden Objektes werden nur teilweise berücksichtigt. Im Folgenden wird daher untersucht, welche Ansätze zur Generierung von Schraffurlinien für medizinische Illustrationen geeignet sind.

Isolinien

Der einfachste Ansatz ist die Verwendung von Isolinien. Isolinien sind bekannt aus Wetterkarten (Isobaren), bei denen sie die Ausbreitung von Hoch- und Tiefdruckgebieten beschreiben. Eine Isolinie verbindet in einem zweidimensionalen Feld alle

Punkte, die den gleichen Wert haben. SAITO und TAKAHASHI [1990] haben verschiedene so genannte *G-Buffer* beschrieben, mit deren Hilfe Isolinien visualisiert werden können.

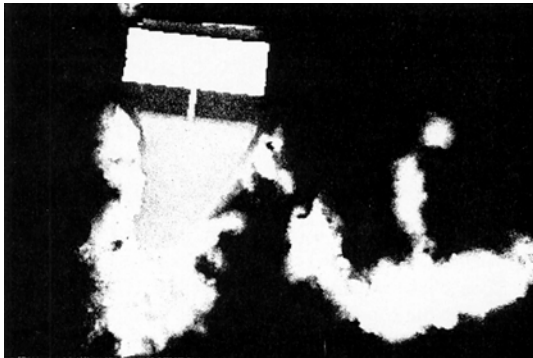
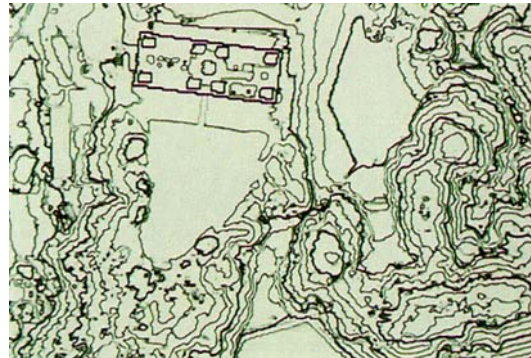
(a) z -Buffer eines Bildes.(b) Extrahierte Isolinien mittels z -Buffer.

Abbildung 2.13: Isolinien erzeugt mittels *G-Buffer*. Quelle SAITO und TAKAHASHI [1990].

Zu diesen *G-Buffer* zählen die Kameraentfernung (z -Buffer), die Texturkoordinaten eines Objektes auf dem Viewport oder die Lichtquelle. In Abbildung 2.13(b) wird die Entfernung der Kamera zum Objekt mit Isolinien dargestellt. Dieser Ansatz ist jedoch ungeeignet, da bei einer interaktiven Darstellung die Linien auf dem Objekt „wandern“ würden und die Topologie der Objekte nicht berücksichtigt wird. LEISTER [1994] hat in seiner Arbeit allen Objekten einen Bezugspunkt zugeteilt, zu welchem der Abstand berechnet wird (Abbildung 2.14). Dadurch sind die Schraffurlinien auch bei einer interaktiven Darstellung fest auf dem Objekt verankert. Die Topologie der Objekte wird jedoch auch hier nicht beachtet.

Schraffur auf Bildebene

LAKE et al. [2000] nutzt die Beleuchtungs- und Objekt-ID-Informationen aus, um eine Szenerie mittels Schraffur zu zeichnen. Der Schraffur auf Bildebene liegt zwar ein dreidimensionales Objekt zugrunde, aber zur Berechnung wird nur der aktuelle Bildspeicher benutzt. Die Berechnung des Bildes geht außerordentlich schnell, da nur auf 2D-Daten gearbeitet wird. Je nach Objekt-ID wird eine andere Schraffur gewählt. In einem Vorverarbeitungsschritt werden verschiedene Texturen erzeugt, sodass die Schattierung der einzelnen Bildbereiche berücksichtigt wird. Damit ein fließender Übergang zwischen zwei verschiedenen schattierten Regionen erzeugt werden kann, wird die hellste Textur als Grundlage genommen und je nach Abschattung mit weiteren Schraffurlinien überlagert. Die Texturen werden anschließend je nach Objekt-ID und Schattierung vom Bildschirm auf die Szene projiziert (Abbildung 2.15(b)). Durch die Fixierung der Texturen auf den Bildschirm und die Überlagerung erscheinen die einzelnen Schraffur-Striche immer an den gleichen Stellen.

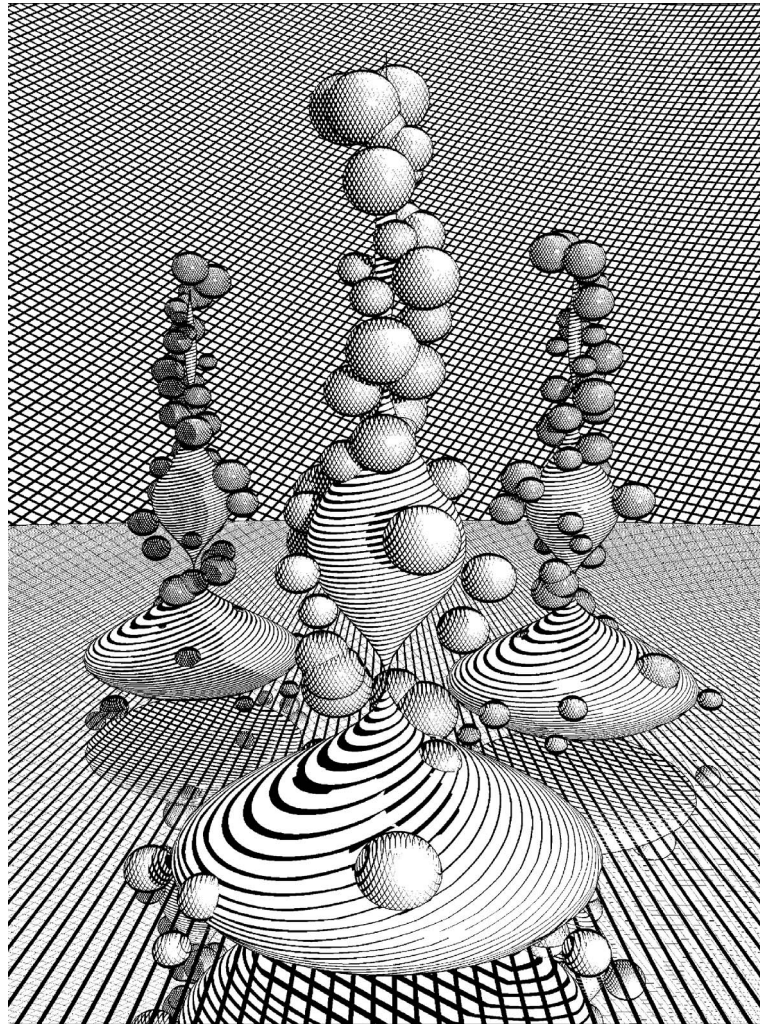
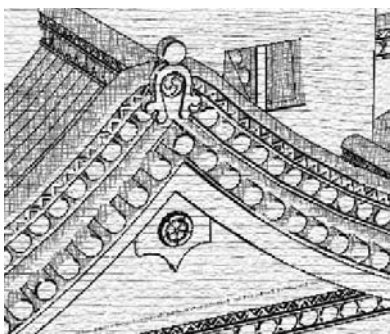
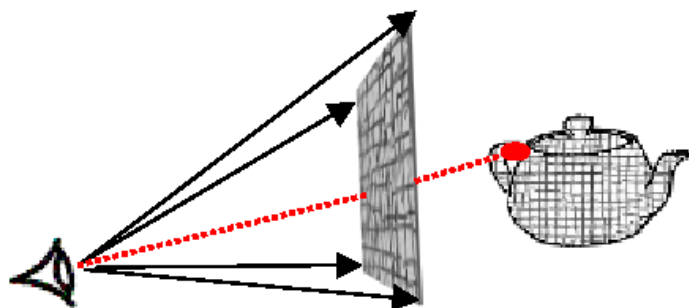


Abbildung 2.14: Marsbananen. Die Linien werden mittels einer Abstandskodierung zu verschiedenen Bezugspunkten generiert. Quelle: LEISTER [1994].



(a) Computer-generierte Schraffurzeichnung einer 3D-Szene.



(b) Die Textur wird vom Viewport auf das Modell projiziert, um Frame-Kohärenz zu gewährleisten.

Abbildung 2.15: Bildbasierter Ansatz der Schraffurgenerierung. Quelle LAKE et al. [2000].

Allerdings werden bei diesem Ansatz weder die Topologie der Objekte noch die Rotation der Szene berücksichtigt. Stattdessen tritt der so genannte *Shower-Door-Effekt* auf. In Abbildung 2.15(a) ist zu sehen, dass die Wand trotz Schräglage zur Kamera mit waagerechten Schraffurlinien gezeichnet wurde. Der Giebel am Dach wurde mit geraden Strichen versehen, obwohl er eine Krümmung aufweist.

Ausrichtung in Hauptkrümmungsrichtung

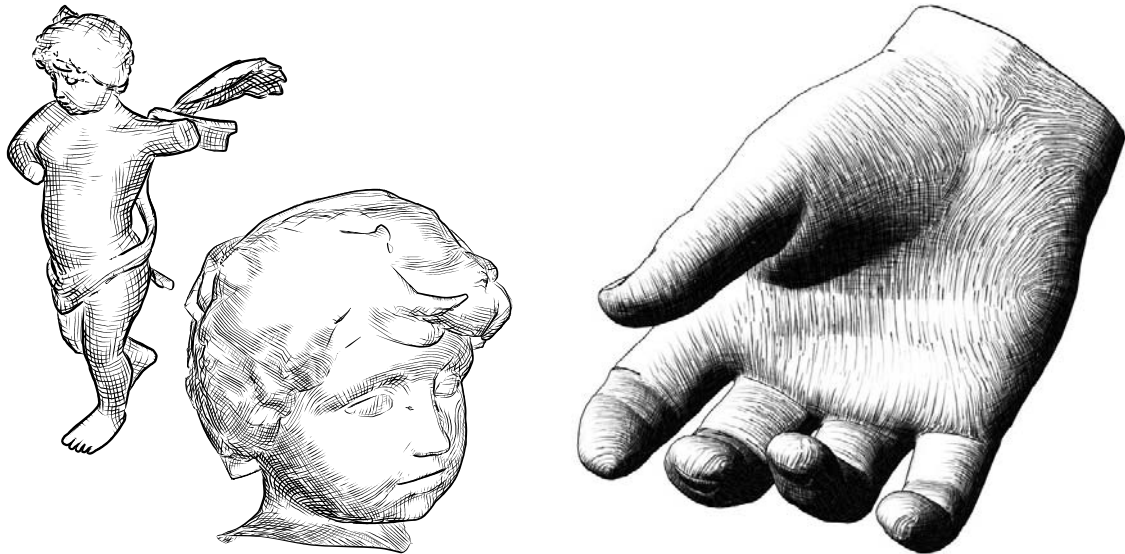
Gesucht wird ein Verfahren, mit dessen Hilfe eine Schraffur erzeugt wird, die fest auf der Objektoberfläche verankert ist. Außerdem muss ebenfalls eine Schraffurrichtung gewählt werden, welche besonders gut die Form des Objektes widerspiegelt.

HERTZMANN und ZORIN [2000] haben Radierungen anderer Zeichner untersucht und festgestellt, dass diese die Richtung der Schraffur häufig an den umschließenden Zylinder des zu zeichnenden Objektes ausgerichtet haben. Alternativ zu dieser Richtung wird auch die Richtung im rechten Winkel dazu verwendet. Um diese Technik nachzuahmen, stellen sie eine Methode vor, bei der ein Strömungsfeld (*Flow Field*) in Hauptkrümmungsrichtung auf dem Modell erzeugt wird.

In einem initialen Schritt wird das Modell geglättet. Der Grad der Glättung ist abhängig vom jeweiligen Modell. Dadurch wird ein konsistenteres Strömungsfeld erzeugt. Anschließend werden auf dem Modell parabolische Regionen gesucht, da für diese Regionen die beiden Hauptkrümmungsrichtungen des Feldes (in stärkster und geringster Krümmung) am zuverlässigsten bestimmt werden. Regionen mit nicht definierter Krümmigkeit werden im nächsten Schritt am definierten Gebiet ausgerichtet (Kugeloberflächen, plane Ebenen). Die Schraffurlinien werden anhand des Strömungsfeldes angeordnet. Die Positionierung der Linien geschieht bildbasiert, wodurch die Linien besonders gleichmäßig verteilt werden.

Durch die bildbasierte Positionierung kann dieser Ansatz nicht angewendet werden, wenn mit dem Modell interagiert werden soll, da der Verlauf der Linien für jedes Frame neu berechnet werden muss. Die Generierung des Strömungsfeldes benötigt in der Vorverarbeitung einen relativ hohen Berechnungsaufwand. Bei diesem Ansatz tauchen außerdem Probleme auf, wenn die Modelle nicht ausreichend geglättet werden, da sonst kein aussagekräftiges Strömungsfeld erzeugt werden kann.

In der Arbeit von PRAUN et al. [2001] wird ein Ansatz zur objektbasierten Schraffur vorgestellt, bei dem mit den Modellen in Echtzeit interagiert werden kann (Abbildung 2.16(b)). Die Schraffur wird hier auf der Grafik-Hardware durchgeführt. Als Vorverarbeitungsschritt muss allerdings jedem Eckpunkt ein Vektor zugewiesen werden, der die Richtung der Schraffurlinien festlegt. Für die Zuweisung wird angegeben, dass diese manuell durchzuführen ist bzw. auf die von HERTZMANN und ZORIN [2000] beschriebene Methode verwiesen.



(a) Die Kreuzschraffur wurde anhand des berechneten Strömungsfeldes erstellt. Quelle: HERTZMANN und ZORIN [2000].

(b) Die Richtung der Linien wurde für jeden Vertex vorgegeben. Quelle: PRAUN et al. [2001].

Abbildung 2.16: Schraffur in Hauptkrümmungsrichtung.

Kernpunkt der Arbeit von PRAUN et al. [2001] ist die Einführung so genannter *Tonal Art Maps* (TAMs). Diese stellen eine Erweiterung der *mip maps* von WILLIAMS [1983] dar. Durch die Erweiterung ist es möglich, nicht nur verschiedene vorberechnete Texturen für die unterschiedlichen Skalierungen im Texturspeicher der Grafikkarte zu halten, sondern Texturen im Speicher vorzudefinieren, die zusätzliche Eigenschaften wie Ausrichtung der Schraffur und beleuchtungsabhängige Dichte der Schraffurlinien beinhalten. Die Texturen werden vorher wie bei LAKE et al. [2000] so generiert, dass ein fließender Übergang zwischen den verschiedenen schattierten Regionen gewährleistet ist.

ZANDER et al. [2004] stellen einen Algorithmus vor, bei dem die Schraffurlinien objektbasiert berechnet werden und in Echtzeit mit dem Objekt interagiert werden kann (Abbildung 2.17). In einem ersten Schritt wird hierzu das Strömungsfeld in Hauptkrümmungsrichtung zu dem Objekt berechnet. Dieses wird optimiert, indem in einem weiteren Schritt das Strömungsfeld an den Richtungsvektoren dieses Feldes angeglichen wird, dessen Ausrichtung als besonders zuverlässig eingestuft wird. Als zuverlässig gelten solche Vektoren, deren umliegende Vektoren annähernd die gleiche Ausrichtung haben. Dieses Verfahren ist auch nicht resistent gegen fehlerhafte Ausrichtungen des Strömungsfeldes bei rauen Modelloberflächen oder bei zu fein aufgelösten Polygonnetzen. Im Gegensatz zu dem von HERTZMANN und ZORIN vorgestellten Verfahren wird hier nur eine limitierte Anzahl von Schraffurlinien erzeugt. Um das Modell am Bildschirm skalieren zu können, wird die Breite der Linien variiert.

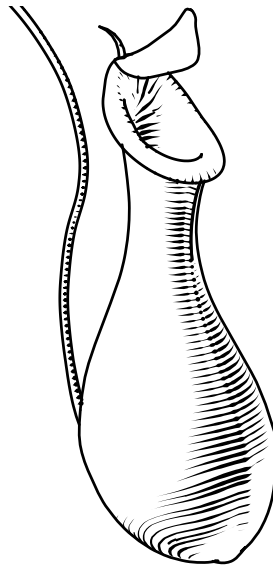


Abbildung 2.17: Die Schraffur wurde an der Hauptkrümmungsrichtung ausgerichtet. Mit dem Objekt lässt sich zudem in Echtzeit interagieren. Quelle: ZANDER et al. [2004].

Da von allen Verfahren die von ZANDER et al. vorgestellte Methode am ehesten die Anforderungen der Schraffurgenerierung für die medizinische Visualisierung erfüllt, wird dieser Ansatz in dieser Arbeit verwendet.

2.2.4 Probleme beim interaktiven NPR

Bei interaktiven NPR-Visualisierungen entstehen zusätzliche Anforderungen, die bei statischen NPR-Bildern oder PR-Darstellungen keine Rolle spielen oder nicht vorhanden sind. Außerdem treten Probleme auf, wenn die zugrunde liegenden Modelle aus medizinischen Volumendaten gewonnen werden.

Frame-Kohärenz

Wenn die darzustellenden Objekte durch Liniengrafiken repräsentiert werden, wirkt es für den Betrachter äußerst störend, wenn die Linien auf dem Objekt ihre Position wechseln. Besonders ausgeprägt ist dieses Problem, wenn die Linienzüge mittels Texturen dargestellt werden. Bei der Schraffur muss deswegen eine Methode gewählt werden, bei der die Linien auf der Oberfläche fixiert werden. Ein besonderes Problem stellen die Silhouetten dar, da diese auf der Objektoberfläche wandern. Eine im nächsten Bild generierte Linie hat deswegen meistens keinen gemeinsam Punkt mit der vorhergegangenen Linie. Daher müssen die Endpunkte möglichst nah an denen der alten Linie liegen, damit die Linien-Textur nicht auf dem erzeugten Bild wandert oder umherspringt. Durch Auswahl eines angemessenen Generierungsverfahrens kann die Frame-Kohärenz gewährleistet werden [ISENBERG et al., 2003].

Frame-Kohärenz bedeutet nicht, dass die Linien fest auf der Oberfläche verankert sein müssen [GIRSHICK et al., 2000]. In der Strömungsvisualisierung können die Linien durchaus in der Strömungsrichtung „wandern“. Eine Variation der Linienstärke, die von dem Kamerastandpunkt und der Lichtquelle abhängig ist, scheint ebenfalls sinnvoll.

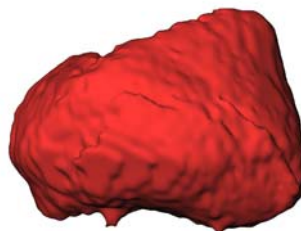
Raue Modelloberflächen

Wenn geometrische Modelle aus radiologischen Volumendaten extrahiert werden, führt der Partialvolumeneffekt und die anisotrope Voxelgröße bei der Segmentierung zu unebenen Modelloberflächen. Wenn die Schraffur auf den Oberflächen in geodätischer Richtung¹ verlaufen soll, muss das Objekt stark geglättet werden, damit die Richtungsbestimmung nicht fehlgeleitet wird.

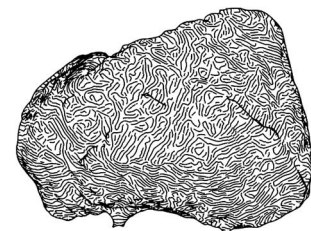


(a) Fotoaufnahme einer Leber.

Quelle: <http://medlib.med.utah.edu>.



(b) 3D-Darstellung einer segmentierten Leber.



(c) Schraffur anhand der segmentierten Oberfläche.

Abbildung 2.18: Oberflächen einer realen und einer segmentierten Leber im Vergleich.

PAGE et al. [2001] haben ein Verfahren namens *Normal Voting* entwickelt, mit dem die Krümmung eines Polygonnetzes bestimmt werden kann, auch wenn die zugrunde liegende Modelloberfläche stark verrauscht ist. Die Grundidee des *Normal Voting* ist, von einem Eckpunkt aus die Nachbarschaft im geodätischen Sinne auszuwählen, d.h. die Eckpunkte, die möglichst auf derselben Ebene liegen wie der Referenzpunkt. Mit Hilfe der gefundenen Nachbarn wird die Normale des Eckpunktes gewählt (*voted*). Nachdem auf diesem Wege alle Normalen bestimmt wurden, wird mittels der gleichen Nachbarschaft die Krümmung berechnet.

Wenn das zugrunde liegende Modell geglättet werden muss, um die Qualität der Darstellung zu verbessern, muss ein Ansatz gewählt werden, bei dem die Topologie des Modells erhalten bleibt und der Zusammenhang des Modells gewährleistet ist. Weiterhin müssen die Merkmale der Struktur (scharfe Kanten) erhalten bleiben.

¹HOSCHEK und LASSER [1992] definieren geodätisch als lokal kürzeste Flächenkurven zwischen zwei Flächenpunkten. Mit anderen Worten der kürzeste Weg zwischen zwei Punkten auf einem Objekt, ohne dieses dabei zu durchdringen.

Performanz

Aufgrund der hohen Auflösung der Datensätze fallen zum Teil sehr große Polygonnetze (≈ 100.000 Dreiecke) als Endergebnis an. Dies führt zu einem zeitaufwändigen Vorverarbeitungsschritt beim Generieren der Datenstrukturen, die zum Extrahieren der Schraffur und der Merkmalslinien notwendig sind. Probleme treten hier auch bei der Silhouettenberechnung auf, da für jedes Frame die gesamte Datenstruktur ausgewertet werden muss. Die Objekte müssen daher in einem Vorverarbeitungsschritt vereinfacht werden, um die Anzahl der Polygone zu verringern und damit die Performanz zu erhöhen.

2.3 Medizinische Volumen-Visualisierung

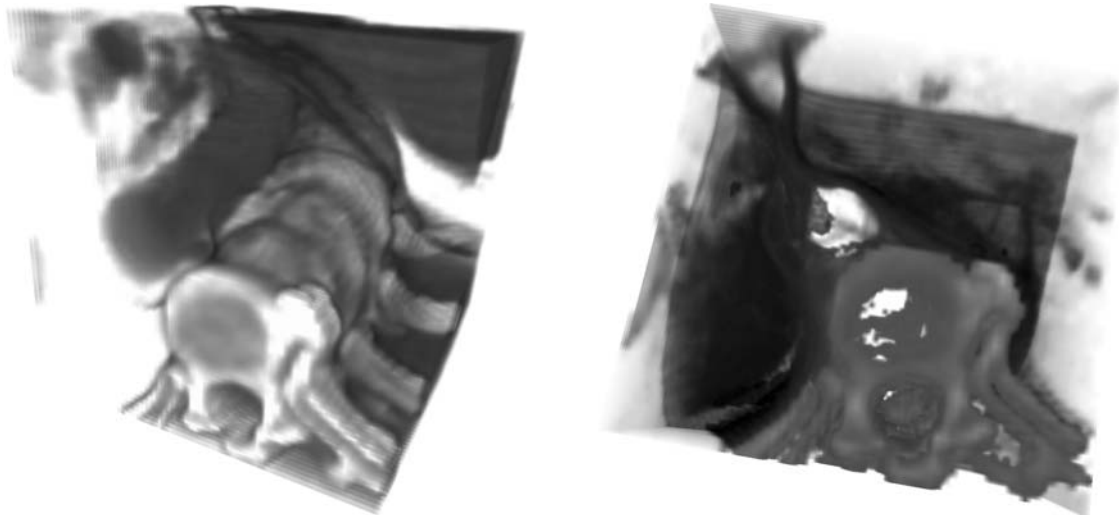
Medizinische Volumendaten resultieren aus der Anwendung bildgebender Verfahren – vor allem Computertomographie (CT) und Magnetresonanztomographie (MRT). Als Ergebnis liefern die Tomographen plane Schichtbilder mit konstantem Abstand und konstanter Größe zurück. Die Schichtbilder geben jedoch kaum Aufschluss über die Topologie der abgebildeten Strukturen (z.B. ineinander greifende Gefäßsysteme). Die in den Schichtbildern enthaltenen, aber für die meisten Menschen räumlich schwer vorstellbaren Strukturen werden in ihrer Ausdehnung und Lage durch eine interaktiv handhabbare 3D-Darstellung besser beurteilbar. 3D-Darstellungen patientenindividueller Daten unterstützen die Diagnosestellung sowie Therapieentscheidungen, wie Bestrahlungsplanung und Planung chirurgischer Eingriffe. [PREIM et al., 2000; ELVINS, 1992]

Bei der Darstellung von Volumendaten haben sich zwei große Klassen von Visualisierungsverfahren herausgebildet, das direkte und das indirekte Volumen-Rendering. Weiterhin gibt es neuerdings Entwicklungen, bei denen NPR-Techniken direkt auf das Volumen-Rendering angewendet werden.

2.3.1 Direktes Volume-Rendering (DVR)

Bei dieser Form der Visualisierung wird die detailgetreue Visualisierung der Originaldaten ermöglicht. Die Daten können ohne vorherige Segmentierung am Bildschirm dargestellt werden. Da bei einer interaktiven Darstellung für jedes Frame der Einfluss aller Voxel berücksichtigt werden muss, ist dieses Verfahren mit einem beträchtlichen Speicher- und Rechenaufwand verbunden. Um die Geschwindigkeit zu erhöhen, wurden diverse Verfahren zur Optimierung entwickelt.

Bei den auf Software basierenden Verfahren ist die von LACROUTE und LEVOY [1994] entwickelte Shear-Warp-Transformation zur Zeit die schnellste Methode. Das Bild wird dazu in einem mehrstufigen Prozess generiert. Dabei werden die Schichten



(a) Einfache Rampenfunktion. Alle Strukturen im höheren Hounsfield-Bereich werden dargestellt.

(b) Mittels Sägezahnfunktion kann die stark kontrastierte Aorta ausgeblendet werden, wobei trotzdem Weichteile und Knochen angezeigt werden.

Abbildung 2.19: Darstellung der Wirbelsäule mit Hilfe mittels DVR. Zur Darstellung wurden unterschiedliche Transferfunktionen genutzt.

des Volumens zuerst so geschert, dass die Sichtstrahlen immer nur ein Voxel pro Schicht kreuzen. Dadurch liegen die Daten so vor, dass die Bildkohärenz optimal ausgenutzt werden kann und keine weiteren Matrizen-Operationen zur Berechnung der Sichtstrahlen notwendig sind. Durch die Projektion des Datensatzes auf die Sichtebeine wird ein verzerrtes Zwischenbild erstellt, das durch 2D-*Warping* (Entzerrung) in das endgültige Bild überführt wird.

Wesentlich schneller sind die auf Hardware basierenden Verfahren, bei denen das Volumen direkt auf speziellen Grafikkarten gerendert wird. Nachteile dieses Verfahrens sind die damit verbundenen Hardware-Kosten und die Bindung an einen bestimmten Kartentyp. Die populärsten Vertreter sind die VolumePro-Karten von TERARECON [2004]. Das neueste System dieser Firma namens VP1000D fasst bis zu 8 GB große Datensätze und kann diese in Echtzeit darstellen. Mittlerweile unterstützen auch alle neuen Grafikkarten 3D-Texture-Mapping, sodass durch geschickte Implementierung auch hier große Datensätze in Echtzeit gerendert werden können.

Die Tomographen lösen in einer sehr breiten Bandweite Intensitätswerte auf (bei der CT 4096 Einheiten). Da das menschliche Auge jedoch nur 64–128 Grauwerte auf einmal wahrnehmen und typische Grafikkarten nur 256 Graustufen darstellen können, lässt sich bei der anschließenden Betrachtung eine so genannte Fensterung (*Windowing*) über eine Transferfunktion einstellen, wobei nur gewisse Intensitätswerte auf Grauwerte abgebildet werden. Bei einer linearen Transferfunktion werden

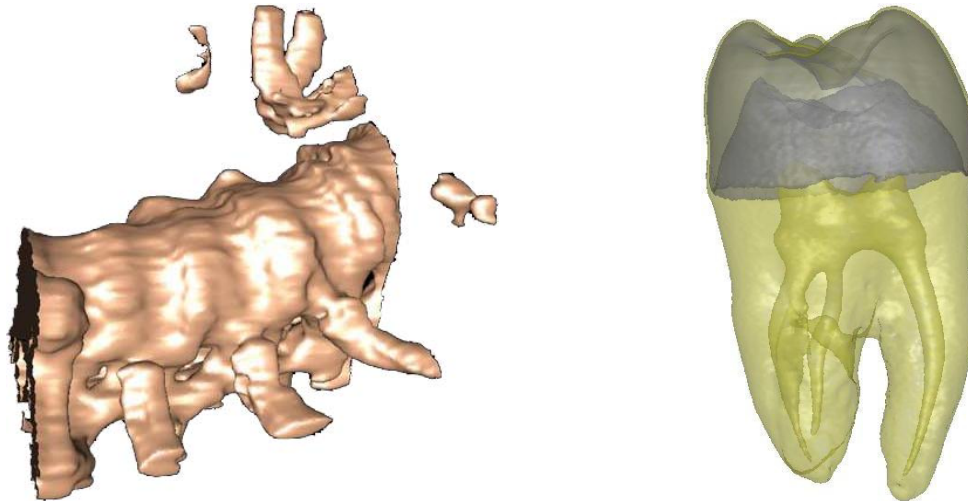
zwei Schwellwerte festgelegt, zwischen denen Intensitätswerte auf Graustufen abgebildet werden. Werte, die über bzw. unter diesen Schwellwerten liegen, werden Weiß bzw. Schwarz gezeichnet (Abbildung 2.19(a)). Eng beieinander liegende Schwellwerte erzeugen hierbei einen hohen Kontrast. Dadurch lassen sich Strukturen sehr differenziert wahrnehmen, die sonst dem menschlichen Auge verborgen geblieben wären. Analog zu den Grauwerten kann auch die Transparenz auf Intensitätswerte abgebildet werden. Meistens werden beide Einstellungen gekoppelt. Dabei werden weiße Voxel vollständig opak und schwarze Voxel transparent dargestellt.

Eine typische Transferfunktion ist die so genannte Sägezahn-Transferfunktion. Hier wird nicht wie bei der einfachen linearen Transferfunktion nur ein Intensitätsbereich auf Grauwerte abgebildet, sondern es lassen sich verschiedene Intensitäten auf gleiche Grauwerte abbilden (Abbildung 2.19(b)). Bei diesem Verfahren treten jedoch Artefakte an den Übergängen zwischen den einzelnen „Zähnen“ der Transferfunktion auf.

Neben der Verwendung von Transferfunktionen zur Visualisierung kommen auch verschiedene Projektionsmethoden zum Einsatz. Vertreter solcher Projektionen sind die Maximum- und die Minimum-Intensity-Projektion (MIP und mIP). Die MIP wird vorwiegend bei Angiographien verwendet. Bei Angiographien wird dem Patienten Kontrastmittel appliziert und dessen Verteilung im Körper untersucht. Dabei sind Regionen ohne Anreicherung von Kontrastmittel von mindermem Interesse. Um diese Bildbereiche auszublenden, wird auf den einzelnen Sichtstrahlen nur das Voxel dargestellt, das die maximale Intensität entlang des Strahls besitzt. Ein erweiterter Ansatz der MIP ist die LMIP (LOCAL MIP), auch CLOSEST VESSEL PROJECTION (CVP) genannt [ZUIDERVELD und VIERGEVER, 1994]. Da bei der MIP Tiefeninformationen und Verdeckungen komplett ignoriert werden, wird bei dieser Variante nach dem ersten lokalen Maximum gesucht, welches oberhalb eines definierten Schwellwertes liegt. Problematisch ist hier das Festlegen eines geeigneten Schwellwertes, um Artefakte zu vermeiden, die durch das Bildrauschen auftreten, andererseits aber die gewünschten Informationen nicht zu unterdrücken. Die MIP wird z.B. in der Emphysemdiagnostik (Überblähung des Lungengewebes) verwendet. Analog zur MIP wird bei diesem Verfahren das Voxel mit minimaler Intensität dargestellt.

2.3.2 Indirektes Volume-Rendering (Iso-Surface-Rendering)

Bei der indirekten Volumen-Visualisierung werden Voxel eines Intensitätswertes in eine Zwischenrepräsentation mit geringerer Dimension überführt, deren Darstellung beschleunigt werden kann. Die so gewonnene Repräsentation benötigt zur Berechnung ebenfalls den gesamten Datensatz, die Menge der Daten zur Darstellung ist jedoch wesentlich geringer.



(a) Visualisierung der Wirbelsäule aus Abbildung 2.19(a).

(b) Ein Zahn, dargestellt mit mehreren transparenten Iso-Flächen. Quelle: GERSTNER [2002].

Abbildung 2.20: Volumen-Darstellung mit Hilfe von Iso-Oberflächen.

Das ursprüngliche Verfahren beruht auf den Marching-Cubes-Algorithmus von LORENSEN und CLINE [1987]. Dabei wird das Voxelgitter in ein Würfelgitter überführt. Über lineare Interpolation wird die Position des gesuchten Intensitätswertes auf den Würfelkanten ermittelt. Aus den Schnittpunkten wird anschließend das Dreiecksnetz generiert. Dieses Verfahren ist sehr ineffizient gegenüber Laufzeit und Anzahl der generierten Dreiecke. Mittlerweile gibt es Methoden, die in der Lage sind, mehrfache transparente Iso-Flächen in Echtzeit zu bestimmen, bei denen außerdem der Iso-Wert dynamisch geändert werden kann. [GERSTNER und RUMPF, 2000; GERSTNER, 2002]

Die Vorteile gegenüber dem DVR liegen in der guten Erkennbarkeit der räumlichen Strukturen, da diese klare Abgrenzungen besitzen und die Oberflächen beleuchtet werden können, was dem gewohnten Sehen nahe kommt. Weiterhin können polygonale Modelle mittels herkömmlicher Grafik-Hardware effizient visualisiert werden. Da das Verfahren direkt auf den zugrunde liegenden Volumendaten arbeitet, ohne dass vorher eine Segmentierung notwendig war, kann die Visualisierung über die Exaktheit der extrahierten Oberfläche hinwegtäuschen (z.B. bei Tumoren). Segmentierung und Visualisierung sind also nicht klar voneinander getrennt. Aufgrund der Reduzierung der Objekte auf Oberflächen können die Strukturen erheblich von ihrer eigentlichen Anatomie abweichen. Durch Partialvolumeneffekte und verrauschte Bilddaten können disjunkte Strukturen miteinander verschmelzen oder zusammengehörige Strukturen getrennt werden (z.B. bei Gefäßbäumen).

Direktes und indirektes Volume-Rendering sind nicht strikt voneinander getrennt. Sie können auch kombiniert und parallel angewendet werden. Genauso können beliebige polygonale Daten wie segmentierte Objekte oder virtuelle Operationswerk-

zeuge in der Darstellung mit angezeigt werden (hybrides Rendern).

2.3.3 NPR Volumen-Rendering

Neben den NPR-Methoden aus Abschnitt 2.2 gibt es Bestrebungen, NPR direkt auf den Volumendaten durchzuführen. Die Vorteile einer solchen Visualisierung haben RHEINGANS und EBERT [2001] formuliert. Bei der Darstellung mittels NPR lassen sich zusätzliche Informationen extrahieren und in die Darstellung integrieren. Das klassische Volumen-Rendering-Verfahren entspricht der natürlichen Erscheinung von durchsichtigen Objekten, welches die Abschwächung eines Lichtstrahls durch ein Objekt simuliert. Die Informationen über die Struktur des Objektes gehen jedoch größtenteils verloren.

Bei keinem der hier vorgestellten Ansätze wurden von den Autoren Angaben darüber gemacht, ob ihre Verfahren auch auf Daten angewendet werden können, die anhand von MR-Tomographen erstellt wurden. Aufgrund der auftretenden Bildinhomogenitäten bei MR-Daten ist jedoch anzunehmen, dass diese Verfahren nur auf CT-Daten adäquat funktionieren. Sofern von den Autoren Angaben über die Aufnahmemodalitäten gemacht werden, wird ausschließlich das CT erwähnt.

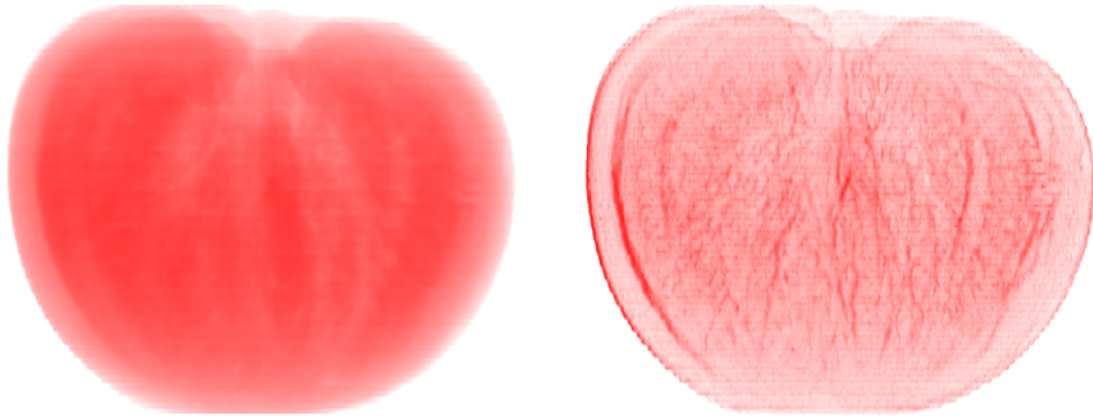
Silhouette

Wird als Darstellungsform die Silhouette gewählt, lassen sich neben der äußeren Begrenzung des Objektes auch Informationen über den Aufbau im Inneren darstellen [RHEINGANS und EBERT, 2001; CSÉBFALVI et al., 2001]. Die Darstellung mittels Silhouette entspricht einer sehr komplexen Sägezahntransferfunktion, wobei im Gegenzug bei der Silhouettengenerierung keine Transferfunktion vonnöten ist.

Im Gegensatz zu geometrischen Modellen gibt es bei einer Volumen-Repräsentation keine fest definierten Oberflächen. Anstelle dessen werden hier die Bereiche als Kanten angesehen, bei denen der lokale Gradient besonders hoch ist. Die Silhouette wird also extrahiert, indem der Gradient mit Informationen über die Kameraausrichtung kombiniert wird, mathematisch gesehen die Stellen, bei denen das Skalarprodukt aus Gradientenrichtung und Blickrichtung gegen Null konvergiert.

Stippling

LU et al. [2002] haben ein Verfahren entwickelt, mit dem ein Volumendatensatz über Stippling dargestellt wird (Abbildung 2.22(a)). Den Einsatz rechtfertigen LU et al. [2002] zum einen mit der langen Tradition der Stippling-Technik in anderen Bereichen, und zum anderen damit, dass aus computergrafischer Sicht ein Punkt das am



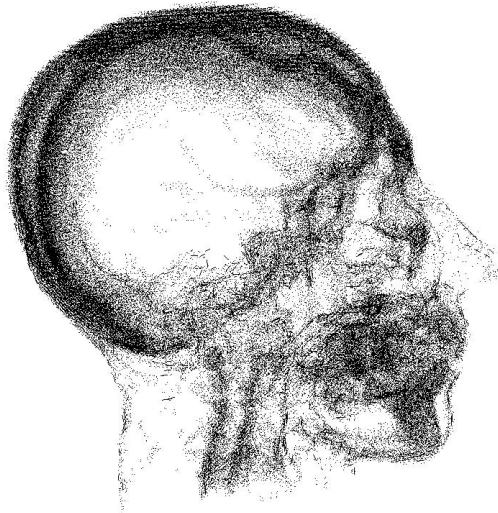
(a) Physikalisch korrekte Darstellung einer Tomate. (b) Darstellung über Silhouetten-Rendering.

Abbildung 2.21: Vorteil der NPR-Darstellung gegenüber der normalen Variante. Quelle: RHEINGANS und EBERT [2001]. Die Bilder wurden zur besseren Darstellung modifiziert.

einfachsten zu zeichnende Objekt ist. Allerdings ist der zweite Grund nicht nachvollziehbar, da die Bestimmung, ob ein Punkt zu zeichnen ist oder nicht, so zeitaufwändig ist. Das Problem bei dieser Technik besteht darin, dass je nach Sichtbarkeit und Entfernung vom Betrachter pro Voxel unterschiedlich viele Punkte gezeichnet werden müssen, damit die Helligkeits-Informationen weiterhin korrekt dargestellt werden. Kombiniert mit anderen NPR-Methoden ist diese Technik aber durchaus sinnvoll.

Tone-Shading

Ein Tone-Shading-Verfahren für direktes Volumen-Rendering haben [LUM und MA, 2002] vorgestellt (Abbildung 2.22(b)). Tone-Shading wurde in der Computergrafik erstmals von GOOCH [1998] beschrieben. Bei diesem Verfahren wird ein Objekt nicht nur abhängig vom Material und der Beleuchtungsquelle dargestellt, sondern weitere Parameter über die Farbtemperatur kodiert. Bei direkter Beleuchtung wird das Objekt mit warmen Farbtönen (rötlich) und bei indirekter Beleuchtung mit kühlen Farbtönen (bläulich) dargestellt. Auch eine bläuliche Abtönung bei größeren Entfernungen, die in der Natur durch atmosphärische Interferenzen entsteht, wird verwendet. Auf diese Weise können Tiefeninformationen (*Depth Cues*) in die Darstellung kodiert werden. Um eine Farbe zuzuweisen, wird wie bei der Silhouetten-Generierung das Skalarprodukt aus lokalem Gradienten und Kamerarichtung ausgewertet. Neben der Kameraposition muss hier die Position der Lichtquelle berücksichtigt werden.



(a) Stippling kombiniert mit Silhouette. Quelle: LU et al. [2002]



(b) Tone-Shading. Quelle: LUM und MA [2002].

Abbildung 2.22: Stippling und Tone-Shading anhand von Volumendaten

Kombinationen

Durch die Kombination der verschiedenen NPR-Techniken werden Strukturen unterschiedlich hervorgehoben. Dabei stehen zwei Möglichkeiten zur Verfügung. Zum einen können verschiedene Regionen im Bild unterschiedlich abgebildet werden. Dieser Ansatz wird von ZHOU et al. [2002] vorgestellt (Abbildung 2.23(a)). Überzeugend ist dieser Ansatz nicht, da die Übergänge zwischen den Regionen sehr störend wirken können. Zum anderen ist es möglich, verschiedene Stile auf segmentierte Objekte anzuwenden. Das Problem bei diesem Ansatz ist, dass für jeden Stil das gesamte Volumen noch einmal abgebildet werden müsste. HADWIGER et al. [2003] stellen ein System vor, bei dem durch geschickte Kombination der notwendigen Rechenschritte nur zwei Durchläufe gemacht werden müssen.

Über die Anwendung von Schraffur auf direktem Volumen-Rendering wurden keine Arbeiten gefunden. Nur bei der indirekten Volumen-Visualisierung wurden bisher Schraffuren verwendet, was in Abschnitt 2.2.1 beschrieben wurde [INTERRANTE, 1997]. Diese Technik unterscheidet sich jedoch nicht von der Schraffurgenerierung auf Polygonnetzen.

2.4 Anwendungen und Kombinationen

In der Medizin sind bereits eine Vielzahl von computergestützten Anwendungen im Einsatz. Dabei lassen sich zwei Systeme unterscheiden. Zum einen Systeme, welche



(a) Regionenbasierte Anwendung verschiedener Stile. Quelle: ZHOU et al. [2002]



(b) Objektbasierte Anwendung verschiedener Stile. Gehirn: Tone-Shading; Haut: Silhouette; Augen: Shaded DVR; Trachea: MIP. Alle weiteren Objekte: DVR. Quelle: HADWIGER et al. [2003].

Abbildung 2.23: Verschiedene Möglichkeiten, NPR-Techniken auf Volumendaten zu kombinieren. Die Bilder wurden zur besseren Darstellung modifiziert.

zur Aus- und Fortbildung dienen, und zum anderen Programme, die im klinischen Alltag Anwendung finden.

Die ausgereiftesten Anwendungen gibt es in der computergestützten Diagnostik. Bei dieser Sparte kommen jedoch ausschließlich Verfahren in Frage, die die Daten unverfälscht wiedergeben. Von daher werden NPR-Techniken hier nicht verwendet.

2.4.1 Ausbildungsprogramme

Programme zur Ausbildung werden meist von Studenten benutzt und dienen dazu, diese auf den klinischen Alltag vorzubereiten. Dabei handelt es sich meistens um fallbasierte, computergestützte Lernsysteme (CBT - *Computer Based Training*), in denen Autoren konkrete Fälle aufbereiten und den Studenten zugänglich machen [FISCHER et al., 1996; RIEDEL et al., 2000]. Den aufbereiteten Fällen werden Daten in Form von (eingescannten) Bildern von Röntgen, EKG-Diagrammen etc. beigelegt.

Für bereits ausgebildete Ärzte bietet WEBSURG [MUTTER und MARESCAUX, 2003] einzelne, hervorragend aufgearbeitete Fälle an. Überblendete Handzeichnungen und Abfolgen von Fotoaufnahmen aus verschiedenen Stadien während der Operation werden als Material angeboten und von Sprechern kommentiert. Es handelt sich

dabei ausschließlich um vorgefertigte Animationen, bei denen der Nutzer aus Sicht der Interaktion nur noch die Reihenfolge beeinflussen kann.

Das herausragende Programm zur medizinischen Ausbildung mit 3D-Modellen ist *VOXEL-MAN* von HÖHNE et al. [2003]. Dieses Programm arbeitet auf Daten, die im Rahmen des *VISIBLE HUMAN*-Projektes zur Verfügung gestellt wurden. Alle anatomischen Strukturen lassen sich einzeln ein- und ausblenden und in ihrer realen Farbgebung darstellen. Bei diesem Programm wurde ein hoher Wert auf die realistische Darstellung anatomischer Strukturen gelegt und vollständig auf NPR-Darstellungen verzichtet.

Neben den bereits vorgestellten Lehrbüchern und Atlanten gibt es auch interaktive Atlanten [SOBOTTA, 2000]. Sie zeigen neben den bekannten Illustrationen auch vorgefertigte Animationen, in denen einzelne Objekte ausgeblendet werden. Die Animationen zeigen ebenfalls nur herkömmliche Renderings, sodass der Vorteil der Handzeichnungen, wie er in Abschnitt 2.1 beschrieben wurde, hier nicht zum tragen kommt.

Um den Lernenden das Begreifen von anatomischen Zusammenhängen leichter zu machen, hat RITTER [1999] ein 3D-Puzzle entworfen. Bei diesem Programm kann ein beliebiges Objekt, welches in seine Strukturen zerlegt ist, in einem interaktiven 3D-Szenario zusammengesetzt werden. Die einzelnen Strukturen müssen als separate Polygonnetze vorliegen, wobei für jedes Netz die funktionellen Nachbarschaftsbeziehungen definiert werden müssen. Um die Lokalisierung selektierter Objekte zu vereinfachen, werden zwei Möglichkeiten vorgeschlagen. Bei der einen Methode werden bis auf das gesuchte Objekte alle anderen transparent dargestellt. Als zweite Variante kann das Modell explodieren, d.h. die umliegenden Objekte werden vom Zielobjekt fort bewegt.

Der *LIVERSURGERYTRAINER* von BADE et al. [2004] bzw. MIRSCHEL [2004] ist ebenfalls ein CBT-System, welches einen besonderen Fokus auf das Arbeiten mit 3D-Visualisierungen basierend auf klinischen Fällen legt. Bei diesem System wird versucht, Illustrationen aus medizinischen Atlanten nachzuempfinden, wobei hier die Möglichkeiten zur NPR-Darstellung von *MACROMEDIA DIRECTOR 8.5* ausgenutzt werden. Diese Möglichkeiten beschränken sich jedoch auf die Darstellung von Silhouetten und bildbasiertem Stippling einzelner Objekte.

Abschließend ist festzustellen, dass außer dem *LIVERSURGERYTRAINER* keines der Programme interaktive NPR-Techniken anwendet. Direktes Volume-Rendering wird von keinem der erwähnten Programme genutzt.

2.4.2 Therapieplanungs- und Trainingsprogramme

Bei den professionell eingesetzten Workstations von Siemens oder Philips stehen gleich mehrere Optionen zur Visualisierung zur Auswahl (MIP, CVP, DVR, etc.).

Es ist außerdem eine Einfärbung der einzelnen Strukturen möglich, um eine realistischere Darstellung zu ermöglichen. Der Schwerpunkt dieser Workstations liegt vorrangig auf der automatischen Segmentierung und einer möglichst guten Unterstützung der Arbeitsschritte im klinischen Alltag. Die Anwendung von NPR-Techniken, weder auf Polygonnetzen noch auf Volumendaten, findet keinen Einsatz.

Das Programm KISMET von [KÜHNAPFEL et al., 2000] dient zum Training von laparoskopischen (minimal invasiven) Operationen. Bei dieser Art von Eingriff werden nur kleine Löcher in die Bauchwand geschnitten, durch die die Instrumente und ein Endoskop in die Bauchhöhle eingeführt werden. Der Chirurg muss sich dafür erst an die ungewohnte Optik durch die Endoskopie und vor allem an die indirekte Steuerung der Operationswerkzeuge gewöhnen. Dieses Trainingsprogramm wurde deswegen so konzipiert, dass das Bauchinnere so realistisch wie möglich abgebildet wird. Zur Darstellung werden hier texturierte Polygonnetze verwendet, da bei diesen zusätzlich die Verformung durch Operationswerkzeuge simuliert werden kann.

Bei MEVIS wurde ein Therapieplanungsprogramm namens INTERVENTIONPLANNER entworfen [PREIM et al., 2003]. Dieses Programm dient vorrangig dazu, die Erkundung der Lagebeziehungen der einzelnen Strukturen zueinander zu ermöglichen. Die Tomographieaufnahmen eines Patienten können in verschiedenen Formen angezeigt werden. Alle Visualisierungsparameter der segmentierten Objekte lassen sich nach Belieben einstellen, wobei die Parameter so initialisiert werden, dass eine Interaktion in der Regel nicht notwendig ist. Die Transferfunktion des DVR lässt sich ebenfalls ändern. Parallel zur 3D-Visualisierung lassen sich die korrespondierenden Schichtaufnahmen anzeigen, in denen auch die segmentierten Objekte einblendet werden. Um die Proportionen und Lagebeziehungen besser einschätzen zu können, gibt es außerdem manuelle und automatische Vermessungswerkzeuge, mit denen Ausdehnungen und Abstände bestimmt werden können. Die Ergebnisse dieser Diplomarbeit werden nach Abschluss zur weiteren Evaluierung in den INTERVENTIONPLANNER integriert.

2.4.3 Visible Human

Im Jahre 1986 wurde ein umfangreiches Projekt mit Namen VISIBLE HUMAN ins Leben gerufen [TIEDE et al., 1996]. Im Rahmen dieses Projektes sollen vollständige, anatomisch detaillierte, dreidimensionale Repräsentationen gesunder männlicher und weiblicher Menschen kreiert werden. Axiale CT-, MRT- und Cryosection-Schnittbilder mit einem Millimeter Schichtabstand sind parallel verfügbar. Mit sehr großem Zeitaufwand wurden auch alle Organe etc. segmentiert.

Die Ergebnisse des VISIBLE HUMAN Projektes sind jedoch nicht mit dem klinischen Alltag vergleichbar. So sind bei CT oder MRT Aufnahmen von Thorax oder

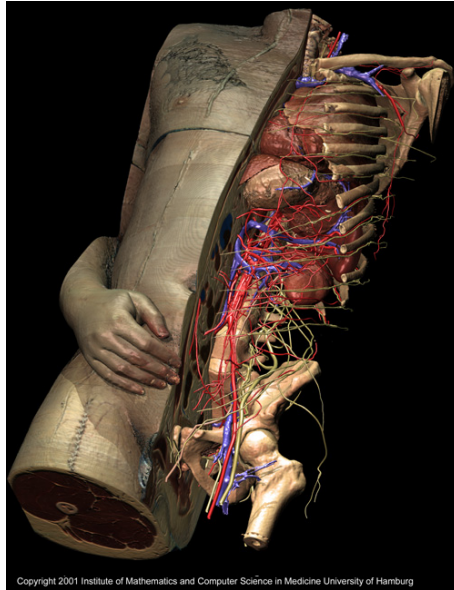


Abbildung 2.24: Das VOXEL-MAN/Inner-Organ Modell besteht aus 650 anatomischen Objekten. Die größeren Objekte (Leber, Nieren etc.) werden über DVR dargestellt. Die kleineren Objekte, wie Venen und Arterien, werden als Oberflächen-Repräsentation modelliert. Quelle: HÖHNE et al. [2003].

Abdomen 4 mm Schichtabstand üblich, um Bewegungsartefakte durch den erhöhten Zeitaufwand bei der Aufnahme zu verringern. Bei der CT darf der Patient auch keiner zu großen Strahlungsbelastung ausgesetzt werden. Durch den großen Schichtabstand muss bei der Segmentierung stark interpoliert werden. Hinzu kommt, dass nur wenig Zeit zum Segmentieren zur Verfügung steht und die Aufnahme durch Atem- und Bewegungsartefakte verfälscht wird. Daher weicht die Qualität der Modelle, die aus den patientenindividuellen Daten gewonnen werden, erheblich von den Modellen ab, die zu Forschungszwecken mit Hilfe von menschlichen Leichen generiert wurden. Aus diesem Grund wird auf das VISIBLE HUMAN Projekt in dieser Arbeit nicht näher eingegangen.

2.5 Zusammenfassung

Es wurden medizinische Atlanten vorgestellt, die den optimalen Weg darstellen, um anatomische Gegebenheiten des menschlichen Körpers studieren zu können. Da es sich hierbei um Handzeichnungen handelt, ist ein interaktives Arbeiten mit der Darstellung nicht möglich. Mit Hilfe der Methoden zur Erstellung von Liniengrafiken auf 3D-Modellen können die Handzeichnungen reproduziert werden, wobei zusätzlich mit den Modellen interagiert werden kann.

In der direkten Volumen-Visualisierung wurden bisher einige Versuche unternommen, verschiedene NPR-Stile in der Darstellung zu kombinieren [ZHOU et al., 2002;

HADWIGER et al., 2003]. Es ist bisher aber nicht gelungen, einen Schraffur-Ansatz direkt auf den Volumendaten zu implementieren. Würden die segmentierten Objekte aus der Arbeit von HADWIGER et al. [2003] in eine Oberflächen-Repräsentation überführt werden, könnten die aus der Segmentierung resultierenden Oberflächen auch direkt mit Hilfe der beschriebenen Liniengrafiken dargestellt werden. Zusätzlich ist es möglich, diese Oberflächen auch mit Schraffur zu versehen.

Der Vorteil des direkten Volumen-Renderings liegt darin, dass die zugrunde liegenden Daten nicht segmentiert werden müssen, um sie darstellen zu können. Dieser Vorteil muss unbedingt genutzt werden [PREIM et al., 2003]. In medizinischen Anwendungen werden außer in dem LIVERSURGERYTRAINER von BADE et al. [2004] keine interaktiven NPR-Techniken angewendet.

Um so wichtiger ist in der medizinischen Visualisierung die Kombination von nicht-fotorealistischem Rendering und direkter Volumenvisualisierung. Ziel dieser Arbeit soll also die Anwendung dieser beiden miteinander kombinierten Methoden sein, worauf in den nächsten Kapiteln genau eingegangen wird.

3 Entwurf von NPR-Methoden für medizinische Visualisierungen

In diesem Kapitel wird zunächst der Einsatz von NPR-Techniken motiviert und die weiteren Vorteile der computergestützten Rendering-Methoden beschrieben. Um bestimmte nicht-fotorealistische Effekte erzeugen zu können, ist der Einsatz von Parametern zur Einstellung und Anpassung der NPR-Techniken sowie des Rendering-Vorgangs notwendig. Diese müssen sinnvoll initialisiert werden, damit mit ihnen gearbeitet und die gewünschten Darstellungen erzielt werden können. Daher wird im Anschluss an die Motivation ausführlich auf die Parametrisierung eingegangen und abschließend ein Rendering-Verfahren vorgestellt, das erstens alle Anforderungen der Parametrisierung erfüllt und zweitens die interaktive Exploration medizinischer Visualisierungen ermöglicht. Das gesamte Verfahren wird durch ein Szenengraph-Konzept realisiert, dessen Aufbau ebenfalls im Detail beschrieben wird.

Begriffsfestlegung

Im weiteren Verlauf der Diplomarbeit wird sich auf die drei folgenden Typen von Strukturen bzw. Objekten bezogen:

Das Fokusobjekt: Es steht im Mittelpunkt des Interesses und soll daher hervorgehoben dargestellt werden.

Die fokusnahen Objekte: Diese sind zum Verständnis der räumlichen oder funktionellen Lage des Fokusobjekts wichtig. Ihre Darstellung hängt von der jeweiligen Fragestellung ab.

Der Kontext: Dieser beschreibt bzw. umfasst alle übrigen Objekte.

3.1 Motivation & Analyse

Die bisherigen Verfahren zur Visualisierung von segmentierten Bilddaten in 3D sind nicht ausreichend, um diese zufriedenstellend darstellen zu können. Das heißt, dass es derzeit kein Verfahren gibt, das die Trennung zwischen Fokusobjekt und Kontext

grafisch in einer ansprechenden und eindeutigen Art und Weise herstellt. Bisherige Verfahren beschränken sich in erster Linie auf eine veränderte Darstellung des Kontextes. Dabei gibt es die Möglichkeit, den Kontext mit transparenten flächenhaften Objekten oder mit Volumen-Rendern (Abbildung 3.1) darzustellen, um ihn vom Fokusobjekt abzugrenzen. Bei beiden Verfahren ist jedoch entweder der Fokus nicht mehr zu erkennen oder der Kontext selbst ist nicht mehr aussagekräftig genug, um die Lage des Fokus beurteilen zu können.

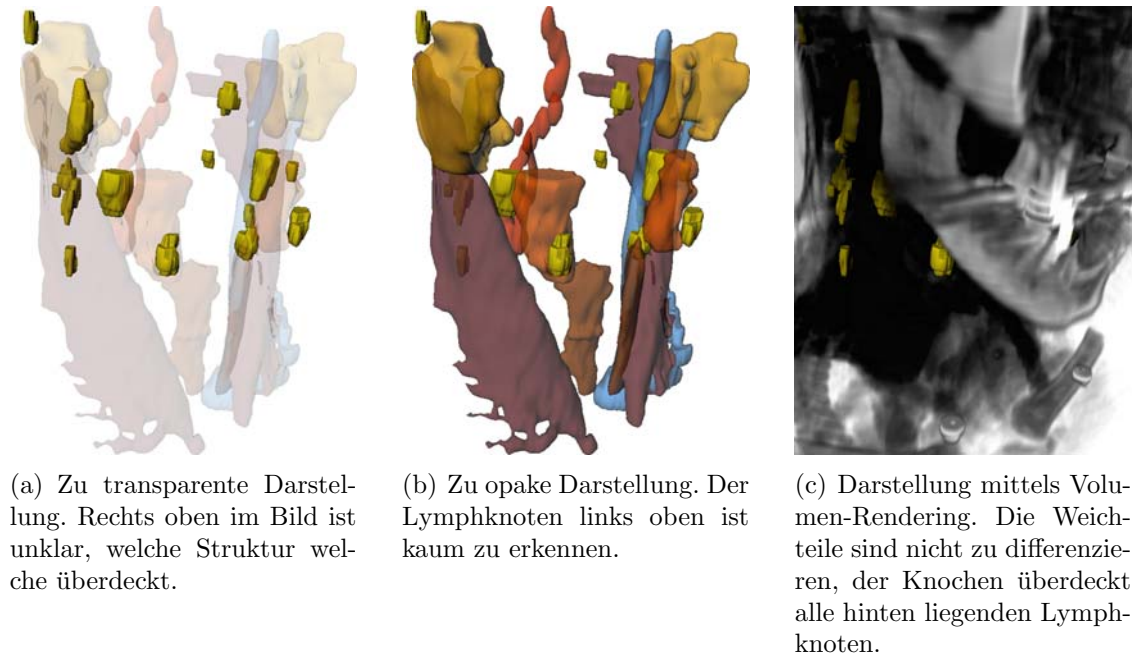


Abbildung 3.1: Demonstration der Nachteile der bisherigen Möglichkeiten zur Darstellung des Kontextes. Die Lymphknoten sind hierbei im Fokus.

Die erste Möglichkeit, die transparente Darstellung des Kontextes, führt aus folgenden Gründen nicht zu einer klareren Darstellung des Fokusobjekts: Entweder ist der Grad der Transparenz so gering, dass die durchscheinenden Objekte kaum zu sehen sind und die Aufmerksamkeit des Betrachters genauso stark oder sogar stärker von den transparenten Objekten in Anspruch genommen wird. Oder der Grad ist so hoch, dass der Kontext kaum noch zu sehen und eine räumliche Trennung der enthaltenen Objekte fast nicht mehr möglich ist. In beiden Fällen wird die Aufmerksamkeit des Betrachters somit auf das Verständnis der Räumlichkeiten gelenkt und nicht auf das Fokusobjekt.

Wird der Kontext alternativ mittels Volumen-Rendern dargestellt, ergeben sich ebenfalls Probleme mit der Differenzierung zwischen einzelnen Strukturen. Die Ursache hierfür ist die Unschärfe, die durch die Darstellung der semi-transparenten Voxel entsteht.

Bei der Darstellung in medizinischen Atlanten ist die optimale Darstellung von

Fokus und Kontext gewährleistet, jedoch lässt sich mit der Illustration nicht interagieren. Die deutlichere Trennung zwischen Fokus und Kontext in den medizinischen Atlanten wird u.a. durch die Verwendung von NPR-Techniken erzielt. Durch die Verwendung von NPR-Techniken zur Darstellung des Kontextes können dabei oben genannte Probleme behoben werden. Die räumliche Trennung wird z. B. sehr leicht durch den Einsatz von Silhouettenlinien gewährleistet. Die Form der Objekte im Kontext oder im fokusnahen Bereich wird durch Merkmalslinien und Schraffur hervorgehoben. Fokusobjekte, die hinter oder im Kontext liegen, werden somit nicht verdeckt und sind weiterhin sehr gut zu erkennen.

3.1.1 Vorteile computergestützter Rendering-Methoden

Neben den genannten Nachteilen besteht der große Vorteil der computergestützten Darstellung allerdings darin, dass nicht nur eine fixierte Darstellung eines Modells gegeben ist, sondern diese interaktiv modifiziert werden kann. Die Palette möglicher Modifikationen reicht von einfachen Animationen, bei denen vorgefertigte Abläufe präsentiert werden, bis hin zu Interaktionen, bei denen der Anwender die Szenerie beliebig manipulieren kann. Eine Mischform hieraus ist eine Visualisierung, bei der sich die Darstellungsart einzelner Objekte im Bild je nach Interaktion ändert, um den Aufmerksamkeitsfokus auf ein anderes Objekt zu verlagern. Somit ist es z.B. möglich, mit Hilfe der selben Daten verschiedene Fragestellungen zu erläutern. In Abbildung 3.2 konnten so z. B. bei demselben Datensatz einmal die Lymphknoten und einmal zwei Halsmuskeln hervorgehoben werden.

Ein weiterer Vorteil liegt in der Möglichkeit die Anwendung zur Segmentierung der patientenindividuellen Daten auf die Anwendung zur Visualisierung abstimmen zu können. Dadurch stehen viele der benötigten Informationen zur Verfügung, die zur Visualisierung erforderlich sind. Die Daten, die bei der Segmentierung entstehen, können direkt zur Erstellung der Modelle für die Visualisierung genutzt werden. Weitere Analysen bezüglich funktioneller und pathologischer Fragestellungen stehen ebenfalls für die Visualisierung zur Verfügung. Außerdem kann auch auf die Volumendaten, die der Segmentierung zugrunde liegen, zurückgegriffen werden. Ziel ist es daher, Segmentierungsdaten und Visualisierungsparameter miteinander zu verbinden, was im folgenden Abschnitt erläutert wird.

3.1.2 Anforderungen an das neue Verfahren

Aus dem Segmentierungsprozess müssen alle relevanten Informationen gespeichert werden, die zu einer sinnvollen Parametrisierung der Visualisierung beitragen könnten. Die Parametrisierung sollte zunächst automatisch erfolgen, so dass eine Vorentscheidung über den Visualisierungsstil getroffen werden kann. Nach der Erzeugung



Abbildung 3.2: Zwei Objekte des selben Datensatzes wurden zur Erörterung verschiedener Fragestellungen hervorgehoben. Die Objekte lassen sich von allen Seiten betrachten und sind aus allen Blickrichtungen gut zu erkennen.

eines ersten Bildes sollte der Benutzer die Möglichkeit haben, die Parametrisierung zu modifizieren.

Damit die in Abschnitt 2.2.4 beschriebenen Probleme (raue Oberflächen und Performanz) nicht auftauchen, müssen die Modelle nach der Segmentierung entsprechend modifiziert werden. Alternativ können auch Visualisierungstechniken angewendet werden, die resistent gegen solche Probleme sind. Zusätzlich müssen die Segmentierungen besonders auf Fehler überprüft werden, für den Fall das die resultierenden Visualisierungsergebnisse für Schulungszwecke eingesetzt werden sollen.

Außerdem wird angestrebt, dass die einzelnen Objekte beliebig und unabhängig voneinander in einen anderen Visualisierungsstil überführt werden können, um die verschiedenen Fragestellungen verdeutlichen zu können. Auch die beschriebenen Vorteile des direkten Volumen-Rendings im medizinischen Bereich müssen genutzt werden können.

Die neue Visualisierungstechnik muss also in der Lage sein, die drei Darstellungsarten – flächenhaftes Rendering, NPR und Volumen-Rendring – so zu kombinieren,

dass eine problemorientierte, ansprechende Visualisierung präsentiert wird, die mit und ohne Benutzereingaben sinnvolle Bilder generiert.

Veranschaulichung

Da es ermöglicht werden soll, anhand eines Datensatzes mehrere Fragestellungen zu veranschaulichen, muss die Visualisierung so aufgebaut werden, dass die Aufmerksamkeit des Betrachters auf das Objekt fokussiert wird, das Gegenstand des Interesses ist. Die Aufmerksamkeit kann durch den Kontrast des Abstrahierungsgrades zwischen Fokus und Kontext gelenkt werden.

Das flächenhaft dargestellte Modell ist als detaillierteste Form der Visualisierung anzusehen. In Abbildung 3.3 ist der Tumor einer Leber opak und flächenhaft dargestellt. Bei dieser Darstellungsform ist die Oberfläche des Objektes leicht zu erkennen. Alle Feinheiten der Oberfläche sind gut zu differenzieren. Auch bei der transparenten Darstellung der Leber selbst (Abbildung 3.3(a)) ist die Form gut zu erkennen. Diese Eigenschaft geht jedoch verloren, wenn die Leber von anderen transparenten Organen überlagert wird. Bei der Visualisierung mit Hilfe der beiden abstrakteren Visualisierungsstile gehen viele Informationen über die Oberfläche verloren (Abbildungen 3.3(b) und 3.3(c)). Diese beiden Visualisierungsstile kommen deswegen für die Darstellung des Kontextes in Frage (Abbildung 3.3). Um verschiedene Abstufungen zwischen Kontext und Fokus zu ermöglichen, sind jedoch Mischformen aus den drei Techniken notwendig.

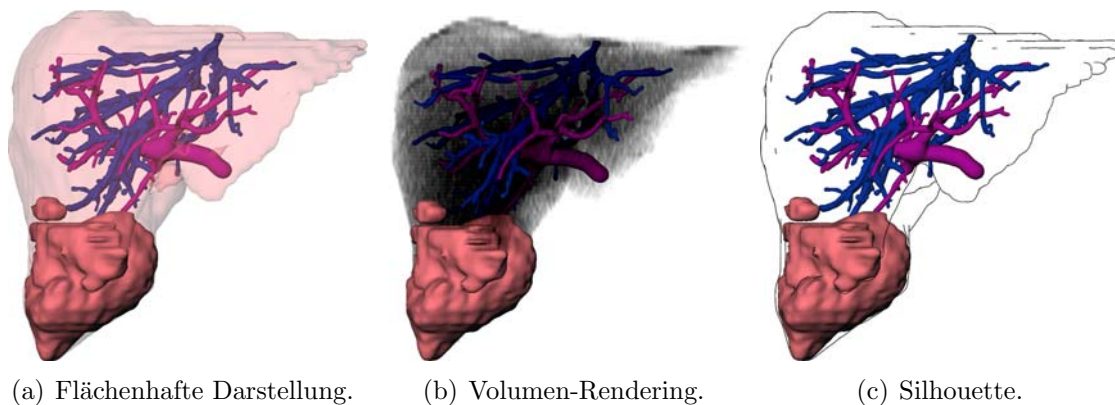


Abbildung 3.3: Bei diesen drei Darstellungen ist eine Leber mit ihren Gefäßsystemen und einem Tumor (unten) zu sehen. Der Tumor und die Gefäßsysteme sind hierbei im Fokus. Die Leber ist mit den drei Varianten der Kontextdarstellung zu sehen.

Diese Mischformen müssen ineinander überführt werden können, so dass die Visualisierung an das jeweilige Problem angepasst werden kann. Um dies realisieren zu können, muss zunächst das Setzen einer Reihe von Parametern beachtet werden.

3.2 Parametrisierung der Effekte und Stile

Um verschiedene Visualisierungseffekte und -Stile einsetzen zu können, ist der Einsatz einer Parametrisierung der Szenerie, Daten, Stile etc. notwendig. Da mit Volumendaten gearbeitet wird, beziehen sich diese nicht nur auf die Darstellungsarten und ihre Kombinationen, sondern auch auf die Objekte selbst. Zusätzlich werden Parameter zur Interaktion benötigt. Die Anzahl der Parameter machen eine ausschließlich manuelle Einstellung daher völlig inakzeptabel. Die Parameter werden deshalb dahingehend untersucht, inwieweit eine automatische Konfiguration vorgegeben werden kann. Um eine Übersicht über alle Parameter zu schaffen, werden sie an dieser Stelle zunächst klassifiziert.

3.2.1 Klassifizierung der Parameter

Es gibt vier Klassen von Parametern, die hier stichpunktartig aufgezählt werden. Die genaue Verwendung und Einstellung der Parameter wird in den darauffolgenden Abschnitten erläutert.

Allgemeine Parameter

Es gibt allgemeine Parameter, die unabhängig von den dargestellten Objekten und der Problemstellung sind. Dazu gehören:

- Mausposition,
- Kameraspezifizierung und
- Lichtquellen.

Objektspezifische Parameter

Die objektspezifischen Parameter beschreiben die Charakteristika eines Objektes unabhängig vom Visualisierungsstil. Ausgehend davon kann die Art der Darstellung bestimmt werden:

- Art der Struktur,
- Größe am Bildschirm und
- evtl. Form des Objektes (länglich, kompakt etc.).

Parameter der Visualisierungsstile

Für die Visualisierungsstile lassen sich dagegen die meisten Parameter festlegen. Als erstes muss entschieden werden, welche Technik auf ein Objekt angewendet werden soll. Für die Techniken selbst lassen sich folgende Parameter einstellen:

- Volumen-Rendering Parameter, hierzu gehören
 - Transferfunktion, Histogramm, Masken der segmentierten Regionen.
- Parameter der flächenhaften Visualisierung, u. a.
 - Farbe, Transparenz, sonstige Materialeigenschaften.
- Parameter für die Liniengrafiken sind
 - Art der Darstellung: Silhouette, Merkmalslinien, Schraffur,
 - Linienrichtung bei Schraffur: Hauptkrümmungsausrichtung, Hauptachse des Objektes, Anhand einer Skelettierung,
 - Liniendicke abhängig von: der lokalen Krümmung, Kamera- und Lichtquellenposition, Entfernung zur Kamera und schließlich
 - Farbe oder farbige Hinterlegung

Problemorientierte Parameter

Die problemorientierten Parameter beschreiben, welche anderen Objekte als fokussnah eingestuft werden, wenn ein Objekt in den Fokus gesetzt wurde.

- Topographischer Zusammenhang,
- Funktioneller Zusammenhang sowie
- weitere Fragestellungen

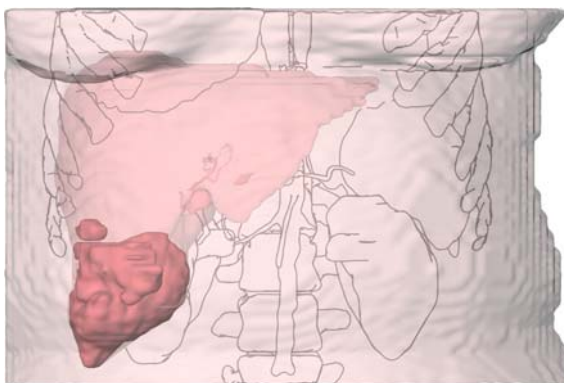
Nachdem alle Parameter aufgelistet wurden, die in der Visualisierung in Betracht zu ziehen sind, muss geklärt werden, welche Parameter automatisch gesetzt werden können und welche manuell eingestellt werden sollten.

3.2.2 Parameter für die Nutzerinteraktion

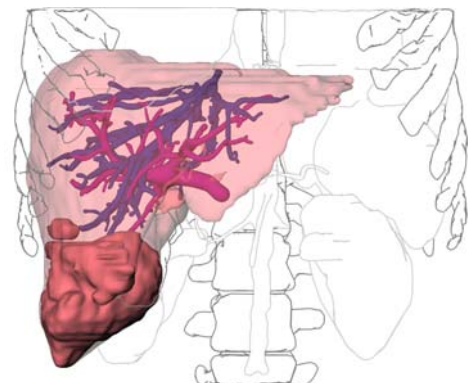
Aufgrund der Vielfalt an Formen und Lagebeziehungen liefert eine automatische Parametrisierung nicht in allen Fällen gute oder gar optimale Ergebnisse. Interaktionsmöglichkeiten, um die Voreinstellungen ändern zu können, sind daher sinnvoll. Die Parameter müssen hierzu in zwei Kategorien aufgeteilt werden – in solche, die auch für einen unerfahrenen Nutzer praktikabel sind und zusätzliche Parameter für fortgeschrittene Nutzer. Wenn der Nutzer die Parameter nach seinen Vorstellungen geändert hat, müssen die Einstellungen gespeichert und damit wiederverwendet werden können.

Nur der Nutzer weiß, welche Struktur gerade Gegenstand des Interesses ist. Um den Datensatz flexibel zu explorieren, muss die Kameraposition deswegen frei gesteuert werden können.

Zwei unterschiedliche Fragestellungen, die auf einem Patientendatensatz erörtert werden könnten, sind etwa die Lage der Leber in Relation zum Rippenbogen, um eine geeignete Schnittführung durch die Bauchdecke planen zu können (Abbildung 3.4(a)), oder aber die Lage eines Tumors innerhalb der Leber, bei dem aber die Bauchdecke keine Rolle mehr spielt (Abbildung 3.4(b)). Dieser Parameter ist also unbedingt vom Nutzer zu steuern. Der Fokus kann beispielsweise über die Computer-Maus gesetzt werden, indem an einer Position die Maustaste gedrückt und dann das erste getroffene Objekt ermittelt wird, welches dann in den Fokus gesetzt wird.



(a) Hervorhebung der Relation zwischen Haut, Leber und den Rippen.



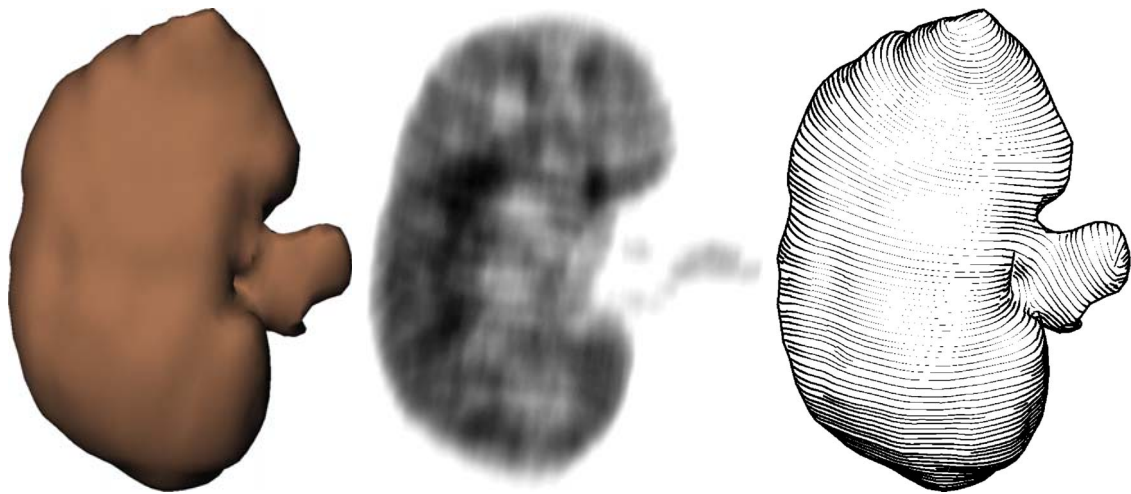
(b) Die Lage des Tumors zu den Lebergefäßen wird betont.

Abbildung 3.4: Zwei Fragestellungen für die Leberoperationsplanung, die anhand eines identischen Datensatzes erläutert werden.

Um eine starre Aufteilung in ein Fokusobjekt und übrig bleibende Kontextobjekte zu vermeiden, ist eine Einteilung der Strukturen in verschiedene Gruppen sinnvoll. Unklar ist dabei, nach welchen Kriterien diese Einteilung vonstatten gehen soll. Eine ausschließlich topographische Kategorisierung, die zur Einordnung die Entfernung

der umliegenden Strukturen vom Fokus-Objekt nimmt, ist nicht zu empfehlen, da ein besonders nah liegendes Objekt nicht immer vom besonderen Interesse ist. So sind beispielsweise von allen Strukturen, die an die Leber grenzen, nur der Rippenbogen und die Gallenblase für einen hepatischen Eingriff relevant. Hier ist also eine funktionelle Kategorisierung sinnvoll.

Eventuell ist das Volumen-Rendering besser zur Darstellung eines Objektes im Kontext geeignet als die liniengrafische Darstellung bzw. umgekehrt. Das Volumen-Rendering wirkt sehr unnatürlich und ist durch die semi-transparenten Gebiete nicht leicht zu interpretieren. Auf der anderen Seite gibt das Volumen-Rendering die zugrunde liegenden Originaldaten wieder und kann so auch Strukturen darstellen, die nicht zuvor segmentiert worden sind. Die Wahl zwischen den verschiedenen Hervorhebungsstilen muss deshalb dem Nutzer überlassen werden.



(a) Fokus-Visualisierung der rechten Niere. (b) Bei der Visualisierung mittels Volumen-Rendering wirkt die Niere etwas kleiner. (c) Visualisierung mittels Schraffur und Silhouette.

Abbildung 3.5: Drei Varianten zur Visualisierung der rechten Niere. Einmal als Fokus (links) und zweimal als Kontext.

3.2.3 Automatische Vorgaben

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt jene Parameter beschrieben wurden, die manuell eingestellt werden müssen, folgen nun die Parameter, die sich automatisch anpassen lassen. Diese Parameter betreffen fast ausschließlich die reine Visualisierung der anatomischen Strukturen, abhängig von der Ausgangssituation und der angegebenen Problemstellung.

Einfärbung

Zur Einfärbung der einzelnen anatomischen Strukturen lassen sich die Farben verwenden, die auch in den medizinischen Atlanten eingesetzt werden. Aufgrund der langen Tradition haben sich diese Farbgebungen herauskristallisiert. Eine Auflistung der Farben gibt Tabelle 3.1. Die jeweilige Struktur sollte nicht fest an die vorgegebene Farbe gebunden sein. Um ein Objekt aus dem Fokus in eine Kontext-Darstellung zu überführen, ist es dadurch möglich, die Farbinformation zu entfernen und das Objekt in einer Graustufe darzustellen.

Farbige Liniengrafiken werden in Atlanten eher selten genutzt. Da eine Einfärbung aber der Identifizierung der Struktur dienlich sein kann, wird sie trotzdem verwendet. Ob diese Möglichkeit wirklich hilfreich ist, wird in der Evaluierung (Kapitel 5) untersucht.

Struktur	Farbe	fokusnaher Stil
Nerven	gelb	
Venen	blau	
Arterien	rot	
große Gefäße	Farbe wie oben	Schraffur in radialer Richtung
Haut als Kontext	grau	Punktierttechnik oder Shading
Muskeln	rot	Schraffur in Längsrichtung
Sehnen Bänder	beige	Schraffur in Längsrichtung
Bindegewebe Bänder	braun gelb	Schraffur in Längsrichtung
Speiseröhre	blau grau	
Zähne	hellgrau	
Knochen	hellbraun	je nach Form
Organe	Farbe je nach Organ	Punktierttechnik
unbekannt länglich	grau	Schraffur in radialer Richtung
unbekannt kompakt	grau	Punktierttechnik oder Shading

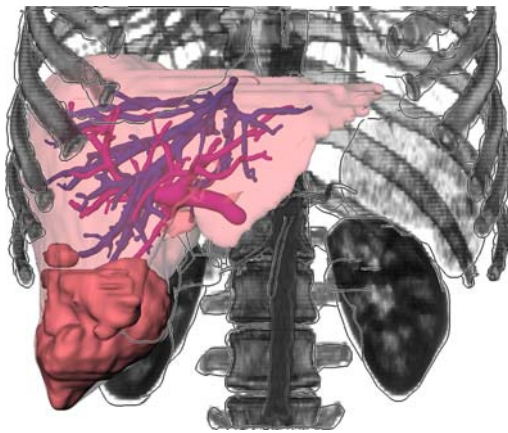
Tabelle 3.1: Weitere Differenzierungen sind ebenfalls in den Atlanten vorhanden (siehe Tabelle 2.1). So ist die Milz typischerweise blau und die Gallenblase grün. Der einfache Kontext-Stil ist nicht mit aufgeführt, der er alle Strukturen nur per Silhouette andeutet.

Gewährleistung der Sichtbarkeit

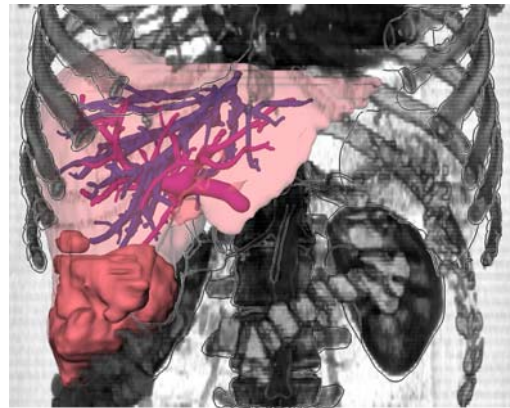
Damit die Fokusstruktur von allen Seiten gut zu erkennen ist, darf der Kontext die Fokusstruktur möglichst nicht überdecken. Bei der Darstellung über Liniengrafiken ist die Sichtbarkeit nahezu immer gewährleistet, da nur die Linien selbst die flächenhaft gerenderten Objekte überdecken.

Bei dem Volumen-Rendering kommt es vor allem auf eine geeignete Transferfunktion an, um überhaupt die gewünschten Strukturen sichtbar zu machen. Die automatische Fensterung von CT-Daten über die Hounsfield-Einheiten ist nicht sinnvoll, da durch eventuelle Kontrastmittelapplikation starke Schwankungen bei der Intensitätsverteilung entstehen. Eine Auswertung der Histogrammverteilung führt zu zuverlässigeren Ergebnissen. Bei der Anpassung der Transferfunktion an bestimmte Strukturen im Histogramm (z.B. ausgeprägte Maxima und Minima) können auch MR-Daten automatisch gefenstert werden.

Es ist durchaus sinnvoll, nur Teile des Datensatzes anzuzeigen. Wichtig ist, dass alle Strukturen, die im Fokus liegen, sichtbar sind. Da die Kontextstrukturen im gleichen Intensitätsbereich liegen können wie Objekte im Fokus, ist es angebracht, den Volumendatensatz so zu modifizieren, dass nur die Teile angezeigt werden, die zuvor segmentiert worden sind (Abbildung 3.6(a)). Dadurch können nicht segmentierte Strukturen, wie ein teilweise gefüllter Darm, den Fokus nicht überdecken (Abbildung 3.6(b)).



(a) Die nicht segmentierten Strukturen werden aus dem Volumen-Rendering ausgespart.



(b) Der nicht segmentierte Darm lässt sich mit einer linearen Transferfunktion nicht ausblenden, ohne das wichtige Strukturen ebenfalls ausgeblendet werden.

Abbildung 3.6: Sicherstellen der Sichtbarkeit beim Volumen-Rendering. Die segmentierten Strukturen werden zusätzlich über eine s/w Silhouette hervorgehoben

Bei der Kombination von Volume-Rendering und Liniengrafiken tritt das Problem auf, dass die Linien nur sehr schwer auf dem Rendering zu erkennen sind. Hierbei

verschafft eine rein schwarze oder weiße Umrandung der Linien Abhilfe. Ein Einsatz dieser Technik ist u.a. in Abbildung 3.6 zu sehen.

Auswahl des Visualisierungsstils

Da drei grundsätzlich verschiedene Stile zur Visualisierung existieren, muss für jedes Objekt ein Stil ausgewählt werden. Die Auswahl zwischen den Hervorhebungsstilen wird wie beschrieben dem Anwender überlassen. Daraufhin erfolgt eine automatische Parametrisierung, die im folgenden beschrieben wird.

Fokusobjekte werden immer flächenhaft dargestellt. Sofern nicht Strukturen im Inneren des Objektes liegen, wird das Modell opak gezeichnet. Wenn der Blick auf das Innere freigegeben werden muss, wird das Objekt transparent dargestellt.

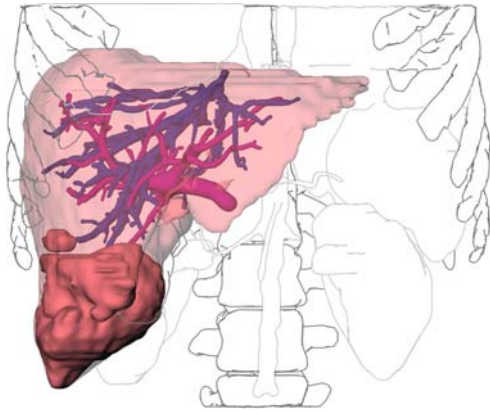
Die Visualisierung des Kontextes wird, mit leichten Variationen, auf zwei Wegen realisiert: mit Liniengrafiken und mit Volumen-Rendering. Außerdem gibt es Abstufungen zwischen fokusnahem Kontext, der zur besseren Einschätzung des Fokus notwendig ist, und reinem Kontext, der zur Problembewertung unerheblich ist.

Grundsätzlich werden alle Objekte außerhalb des Fokus mit einer Silhouette versehen. Diese wird in den medizinischen Atlanten bei allen Objekten, unabhängig von Form und Größe, angewendet. Beim reinen Kontext werden bei der NPR-Darstellung nur die Silhouetten dargestellt. Die fokusnahen Objekte werden hingegen mit zusätzlichen Informationen versehen, um Form und Lage zu veranschaulichen und es vom restlichen Kontext abzuheben. Die Auswahl des Visualisierungsstils bei der liniengrafischen Darstellung erfolgt wie bei der Farbgebung ebenfalls nach dem Vorbild der medizinischen Atlanten.

Alternativ zur Einblendung von Schraffur oder Punktierung können fokusnahe Objekte auch durch auffälligere Silhouetten hervorgehoben werden (Abbildung 3.7(a)). Dadurch wird jedoch nur klar, dass diese Objekte von größerer Bedeutung sind. Zusätzliche Informationen über das Erscheinungsbild der Struktur werden allerdings nicht gegeben.

Bei Strukturen, die keine lokale Krümmung aufweisen, die um nur eine Achse stark ausgeprägt ist, wird die Punktieretechnik oder ein einfaches Shading angewendet (Abbildung 3.7(b)). Diese Technik findet zum Beispiel auf Organen wie der Leber, der Milz oder auch Knochen Einsatz. Gestreckte Strukturen, wie etwa Äste eines Gefäßsystems oder Muskeln, Bänder und Sehnen, werden zusätzlich mit Schraffur versehen. Die Art der Struktur ist aus dem Segmentierungsvorgang bekannt und kann deswegen direkt auf den Stil übertragen werden.

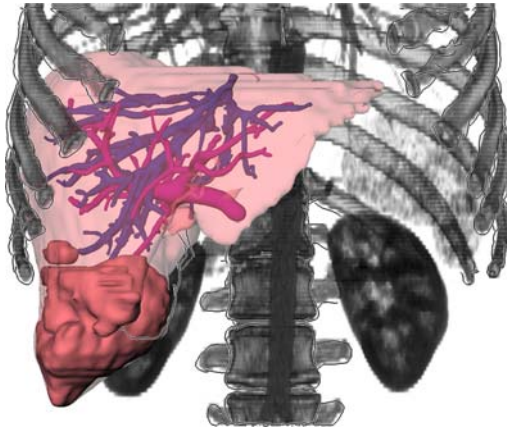
Bei dem Volumen-Rendering werden die fokusnahen Strukturen mit einer Silhouette hervorgehoben (Abbildung 3.7(c)). Da die Transferfunktion so gewählt sein kann, dass die Struktur kaum zu sehen ist, ist sie durch die Silhouette leichter zu erkennen. Alternativ kann auch die Transferfunktion angepasst werden, sodass die fokusnahen



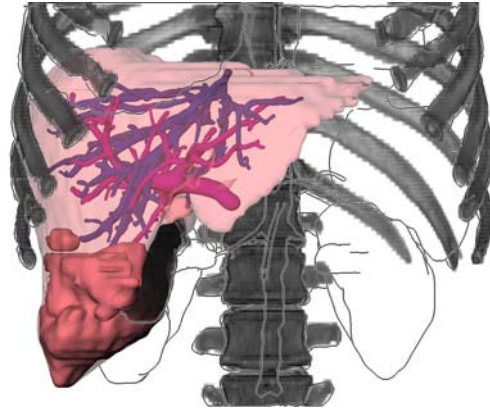
(a) Der Kontext wird mit einfachen Silhouetten dargestellt. Der fokusnahe Kontext wird mit Hilfe dunklerer Silhouetten hervorgehoben.



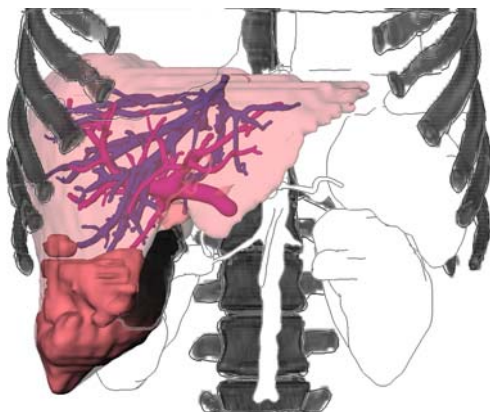
(b) Der Kontext wird mit einfachen Silhouetten dargestellt. Der fokusnahe Kontext wird mit einem zusätzlichen Shading versehen.



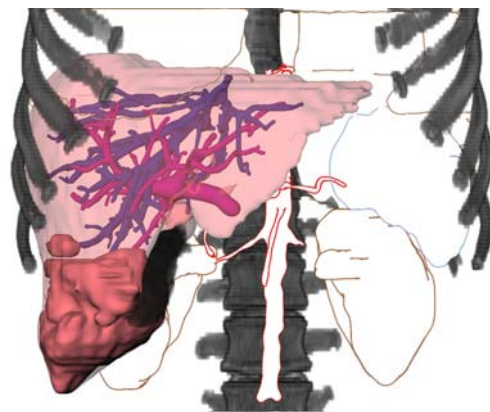
(c) Der Kontext wird per Volumen-Rending dargestellt und der fokusnahe Kontext zusätzlich mit Silhouetten versehen.



(d) Nur der fokusnahe Kontext wird mittels DVR dargestellt, der reine Kontext wird mittels Silhouetten angezeigt.



(e) Wie Variante 3.7(d), nur dass der Hintergrund des reinen Kontextes nicht dargestellt wird.



(f) Darstellung mit farbigen Silhouetten, Kochen und Gallenblase wurden nicht mit Silhouetten umrandet.

Abbildung 3.7: Verschiedene Varianten zur Abstufung des Kontextes. Die Leber ist bei allen Bildern im Fokus.

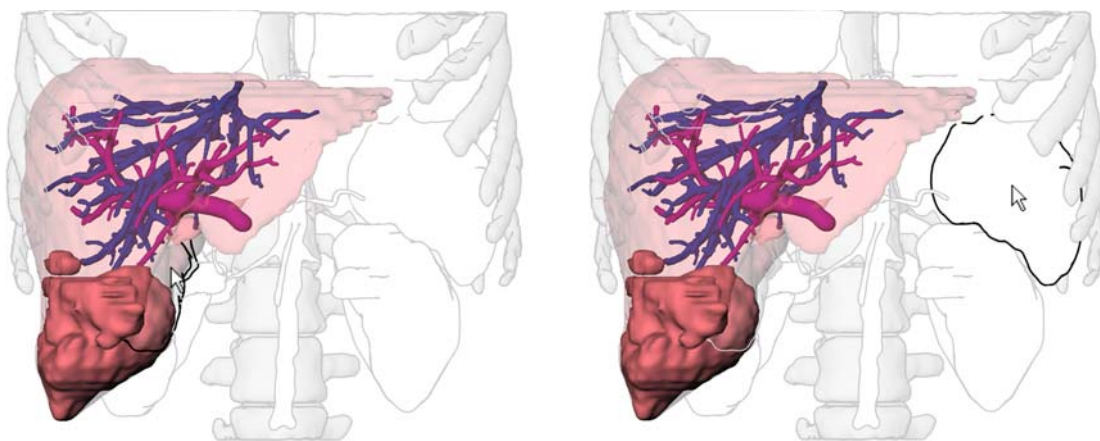
Teile besser zu sehen sind. Die Schraffur wird nicht über das Volumen-Rendering gelegt, da durch das Volumen-Rendering selbst Informationen aus dem Inneren der Struktur sichtbar werden, die sonst wieder überdeckt werden würden.

In Abbildung 3.7(d) wurden die fokusnahen Objekte mit Volumen-Rendering dargestellt. Die Kontextobjekte wurden ausschließlich über Silhouetten angedeutet. Das Innere der Kontextobjekte überdeckt dabei nicht die restliche Darstellung, wodurch der hintere Teil der Rippenbögen zu sehen ist. Bei den Abbildungen 3.7(e) und 3.7(f) wurde das Durchscheinen durch die Kontextobjekte verhindert. Um die Kontextobjekte untereinander noch etwas besser differenzieren zu können, wurden die Silhouetten eingefärbt.

Weitere Möglichkeiten zur Differenzierung zwischen fokusnahem und reinem Kontext sind im nächsten Abschnitt beschrieben.

3.2.4 Parametereinstellung durch die 3D-Interaktion

Damit der Nutzer eine Rückmeldung darüber bekommt, welches Objekt er auswählen würde, wenn er an der momentanen Position die Maustaste drückt, muss das Objekt gesondert hervorgehoben werden. Da stärkere Silhouetten ungeeignet sind, um ein Objekt vom Kontext in den fokusnahen Bereich zu überführen, kann diese Technik zur Hervorhebung der Auswahl verwendet werden. In Abbildung 3.8 ist zu sehen, wie einmal die Gallenblase und einmal die Milz per Maus angewählt wird. Geeignete Maßnahmen müssen getroffen werden, wenn das gewünschte Objekt von einem anderen umschlossen wird (z.B. ein Tumor in einem Organ). Hier kann ein Auswahlfeld angezeigt oder das Objekt mit der kleineren Bounding Box ausgewählt werden.



(a) Die Gallenblase ist im Fokus der Maus.

(b) Die Milz ist im Fokus der Maus.

Abbildung 3.8: Zur Zeit ist die Leber im Fokus. Das Objekt, das beim Drücken der Maustaste ausgewählt werden würde, wird durch eine stärkere Silhouette hervorgehoben.

Wenn ein Objekt in den Fokus geholt wird, muss es aus seinem bisherigen Visualisierungsstil in den Fokus-Stil und alle anderen Objekte in den Kontext-Stil überführt werden. Ein plötzliches Wechseln in den neuen Stil ist zu vermeiden, da es zur Desorientierung des Anwenders führen kann. Aus diesem Grund muss mit Hilfe des *Level-of-Detail* langsam in den jeweiligen Stil überblendet werden, was im folgenden erläutert wird.

Level-of-Detail

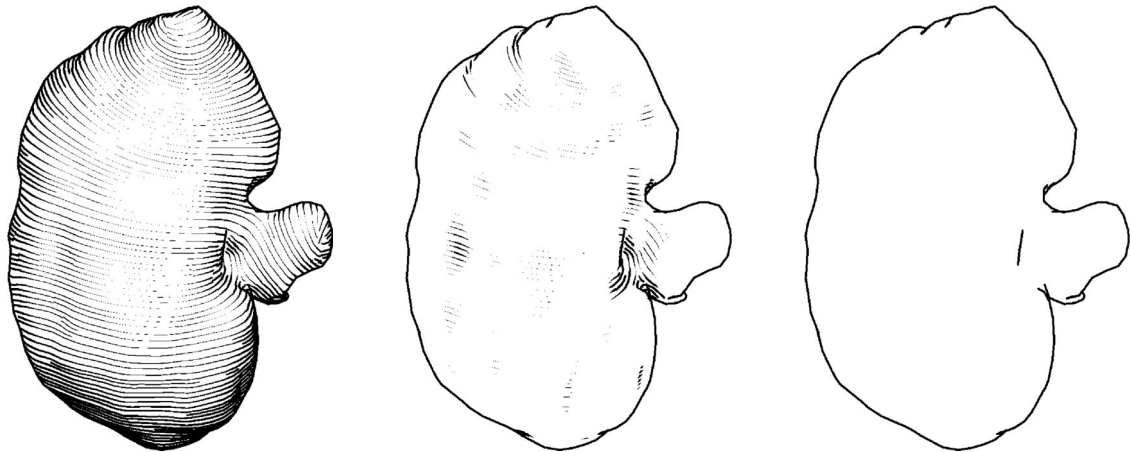
Die verschiedenen Stufen der Abstraktion lassen sich über einen *Level-of-Detail* (LOD) beschreiben. In der Computergrafik wird dieses Verfahren benutzt, um Objekte in größerer Entfernung mit weniger Detail darzustellen. Diese Vorgehensweise wird genutzt, um die Abstraktionsstufen zwischen Fokus und Kontext zu beschreiben. Es gibt verschiedene Wege, ein Objekt aus dem Fokus soweit zu abstrahieren, dass es kaum noch wahrgenommen wird. Welche Art und Weise am besten ihren Zweck erfüllt, wird mit Hilfe der Evaluierung in Kapitel 5 herausgefunden. Die Wirkungsweise kann am besten grafisch ermittelt werden. An dieser Stelle wird anhand von drei Beispielen auf die möglichen Detaillierungsgrade eingegangen. Die Beispiele geben einen Überblick zur Abschwächung der verschiedenen Techniken:

- Ausblendung der Schraffur
- Ausblendung der farbigen flächenhaften Darstellung in eine s/w Liniengrafik
- Ausblendung des Volumen-Renderings bei zusätzlichem Einsatz von Silhouetten

In Abbildung 3.9 wird ein schraffiertes Objekt vom fokusnahen Kontext in den reinen Kontext überführt. Die Schraffur wird hierbei langsam ausgeblendet. Während die Schraffur im ersten Bild über das gesamte Organ verläuft, ist sie im zweiten Schritt nur noch an charakteristischen Stellen eingeblendet. Die Schraffur wird hier nur für stark gekrümmte Flächen dargestellt. Im letzten Bild sind nur noch die Silhouetten und die Merkmalslinien abgebildet. Die Schraffur kann zusätzlich zur Kontextabstufung über einen LOD ausgedünnt werden, welcher die Größe des Objektes auf dem Bildschirm als Bezugsgröße nimmt.

Abbildung 3.10 zeigt die Ausblendung für das Volumen-Rendering. Hier wird die Transferfunktion initial so eingestellt, dass die Haut des Patienten zu sehen ist. Die Transferfunktion wird dann so modifiziert, dass die Strukturen im Inneren des Körpers sichtbar werden. Im letzten Schritt werden nur die Strukturen über das Volumen-Rendering wiedergegeben, die auch zuvor segmentiert worden sind. Alle segmentierten Strukturen werden zusätzlich durch Silhouetten hervorgehoben. Zur besseren Sichtbarkeit werden die schwarzen Liniensegmente weiß hinterlegt.

In Abbildung 3.11 wird gezeigt, wie in mehreren Schritten die Leber in den Fokus genommen wird und das gesamte Umfeld in die Kontext-Darstellung überführt wird.



(a) Schraffur über das gesamte Organe.

(b) Schraffur nur an Stellen mit deutlicher Krümmung

(c) Darstellung nur über Silhouette.

Abbildung 3.9: Ausblendung der Schraffur am Beispiel der rechten Niere.



(a) Darstellung der Hautoberfläche.

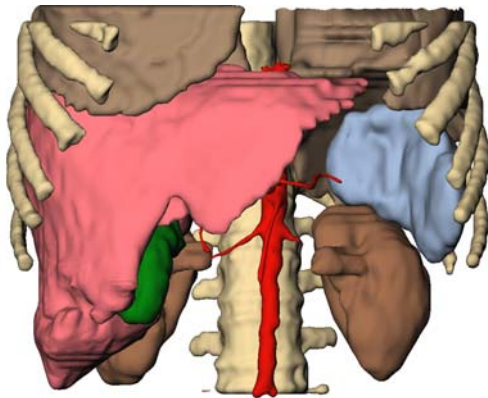
(b) Das Ändern der Transparenzfunktion gestattet Einblick in das Halsinnere.

(c) Die nicht segmentierten Strukturen werden aus dem Volumen-Rendering ausgespart.

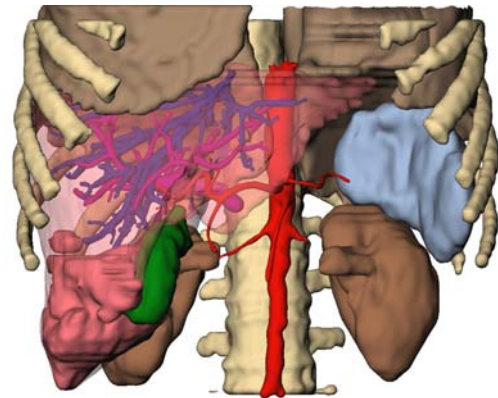
Abbildung 3.10: Der Kontext wird über verschiedene Stufen ausgeblendet. Alle segmentierten Strukturen werden beim Volumen-Rendering zusätzlich durch s/w-Silhouetten hervorgehoben.

Abbildung 3.11(a) zeigt die Ausgangssituation: alle Objekte sind gleichermaßen hervorgehoben. Nachdem die Leber fokussiert wurde, wird sie in Abbildung 3.11(b) transparent dargestellt, um die inneren Strukturen zu zeigen. Der immer noch flächenhafte Kontext wird immer transparenter dargestellt, wobei zusätzlich die Silhouetten in der passenden Einfärbung gezeichnet werden (Abbildungen 3.11(c) und 3.11(d)). In Abbildung 3.11(e) sind nur noch die farbigen Silhouetten zu sehen, welche letztendlich in Abbildung 3.11(f) s/w dargestellt werden.

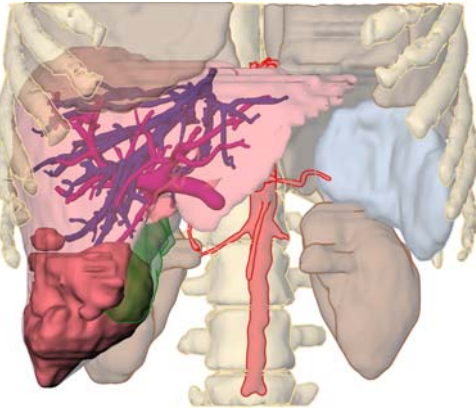
Es gibt noch eine ganze Reihe von Möglichkeiten, vom Fokus in den Kontext zu überblenden. Die vorgestellten Überblendungsmethoden können beliebig kom-



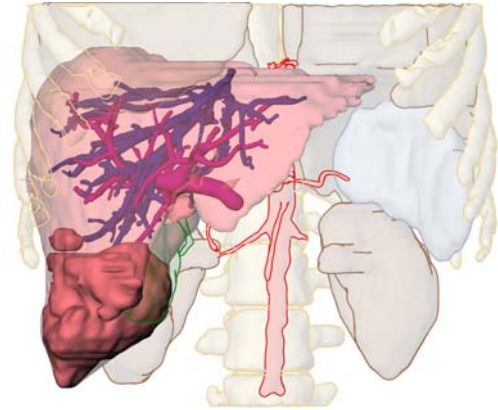
(a) Das gesamte Bild ist im Fokus.



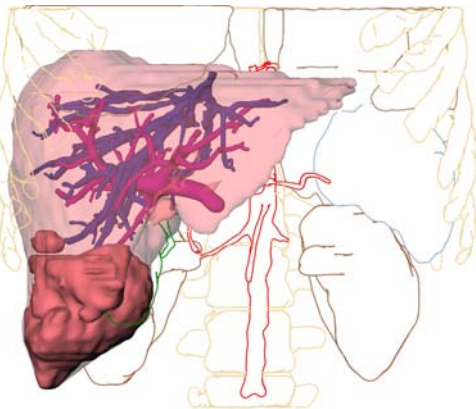
(b) Die Leber ist im Fokus.



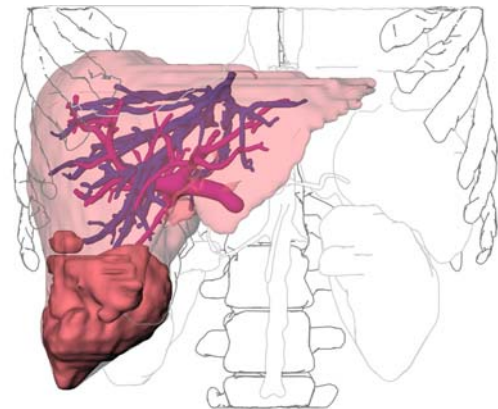
(c) Transparente Darstellung mit Silhouetten.



(d) Weitere Abschwächung.



(e) Darstellung nur durch farbige Silhouetten.



(f) Darstellung durch farblose Silhouetten.

Abbildung 3.11: Der flächenhafte Kontext wird über verschiedene Stufen ausgeblendet.

biniert werden. Die Darstellungsparameter für den fokusnahen Kontext und den reinen Kontext, in die die Strukturen überführt werden, können auch an einen der Vorschläge aus Abbildung 3.7 angepasst werden.

3.3 Das Rendering-Verfahren

Benötigt wird ein Rendering-Verfahren, in dem sich die drei Visualisierungsmethoden – flächenhafte Darstellung, Liniengrafiken und Volume Rendering – miteinander kombinieren lassen. Da zur Darstellung einzelner Klassen von Strukturen vordefinierte Parametrisierungen verwendet werden sollen, ist ein auf Szenengraphen basierendes Modell von Vorteil [STRAUSS und CAREY, 1992]. In Szenengraphen wird strikt getrennt zwischen Knoten

- die zur Transformation von Objekten dienen,
- die die geometrischen Daten selbst enthalten und
- die die Visualisierung der Geometrie beschreiben.

Szenengraphen werden üblicherweise in einer festgelegten Reihenfolge traversiert. In dieser Arbeit wird eine Traversierung von oben nach unten und von links nach rechts vorgenommen. Transformationen oder Visualisierungseigenschaften wirken sich auf alle nachfolgenden Knoten aus, sofern sie nicht durch spezielle Knoten wieder rückgängig gemacht werden. Auch das Volumen-Rendering lässt sich in ein Szenengraph-Modell integrieren.

Die Knoten, die die Darstellung anderer Geometrie-Knoten beschreiben, können an mehreren Stellen im Graphen wiederverwendet werden. Dadurch wird den Objekten der Szene ein einheitlicheres Aussehen verliehen. Alle Objekte können außerdem gleichzeitig mit Hilfe eines Visualisierungs-Knotens in eine andere Darstellung überführt werden.

Normalerweise reicht es zur flächenhaften Darstellung von Dreiecksnetzen aus, nur die Positionen der Dreiecke zu kennen, die das Drahtgitter repräsentieren. Ob und wie die Dreiecke über das Drahtgittermodell mit anderen Dreiecken verknüpft sind, ist für die Darstellung irrelevant. Im Gegensatz dazu ist es zur Darstellung von Liniengrafiken notwendig, die Konnektivitätsinformationen der Dreiecke im Szenengraphen zu halten. Bei der späteren Implementierung muss daher darauf geachtet werden, dass diese Informationen verarbeitet werden können.

Two-Step-NPR-Rendering

Es soll möglich sein, eine Schraffur für Objekte zu generieren, die wie in Abschnitt 2.2.3 beschrieben parametrisiert wird. Daher ist eine objektbasierte Generierung der Liniengrafiken notwendig.

Nachteilig bei der objektbasierten Generierung von Liniengrafiken ist, dass die Linien unabhängig von ihrer tatsächlichen Sichtbarkeit erzeugt werden. Es müssen alle Liniensegmente nachträglich entfernt werden, die von anderen Objekten oder auch von dem Objekt selbst verdeckt werden. Als einfache und auch schnelle Methode zur Behebung dieses Problems gibt es eine Lösung: In einem ersten Schritt wird der z -Buffer für alle in der Szene befindlichen Objekte generiert, ohne dabei die Objekte selbst darzustellen. In einem zweiten Schritt wird die Liniengrafik erzeugt, wobei in einem dritten Schritt alle Linien wieder verworfen werden, die laut z -Buffer-Information nicht sichtbar sind. Sonderfälle treten hierbei an den Silhouetten der Objekte auf, da hier durch den diskreten Aufbau des z -Buffers Liniensegmente fälschlicherweise gelöscht bzw. erhalten bleiben [ISENBERG et al., 2002].

Pipeline-Prinzip

Um den verschiedenen Strukturen unterschiedliche Parameter zuzuweisen, wobei die Parameter ein gewisses Maß an Ähnlichkeit aufweisen sollen, eignet sich die Verwendung von Rendering-Pipelines. Bei diesem Ansatz wird zuerst eine initiale Datenstruktur erstellt und diese dann in separaten, nachfolgenden Schritten modifiziert. Das entspricht einer Verfeinerung der Stilisierung durch die Visualisierungs-Knoten aus dem Szenengraphen-Prinzip, da hier ein Visualisierungs-Knoten in mehrere einzelne Schritte zerlegt wird. Diese einzelnen Knoten lassen sich ebenfalls mehrfach in die Szenengraph-Struktur integrieren, sodass er für diese Arbeit verwendet wird. Ein Beispiel zur Anwendung einer solchen Pipeline ist in Abbildung 3.12 gegeben.

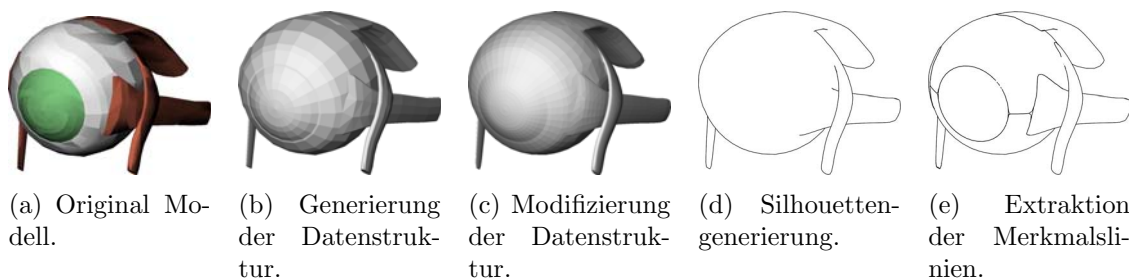


Abbildung 3.12: Das Pipeline-Prinzip. Von einem Modell (a) ausgehend wird die Datenstruktur erzeugt, die zur Extraktion der Liniengrafiken notwendig ist (b). Im nächsten Schritt wird die Struktur verfeinert (c). Die Silhouette wird erzeugt (d) und als letztes werden die Merkmalslinien extrahiert (e).

3.4 Konstruktion des Szenengraphen

Die aus den im letzten Abschnitt aufgestellten Vorgaben resultierende Szenengraphen sind kompliziert im Aufbau, sodass darauf nun detailliert eingegangen wird. Die Komplexität beruht vor allem auf der Kombination der drei Stile zur linienhaften, flächenhaften und Volumen-Darstellung. Um den Aufbau leichter verständlich zu machen, wird zuerst ein Szenengraph erläutert, der ausschließlich flächenhaftes Rendering realisiert. Diese Basis wird dann stückweise erweitert, um am Ende die volle Funktionalität zu erreichen. Die genaue Bedeutung der verwendeten Symbole kann in Anhang A nachgeschlagen werden.

Zu Beginn werden die Reinformen der einzelnen Visualisierungsstile erläutert. Einige Darstellungen können aus der Kombination dieser Techniken jedoch nicht erzeugt werden. Auf diese Spezialfälle wird im nächsten Abschnitt ausführlich eingegangen.

3.4.1 Szenengraph zur flächenhaften Visualisierung

Bei der Verwendung eines Szenengraphen zur flächenhaften Darstellung von Objekten kommt es nicht auf eine feste Reihenfolge der Knoten an, um die Szene korrekt zu rendern. Bei dem Aufbau ist lediglich darauf zu achten, dass aufgrund der Traversierung das gewünschte Ergebnis erzielt wird. Die Transformationen und die Materialeigenschaften müssen dazu an der passenden Stelle eingehangen werden.

In Abbildung 3.13 ist ein einfacher Szenengraph skizziert. Vom Ursprung ausgehend wird zuerst der Material-Knoten passiert, der die Farbe in Rot ändert. Das wirkt sich auf den folgenden Geometrie-Knoten zu Kugeldarstellung aus. Anschließend wird die gesamte nachfolgende Geometrie mit Hilfe des Translations-Knotens verschoben. Auch der Würfel würde rot dargestellt werden, wenn die Farbe nicht vorher in blau geändert werden würde.

3.4.2 Volumen-Rendering

Direktes Volumen-Rendering kann zur Visualisierung von nicht segmentierten Daten genutzt werden. Das Volumen-Rendering kann jedoch beim Vorhandensein von Segmentierungsergebnissen auch modifiziert werden. Mit Hilfe der Masken der segmentierten Gebiete lassen sich nur bestimmte Teile eines Datensatzes anzeigen oder entfernen. In Abbildung 3.14 wird mit Hilfe einer Maske nur ein Teil des gesamten Volumens gerendert.

Das Rendering von Volumendaten und flächenhaften Modellen lässt sich auch miteinander kombinieren. Einzige Einschränkung ist, dass das Volumen-Rendering als letzter Schritt in dem Szenengraphen behandelt wird. Das Volumen-Rendering

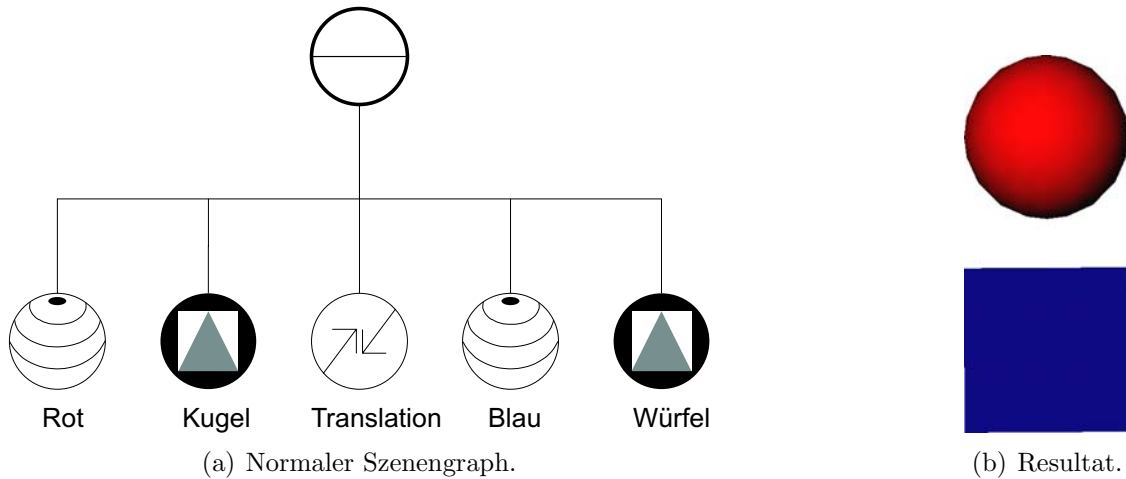


Abbildung 3.13: Die Translation wirkt sich nur auf den Würfel aus. Die rote Einfärbung wird durch die Blaue ersetzt.

nimmt den gesamten Bereich ein, sodass der z -Buffer falsch gesetzt wird und Modelle, die innerhalb des Volumendatensatzes liegen, nicht gezeichnet werden. Um flächenhafte Modelle korrekt darzustellen, muss die Tiefeninformation fehlerfrei berechnet worden sein. Wenn die Modelle jedoch gezeichnet werden, bevor das Volumen-Rendering den z -Buffer manipuliert, wird eine korrekte Darstellung generiert.

Da der in Abbildung 3.13 gezeigte Szenengraph hier am Ende nur um einen Knoten zum Rendern des Volumens erweitert wird, wird dieser nicht extra grafisch erläutert.

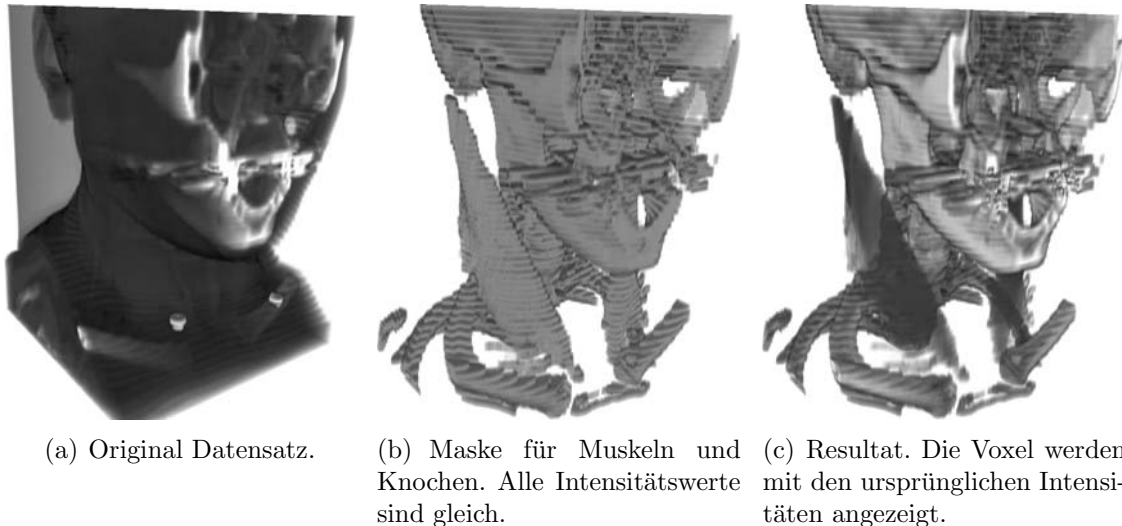


Abbildung 3.14: Reduzierung der Volumendaten auf Knochen und Musculus sternocleidomastoideus.

3.4.3 NPR Szenengraph

Der Szenengraph zur Erstellung von Liniengrafiken lässt sich in drei Schritte aufteilen. Die Vorgehensweise ist in Abbildung 3.15 erläutert.

- Datenstrukturen, Liniengrafiken und z -Buffer erzeugen
- Linien reduzieren
- Linien zeichnen

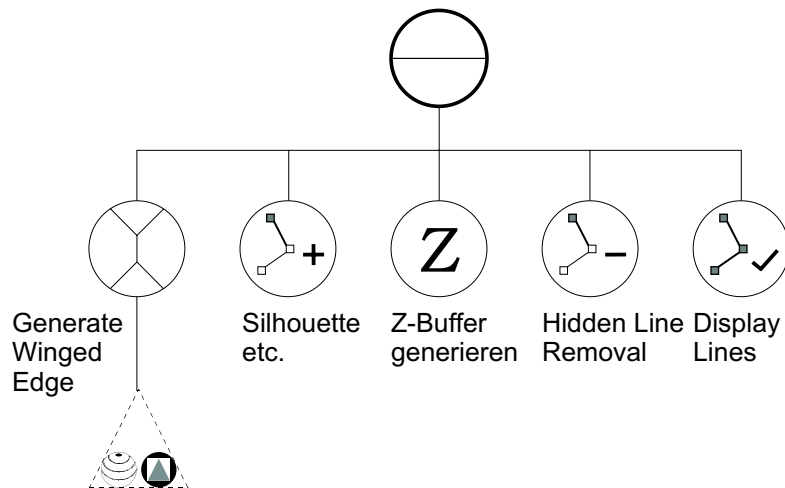


Abbildung 3.15: Die Pipeline des NPR-Szenengraphen unterteilt sich in mehrere Schritte. Zuerst werden die zur Berechnung benötigten Daten aus den Objekten erzeugt. Anhand dieser werden alle Linien generiert. Anschließend wird der z -Buffer der Objekte gerendert, um danach alle nicht sichtbaren Linien zu entfernen und dann zu zeichnen.

Im ersten Schritt werden aus den Geometriedaten die Daten erzeugt, die zur Generierung von Liniengrafiken notwendig sind. Anschließend werden alle Linien auf den Objekten erzeugt (Silhouetten, Merkmalslinien, Schraffurlinien). Die Generierung ist dabei unabhängig von ihrer eigentlichen Visualisierung. Die Farbgebung der Linien wird später vorgenommen. Im Anschluss an die Liniengenerierung wird der z -Buffer gerendert, um die Sichtbarkeiten zu berechnen. Das Objekt wird ausschließlich in den z -Buffer gerendert, es erfolgt keine Darstellung auf dem Bildschirm.

Im zweiten Schritt werden anhand des z -Buffers alle nicht sichtbaren Linien entfernt. Weitere Methoden zur Reduzierung der Linien werden bei Bedarf ebenfalls angewendet (Cut Away View, hell beleuchtete Regionen). Im finalen Schritt werden die verbleibenden Linien dargestellt.

Sollen zusätzlich zu den Liniengrafiken auch flächenhafte Modelle dargestellt werden, so müssen diese vor dem ersten Schritt generiert werden, da sonst der für die Liniengrafiken gesetzte z -Buffer das korrekte Zeichnen der Modelle verhindern würde. Dies funktioniert jedoch nur, wenn alle Modelle opak gezeichnet werden.

Sollen die flächenhaften Modelle transparent gezeichnet werden, aber trotzdem die Generierung der dahinter liegenden Linien verhindern, treten hier gesonderte Anforderungen auf. Durch die transparente Darstellung wird der z -Buffer nicht gesetzt, wodurch nicht bekannt ist, dass diese Linien entfernt werden müssen. Das Rendern des z -Buffers muss an dieser Stelle auch für transparente Objekte erzwungen werden. Andererseits verhindert das Rendern des z -Buffers für transparente Modelle nicht nur Darstellung der Liniengrafiken, sondern auch die Darstellung von flächenhaften Modellen, die von dem nun nicht mehr transparenten Objekt verdeckt werden. Die Lösung dieses Problems wird im folgenden Abschnitt präsentiert.

3.4.4 Kombinierung der drei Darstellungsarten

Aus den beschriebenen Einschränkungen, wonach das Volumen-Rendern nach der flächenhaften Darstellung und die flächenhafte Darstellung vor der NPR-Darstellung erfolgen muss, ergeben sich Forderungen bei der Kombination der drei Techniken. Zum besseren Verständnis ist der Szenengraph in Abbildung 3.16 noch einmal dargestellt. Der komplette Render-Vorgang lässt sich in drei Schritte unterteilen, die leicht von den Schritten des reinen NPR-Renderers abweichen:

1. z -Buffer für linien- und flächenhafte Darstellung erzeugen,
2. Linien in einem Schritt generieren und reduzieren, anschließend den gesamten z -Buffer löschen und
3. Liniengrafiken und flächenhafte Modelle zeichnen, anschließend Volumen-Rendern zeichnen.

Die flächenhafte Darstellung wird auch hier zuerst generiert. Allerdings wird nur der z -Buffer der Objekte gerendert, unabhängig davon, ob das Objekt transparent oder opak dargestellt wird. Zusätzlich wird der z -Buffer für die Objekte erzeugt, die als Liniengrafik dargestellt werden sollen.

Als nächstes werden die Linien auf den Objekten erzeugt. Die Linienreduktion wird ebenfalls durchgeführt, da der z -Buffer bereits gesetzt ist. Für die Linien wird getrennt gespeichert, wie ihre räumliche Lage ist. Eine rein bildbasierte Positionierung ist nicht ausreichend. Nachdem die Extraktion der Linien abgeschlossen ist, wird der z -Buffer wieder gelöscht.

Als letztes werden alle Objekte auf den Bildschirm gerendert. Da im ersten Schritt nur der z -Buffer gerendert wurde, treten keine Überzeichnungen der transparenten Gebiete auf. Die Linien können aufgrund der separaten Speicherung der räumlichen Lage trotz Zerstörung des z -Buffers mit korrekter Tiefeninformation dargestellt werden. Abschließend wird das Volumen in die Darstellung gerendert. Bevor die Szene gerendert werden kann, muss festgelegt werden, in welchem Stil ein Objekt gerendert werden soll. Zusätzlich muss abhängig von der Fokussierung entschieden werden, welche Linien für ein NPR-Objekt erzeugt werden müssen.

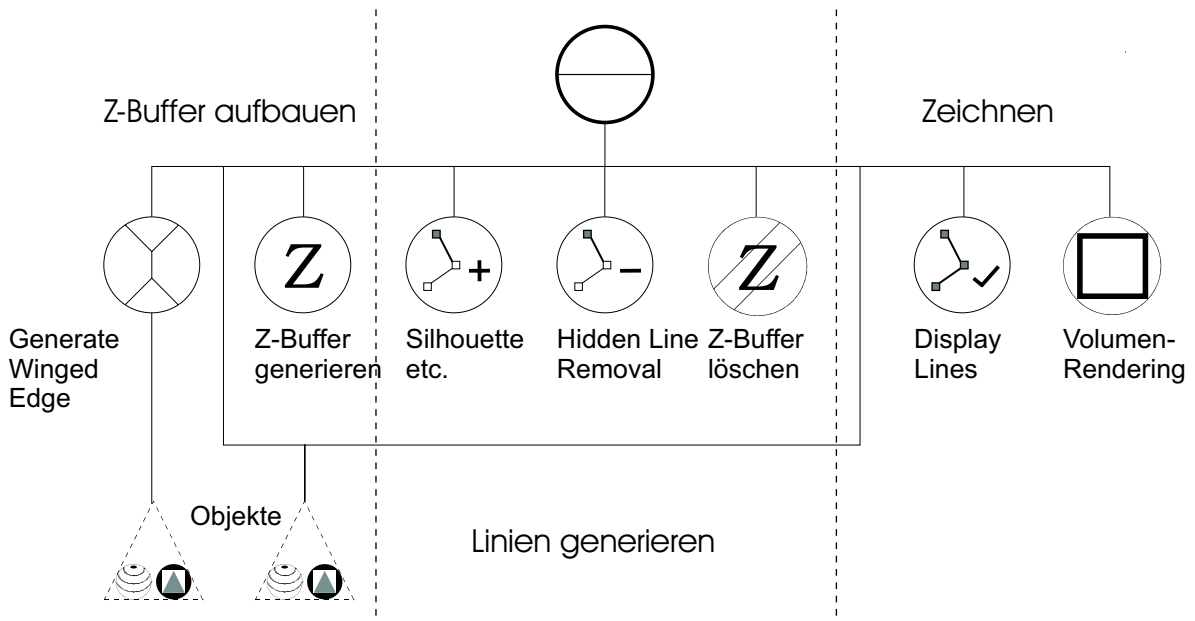


Abbildung 3.16: Bei dem kombinierten Szenengraphen wird zuerst der z-Buffer für alle Modelle gerendert. Anschließend werden alle Linien erzeugt und anhand des z-Buffers reduziert. Der z-Buffer wird anschließend gelöscht, um alle Objekte darstellen zu können.

3.4.5 Level-of-Detail

Wie detailliert ein Objekt als Liniengrafik dargestellt wird, wird mit einem Level-of-Detail-Knoten beschrieben. Dabei wird wie in Abbildung 3.17 vorgegangen. Der gezeigte Szenengraph steht dabei stellvertretend für den Liniengenerierungs-Knoten aus Abbildung 3.16.

Im geringsten Detaillierungsgrad wird das Objekt nur per Silhouette dargestellt. Die Weiche an der Spitze des Graphen verweist dabei auf den ganz linken Knoten (der Silhouette). In der nächsten Abstufung werden Silhouetten und Merkmalslinien generiert. Diese werden in einem Gruppierungs-Knoten zusammengefasst, wodurch der Silhouetten-Knoten wiederverwendet werden kann. Bei der zusätzlichen Einblendung der Schraffur wird analog vorgegangen.

Mit Hilfe dieser Vorgehensweise können fließende Übergänge zwischen den einzelnen Darstellungsstilen, wie sie in Abschnitt 3.2.4 beschrieben wurden, realisiert werden.

3.4.6 Transparente Liniengrafiken

In manchen Fällen ist es von Interesse, dass ein Objekt, das liniengrafisch dargestellt wird, ein dahinter liegendes Objekt nicht verdeckt, welches ebenfalls nur liniengrafisch dargestellt wird (Abbildung 3.18(a)). Das Objekt soll also tatsächlich

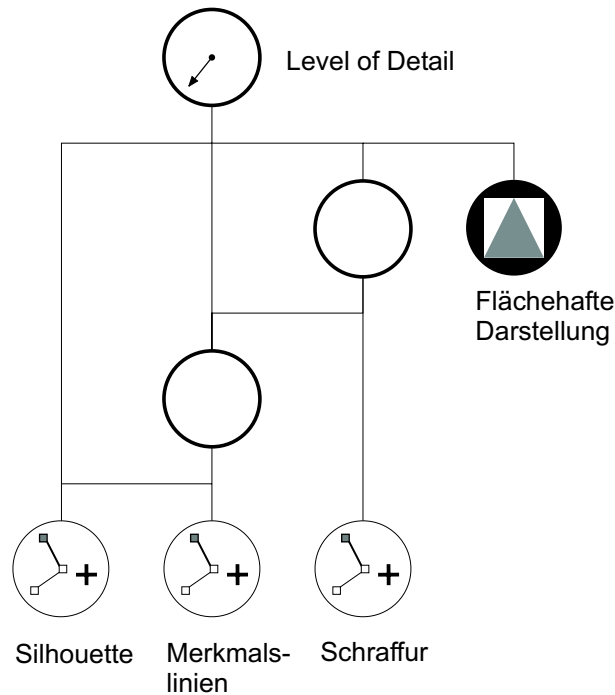


Abbildung 3.17: Der Schalter wählt eines der Kinder aus, um unterschiedlich detaillierte Darstellungen zu erzeugen.

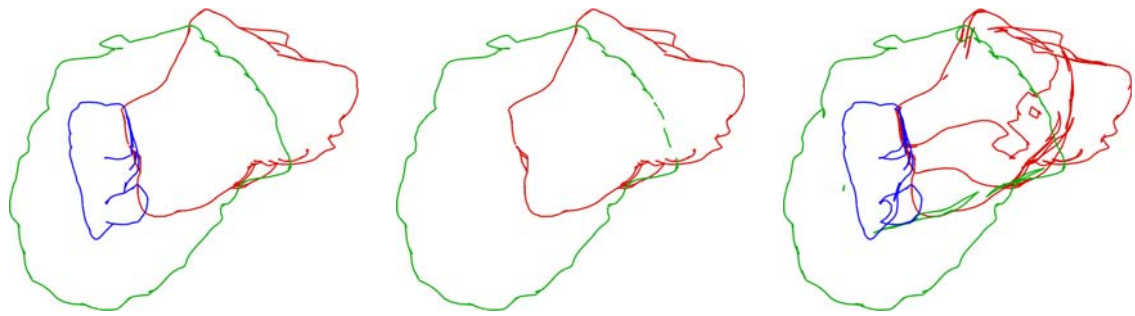
transparent sein. Durch das bisher beschriebene Vorgehen ist das jedoch nicht möglich. Wie in Abbildung 3.18(b) verhindert der gesetzte z -Buffer die Zeichnung des verdeckten Objektes. Der z -Buffer muss aber für jedes Objekt berechnet werden, da sonst Linien, die durch das Objekt selbst verdeckt werden, nicht entfernt werden (Abbildung 3.18(c)).

Das Problem kann behoben werden, indem die Liniengrafiken für jedes Objekt getrennt nach Abbildung 3.16 generiert werden. Für jedes Objekt muss der korrekte z -Buffer berechnet werden, bestehend aus den flächenhaften Objekten und dem Objekt selbst. Nachdem alle Linien für ein Objekt erzeugt wurden, muss der z -Buffer wieder gelöscht und für das nächste Objekt neu aufgebaut werden.

3.5 Zusammenfassung

Für alle Parameter wurden soweit wie möglich initiale Werte bestimmt, mit Hilfe derer eine Darstellung ohne weitere Interaktion erstellt werden kann. Die meisten der Parameter konnten anhand ihrer Verwendung in anatomischen Lehrbüchern und Atlanten empirisch bestimmt werden.

Für alle anderen Parameter wurden Verfahren entwickelt, mit denen die Parameter aus der Interaktion heraus automatisch gesetzt werden können. Beispiel hierfür ist



(a) Transparente Objekte. Der z -Buffer wurde lokal für jedes Objekt erzeugt.

(b) Liniengenerierung mit dem bisher beschriebenen Verfahren.

(c) Liniengenerierung ohne Hidden Line Removal.

Abbildung 3.18: Generierung separater z -Buffer zur Darstellung von transparenten Liniengrafiken.

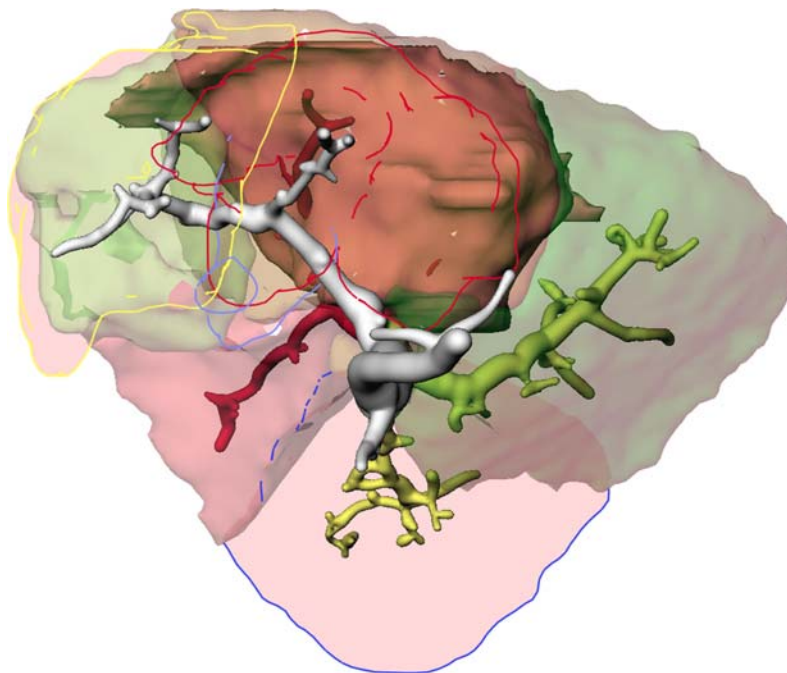


Abbildung 3.19: Bei dieser Darstellung der Leber wurden die Versorgungsgebiete der Leber, die vom Tumor infiltriert wurden, mit Silhouetten dargestellt. Um dahinterliegende Gebiete nicht zu verdecken, wenn sie ebenfalls nur mit Silhouetten gerendert werden, werden die z -Buffer einzeln generiert.

die Abblendung eines Objektes, wenn ein anderes in den Fokus geholt wird. Es wurden diverse Vorschläge gemacht, mit denen sich Objekte von einem Visualisierungsstil stufenlos in einen anderen überführt werden können.

Für einige Parameter konnten jedoch keine Vorgaben gemacht werden. Es ist u.a. unklar, welche Objekte im Kontext als Volumen-Rendering oder als Liniengrafik dargestellt werden sollten. Um genauere Aussagen über die Parametrisierung treffen zu können, muss zuerst eine Evaluierung durchgeführt werden.

Es wurde ein Konzept entwickelt, um die Visualisierungstechniken miteinander verbinden zu können. Zur gemeinsamen Darstellung werden alle Objekte in einem Szenengraphen angeordnet. Der komplizierte Aufbau des Graphen wurde zunächst in Teilbäume zerlegt und an mehreren Beispielen veranschaulicht. Sonderfälle wie transparente Objekte als linien- oder flächenhafte Darstellungen wurden erläutert. Zum Abschluss wurde ein Szenengraph präsentiert, in dem sich alle Visualisierungsstile vereinen lassen.

Im folgenden Kapitel wird beschrieben, wie die vorgeschlagenen Lösungen realisiert werden können.

4 Implementierung

In diesem Kapitel wird die Umsetzung der Ideen und gesteckten Ziele beschrieben. Zuerst werden die Programme und Bibliotheken vorgestellt, mit deren Hilfe die Arbeit implementiert wird. Da diese Bibliotheken nicht für die Bedürfnisse dieser Arbeit ausgelegt sind, werden die notwendigen Anpassungen beschrieben. Abschließend wird die konkrete Umsetzung der gesteckten Ziele geschildert.

4.1 Werkzeuge zur Implementierung

Zur Umsetzung der gestellten Anforderungen an die neue Methode wurden die Entwicklungsumgebungen ILAB [HAHN et al., 2003] und OPENNPAR [HALPER et al., 2003a] gewählt. ILAB ist speziell für die medizinische Bildverarbeitung und Visualisierung entwickelt worden. OPENNPAR ist eine NPR-Bibliothek, mit der auch Liniengrafiken anhand von Drahtgittermodellen generiert werden können. Beide Umgebungen setzen auf der 3D-Grafikbibliothek OPEN INVENTOR auf, wodurch eine Kombination von OPENNPAR und ILAB möglich wird.

ILAB nutzt eine andere OPEN INVENTOR Version als OPENNPAR. Auf Probleme, die sich daraus ergeben, soll hier nicht im Besonderen eingegangen werden. Da OPEN INVENTOR ein auf Szenengraphen basierendes System ist, in dem Klassen verschiedener Funktionalität als Knoten in den Graphen eingehangen werden, wird häufiger von dem Wort *Knoten* als Synonym für *Klasse* Gebrauch gemacht.

4.1.1 Open Inventor

Bei OPEN INVENTOR handelt es sich um eine objektorientierte Grafikbibliothek, die auf den Grafikroutinen von OpenGL aufsetzt [WERNECKE, 1994a,b]. Ziel von OPEN INVENTOR ist es, Szenen darzustellen, deren Eigenschaften in Echtzeit vom Benutzer manipuliert werden können, wie z.B. der Blickwinkel, die Materialeigenschaften oder die 3D-Objekte selbst. Sämtliche Objekte werden in einem Szenengraphen zusammengefügt, wobei mit „Objekten“ in diesem Zusammenhang nicht nur Grafikprimitive gemeint sind, sondern auch Materialeigenschaften, Transformationen, Kameras etc. Beim Darstellen des Szenengraphen werden sämtliche Knoten von oben nach unten und von links nach rechts traversiert. Die Eigenschaften eines

Knotens, wie z.B. eine Translation oder eine Materialeigenschaft, wirken sich auf alle nachfolgenden Knoten aus, sofern sie nicht von einem weiteren Knoten wieder rückgängig gemacht oder überschrieben werden.

Teilbäume können unter **SoGroup**-Knoten zusammengefasst werden. Dadurch wird es möglich, diese Teilbäume an verschiedenen Stellen des Szenengraphen einzuhängen. Ein besonderer Gruppierungsknoten ist der **SoSeparator**. Alle Änderungen der Transformationsmatrix und der Materialeigenschaften, die unterhalb des **SoSeparator**s zugewiesen werden, wirken sich nur lokal auf diesen Subgraphen aus.

Alle Eigenschaften und Zustände werden mit Hilfe von so genannten Elementen zwischen den einzelnen Knoten ausgetauscht. Ändert ein Knoten beispielsweise die ambiente Farbe, so ändert er intern das **SoAmbientColorElement**. Alle nachfolgenden Knoten, die die ambiente Farbe verwenden, fordern die benötigte Information aus diesem Element an. Zusätzlich können in **OPEN INVENTOR** auch eigene Elemente definiert werden.

Ein weiteres Konzept, welches von **OPEN INVENTOR** unterstützt wird, ist die Benutzung so genannter Felder. Für sämtliche gängigen Datentypen wie Integer oder Float wurden eigene Klassen eingeführt, die die ständige Überwachung der Variablen ermöglichen. Felder können mit Sensoren verbunden werden, welche bei einer Änderung benachrichtigt werden und eine Update-Routine anstoßen, die eine Aktualisierung veranlasst. Ein besonderer Sensor ist der **SoNodeSensor**. Dieser überwacht nicht nur einzelne Felder, sondern einen gesamten Knoten. Wird ein Feld dieses Knotens geändert, wird der Sensor benachrichtigt. Zusätzlich wird er auch dann benachrichtigt, wenn sich der Subgraph dieses Knotens geändert hat. Eine manuelle Sensorbenachrichtigung ist ebenfalls möglich.

OPEN INVENTOR stellt ein ganzes Arsenal von Möglichkeiten zur Interaktion mit der Szene bereit. Die Transformation einzelner Objekte oder Teilbäume des Szenengraphen ist genauso möglich wie das Abfragen von Maus- oder Tastatur-Ereignissen. Beim Drücken der Maustaste innerhalb der Szene werden auf Wunsch sämtliche getroffenen Objekte angegeben.

Um Optimierungen bei der Darstellung des Szenengraphen durchführen zu können, meldet **OPEN INVENTOR** sämtliche Klassen in einer Datenbank an. Da z.B. nicht alle Knoten von der Änderung eines Elements beeinflusst werden, werden nur die betroffenen Knoten traversiert, was durch einen direkten Zugriff über eine Datenbank schneller durchgeführt werden kann.

4.1.2 ILab

ILAB wurde am Centrum für Medizinische Diagnosesysteme und Visualisierung **MEVIS** entwickelt und wird speziell für das Prototyping von medizinischen Applikationen eingesetzt. **ILAB** ist eine grafische Entwicklungsoberfläche, in der die

OPEN INVENTOR-Knoten mit den Bildverarbeitungsmodulen von MEVIS kombiniert werden. OPEN INVENTOR wurde um einige Klassen erweitert, durch die es möglich wird, auch Volumendatensätze in den Szenengraphen zu integrieren. Medizinische Datensätze werden direkt in dieser Umgebung segmentiert und visualisiert, sodass zur Darstellung mit NPR-Techniken alle erforderlichen Parameter über die Strukturen zur Verfügung stehen.

Die Klassen von OPEN INVENTOR und die Bildverarbeitungsmodule werden hier als Module in eine grafische Oberfläche eingefügt und zu einem Netzwerk verknüpft. Die beiden von OPEN INVENTOR eingeführten Konzepte – der Szenengraph und die Felder – werden von ILAB direkt unterstützt. Alle Felder einer OPEN INVENTOR Klasse werden in dem zugehörigen Panel angezeigt und können mit Feldern anderer Klassen per *Drag & Drop* verknüpft werden.

Um nicht alle Felder einer Klasse manuell in ILAB eintragen zu müssen, nutzt ILAB einen Randeffekt der OPEN INVENTOR-Datenbank. Die Datenbank speichert unter anderem auch alle in der Klasse enthaltenen Felder. Zu den Feldern wird nicht nur ein Zeiger auf den Speicherbereich abgelegt, sondern auch der Name, der vom Programmierer zugewiesen wurde. ILAB entnimmt all diese Informationen aus der Datenbank und generiert daraus automatisch eine grafische Benutzeroberfläche, über die die Klasse gesteuert werden kann. Allerdings gibt es keine andere Möglichkeit zur Steuerung der Knoten. Ein Zugriff über Methoden oder einfache Variablen des Knotens ist nicht möglich.

Mitunter ist es sinnvoll, Netzwerke mit einer bestimmten Funktionalität getrennt abzuspeichern und als Makro in ein anderes Netzwerk zu integrieren. Die Ein- und Ausgabeparameter des Makros, sowie die Felder der einzelnen Netzwerkkomponenten, die nach außen geführt werden sollen, können in der ILAB-Skriptsprache definiert werden. In die Skriptsprache sind außerdem die Sprachen OBJECTIVE-C und JAVASCRIPT eingebettet, wodurch auch Funktionsaufrufe und komplexe Operationen möglich sind. Um die komplizierten Netzwerke von dem Endanwender fernzuhalten und ihm eine fertige Applikation anzubieten, lässt sich das Layout des Makro-Panels mit der Skriptsprache frei gestalten und zu einem komplexen Fenstersystem ausbauen.

4.1.3 OpenNPAR

OPENNPAR ist eine Grafikbibliothek, die speziell für die Generierung von nicht-fotorealistischen Grafiken anhand von Drahtgittermodellen entwickelt worden ist. Die Möglichkeit zur Erstellung von Silhouetten, Merkmalslinien und Schraffierungen ist in dieser Bibliothek bereits integriert. Die Punktieretechnik ist nicht implementiert.

Zur Darstellung von Liniengrafiken müssen die Konnektivitätsinformationen der Dreiecke im Graphen gehalten werden. Die Funktionalität von OPEN INVENTOR

wurde dahingehend erweitert, dass diese Informationen erzeugt und in dem Szenengraphen gehalten werden. Dabei wurde der Aufbau von OPEN INVENTOR in einer geeigneten Weise genutzt, sodass die Verwendung von Pipelines möglich ist. Elemente, die normalerweise zum Speichern von Zuständen dienen, werden hier zum Weiterreichen einer Datenstruktur verwendet, mittels derer die Liniengrafiken erzeugt werden.

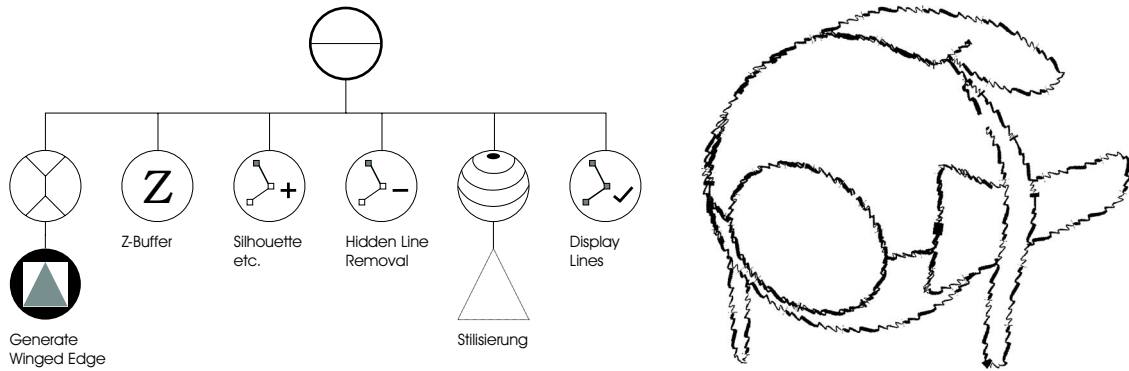
Aus den Modellen wird mit Hilfe des Knotens `SoGenerateWingedEdge` eine *Winged-Edge* Datenstruktur `SbWingedEdge` erzeugt, die die Konnektivitätsinformationen beinhaltet [BAUMGART, 1972]. Die `SbWingedEdge`-Datenstruktur wird dann mit Hilfe des `SbWingedEdgeElement` durch die Pipeline geschleust. Ein weiterer Knoten namens `SoGenerateSilhouette` erzeugt anhand der Datenstruktur die Silhouette und die Merkmalslinien. Die extrahierten Linien werden ebenfalls über Elemente durch die Pipeline weitergeleitet.

Zur Visualisierung der Winged-Edge dient der `SoWingedEdge`-Knoten. Es kann z.B. eine farblich kodierte Darstellung der Winged-Edge je nach Grad und Richtung der lokalen Krümmung ausgegeben oder der z -Buffer eines Objektes gerendert werden. Damit alle nicht sichtbaren Linien entfernt werden können, wird mit Hilfe von `SoWingedEdge` der z -Buffer berechnet, um dann mit `SoLineHiddenLineRemover` alle verdeckten Linien zu entfernen. Die Linien selbst können ohne Stilisierung mit `SoDisplayStrokes` dargestellt werden oder die Stilisierungspipeline durchlaufen.

Bisherige Nutzung von OpenNPAR

OPENNPAR wurde in erster Linie dahingehend optimiert, den Liniengrafiken Texturierungen zuzuweisen, um ihnen z.B. den Anschein von Öl- oder Graphit-Zeichnungen zu geben. Zu diesem Zweck wurde die Pipeline für die Stilisierung der Linien erweitert, wie in Abbildung 4.1(a) dargestellt (Stilisierungspipeline). Diese Form der Stilisierung ist für diese Arbeit jedoch nicht von Interesse (Abbildung 4.1(b)). Problematisch ist, dass bei dieser Bibliothek nur die Verwendung sequenzieller Szenengraphen zur Wiedergabe verschieden stilisierter Liniengrafiken möglich ist. D.h. für jede unterschiedliche Stilisierung muss eine getrennte Linien-Pipeline erzeugt werden. Die Verwendung paralleler Stilisierungen wird nicht berücksichtigt. Es ist auch nicht möglich, innerhalb einer Pipeline den einzelnen Linien getrennte Farben zuzuweisen, um diese an die Einfärbung der zugrunde liegenden Modelle anzupassen.

Zum Generieren der Schraffur sind unter OPENNPAR drei weitere Datenstrukturen notwendig, welche Informationen über die lokale Krümmung auf dem Objekt sowie über den Verlauf der Schraffur speichern [ZANDER et al., 2004]. Die Schraffur lässt sich leider aufgrund von Entwicklungsfehlern nicht auf alle Objekte anwenden. Unglücklicherweise sind davon ausgerechnet all jene Modelle betroffen, die in medizinischen Atlanten mit Schraffur versehen sind.



(a) Normaler OPENNPAR-Szenengraph. Das Erscheinungsbild der Linien wird mit einer zusätzlichen Pipeline modifiziert.

(b) Die extrahierten Liniensegmente wurden mit einer geschwungenen Textur versehen.

Abbildung 4.1: Der Fokus bei OPENNPAR liegt in der Stilisierung der Linien.

4.2 Umstrukturierung von OpenNPAR

Mit ILAB ist es durch die grafische Benutzeroberfläche möglich, schnell und einfach beliebige Änderungen an dem Szenengraphen vorzunehmen. Da OPENNPAR bisher noch nie in dieser Form genutzt wurde, hat es sich für diese Anwendung als nicht robust erwiesen. OPENNPAR war an eine relativ feste Reihenfolge der einzelnen Pipeline-Knoten gebunden. Die Bibliothek musste deswegen im Vorfeld soweit verifiziert werden, dass ein stabiles Arbeiten im Zusammenhang mit ILAB möglich ist.

Die Änderungen wurden an fast allen Knoten vollzogen, die in der Pipeline integriert sind. Um Wiederholungen zu vermeiden, werden die Änderungen exemplarisch an einem Knoten, dem `SoModifyWingedEdge`-Knoten, vorgestellt. Weiterhin werden die Modifikationen, die an der zugrunde liegenden Datenstruktur `SbWingedEdge` vorgenommen wurden, beschrieben. Die Datenstrukturen zum Erzeugen der Schraffur wurden synchron behandelt. Es wurde bei der Implementierung vor allem darauf geachtet, dass die bisherige Funktionsweise und Handhabung von OPENNPAR nicht beeinflusst wird.

Wie der Name schon sagt, dient der `SoModifyWingedEdge`-Knoten dazu, die im Szenengraphen vorhandene `SbWingedEdge` zu modifizieren. Er besitzt Methoden, um das zugrunde liegende Modell zu glätten und ist in der Lage, die Datenstruktur so zu manipulieren, dass alle enthaltenen Objekte vereinigt werden. Die Vereinigung ist aufgrund der Implementierung beispielsweise Voraussetzung, um eine Schraffur für ein Objekt erzeugen zu können.

4.2.1 Flexibilisierung von OpenNPAR

Wie bereits erwähnt, ist in OPENNPAR die Verwaltung von mehreren Szenengraphen zwar möglich, doch ist dieses System ursprünglich nur für die Verwendung eines Szenengraphen konzipiert worden. Das beinhaltet, dass jeder Knoten für die Verarbeitung von genau einer Winged-Edge ausgelegt war. Es wurde dabei weder die Existenz noch die Anzahl der Winged-Edge-Knoten im Szenengraphen überprüft.

Die Implementierung von `SoModifyWingedEdge` war so angelegt, dass von einem `SoGenerateWingedEdge`-Knoten vor dem `SoModifyWingedEdge`-Knoten ausgegangen wurde. Wenn keine `SbWingedEdge` vorhanden war, wurde auf invaliden Daten gearbeitet. Als Erstes musste daher bei allen Knoten das Vorhandensein der Daten überprüft werden.

Um festzustellen, ob die `SbWingedEdge` bereits von einem `SoModifyWingedEdge`-Knoten bearbeitet worden ist, wurde innerhalb der `SbWingedEdge` ein Flag gesetzt. Da es aber nur ein Flag zum Testen auf Modifizierungen gab, konnte nur ein `SoModifyWingedEdge`-Knoten die Daten ändern. Ein zweiter `SoModifyWingedEdge`-Knoten hätte dasselbe Flag ausgelesen und keine Berechnungen durchgeführt, da die Daten als bereits bearbeitet markiert sind.

Um die Pipeline unabhängig von solchen Flags zu machen, wurde jede Datenstruktur mit einer eindeutigen ID versehen, die bei jeder neu erstellten oder geänderten Datenstruktur neu vergeben wird. Bei jedem Durchlaufen der Pipeline testen die Knoten, ob sie beim letzten Durchlauf schon dieselbe ID bearbeitet haben und entscheiden daraufhin, ob noch Berechnungen notwendig sind. Wenn der `SoModifyWingedEdge`-Knoten eine Datenstruktur mit einer neuen ID bekommt, erzeugt er eine neue Datenstruktur mit seinen veränderten Daten und speichert sie nicht mehr wie vorher in der Original-Datenstruktur ab. Die erzeugte Datenstruktur wird dann in dem `SbWingedEdgeElement` eingetragen. In einem erneuten Durchlauf der Pipeline wird `SoModifyWingedEdge` auf eine bekannte ID stoßen und auf die bereits berechnete Datenstruktur zurückgreifen.

Neue Berechnungen müssen nicht nur durchgeführt werden, wenn sich die Datenstruktur ändert, sondern auch, wenn die Parameter des Knotens selbst modifiziert werden. Um die Felder zu überwachen, wird ein `SoNodeSensor` mit der Klasse verknüpft. Durch diesen werden alle Methoden zur Zustandsprüfung der einzelnen Felder ersetzt. Der Sensor ruft bei Veränderungen eine selbstdefinierte Methode auf, an die zusätzlich übergeben wird, welches Feld sich geändert hat. Dieselbe Methode wird auch dann aufgerufen, wenn eine Datenstruktur mit einer neuen ID empfangen wird.

Um den vollen Funktionsumfang von `SoModifyWingedEdge` unter ILAB nutzen zu können, mussten alle von außen zugänglichen Variablen und Methoden in Felder konvertiert werden. Zuvor wurden die meisten Interaktionsmöglichkeiten über

die OPENNPAR-Klassenmethoden intern angestoßen. Die Möglichkeit von Feldern wurde dabei vernachlässigt. Da Methoden nicht in der Datenbank von OPEN INVENTOR angemeldet werden, war eine Benutzung in der grafischen Benutzeroberfläche von ILAB nicht möglich.

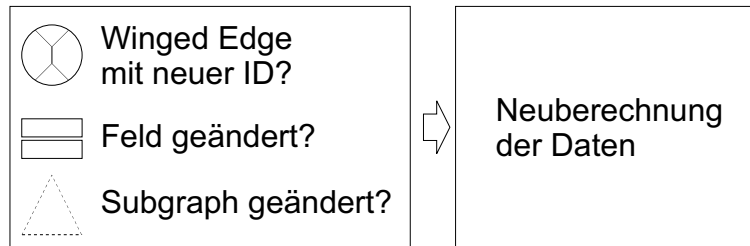


Abbildung 4.2: Der Knoten berechnet nur dann seine Daten neu, wenn sich entweder die ankommende Winged-Edge, eines seiner Felder oder der evtl. vorhandene Subgraph ändert.

4.2.2 Verwaltung mehrerer Pipelines

Der Vorteil von OPEN INVENTOR ist, dass Teilbäume des Szenengraphen in beliebig viele Stellen wiederholt eingehangen werden können. Auf diese Weise wird Speicherplatz eingespart, da nur eine Instanz der Klasse im Speicher gehalten werden muss. Zudem kann eine aufwändig parametrisierte Klasse mehrfach wiederverwendet werden. Das ermöglicht den Einsatz von *Presets*, in denen voreingestellte Werte für bestimmte anatomische Strukturen bereitgestellt werden. Dieses Konzept wird aber von OPENNPAR nicht direkt unterstützt.

Unter OPENNPAR ist es schon immer möglich gewesen, mehrere Objekte gleichzeitig darzustellen. Dies wurde dadurch realisiert, dass alle Objekte zu einem einzigen vereint werden mussten, um eine gemeinsame Rendering-Pipeline nutzen zu können. Um diese Einschränkung aufzuheben hat NETTELBECK [2003] ein Konzept entwickelt, mit dem eine bereits berechnete *SbWingedEdge* an einer beliebigen Stelle im Szenengraphen wieder eingehangen werden kann. Das wird realisiert, indem ein *SoStoreWingedEdge*-Knoten an der Stelle in den Szenengraphen gehängt wird, an dem die gewünschte *SbWingedEdge* im *SbWingedEdgeElement* vorliegt. Ein Zeiger auf die Struktur wird in einer Liste abgelegt und kann an einer anderen Stelle im Szenengraphen mit *SoSelectWingedEdge* wieder dem Element zugewiesen werden.

Dadurch wird es möglich, getrennte *SbWingedEdges* im Szenengraphen zu halten, was notwendig ist, da alle Strukturen im ersten Schritt den *z*-Buffer generieren müssen, aber im zweiten Schritt unterschiedlich dargestellt werden sollen. Bei diesem Lösungsansatz tauchen jedoch weiterhin Probleme auf:

- Das Konzept ist ausschließlich auf die *SbWingedEdge*-Datenstruktur anwendbar. Andere Datenstrukturen, die z.B. für die Generierung der Schraffur notwendig sind, werden nicht berücksichtigt. Aus diesem Grund bleibt weiterhin

4 Implementierung

für jede einzelne `SbWingedEdge` eine Stil-Pipeline zur Visualisierung notwendig.

- Aufgrund der eigentlichen Verwendung von Elementen in `OPEN INVENTOR` werden diese für jedes neue Frame neu initialisiert, d.h. Informationen zur Darstellung eines Frames sind im nächsten Frame nicht mehr vorhanden.

Der triviale Ansatz, alle Strukturen, die mit einem identischen Stil dargestellt werden, in einer `SbWingedEdge` zusammenzufassen, ist ebenfalls nicht praktikabel. Da ein einzelnes Objekt bis zu 100.000 Dreiecke besitzen kann und die Stile interaktiv geändert werden sollen, ist dieser Vorgang zu rechenintensiv.

Das bereits beschriebene Einführen einer ID für die Datenstrukturen, anhand welcher festgestellt werden kann, ob die Struktur bereits im letzten Durchlauf berechnet wurde, hat keine Lösung für dieses Problem geliefert. Mit diesem Ansatz kann nur getestet werden, ob die aktuellen Daten valide sind, nicht ob sie zu einem noch früheren Zeitpunkt schon einmal berechnet wurden. Es scheint vertretbar zu sein, wenn für jedes Objekt eine Pipeline angelegt wird. Da es aber möglich sein soll, den Fokus auf verschiedene Objekte zu setzen, wird damit auch eine schnelle Änderung des Darstellungsstils und damit der Stil-Pipeline erforderlich. Es müssten zu jedem Objekt alle denkbaren Stil-Pipelines im Szenengraphen gehalten werden, wodurch diese Lösung sehr unelegant wird.

Zur Verdeutlichung ein kurzes Beispiel: In dem in dieser Arbeit häufig verwendeten Bild der Leber mit den extrahepatischen Strukturen sind insgesamt 12 verschiedene Objekte. Es soll möglich sein, jedes Objekt in einen beliebigen Stil zu überführen. Damit dies interaktiv geschehen kann, müssen alle notwendigen Daten vorher berechnet werden. Jedes Objekt kann auf verschiedene nicht-fotorealistische Arten dargestellt werden: nur mit Silhouetten, mit zusätzlichen Merkmalslinien und mit zusätzlicher Schraffur. Daraus ergeben sich aufgrund der Implementierung von `OPENNPART` 8 Knoten zur Generierung der Liniengrafiken aus den Modellen. Dabei wurde die Optimierung aus Abschnitt 3.4.5 schon berücksichtigt. Keiner der Knoten kann für die Berechnung bei einem anderen Objekt wiederverwendet werden. Übertragen auf die 12 Objekte sind am Ende 96 Knoten im Szenengraphen enthalten, die ausschließlich zur Erzeugung der Liniengrafiken dienen. Wenn die 8 Knoten der Pipeline in einer geeigneten Weise abgeändert werden, können diese jedoch für alle Objekte gleichzeitig verwendet werden, d.h. sie können wie alle `OPEN INVENTOR`-Objekte mehrfach in den Szenengraphen eingehangen werden.

Durch das mehrfache Einhängen eines Pipeline-Knotens wird der Knoten an den verschiedenen Stellen mit unterschiedlichen Daten konfrontiert, wie etwa der `WingedEdge` eines Objektes. Daten für die Stilisierungen der Liniensegmente brauchen nicht zwischengespeichert zu werden. Diese Daten ändern sich mit jedem Rendering-Schritt, wobei die Daten aus dem vorherigen Durchlauf nicht wieder verwendet werden können. Die meisten Daten ändern sich während der Darstellung nicht mehr,

sobald sie einmal initialisiert wurden. Andererseits gibt es auch Daten, die aufgrund bereits vorliegender Ergebnisse schneller generiert werden können. Beispiele für solche Daten sind:

- die bereits genannte Winged-Edge,
- die Hauptkrümmungsrichtungen für das Strömungsfeld und
- das Strömungsfeld, das der Schraffurberechnung zugrundeliegt,
- die Elber-Datenstruktur zur schnelleren Berechnung der Silhouetten [BENICHOUE und ELBER, 1999] oder
- bereits berechnete sichtinvariante Merkmalslinien.

Aus diesem Grund wird nun ein Konzept vorgestellt, durch dessen Umsetzung sich die Knoten an bereits berechnete Daten „erinnern“ können. Das ermöglicht das mehrfache Einhängen eines Knotens an verschiedene Stellen des Szenengraphen.

Caching der Informationen

Damit die Knoten verschiedene Objekte parallel verarbeiten können, müssen sie bereits bearbeitete Daten identifizieren können. Nur dann können sie die entsprechenden, dafür schon einmal berechneten, Daten wieder herstellen. Es ist eine Lösung erforderlich, mit der es möglich ist, verschiedenste Datentypen abzulegen, um zu einem späteren Zeitpunkt wieder darauf zugreifen zu können. Diese Lösung wird mit Hilfe eines Caches zur Verfügung gestellt. Die einzelnen Knoten können bei Bedarf ihre benötigten Datenstrukturen in diesem Cache ablegen und zu gegebener Zeit wieder abrufen.

Die „Kunst“ besteht nun darin, einen Cache zu entwickeln, der sich nahtlos in den bisherigen Aufbau von OPENNPAR einfügen lässt. Eine Programmstruktur, die einen Cache für alle Datenstrukturen zwingend erfordert, hätte zum einen grundlegende Veränderungen an dem gesamten Aufbau von OPENNPAR erfordert. Zum anderen hätten sich alle Entwickler, die an OPENNPAR beteiligt sind, auf das neue System umstellen müssen, auch wenn sie für ihre Zwecke nicht auf einen Cache angewiesen sind. Zudem ist es zu aufwändig, an jeder Datenstruktur, die von OPENNPAR in der Pipeline verwendet wird, entsprechende Änderungen durchzuführen, die das Puffern ermöglichen.

Durch die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Änderungen sind drei Voraussetzungen geschaffen worden, um einen solchen Cache zu realisieren:

- Da die Knoten testen, ob sie tatsächlich Daten bekommen haben, können ihnen auch „keine Daten“ in Form von *Null*-Zeigern übergeben werden.

4 Implementierung

- Durch den ID-Test kann immer festgestellt werden, um welche Datenstruktur es sich handelt.
- Bei jeder Änderung wird die Datenstruktur mit einer neuen ID versehen, wodurch eine Modifikation der Daten identifiziert werden kann.

Der Cache selbst muss zwei Auflagen erfüllen. Er darf nicht selbstständig Daten löschen, wenn der unwissende Programmierer es nicht erwartet. Dies trifft für alle Klassen zu, die nicht selbst den Cache verwenden. Außerdem muss eine Reaktion für den Fall vorgesehen werden, in dem der Entwickler Daten löscht, auf die im Cache verwiesen wird. Es muss also immer sichergestellt sein, dass die im Cache vorhandenen Daten gültig sind.

Eine erste Überlegung war, im Cache eine Kopie der Daten anzulegen, die gecacht werden sollen. Auf diese Weise enthält der Cache nie ungültige Datenstrukturen. Diese Idee wurde schnell verworfen, da das Kopieren viel zu zeitaufwändig ist und Daten, die aus irgendeinem Grund gelöscht werden, keine Relevanz mehr besitzen, weswegen sie auch nicht mehr im Cache gespeichert werden müssen.

Das grobe Konzept der Verwaltung von Daten über den Cache ist wie folgt: ein Knoten stellt eine Anfrage an den Cache, dem er einen Verweis auf sich selbst (*this*-Zeiger) sowie die ID der ankommenden Datenstruktur übergibt. Findet der Cache für dieses Tupel bereits berechnete Daten, gibt er sie an die Klasse zurück. Andernfalls wird ein *Null*-Pointer zurückgegeben. Wenn eine Klasse neue Daten für eine ankommende Datenstruktur berechnet hat, legt sie diese im Cache über ein Tripel ab. Das Tripel hat folgenden Aufbau:

- den Verweis auf sich selbst,
- die ID der ankommenden Daten und
- den Verweis auf die erzeugten Daten.

Da verschiedene Datentypen in einem Cache gespeichert werden sollen, muss eine gemeinsame Basis für alle Datentypen bestehen. Daher müssen diese Datentypen von einer Basisklasse namens **SbDataStructure** abgeleitet werden. Diese Klasse besitzt einen Mechanismus zur Vergabe der ID und einen speziellen Destruktor. Wenn eine Klasse gelöscht wird, egal ob vom Cache oder manuell, informiert der Destruktor den Cache, sodass dieser seine Daten aktualisiert. Dadurch wird verhindert, dass der Cache auf Daten verweist, die nicht mehr gültig sind. Wird eine Datenstruktur im Cache gelöscht, werden ebenfalls alle darauf verweisenden Daten rekursiv gelöscht, da auch diese damit ungültig werden. Die Knoten, die die rekursiv gelöschten Daten ursprünglich angelegt haben, arbeiten weiterhin korrekt, da sie immer zuerst prüfen, ob valide Daten zur Verfügung stehen.

Der Cache speichert nur einen Zeiger auf die **SbDataStructure**. Da alle Zeiger unter C++ gleich behandelt werden, ist für den Cache selbst nicht wichtig zu wissen,

um was für eine Datenstruktur es sich handelt [STROUSTRUP, 2000]. Der Cache wird einmalig und statisch im Speicher abgelegt, sodass verschiedene Datentypen, die voneinander abhängig sind, verwaltet werden können. Beim Auslesen aus dem Cache müssen die Daten wieder in ihren ursprünglichen Typ umgewandelt werden. Das ist kein Problem, da die entsprechende Klasse genau „weiß“, um was für einen Datentyp es sich handeln muss.

Es kommt vor, dass der Knoten, der die Anfrage an den Cache stellt, seine Parameter geändert hat. Deswegen testet der Cache bei einer Anfrage eines Knotens, ob sich die von OPEN INVENTOR vergebene ID des Knotens selbst geändert hat. Diese wird immer dann geändert, wenn sich eines der Felder des Knotens ändert. Der Cache löscht dann alle Daten, die auf der alten Parametrisierung beruhen.

Diese neu eingeführte Datenverwaltung sowie ihre Implementierung haben damit alle geforderten Ziele erreicht. Um eine Datenstruktur im Cache ablegen zu können, muss sie lediglich von `SbDataStructure` abgeleitet werden. Zum Anwenden des Caches in einer Klasse muss diese im Wesentlichen nur um vier zusätzliche Anweisungen erweitert werden:

- Eine Methode zum Ablegen der Daten in dem Cache.
- Eine Methode zum Auslesen der Daten aus dem Cache.
- Die Klasse muss sich in ihrem Konstruktor beim Cache anmelden.
- Die Klasse muss sich in ihrem Destruktor beim Cache abmelden.

Die Knoten der Rendering-Pipeline können nun beliebig oft in einen Szenengraphen eingehangen werden. An den verschiedenen Stellen wird der Knoten mit unterschiedlichen ankommenden Daten konfrontiert. Der Knoten kann im Cache die evtl. bereits erstellten Daten anfordern und zur weiteren Verwendung direkt nutzen, ohne sie neu erstellen zu müssen.

Sollte eine Datenstruktur ungültig werden, so werden alle davon abhängigen Daten aus dem Cache gelöscht. Da alle Daten von derselben Stammklasse abgeleitet werden, können auch Daten automatisch aus dem Cache entfernt werden, die einer anderen Klasse angehören. Wenn also eine Winged-Edge ungültig wird, können nicht nur darauf aufbauende Winged-Edges gelöscht werden, sondern auch darauf aufbauende Daten zur Silhouetten- oder Schraffurberechnung.

4.3 Konkrete Umsetzung der gesteckten Ziele

Im Entwurf wurden zwei zentrale Anforderungen an die Visualisierungstechniken gestellt:

- die Verwendung einer angemessenen Parametrisierung zur Darstellung und

- die Zusammenführung der drei Rendering-Stile in einem Szenengraphen mit der Möglichkeit, die Stile interaktiv zu ändern.

4.3.1 Umsetzung der Rendering-Pipeline

Durch Einführung des Caches kann das entworfene Konzept der Rendering-Pipeline fast ohne Abweichungen umgesetzt werden. Es sind nur kleinere Abänderungen notwendig, da den Linien keine Attribute zugewiesen werden können. Aus diesem Grund müssen weitere Querverweise in den Szenengraphen eingefügt werden, mit deren Hilfe die Einfärbung der Linien abhängig von der Farbe des zugrunde liegenden Objektes ermöglicht wird. In Abbildung B.2 in Anhang B wird der Szenengraph zum besseren Verständnis erläutert. In Abbildung B.3 wird der Szenengraph gegenübergestellt, der ohne Cache zustande gekommen wäre.

Anstelle einer kompletten NPR-Pipeline für jedes Objekt zur Erstellung der Liniengrafiken wird nur eine Pipeline benötigt. Nach dem Rendern des z -Buffers wird jede Winged-Edge zusammen mit einem Material-Knoten, der die Farbe der Linien beschreibt, vor einen Level-Of-Detail-Graphen gehangen. Dieses Vorgehen wird für jedes Objekt wiederholt. Die in dem LOD-Graphen verwendeten Knoten zur Liniengenerierung werden von allen LOD-Graphen gemeinsam verwendet. Da die linienhafte Darstellung für jedes Objekt mit seiner zugewiesenen Farbe gerendert werden soll, werden die Linien in jedem LOD selbst gezeichnet und anschließend aus der Pipeline entfernt. Durch den Löschvorgang werden die Linien nicht zur Darstellung des nächsten Objektes fälschlicherweise noch einmal gezeichnet. Die beiden Schritte der Generierung und der Darstellung der Linien sind also nicht strikt voneinander getrennt. Aus diesem Grund treten bei der Verwendung von farbigen Silhouetten zwei Sonderfälle auf:

- Das Volumen-Rendering kann nicht verwendet werden, ohne dass die Objekte, die nur durch Linien angezeigt werden, trotzdem die gesamte Fläche des Renderings überdecken.
- Die flächenhaft dargestellten Objekte müssen ganz zu Beginn gezeichnet werden, weil sonst die Darstellung von transparenten Gebieten nicht generiert werden kann, da der gesetzte z -Buffer das Zeichnen des Inneren des Objektes verhindert.

Diese beiden Punkte werden jetzt noch einmal genauer erläutert. Soll das Volumen-Rendering nicht von den linienhaft dargestellten Objekten verdeckt werden, können die verschieden eingefärbten Silhouetten nicht verwendet werden. Wenn die farbigen Silhouetten verwendet werden sollen, müssen diese in getrennten Pipelines erstellt werden. Die Linien müssen auch sofort gerendert werden, da die Datenstruktur zur Darstellung der Linien gelöscht werden muss, bevor das nächste Objekte in der neuen Farbe gezeichnet wird. Andernfalls würden die alten Linien ebenfalls in der neuen

Farbe gezeichnet und somit überschrieben werden. Da die Linien der einzelnen Objekte getrennt erzeugt werden, muss für alle Linien der gültige z -Buffer gesetzt sein. Dieser muss aber gelöscht werden, bevor das Volumen-Rendering gezeichnet werden kann. Damit gehen auch die Tiefeninformationen der Linien verloren und die Linien werden vom Volumen-Rendering überdeckt. Die Linien der einzelnen Objekte müssen also alle in der gleichen Farbe gezeichnet werden, um denselben `SoDisplayStrokes`-Knoten verwenden zu können. Dadurch kann der z -Buffer gelöscht werden, und es können hinterher alle Linienelemente mit korrekter Tiefeninformation gerendert werden. Der Aufbau des Szenengraphen aus dem Entwurfsteil kann somit ohne Abwandlungen übernommen werden.

Da die Linien sich von dem in Graustufen dargestellten Volumen-Rendering abheben sollen, müssen sie mit einem andersfarbigen Rahmen versehen werden. Dadurch sind die Linien unabhängig von Hintergrund und Einfärbung gut zu erkennen. Dies wird realisiert, indem zwei `SoDisplayStrokes`-Knoten mit unterschiedlicher Liniendicke nacheinander gezeichnet werden. Der Knoten für die breiteren Linien zuerst, um den Rahmen für die nachfolgenden dünneren Linien zu bilden.

Aus dem selben Grund müssen transparent flächenhaft dargestellte Objekte ganz zu Beginn gezeichnet werden, wenn die farbigen Silhouetten eingesetzt werden sollen. Würden sie erst gezeichnet werden, nachdem der z -Buffer bereits gesetzt wurde, könnte das Innere der transparenten Objekte nicht mehr dargestellt werden. Ein nachträgliches Zeichnen nach einem Löschvorgang des z -Buffers ist nicht möglich, da die Linien dann wie bereits beschrieben überdeckt werden würden.

4.3.2 Generierung und Modifizierung des z -Buffers

Bei der Generierung des z -Buffers im ersten Teil des Szenengraphen wird lediglich der z -Buffer selbst gerendert – auf die Darstellung der Geometrie selbst wird verzichtet. Dadurch wird einerseits verhindert, dass Objekte abgebildet werden, die eigentlich nur als Liniengrafik dargestellt werden sollen. Andererseits werden Objekte, die flächenhaft und transparent dargestellt werden sollen, nicht im finalen Rendering-Schritt des Szenengraphen überzeichnet. Nach der Extraktion der Linien wird der z -Buffer wieder gelöscht, um mit dem eigentlichen Zeichnen beginnen zu können. Das Löschen wird von dem `SoClearGLBuffer`-Knoten von `OPENNPAR` bewerkstelligt.

Insbesondere bei der Erstellung der transparenten Silhouetten muss für jedes Objekt aufs Neue der korrekte z -Buffer erstellt werden. Dies geschieht durch das mehrfache Einhängen aller Knoten, die den z -Buffer beeinflussen sollen.

4.3.3 Umsetzung der Parametrisierung

Da die Schraffur nicht eingesetzt werden kann, bleibt zur linienhaften Darstellung nur die Verwendung von Silhouetten und Merkmalslinien. Die Parametrisierung dieser Linien verhält sich relativ simpel: entweder sie werden gezeichnet oder sie werden nicht gezeichnet. Ob sie gezeichnet werden, hängt von der Art der gewählten Darstellung ab. Zur objektabhängigen Einfärbung der Linien wurde ein Material-Knoten implementiert, der voreingestellte Farben für die verschiedenen Strukturen des menschlichen Körpers anbietet. Dieser Knoten wurde als Makro unter ILAB realisiert. Durch die Verwendung des Makros kann der Nutzer bei Bedarf einen der voreingestellten Werte abändern und als Preset abspeichern. Auf dieses veränderte Makro lässt sich jederzeit wieder zugreifen, sodass die Materialeigenschaften auch auf andere Datensätze anwendbar sind.

4.3.4 Fokussierung

Um den Fokus auf ein Objekt zu setzen, wird mit der Maus ein Objekt in der Szene per Mausklick ausgewählt. OPEN INVENTOR bietet die so genannte *SoRayPickAction* an, mit Hilfe derer das getroffene Objekt ermittelt wird. Da die Objekte sehr groß sind, ist eine genaue Bestimmung des Schnittpunktes zu aufwändig. Mit Hilfe des OPEN INVENTOR-Knotens *SoPickStyle* wird festgelegt, dass nur die *Bounding Box* des getroffenen Objektes ermittelt werden soll. Das ist für diese Zwecke vollkommen ausreichend. Aus der Liste aller getroffenen Objekte wird dasjenige ermittelt, welches die kleinste Bounding Box besitzt. Auf diese Art und Weise können auch Objekte ausgewählt werden, die eigentlich von anderen Objekten umschlossen sind. Kann das gewünschte Objekt nicht ausgewählt werden, da ein kleineres Objekt vom Sichtstrahl gekreuzt wird, kann durch die Drehung des Mousrades eines der ermittelten Objekte ausgewählt werden.

4.4 Zusammenfassung

Damit die im Entwurf vorgestellte Parametrisierung und der Szenengraph realisiert werden kann, wurden die Bibliotheken OPENNPART und ILAB zusammengeführt. Beide Bibliotheken zusammengenommen besitzen genau den Funktionsumfang, der zur Kombination der drei Rendering-Stile notwendig ist.

Der Aufbau von ILAB erfordert besondere Anforderungen an Bibliotheken, die in diese Umgebung eingegliedert werden sollen. Die verwendeten Klassen sind ausschließlich über ihre Felder anzusteuern. OPENNPART ist ursprünglich nicht für diese Verwendung konzipiert worden. Aus diesem Grund musste diese Bibliothek den Bedürfnissen entsprechend angepasst und erweitert werden. Um die OPENNPART-Knoten flexibler einsetzen zu können, wurde außerdem ein Cache entwickelt, der

die Klassen dazu befähigt, an beliebig vielen Stellen im Szenengraphen eingehängt werden zu können. Der Cache wurde so implementiert, das OPENNPAR weiterhin wie gewohnt verwendet werden kann.

Durch die Änderungen konnten alle Ziele bis auf die objektspezifische Einfärbung der Linien zusammen mit dem Volumen-Rendering, erreicht werden. Da die Methoden zur Erstellung der Schraffur nicht wie gewünscht funktionieren, konnten für diese keine geeigneten Parameter ermittelt werden.

Um die vom Nutzer angepassten Parameter abspeichern zu können, wird ausgenutzt, dass unter ILAB Teile eines Netzwerkes zu einem Makro zusammengefasst werden können. Alle eingestellten Werte in den Feldern der enthaltenen Klassen im Netzwerk lassen sich ebenfalls über dieses Makro steuern. Das Makro lässt sich als Datei ablegen und ist so jederzeit verfügbar.

5 Evaluierung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde an Methoden zur besseren medizinischen Visualisierung gearbeitet. Obwohl sich ein Großteil der Grundlagenforschung (vgl. Kapitel 2) mit den in der Medizin verbreiteten Darstellungsformen befasst hat, erfolgte die Umsetzung trotz allem unter computergrafischen Gesichtspunkten. Es ist auch nicht auszuschließen, dass unbewusst konstruierte Probleme aufgestellt und gelöst worden sind.

Die entstandenen Visualisierungsmethoden wurden für Mediziner entwickelt, welche viele Jahre intensiv mit medizinischen Atlanten gearbeitet haben und im Gegensatz zu Computergrafikern über ein wesentlich besseres Verständnis für medizinische Fragestellungen verfügen. Aus diesem Grund sollen die Ergebnisse dieser Arbeit Medizinern präsentiert werden, um so die Güte der Visualisierung beurteilen zu können. Ein weiteres Bestreben ist es, wichtige Indizien für Standardwerte zu finden, die für eine ausgehende Initialisierung der Daten verwendet werden können.

Die Evaluierung wurde in Zusammenarbeit mit Sebastian Mirschel erarbeitet, der für seine Entwicklung des LIVERSURGERYTRAINERS ebenfalls verwandte Fragen an Mediziner stellen will [MIRSCHEL, 2004]. Ergebnisse, die für diese Arbeit nicht interessant sind, können in seiner Arbeit nachgeschlagen werden. Der gesamte Fragebogen ist in Anhang C beigelegt.

5.1 Hypothesen

Vor Beginn der Befragung wurden Annahmen darüber getroffen, was das Ergebnis dieser Evaluation sein würde. Da keine der Visualisierungen, die ohne NPR-Techniken erstellt worden sind, den Kontext zufriedenstellend abbilden können, ist anzunehmen, dass eine der Darstellungen mit Silhouetten bevorzugt wird.

In traditionellen Darstellungen aus medizinischen Atlanten werden in der Regel nur dann Silhouetten eingesetzt, wenn wichtige Strukturen in einen Kontext gesetzt werden müssen. Diese Technik soll hier nachempfunden werden. Bei der Visualisierung des Kontextes durch farbige Silhouetten ist eine Zuordnung der Linien zu den jeweiligen Strukturen am einfachsten. Daher wird vermutet, dass diese Methode die Mediziner am meisten zufriedenstellt.

5.2 Methodik

In diesem Abschnitt wird zunächst das Ziel der Befragung konkretisiert, woraus sich eine Zielgruppe ergibt. Ihre Auswahl und durch die Zielgruppe entstehende Probleme werden im Anschluss diskutiert. Abschließend wird diskutiert, wie genau diese Erhebung den Befragten präsentiert werden muss, um aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen.

5.2.1 Ziel der Befragung

Mit Hilfe der Umfrage soll herausgefunden werden, ob die NPR-Techniken zu einem besseren Verständnis in der medizinischen Visualisierung beitragen. Neben der opaken flächenhaften Visualisierung gibt es die transparente Darstellung und das Volumen-Rendering, welche normalerweise in der medizinischen Visualisierung eingesetzt werden. Sollte sich die NPR-Darstellung als besser erweisen, gibt es diverse Möglichkeiten, die NPR-Techniken zu parametrisieren. Auch hierfür muss eine Lösung gefunden werden.

Bei komplexen Szenen gibt es meist nur wenige günstige Blickrichtungen, um die Lage aller Strukturen richtig einschätzen zu können. Durch den Freiheitsgrad, die Szene aus beliebigen Richtungen zu betrachten, kann die Szene auch aus anderen, suboptimalen Richtungen betrachtet werden. Durch den Einsatz von NPR-Techniken wird es ermöglicht, auch bei solchen Blickrichtungen eine klarere Darstellung zu generieren. NPR-Techniken können also nicht nur in der Visualisierung von Kontext-Strukturen genutzt werden, sondern auch, um sehr komplexe Inhalte im Fokusbereich aufzuschlüsseln. Eine solche Fragestellung muss ebenfalls geklärt werden.

5.2.2 Zielgruppe

Als Zielgruppe kommen bereits ausgebildete oder auszubildende Mediziner in Frage, da sie über eine breit gefächerte Erfahrung mit medizinischen Atlanten verfügen. Um bei einer Umfrage auswertbare Antworten zu bekommen, müssen die entsprechenden Fragen präzise gestellt werden. Dazu ist es erforderlich, sich auf ein spezielles Gebiet festzulegen.

Als Fachgebiet wird die Leberchirurgie gewählt, da hierzu entsprechende Datensätze zur Generierung von Bildern sowie Personen zur Befragung zur Verfügung stehen. Zur Befragung wird die Arbeitsgruppe um Prof. Dr. Karl J. Oldhafer am Allgemeinen Krankenhaus Celle herangezogen. Tätigkeitsfeld dieser Gruppe ist die Chirurgie im Bauchraum. Die Arbeitsgruppe muss dazu regelmäßige Interventionsplanungen der Operationen durchführen. Diese Planungen werden mit Hilfe des

INTERVENTIONPLANNERS von MEVIS durchgeführt, sodass hier ein direkter Bezug zum Thema dieser Diplomarbeit besteht.

Um sicherzugehen, dass bei der Evaluierung alle Fragen richtig interpretiert werden, wird zuerst mit Hilfe des Fragebogens eine Befragung innerhalb des Instituts für Simulation und Grafik an der Universität Magdeburg durchgeführt.

Es ist ebenfalls geplant, eine Befragung von Laien durchzuführen. Damit sind Personen gemeint, die sich weder intensiv mit Medizin noch mit Computergrafik auseinandergesetzt haben. Praktische Relevanz hat diese Umfrage, da vor einer Operation Aufklärungsgespräche mit den betroffenen Patienten durchgeführt werden, wobei durch die Anwendung von NPR-Techniken im Präsentationssystem die Aufklärung evtl. verbessert werden kann.

5.2.3 Erwartete Probleme

Um eine möglichst hohe Fallzahl zu erreichen, muss die Umfrage während des klinischen Alltags erhoben werden. Demzufolge kann die Umfrage nicht am Rechner durchgeführt werden, da nicht jeder Mitarbeiter über einen Rechner verfügt. Durch die Verteilung eines ausgedruckten Fragebogens wird sichergestellt, dass alle zu befragenden Personen in der Lage sind, an der Evaluierung teilzunehmen.

Es nicht auszuschließen, dass eine ablehnende Haltung gegenüber den NPR-Techniken herrscht, da mit den Visualisierungen nicht interagiert werden kann. Von daher wird sehr viel Vorstellungsvermögen erfordert, um sich die Silhouetten in einer 3D-Umgebung vorstellen zu können. Dies muss bei der Erstellung des Fragebogens berücksichtigt werden. Da nur die Silhouetten für alle Objekte generiert werden können, wird eine zusätzliche Kontextabstufung mittels leichtem Shading auf dem entsprechenden Objekt erzeugt.

5.3 Aufbau des Fragebogens

Bei der Formulierung der Fragen und dem Umfang des Bogens haben wir uns beim Entwurf an bereits existierenden Fragebögen in verwandten Gebieten orientiert [OLDHAFFER et al., 2002; OELTZE, 2004].

Auf die fehlende Interaktionsmöglichkeit wird in einem kurzen Begrüßungstext hingewiesen. Außerdem werden die Modalitäten zur Fragetechnik erklärt. Es gibt zwei Frage-Antwort-Typen, beide im *Multiple Choice*-Verfahren. Zum einen muss bei einer Auswahl von Bildern eins ausgewählt werden. Zum anderen muss eine Problemstellung auf einer fünfstelligen Skala (--, -, 0, +, ++) bewertet werden. Was genau (--) bzw. (++) bedeutet, wird bei der jeweiligen Frage angegeben. Der

Befragte wird ebenfalls dazu angehalten, bei Bedarf eigene Bemerkungen anzubringen. Um die Antworten besser einschätzen zu können, werden einige persönliche Fragen gestellt: Alter, Ausbildungsstand, sowie persönliche Erfahrung im Umgang mit dem PC und mit 3D-Anwendungen. Die Testgruppe des ISG wird durch einen zusätzlichen Text in die notwendigen medizinischen Kenntnisse eingewiesen.

Fragen, bei denen eine offensichtliche Antwort zu erwarten war, wurden in manchen Fällen trotzdem in die Evaluierung mit aufgenommen. Oft war unklar, ob es sich bei der Frage um eine Suggestivfrage handelt, oder ob die Antwort eben nicht für alle Mediziner eindeutig feststeht. Bei einigen Fragestellungen soll auch nur das angenommene Ergebnis bestätigt werden.

5.3.1 Anordnung der Fragen

Es muss aus vier verschiedenen Visualisierungsverfahren das am besten geeignete extrahiert werden. Zu diesem Zweck wird der Fragebogen so aufgebaut, dass das beste Verfahren über einen Entscheidungsbaum ermittelt werden kann.

Aufgrund der Sichtfeldüberlappung können horizontal angeordnete Bilder leichter miteinander verglichen werden, als Bilder in anderen Kombinationen. Aus diesem Grund werden auf jedem Blatt des Fragebogens zwei horizontal angeordnete Bilder dargestellt und darunter Fragen zu den beiden Bildern gestellt. Auf den verschiedenen Seiten werden unterschiedliche Kombinationen präsentiert, sodass durch eine abschließende Auswertung der Favorit ermittelt werden kann.

Eine Ausnahme im Fragebogen bildet das vorletzte Blatt. Hier werden drei Bilder miteinander verglichen, wobei die Anordnung hier weiterhin horizontal ist. Die gewohnte Darstellung ist dabei in der Mitte eingeordnet, sodass ein direkter paarweiser Vergleich trotzdem möglich ist. Bei einer Aufschlüsselung mit jeweils zwei Bildern wären drei Blätter notwendig gewesen, sodass in diesem Fall ein Kompromiss eingegangen wurde, um den Umfang des Fragebogens zu reduzieren.

Die Fragen sind immer nach dem gleichen Schema aufgestellt. Zu Beginn wird dazu aufgefordert, das Bild anzugeben, welches auf den ersten Blick besser gefällt. Es geht hierbei um die persönliche Präferenz, ohne nähere Betrachtung darüber, ob die Darstellung gewisse Problematiken in sich birgt. Im Anschluss werden zwei bis drei Fragen gestellt, die dazu anregen, sich kritisch mit den beiden Visualisierungen auseinander zu setzen. Wenn nötig, wird ein kurzer Text zur Erläuterung vorangestellt. Abschließend wird darum gebeten, sich für eine Variante zu entscheiden, mit der tatsächlich gearbeitet werden würde.

Durch dieses Vorgehen kann eingeschätzt werden, welche Visualisierung optisch ansprechender und welche beim problembezogenen Arbeiten besser interpretierbar ist. Durch die Auswertung soll eine Darstellungsart ermittelt werden, die insbesondere

in Lernumgebungen eingesetzt werden kann, bei denen beide Aspekte eine Rolle spielen.

Um einen Entscheidungsbaum aufstellen zu können, dürfen die Fragen zu den einzelnen Bildern nicht zu sehr voneinander abweichen, damit sie anschließend verglichen werden können. Damit die Fragen auf den fortgeschrittenen Seiten nicht nur überflogen werden, werden die Fragestellungen leicht im Satzbau und in der Wortwahl variiert.

5.3.2 Bildaufbau

Da mit den Bildern nicht interagiert werden kann, muss eine geeignete Perspektive auf den Datensatz gewählt werden. Da die primäre Zielgruppe aus Chirurgen besteht, wird der Datensatz koronal ausgerichtet, sodass die Bilder aus *Sicht des Chirurgen* gezeigt werden, d.h. aus der gleichen Perspektive wie bei einer Operation.

In der Evaluierung werden verschiedene Möglichkeiten zur Kontext-Visualisierung miteinander verglichen. Daher muss die Darstellung des Fokus in allen Bildern konstant bleiben. Als Konstante wird die Leber mit zusätzlichen intrahepatischen Strukturen gewählt (Abbildung 5.1). Die Darstellung des Fokus ist auch in Größe und Ausrichtung bei allen Bildern gleichbleibend.

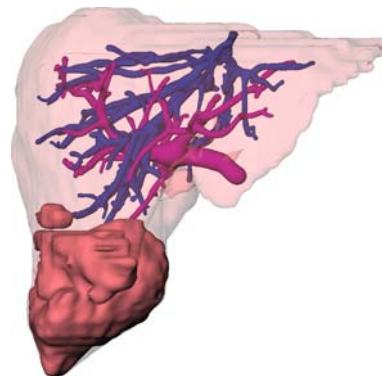


Abbildung 5.1: Darstellung der Leber mit intrahepatischen Strukturen. Die Darstellung ist in allen Bildern des Fragebogens unverändert.

Um die Darstellung der Leber etwas komplizierter im Aufbau zu gestalten und relevante Informationen für eine Leber-Operation hinzuzufügen, wird sie leicht transparent dargestellt. Im Inneren wird ein Tumor sowie der Gefäßbaum der Leberarterie und des portalvenösen Systems eingeblendet. Da der Tumor bei diesem Datensatz so groß und dezentral angeordnet ist, wird er in seiner Farbgebung an die Darstellung der Leber angepasst. Dadurch wird klarer hervorgehoben, dass der Tumor zur Leber gehört und kein eigenständiges Organ ist. Um die Leber in einen anatomischen Kontext zu setzen, werden zusätzliche extrahepatische Strukturen segmentiert. Die

5 Evaluierung

Einfärbung bei den kolorierten Darstellungen wird gemäß der Einfärbung in medizinischen Atlanten vorgenommen:

- Aorta
- Gallenblase
- linker und rechter Lungenflügel
- Milz
- linke und rechte Niere
- linker und rechter Rippenbogen
- Wirbelsäule

Anhand der segmentierten Daten wird eine repräsentative Auswahl aller Visualisierungen generiert, die mit den in dieser Diplomarbeit implementierten Methoden möglich sind. Dabei wird berücksichtigt, dass unterschiedliche Phänomene bei der Betrachtung der Bilder entstehen, je nachdem, ob viel oder wenig Kontext zum Fokus dargestellt wird. Auf die Parameter der einzelnen Bilder und auf die Phänomene wird nun im einzelnen eingegangen.

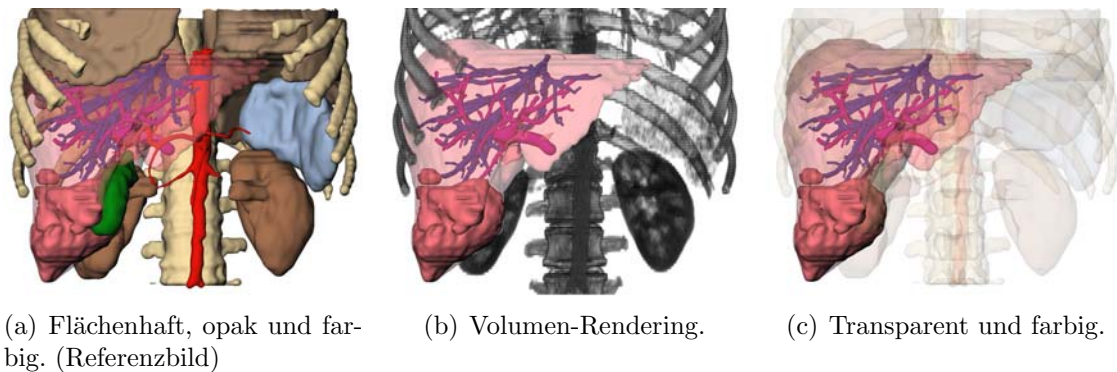


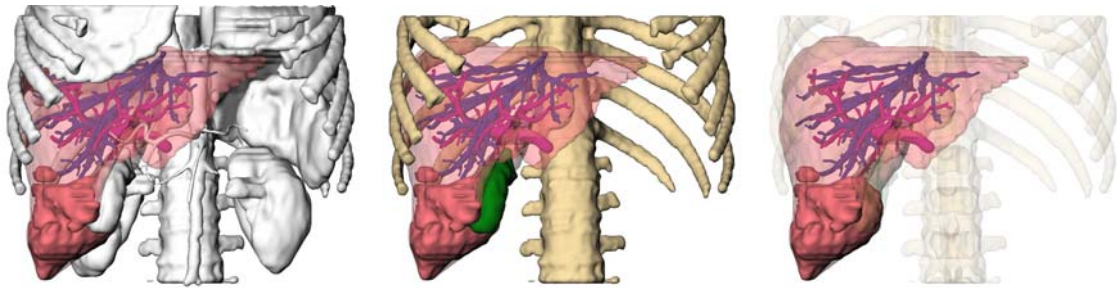
Abbildung 5.2: Unterschiedliche Varianten zur Visualisierung des Kontextes.

Als Referenzbild für den Vergleich wurde Bild 5.2(a) gewählt, da hier die Strukturen des Kontextes im Vergleich zur Darstellung mit Hilfe des Volumen-Renderings oder der Transparenz am deutlichsten zu erkennen sind. Der große Nachteil bei dieser Darstellung ist, dass der Fokus bei anderen Sichtrichtungen überdeckt wird. Auch aus dieser Perspektive werden bereits Teile der Leber vom Lungenflügel und Rippenbogen der rechten Seite verdeckt. Außerdem sind durch diese Form der Visualisierung Kontext und Fokus vertauscht.

Ebenfalls vertraut dürfte dem Befragten die Darstellung in Abbildung 5.2(b) vorkommen. Bei diesem Volumen-Rendering werden allerdings nur die Strukturen abgebildet, welche auch segmentiert worden sind. Auf diese Weise kann das Volumen-Rendering besser mit dem Referenzbild verglichen werden. Die Transferfunktion

wurde so eingestellt, dass die Organe transfluent erscheinen, und so die charakteristischen Eigenschaften des Volumen-Renderings erhalten bleiben.

Naheliegender ist auch die transparente Visualisierung aus Abbildung 5.2(c). Der Kontext wird noch durchsichtiger als die Leber dargestellt, wobei alle Kontext-Strukturen den gleichen Grad an Transparenz haben. Es ist dabei ein Kompromiss gewählt worden zwischen Sichtbarkeit des Kontextes und Differenzierbarkeit des Kontextes vom Fokus. Die Lagebeziehung der Strukturen sind allerdings kaum einzuschätzen. Die Gallenblase ist nur schwer zu erkennen.



(a) Flächenhaft, schwarz/weiß und opak. (b) Unvollständige opake Darstellung. (c) Unvollständig und transparent.

Abbildung 5.3: Unterschiedliche Varianten zur Visualisierung des Kontextes.

Eine leichte Abwandlung des Referenzbildes ist Bild 5.3(a). Hier wurden nur die Farbinformationen aus dem Kontext genommen. Dadurch hebt sich der Fokus stärker vom Kontext ab, allerdings treten immer noch Verdeckungen des Fokus bei anderen Sichtrichtungen auf. Die Strukturen des Kontextes sind nicht mehr ganz so einfach zu unterscheiden wie beim Referenzbild, allerdings steht das beim Kontext auch nicht im Vordergrund.

Da bei der Planung einer Leber-Operation die Kontext-Strukturen abgesehen von dem rechten Rippenbogen und der Gallenblase kaum eine Rolle spielen, wurde in Abbildung 5.3(b) nur die beiden fokusnahen Strukturen dargestellt. Dadurch wird bei einer Rotation der Darstellung der Fokus nicht mehr durch die anderen Organe verdeckt. Allerdings wird auch der hintere Teil der Rippenbögen nicht mehr überdeckt, sodass diese deutlicher hervortreten. Gerade an den Stellen, an denen sich der vordere und der hintere Teil kreuzen, fällt das besonders unangenehm auf.

Bei Abbildung 5.3(c) werden ebenfalls nur Knochen und Gallenblase dargestellt. Da die rechte Niere fehlt, ist die Gallenblase zumindest aus dieser Sichtrichtung etwas besser zu erkennen. Wie bei der vollständigen transparenten Darstellung treten die Wirbelknochen besonders hervor.

Nachdem bei allen Kontext-Visualisierungen, die mit herkömmlichen Render-Verfahren erstellt werden können, keine optimale Lösung zur Darstellung gefunden werden konnte, wird nun der Einsatz von NPR-Techniken erprobt. In Abbildung 5.4(a)

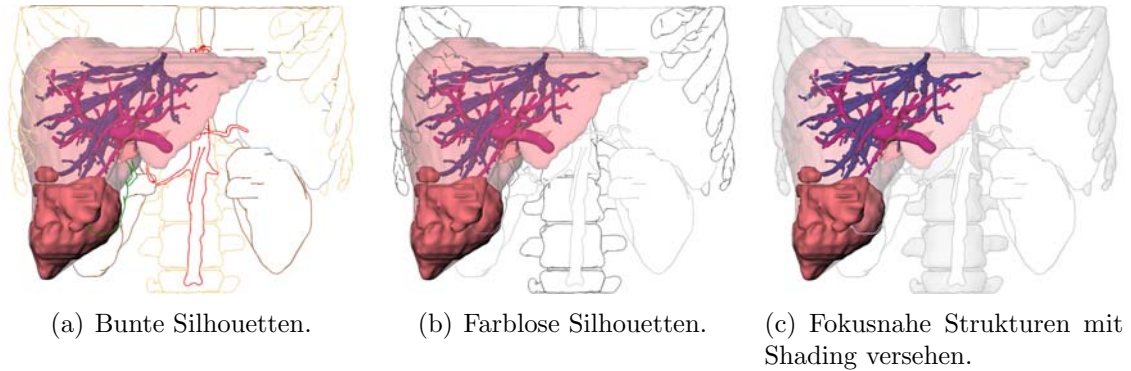


Abbildung 5.4: Unterschiedliche Varianten zur Visualisierung des Kontextes.

wird der Kontext mit Hilfe von Silhouetten dargestellt. Die Silhouetten der einzelnen Strukturen haben dabei jeweils die gleiche Farbe wie im Referenzbild. Im Gegensatz zur transparenten Darstellung sind die Abgrenzungen der Objekte gut zu erkennen. Dafür sind keinerlei Tiefenhinweise mehr vorhanden außer durch die Überdeckung durch andere Objekte.

Abbildung 5.4(b) ist die unauffälligste Variante, da hier die auch die Farbinformation weggelassen wurde. Der fokusnahe Kontext wurde mit einer dunkleren Silhouette versehen. In Abbildung 5.4(c) wurde anstelle der dunkleren Silhouette der fokusnahe Kontext mit einer Schattierung der Oberfläche versehen. Das ist insbesondere bei den Rippen von Vorteil, da hierdurch klar zu erkennen ist, was Rippenbogen und was Raum zwischen den Rippen ist.

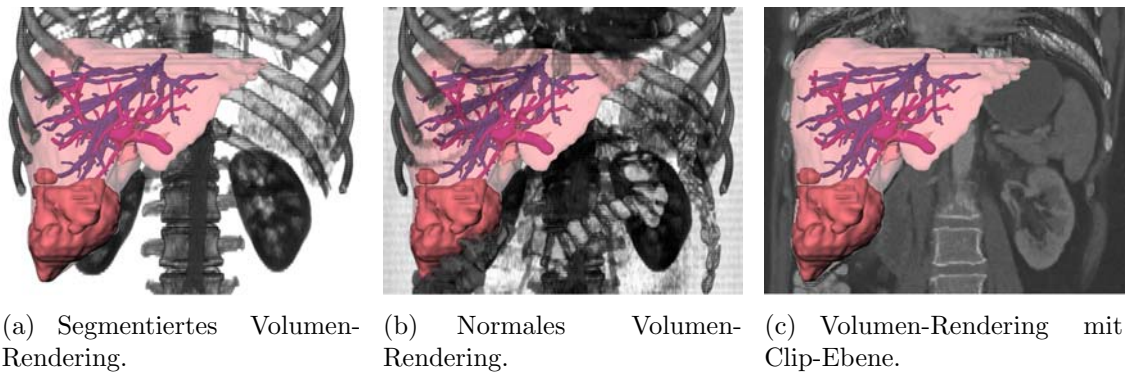


Abbildung 5.5: Unterschiedliche Varianten zur Visualisierung des Kontextes.

Das DVR ist gerade dann interessant, wenn auch nicht segmentierte Strukturen dargestellt werden sollen. Deswegen wird es in Abbildung 5.5(a) noch einmal dem normalen Volumen-Rendering gegenüber gestellt (Abbildung 5.5(b)). Als Alternative wird eine Darstellung angeboten, bei der die Transferfunktion so eingestellt ist, dass das Innere des Körpers eigentlich nicht zu sehen ist. Dafür wurde eine Ebene durch den Mittelpunkt der Leber gelegt, die das Volumen-Rendering clippt.

Ein interessanter Aspekt bei diesen drei Bildern ist, dass der Rippenbogen auf drei verschiedene Arten dargestellt wird. Ganz links wird nur der knöcherner Teil angezeigt, in der Mitte auch die Knorpel und in der rechten Darstellung werden die Rippen so abgeschnitten, dass die Leber nicht verdeckt wird. Durch die Symmetrie der Rippenbögen kann von dem linken Bogen auf den rechten geschlossen werden, sodass der rechte Rippenbogen nicht dargestellt werden muss.

Die zweite untersuchte Fragestellung ist, ob die NPR-Techniken auch eingesetzt werden können, um Strukturen des Fokus zu visualisieren und seine Darstellung zu „entwirren“. Zur Klärung dieser Frage wird ein Datensatz gewählt, bei dem der Tumor weiter im Inneren der Leber liegt. Mit Hilfe der Abbildungen 5.6 bis 5.8 soll diese Frage erörtert werden. Gezeigt wird die Leber, welche in Ihre Couinaud-Segmente aufgeschlüsselt wird [COUINAUD, 1957]. Diese Gebiete beschreiben die Regionen, die von den Ästen dritter Verzweigung der Pfortader versorgt werden. Bei einer Infiltration eines Gebietes durch einen Tumor muss immer das gesamte Segment entfernt werden. Die Einfärbung der Segmente wird analog zur Einfärbung im INTERVENTIONPLANNER vorgenommen, weil es hierfür keine standardisierten Farben gibt. Zusätzlich zu den Couinaud-Segmenten und dem Tumor wird die Pfortader mit farblicher Kodierung des Infiltrationsrisikos dargestellt.

In der jeweils linken Darstellung werden die vom Tumor infiltrierten Gebiete nur über Silhouetten dargestellt. Dadurch wird das Erkennen der Lagebeziehung zwischen Gefäßbaum und Tumor nicht von den transparenten Segmenten behindert. In der mittleren Darstellung werden alle Gebiete transparent dargestellt. Diese Form wird zur Zeit im INTERVENTIONPLANNER verwendet. Als drittes werden jeweils rechts die Segmente mit Silhouetten dargestellt, die nicht infiltriert sind.

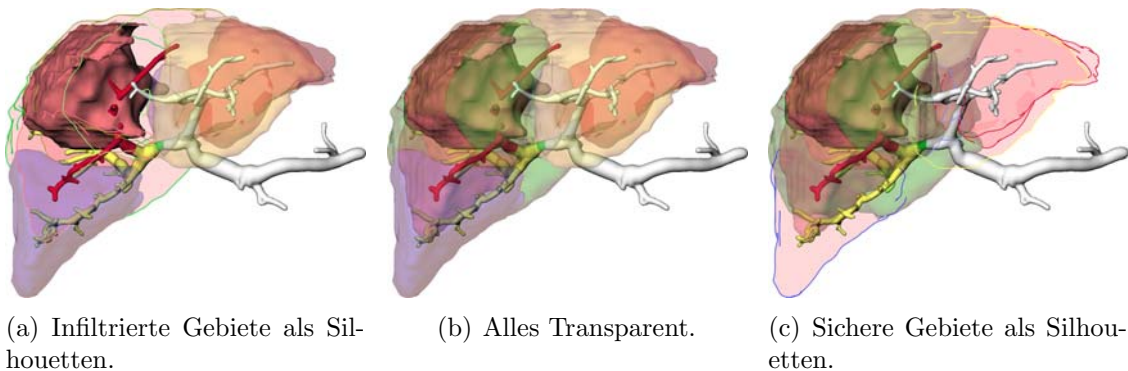


Abbildung 5.6: Koronale Ausrichtung des Leberdatensatzes.

Um den Umfang des Fragebogens zu begrenzen, wurde auf weitere mögliche Darstellungsarten verzichtet. Nach der Auswertung dieses Fragebogens können ergänzende Vertiefungen und Verfeinerungen einzelner Techniken mit zusätzlichen Evaluierungen erforscht werden.

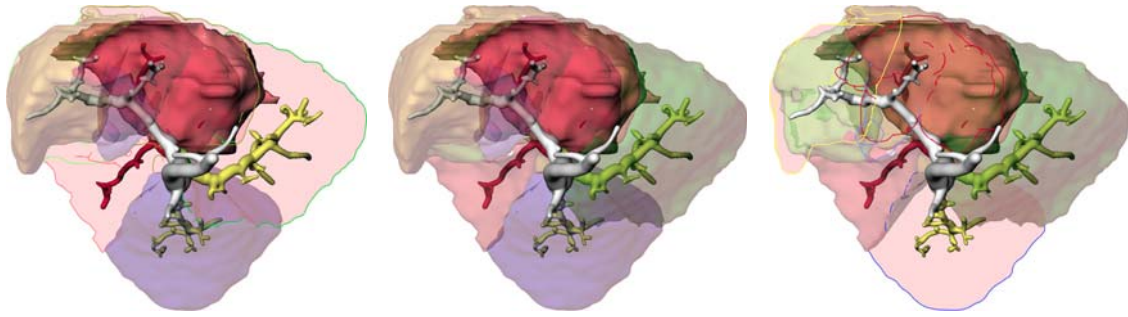


Abbildung 5.7: Sagittale Ausrichtung des Leberdatensatzes.

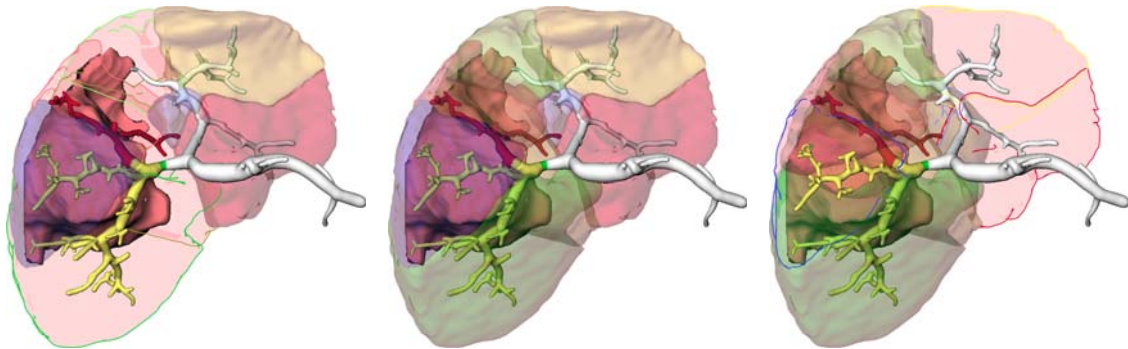


Abbildung 5.8: Axiale Ausrichtung des Leberdatensatzes.

5.4 Auswertung

Bis zwei Tage vor Abgabetermin dieser Arbeit sind insgesamt 29 Fragebögen ausgefüllt worden. Bei allen Fragebögen konnte anhand der Kontrollfragen festgestellt werden, dass die Fragen konsequent beantwortet wurden und die Ergebnisse verwertbar sind. Leider ist bis zu diesem Zeitpunkt nur eine geringe Anzahl an Bögen von Medizinern zurückgesendet worden. Die Verteilung auf die einzelnen Zielgruppen ist wie folgt:

- 4 Mediziner
- 13 Computergrafiker
- 12 potentielle Patienten

5.4.1 Mediziner

Da nur vier Fragebögen von dieser Zielgruppe vorliegen, ist eine zusammenfassende Auswertung aller Bögen nicht sinnvoll, denn es können keine eindeutigen Tendenzen abgeleitet werden. Die Fragebögen werden deswegen einzeln betrachtet. Eine grafische Zusammenfassung der Daten ist in Anhang D in Abbildung D.2 gegeben.

Der erste Arzt, der den Fragebogen ausgefüllt hat, ist Chirurg und 41 Jahre alt. Er hat angegeben, mäßige PC-Kenntnisse und keine Erfahrung mit 3D-Anwendungen zu besitzen. Bei allen Gegenüberstellungen hat er sich stets für die Darstellung mit weniger Kontextinformationen entschieden. Allerdings nur bis zu einem gewissen Grad der Abstraktion. Die Abbildung mit reinen s/w-Silhouetten wurde nicht bevorzugt (Abbildung 5.4(b)). Die farbigen Silhouetten sowie die Silhouetten mit zusätzlichem Shading werden favorisiert. Persönlicher Favorit des Befragten ist die Darstellung mittels farbiger Silhouetten. Bei der Fragestellung, ob die Verwendung von Silhouetten bei der vereinfachten Darstellung von Fokusstrukturen sinnvoll ist, hat sich der Befragte für die Darstellung entschieden, bei der die nicht infiltrierten Couinaud-Segmente nur als Silhouetten angezeigt werden.

Die zweite Medizinerin ist noch keine Fachärztin und 29 Jahre alt. Sie verfügt über gute Erfahrungen am PC und hat ebenfalls keine Praxis mit 3D-Anwendungen. Die Befragte hat sich bei allen flächenhaften Darstellungen jeweils für die Variante mit weniger Kontextinformation entschieden. Die linienhafte Darstellung wurde prinzipiell abgelehnt. Beim Vergleich der NPR-Techniken untereinander hat auch sie sich jeweils für die Darstellung entschieden, bei der zusätzliche Informationen über die Objekte geliefert werden. Auch bei der Visualisierung der infiltrierten Couinaud-Segmente wurde die normale flächenhafte Variante gewählt. Ihr persönlicher Favorit ist die flächenhafte s/w-Darstellung (Abbildung 5.3(a)).

Der dritte Fragebogen ist von einem 45 Jahre alten Chirurgen bearbeitet worden. Er besitzt nach eigenen Angaben gute Kenntnisse im Umgang mit dem PC und wenig im Umgang mit 3D-Anwendungen. Auch er hat sich immer für das Bild mit weniger Kontextinformation entschieden. Als persönlicher Favorit wurde die Darstellung mit farbigen Silhouetten gewählt. Die Visualisierung mit zusätzlichem Shading wurde gegenüber der reinen s/w-Darstellung ebenfalls bevorzugt. Bei der „Entwirrung“ der Couinaud-Segmente wurde es als hilfreich empfunden, wenn die infiltrierten Couinaud-Segmente als Silhouetten dargestellt waren.

Der vierte und letzte Fragebogen wurde von einem 4 Jahre alten Chirurgen zurückgesendet. Es ist anzunehmen, dass der Befragte die zweite Ziffer seines Alters unterschlagen hat. Die Auskunftsperson hat wenig PC-Erfahrung und keine Kenntnisse im Umgang mit 3D-Anwendungen. Im Gegensatz zu den anderen Befragten wurde hier grundsätzlich das Bild mit mehr Kontextinformation bevorzugt. Entsprechend ist hier die farbige, opake flächenhafte Darstellung bzw. das Referenzbild (Abbildung 5.2(a)) als Favorit gekennzeichnet worden. Bei der Visualisierung der Couinaud-Segmente wurde jedoch die Variante gewählt, bei der die vom Tumor infiltrierten Gebiete mit Silhouetten dargestellt werden.

Insgesamt haben sich die Befragten für grundsätzlich weniger Kontextinformationen entschieden. Es müssen jedoch grundlegende Informationen über das Objekt vorhanden sein. Die Darstellung des Kontextes ausschließlich über s/w-Silhouetten

ist nicht ausreichend. Bei der Darstellung der gefährdeten Couinaud-Segmente mittels Silhouetten haben sich 3 von 4 Medizinern für die abstraktere Darstellung entschieden.

5.4.2 Computergrafiker

Von allen befragten Computergrafikern wurden durchgängig gute bis sehr gute Erfahrungen mit dem PC und mit 3D-Anwendungen angegeben. Das Durchschnittsalter beträgt 25,4 Jahre. Die Ergebnisse können in Abbildung D.4 in Anhang D eingesehen werden. Von den Computergrafikern wird die nicht-fotorealistische Variante eindeutig bevorzugt. Fast alle Befragten haben die linienhafte Darstellung mit zusätzlichem Shading als Favoriten angegeben (Abbildung 5.4(c)).

Von den Befragten wurde auch nach Auswertung des Entscheidungsbaums eindeutig die „eleganteste“ Visualisierung ausgewählt. Das opake farbige Referenzbild wurde mit dem Volumen-Rendering, der transparenten Visualisierung und der linienhaften Darstellung gegenüber gestellt. Dabei hat sich im Vergleich zum Volumen-Rendering und zur transparenten Darstellung keine eindeutige Tendenz ausbilden können. Bei der nicht-fotorealistischen Variante ist jedoch ein signifikanter Trend zur NPR-Darstellung zu erkennen. 85% aller Befragten haben sich für die abstraktere Variante entschieden. Bei dem Vergleich zwischen NPR- und transparenter Darstellung haben sich sogar 92% für die neue Visualisierungstechnik entschieden.

Bei dem Versuch, die Couinaud-Segmente verständlicher abzubilden, haben sich immerhin 84% für die Darstellung der infiltrierten Gebiete über Silhouetten entschieden.

5.4.3 Potentielle Patienten

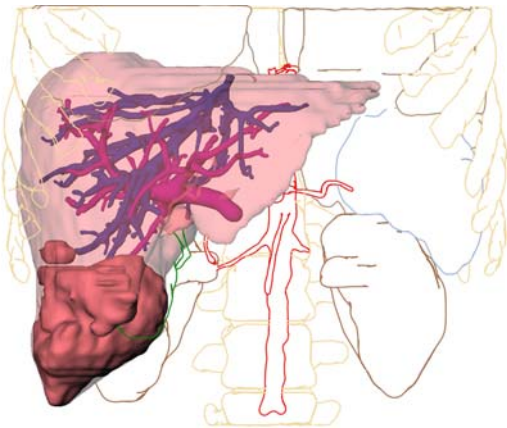
Die Laien waren im Schnitt 27 Jahre alt. Es wurde eine mäßige Erfahrung am PC und bei 3D-Anwendungen angegeben. Bei der Auswertung des Entscheidungsbaums (Diagramm D.4 in Anhang D) konnte keine eindeutige Tendenz für die Bilder ermittelt werden. Hierbei ist anzumerken, dass der Fragebogen nicht für eine Patienten/Laien-Befragung konzipiert worden ist. Die präsentierten Fragen und Visualisierungen dürften für die meisten Befragten sehr neuartig gewesen sein. Dies lässt sich daran erkennen, dass der erste Eindruck im genauen Gegensatz zur Wahl nach der kritischen Auseinandersetzung steht. Ein Beispiel hierfür ist der Vergleich der opaken flächenhaften Visualisierungen, bei denen einmal alle Organe und einmal nur Knochen und Gallenblase dargestellt werden. Hier haben sich vor der kritischen Betrachtung 76% für die unvollständige Darstellung entschieden, nach der Betrachtung haben 73% die andere Darstellung bevorzugt. Im Gegensatz dazu waren die Entscheidungen der Computergrafiker und Mediziner vor und nach der kritischen Auseinandersetzung meist gleichbleibend.

Es gibt jedoch drei Vergleiche, bei denen die Entscheidungen auch hier gleichbleibend und von signifikanter Ausprägung sind. Bei allen drei Vergleichen wurden Varianten eines Visualisierungsstils gegenübergestellt. Beim Vergleich der opaken farbigen Darstellung mit der s/w-Variante wurde die s/w-Darstellung eindeutig favorisiert. Die NPR-Darstellung mit zusätzlichem Shading wurde der Variante ohne Shading zu 100% vorgezogen. Auch wurden die s/w-Silhouetten gegenüber der farbigen Darstellung als hilfreicher empfunden.

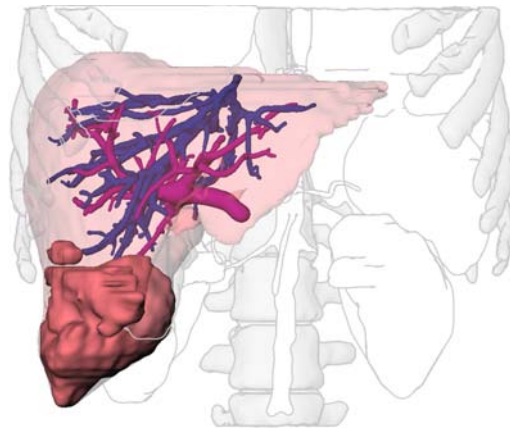
Bei der Frage nach einer optimalen Darstellungsweise der Couinaud-Segmente sind die Angaben sehr widersprüchlich, wodurch keine eindeutige Aussage erzielt werden konnte.

5.5 Schlussfolgerungen

Der Einsatz von NPR-Techniken scheint eine sinnvolle Erweiterung der bisherigen Visualisierungsmöglichkeiten zu sein. Die beiden herausragenden Favoriten der Befragten sind die Visualisierungen in Abbildung 5.9. Eine zusammenfassende Auswertung aller Befragten ist in Diagramm D.5 in Anhang D dargestellt. Hier zeigt sich vor allem der Vorteil der NPR-Technik gegenüber der transparenten Darstellung. Es sind auch Tendenzen zur s/w flächenhaften Darstellung und eine Verbesserung der NPR-Variante durch den Einsatz von zusätzlichem Shading vorhanden.



(a) Die farbigen Silhouetten wurden von zwei Medizinerinnen und mehreren der beiden Anderen Zielgruppen bevorzugt.



(b) Der Einsatz der NPR-Technik mit zusätzlichem Shading wurde von 50% der Befragten als Favorit gekennzeichnet.

Abbildung 5.9: Diese beiden Visualisierungen sind die herausragenden Favoriten der Evaluation.

Der exklusive Einsatz von Silhouetten ohne weitere Informationen über Form oder Farbe des dargestellten Objektes ist von allen Befragten als nachteilig eingestuft

worden. Allerdings sind sehr gute Umfrageergebnisse für die NPR-Techniken bei zusätzlicher Verwendung von Farb- und Forminformationen erzielt worden.

Insbesondere die befragten Mediziner haben sich insgesamt für weniger Kontextinformation ausgesprochen, wobei aber grundlegende Informationen über das Objekt vorhanden sein müssen. Der intensive Einsatz von Farbinformationen in der flächenhaften Darstellung des Kontextes wurde von den meisten Befragten als störend empfunden.

Alle Befragten mussten bei dem Vergleich der flächenhaften farbigen Darstellung mit der s/w-NPR-Darstellung angeben, ob weitere Veränderungen an der Visualisierung zum besseren Verständnis wünschenswert sind. Es wurden im Schnitt mäßige Veränderungen in der Darstellung erwünscht. Der zusätzliche Einsatz der Schraffur oder der Punktieretechnik dürfte eine wesentliche Verbesserung der Qualität der Visualisierung liefern.

Auch in der Therapieplanung scheint der Einsatz der NPR-Techniken sinnvoll zu sein. Die Darstellung der infiltrierten Couinaud-Segmente mittels Silhouetten wurde von 3/4 der befragten Mediziner als sinnvoll erachtet. Leider ist die Anzahl der eingegangenen Ergebnisse noch zu gering, um eindeutige Aussagen hierüber treffen zu können. Es ist noch anzumerken, dass bei der Visualisierung dieser Problematik farbige Silhouetten verwendet worden sind. Der zusätzliche Einsatz von Farbinformationen scheint hier nach den bereits gewonnenen Erkenntnissen ausschlaggebend für das gute Ergebnis gewesen zu sein.

Von den Befragten, die angegeben haben wenig Erfahrung im Umgang mit 3D-Anwendungen zu besitzen, wurde die flächenhafte Darstellungsweise leicht bevorzugt. Bei der Parametrisierung der entworfenen Visualisierungstechniken scheint daher ein weiterer Parameter angebracht zu sein, bei dem der Anwender seine Erfahrung mit 3D-Anwendungen angeben kann. Abhängig davon kann die Visualisierung mit mehr oder weniger Informationen versehen werden.

Um den Umfang des Fragebogens nicht zu sehr expandieren zu lassen, konnten diverse direkte Vergleiche der Visualisierungstechniken nicht durchgeführt werden. Sollte eine weitere Evaluierung in diesem Bereich stattfinden, müssen die stark bevorzugten Techniken gegenübergestellt werden, die bisher noch nicht verglichen worden sind. Hierzu zählt insbesondere der Vergleich zwischen Volumen-Rendering und NPR-Technik. Auch die s/w flächenhafte Darstellung hat ein sehr gutes Ergebnis erzielt und ist noch nicht der NPR-Darstellung gegenübergestellt worden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden zwei Themen bearbeitet: Die kombinierte Darstellung von flächenhaftem, linienhaftem und Volumen-Rendering und die Bestimmung von geeigneten Parametern zur Darstellung aller Strukturen mit diesen Methoden.

Die Kombination der drei Rendering-Stile wurde durch die Zusammenführung von OPENNPAR und ILAB bewerkstelligt. Die meisten der entstandenen Probleme, die sich aus der Kombination dieser beiden Programme und aus der Zusammenführung der drei Rendering-Stile ergeben haben, konnten erfolgreich gelöst werden. Es wurden Sonderfälle bei der Darstellung von linien- und flächenhaften Modellen berücksichtigt. Es wurde ein Szenengraph entwickelt, in dem sich alle Darstellungsarten inklusive der möglichen Sonderfälle kombinieren lassen und der es ermöglicht, alle Objekte aus einem Stil der Visualisierung dynamisch in einen beliebigen anderen Stil zu überführen. Die Objekte werden dabei kontinuierlich in den neuen Stil überführt, wodurch Desorientierungen des Betrachters vermieden werden. Alle Parameter wurden dahingehend untersucht, ob eine automatische Parametrisierung möglich ist. Die Definition von Standardwerten für die einzelnen Parameter wurde soweit wie möglich ausgearbeitet. Viele Parameter, etwa die Wahl des angemessenen Visualisierungsstils, sind problemabhängig und können nicht fest definiert werden.

Weiterhin wurde eine Evaluierung ausgearbeitet, mit der die Parameter von ausgebildeten Medizinern verifiziert werden. Außerdem wurde in diesem Rahmen untersucht, ob die neue Form der medizinischen Visualisierung – die Verwendung des nicht-fotorealistischen Renderings – tatsächlich den erwünschten Fortschritt gebracht hat. Obwohl in der Evaluierung nur der Einsatz von Silhouetten präsentiert werden konnte, hat die Verwendung der NPR-Techniken im Vergleich zu den herkömmlichen Techniken erstaunlich gute Ergebnisse erzielen können. Die Auswertung hat gezeigt, dass die abstrakte Darstellungsweise durch die Liniengrafiken von fast allen Befragten bevorzugt wird. Es wurde bestätigt, dass die neue Darstellungstechnik nicht nur zur Kontextvisualisierung genutzt werden kann, sondern auch, um komplizierte Sachverhalte im Fokus aufzuschlüsseln.

Das angestrebte Ziel, durch den Einsatz von nicht-fotorealistischen Rendering-Methoden eine sinnvolle Ergänzung der bisher eingesetzten Visualisierungstechniken zu schaffen, ist also sogar übertroffen worden.

6.1 Fortführungs- und Verbesserungsvorschläge

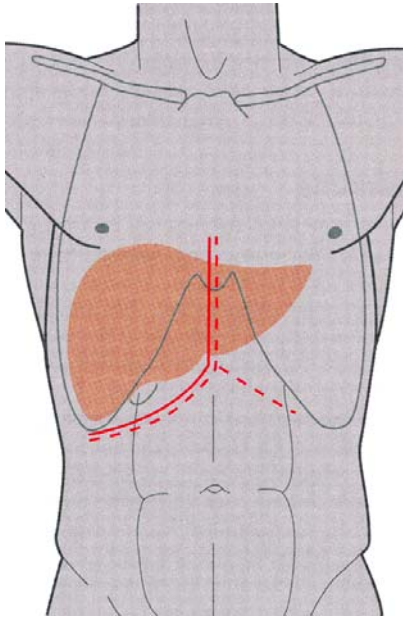
Das in ILAB verwendete Programm HEPAVISION, mit dem zur Zeit alle Strukturen segmentiert werden, speichert die Ergebnisse nur in einem XML-Format ab. Die enthaltenen Daten müssen über ein weiteres Programm namens SIMPLVIEW in das OPEN INVENTOR-Format überführt werden. OPENNPAR wiederum kann nur Objekte bearbeiten, die zuvor mit dem Programm IVFIX bearbeitet wurden. Dieses Programm gehört zum Lieferumfang von OPEN INVENTOR und wandelt alle Objekte in `SoIndexedTriangleStripSets` um. Leider ist dies nicht das Format, das von SIMPLVIEW ausgegeben wird. Ein weiteres Problem bei der Konvertierung in das OPEN INVENTOR Format ist, dass SIMPLVIEW für die extrahierten Modelle einen Material-Knoten generiert und diesen mit in der Datei abspeichert. Dieser hat für die Objekte oberste Priorität, sodass diese nicht mehr dynamisch eingefärbt werden können. Der Knoten muss daher manuell aus der Datei entfernt werden. Zur Zeit müssen somit diverse Konvertierungsschritte durchgeführt werden, um die segmentierten Strukturen mit den neuen Methoden visualisieren zu können. Eine Automatisierung dieser Schritte wäre sehr hilfreich.

Die in OPENNPAR implementierte Schraffur lässt sich nur auf wenige Modelle anwenden. Eine Systematik bei der Fehlfunktion in Bezug auf die Modelle ist nicht zu erkennen. Weder die Größe noch die Form der Objekte war charakteristisch. Um die Aussagekraft der Visualisierungen zu verbessern, ist die Behebung dieses Problems zwingend erforderlich.

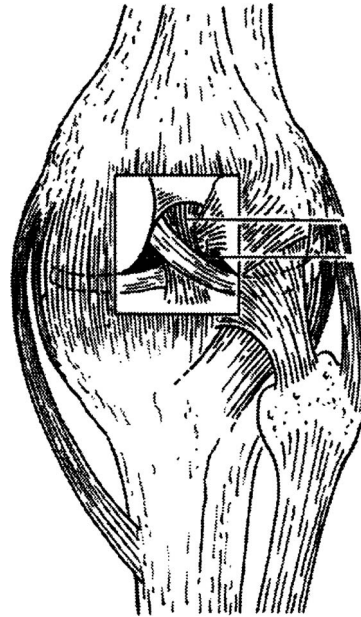
In abstrahierten medizinischen Illustrationen kommt auch das Stippling zum Einsatz. Diese Technik ist zur Zeit noch nicht in OPENNPAR implementiert. Durch diese Technik würde die Qualität der Visualisierung jedoch wesentlich verbessert werden. Zur Linienreduktion ist zur Zeit nur der *Hidden-Line-Remover* verfügbar, doch auch andere Arten der Linienreduktion sind denkbar. In medizinischen Atlanten werden auch so genannte *Cut-Away-Views* verwendet, um die Sicht auf wichtige Strukturen zu ermöglichen. DIEPSTRATEN et al. [2003] haben ein Verfahren entwickelt, mit dem sich diese Technik nachbilden lässt.

Insbesondere die Berechnung der transparenten Silhouetten aus Abschnitt 3.4.6 war sehr zeitintensiv, da zur Wiederherstellung des z -Buffers alle benötigten Objekte noch einmal gerendert werden mussten. Durch die Einführung eines z -Buffer-Elementes, das den Zustand des z -Buffers als 2D-Matrix speichert, kann der benötigte z -Buffer schnell rekonstruiert werden. Die Frame-Rate würde so drastisch erhöht werden können.

Als größter Abstraktionsgrad wird zur Zeit die Silhouette eingesetzt. In der medizinischen Illustration werden Objekte im Kontext jedoch auch in einer Form präsentiert, die in der Computergrafik als visuelle Hülle bezeichnet wird (Abbildung 6.1(a)). Ein Ansatz zur Generierung der visuellen Hülle auf 3D-Modellen ist bereits von MATUSIK et al. [2001] vorgestellt worden.



(a) Visuelle Hülle des Brustkorbes als Silhouette zur Erläuterung von Schnittführungen bei einer Leber-Operation Quelle: PRIESCHING [1986].



(b) *Cut-Away-View* zur Hervorhebung des Kreuzbandes am menschlichen Knie. Quelle: SCHUMPELICK et al. [2003].

Im Zusammenhang mit dem Volumen-Rendering lassen sich keine farbige Linien erzeugen. Die Evaluierung hat jedoch gezeigt, dass die farbliche Kodierung der Linien sehr wichtig für den sinnvollen Einsatz der Silhouetten ist. Gerade im Zusammenhang mit dem Volumen-Rendering würden sich die Linien so auch besser von dem Rendering differenzieren lassen. Das Problem ist, dass die generierten Linien nicht mit Attributen versehen werden können. Durch das Ausstatten der Linien mit Attributen könnten nicht nur farbige Linien erzeugt werden, sondern auch andere Möglichkeiten zur Visualisierung ausgeschöpft werden. Etwa die variable Darstellung der Linien im Bezug auf die Entfernung zur Kamera. Wenn die zu zeichnenden Objekte selbst mit Attributen ausgestattet würden, die bei dem Durchlaufen der Stilisierungspipeline der Liniengrafiken berücksichtigt werden würden, wäre nur noch ein einziger *Level-of-Detail*-Subgraph vonnöten, um alle Objekte mit einem getrennten Abstrahierungsgrad versehen zu können.

In der Medizin gibt es bereits Ansätze, die versuchen, alle existierenden Strukturen und krankhaften Veränderungen im Körper systematisch einzuordnen. Ein solcher Ansatz ist SNOMED [CÔTÉ et al., 1993]. Hier wird unter anderem die Aufteilung in Dimensionen wie Topographie und Funktion vorgeschlagen. Eine Eignung solcher Systeme in diesem Zusammenhang muss noch weiter untersucht werden.

Reizvoll wäre aber auch eine ortsabhängige Transferfunktion, die von anterior nach posterior abnimmt. Auf diese Weise kann eine Illustration nachgebildet werden, indem das Gesicht klar zu erkennen wäre und die Strukturen im Schädel zum Hinterkopf hin auslaufen (siehe Abbildung 2.6(b) auf Seite 11).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Der Cache sollte außerdem weiter verfeinert werden. Wünschenswert ist beispielsweise die selbstständige Zerstörung von Daten bei nicht ausreichendem Speicherplatz, abhängig von dem Zeitpunkt der letzten Verwendung und Dauer der Generierung.

Die Fülle der sich ergebende Möglichkeiten und Ideen zeigt, wie wichtig die hier entwickelte Zusammenführung der medizinischen Visualisierung mit den Techniken des nicht-fotorealistischen Renderings ist.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Vergleich einer herkömmlichen und einer computergenerierten Darstellung	1
2.1	Antike Zeichnungen der menschlichen Anatomie.	6
2.2	Handzeichnungen aus medizinischen Atlanten	7
2.3	Die Blutversorgung des Herzens	8
2.4	Darstellung der Blutversorgung des Schädels	9
2.5	Gleichbleibende Farbwahl trotz unterschiedlicher Quellen	10
2.6	Ansatz und Verlauf von Nervenbahnen im Kopf	11
2.7	Einsatz von Schraffur und Silhouetten zur Illustration	12
2.8	Sonographie bei intraabdominellem Abszess	13
2.9	Einsatz der Punktierung- und Schraffierungstechnik.	16
2.10	Texturunterstützte Wiedergabe der Objektoberfläche	18
2.11	Computergenerierte Darstellung einer Gallone	19
2.12	Silhouetten-Extraktion durch <i>G-Buffer</i>	20
2.13	Isolinien durch <i>G-Buffer</i>	21
2.14	Marsbananen	22
2.15	Bildbasierter Ansatz der Schraffurgenerierung	22
2.16	Schraffur in Hauptkrümmungsrichtung.	24
2.17	Einfache Schraffur in Hauptkrümmungsrichtung	25
2.18	Vergleich von realen und segmentierten Leberoberflächen	26
2.19	Darstellung der Wirbelsäule mit Hilfe mittels DVR	28
2.20	Volumen-Darstellung mit Hilfe von Iso-Oberflächen.	30
2.21	Vorteil der NPR-Darstellung gegenüber der normalen Variante	32
2.22	Stippling und Tone-Shading anhand von Volumendaten	33
2.23	Kombination von NPR-Volumen-endering-Stilen	34
2.24	Das VOXEL-MAN/Inner-Organs Modell	37
3.1	Drei herkömmliche Möglichkeiten zur Darstellung des Kontextes.	40
3.2	Getrennte Hervorhebung zweier Objekte	42
3.3	Drei Varianten zur Visualisierung der Leber als Kontext	43
3.4	Fragestellungen für die Leberoperationsplanung	46
3.5	Drei Varianten zur Visualisierung der rechten Niere	47
3.6	Sicherstellen der Sichtbarkeit beim Volumen-Rendering	49

3.7	Verschiedene Varianten zur Abstufung des Kontextes	51
3.8	Auswahl eines Objektes per Maus.	52
3.9	Ausblendung der Schraffur am Beispiel der rechten Niere.	54
3.10	Ausblendung des Volumen-Rendering-Kontextes	54
3.11	Flächenhaften Kontext über verschiedene Stufen langsam ausblenden	55
3.12	Pipeline-Prinzip	57
3.13	Normaler Szenengraph.	59
3.14	Reduzierung der Volumendaten	59
3.15	NPR Szenengraph	60
3.16	Kombinierter Szenengraph	62
3.17	Level-of-Detail	63
3.18	Transparente Liniengrafiken	64
3.19	Anwendung einzeln generierter z -Buffer.	64
4.1	Normaler OPENNPAR-Szenengraph	71
4.2	Interner Aufbau der OPENNPAR-Knoten	73
5.1	Darstellung der Leber mit intrahepatischen Strukturen	87
5.2	Unterschiedliche Varianten zur Visualisierung des Kontextes.	88
5.3	Unterschiedliche Varianten zur Visualisierung des Kontextes.	89
5.4	Unterschiedliche Varianten zur Visualisierung des Kontextes.	90
5.5	Unterschiedliche Varianten zur Visualisierung des Kontextes.	90
5.6	Koronale Ausrichtung des Leberdatensatzes.	91
5.7	Sagittale Ausrichtung des Leberdatensatzes.	92
5.8	Axiale Ausrichtung des Leberdatensatzes.	92
5.9	Die herausragenden Favoriten der Evaluierung	95
B.1	Szenengraph zur Generierung von transparenten Silhouetten	113
B.2	Szenengraph mit Cache	114
B.3	Szenengraph ohne Cache	115
D.1	Auflistung der erhobenen Daten.	133
D.2	Entscheidung der Mediziner	134
D.3	Entscheidung der Computergrafiker	135
D.4	Entscheidung der potentiellen Patienten	136
D.5	Entscheidung insgesamt	137

Literaturverzeichnis

- Ragnar Bade, Sebastian Mirschel, Karl J. Oldhafer, und Bernhard Preim. Ein fallbasiertes Lernsystem für die Behandlung von Lebertumoren. In *Bildverarbeitung für die Medizin*, Informatik aktuell, Seiten 438–442. Springer-Verlag, 2004.
- Bruce G. Baumgart. Winged edge polyhedron representation. Forschungsbericht, Stanford University, 1972.
- Fabien Benichou und Gershon Elber. Output sensitive extraction of silhouettes from polygonal geometry. In *Proceedings of the 7th Pacific Conference on Computer Graphics and Applications*, Seite 60. IEEE Computer Society, 1999.
- John W. Buchanan und Mario Costa Sousa. The Edge Buffer: A Data Structure for Easy Silhouette Rendering. In Jean-Daniel Fekete und David Salesin, Hrsg., *Proceedings of the first international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*, Seiten 39–42. ACM Press, Juni 2000.
- Claude Couinaud. *Le Foie - Etudes anatomiques et chirurgicales*. Masson, Paris, 1957.
- Balázs Csébfalvi, Lukas Mroz, Helwig Hauser, Andreas König, und Eduard Gröller. Fast Visualization of Object Contours by Non-Photorealistic Volume Rendering. *Computer Graphics Forum*, 20(3):452–460, 2001.
- R. A. Côté, D. J. Rothwell, und R. S. Palotay. *Snomed International: The Systematized Nomenclature of Human and Veterinary Medicine*. College of American Pathologists, 3. Aufl., Juni 1993.
- Leonardo da Vinci. *Anatomical Notebooks*. Biblioteca Ambrosiana, Milan, Italy, 1510.
- Joachim Diepstraten, Daniel Weiskopf, und Thomas Ertl. Interactive Cutaway Illustrations. *Computer Graphics Forum*, 22(3):523–532, 2003.
- T. Todd Elvins. A survey of algorithms for volume visualization. *Computer Graphics*, 26(3):194–201, 1992.
- Martin R. Fischer, S. Schauer, und Cornelia Gräsel. Modellversuch CASUS. Ein computergestütztes Autorensystem für die Problemorientierte Lehre in der Medizin. *Zeitschrift für Ärztliche Fortbildung*, 90:385–389, 1996.

- Thomas Gerstner. Multiresolution Extraction and Rendering of Transparent Isosurfaces. *Computers & Graphics*, 26(2):219–228, 2002.
- Thomas Gerstner und Martin Rumpf. Multiresolutional Parallel Isosurface Extraction based on Tetrahedral Bisection. In Min Chen, Arie Kaufman, und Roni Yagel, Hrsg., *Volume Graphics*, Seiten 267–278. Springer-Verlag, 2000.
- Ahna Girshick, Victoria L. Interrante, Steven Haker, und Todd Lemoine. Line direction matters: an argument for the use of principal directions in 3D line drawings. In Jean-Daniel Fekete und David Salesin, Hrsg., *Proceedings of the first international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*, Seiten 43–52. ACM Press, Juni 2000.
- Amy A. Gooch. Interactive Non-photorealistic Technical Illustration. Diplomarbeit, University of Utah, Dezember 1998.
- Markus Hadwiger, Christoph Berger, und Helwig Hauser. High-Quality Two-Level Volume Rendering of Segmented Data Sets on Consumer Graphics Hardware. In Georges-Pierre Bonneau, Stefanie Hahmann, und Chuck Hansen, Hrsg., *Proceedings Eurographics-IEEE Visualization Symposium 2003*, Seiten 301–308. ACM Press, Oktober 2003.
- Horst K. Hahn, Florian Link, und Heinz-Otto Peitgen. Concepts for Rapid Application Prototyping in Medical Image Analysis and Visualization. In Thomas Schulze, Stefan Schlechtweg, und Volkmar Hinz, Hrsg., *Simulation und Visualisierung 2003*, Seiten 283–298, Erlangen, San Diego, März 2003. SCS–Society for Computer Simulation Int., SCS–European Publishing House.
- Nick Halper, Tobias Isenberg, Felix Ritter, Bert Freudenberg, Oscar Meruvia, Stefan Schlechtweg, und Thomas Strothotte. OpenNPAR: A System for Developing, Programming, and Designing Non-Photorealistic Animation and Rendering. In Jon Rokne, Reinhard Klein, und Wenping Wang, Hrsg., *Proceedings of Pacific Graphics 2003*, Seiten 424–428, Los Alamitos, CA, 2003a. IEEE.
- Nick Halper, Mara Mellin, Christoph S. Herrmann, Volker Linneweber, und Thomas Strothotte. Towards an Understanding of the Psychology of Non-Photorealistic Rendering. In Jochen Schneider, Thomas Strothotte, und Winfried Marotzki, Hrsg., *Proc. Workshop Computational Visualistics, Media Informatics and Virtual Communities*, Seiten 67–78, Wiesbaden, April 2003b. Deutscher Universitäts-Verlag.
- Aaron Hertzmann. Introduction to 3D Non-Photorealistic Rendering: Silhouettes and Outlines. In Stuart Green, Hrsg., *Non-Photorealistic Rendering (Siggraph 99 Course Notes)*. ACM Press, August 1999.

- Aaron Hertzmann und Denis Zorin. Illustrating Smooth Surfaces. In Judith R. Brown und Kurt Akeley, Hrsg., *Proceedings of the 27th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Seiten 517–526. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., Juni 2000.
- Karl Heinz Höhne, Bernhard Pflesser, Andreas Pommert, Kay Priesmeyer, Martin Riemer, Thomas Schiemann, Rainer Schubert, Ulf Tiede, Hans Frederking, Sebastian Gehrman, Stefan Noster, und Udo Schumacher. *VOXEL-MAN 3D-Navigator: Inner Organs. Regional, Systemic and Radiological Anatomy*. Springer-Verlag Heidelberg New York, 2003. DVD-ROM.
- Elaine R. S. Hodges, Hrsg. *The Guild Handbook of Scientific Illustration*. Van Nostrand Reinhold, New York, 1989.
- Josef Hoschek und Dieter Lasser. *Grundlagen der geometrischen Datenverarbeitung*. Teubner Verlag, 1992.
- Victoria L. Interrante. Illustrating Surface Shape in Volume Data via Principal Direction-Driven 3D Line Integral Convolution. In G. Scott Owen, Turner Whitted, und Barbara Mones-Hattal, Hrsg., *Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Seiten 109–116. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., August 1997.
- Victoria L. Interrante und Sunghee Kim. Investigating the Effect of Texture Orientation on the Perception of 3D Shape. In Bernice E. Rogowitz und Thrasyloulos N. Pappas, Hrsg., *Human Vision and Electronic Imaging VI*, Bd. 4299, Seiten 330–339. SPIE, Juni 2001.
- Tobias Isenberg, Bert Freudenberg, Nick Halper, Stefan Schlechtweg, und Thomas Strothotte. A Developer’s Guide to Silhouette Algorithms for Polygonal Models. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 23(4):28–37, 2003.
- Tobias Isenberg, Nick Halper, und Thomas Strothotte. Stylizing Silhouettes at Interactive Rates: From Silhouette Edges to Silhouette Strokes. *Computer Graphics Forum*, 21(3):249–258, 2002.
- Sunghee Kim, Haleh Hagh-Shenas, und Victoria L. Interrante. Conveying Shape with Texture: an experimental investigation of the impact of texture type on shape categorization judgments. In Tamara Munzner und Stephen North, Hrsg., *Proceedings of the IEEE Symposium on Information Visualization*, Seiten 163–170. ACM Press, Oktober 2003a.
- Sunghee Kim, Haleh Hagh-Shenas, und Victoria L. Interrante. Showing Shape with Texture: two directions seem better than one. In Bernice E. Rogowitz und Thrasyloulos N. Pappas, Hrsg., *Human Vision and Electronic Imaging VIII*, Bd. 5007, Seiten 332–339. SPIE, Juni 2003b.

- Uwe Kühnapfel, Hüseyin Kemâl Çakmak, und Heiko Maaß. Endoscopic Surgery Training using Virtual Reality and deformable Tissue Simulation. In *Computers & Graphics*, Bd. 24, Seiten 671–682. Elsevier, 2000.
- Philippe Lacroute und Marc Levoy. Fast Volume Rendering Using a Shear-Warp Factorization of the Viewing Transformation. *Computer Graphics*, 28(Annual Conference Series):451–458, 1994.
- Adam Lake, Carl Marshall, Mark Harris, und Marc Blackstein. Stylized rendering techniques for scalable real-time 3D animation. In Jean-Daniel Fekete und David Salesin, Hrsg., *Proceedings of the first international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*, Seiten 13–20. ACM Press, Juni 2000.
- Wolfgang Leister. Computer Generated Copper Plates. *Computer Graphics Forum*, 13(1):69–77, März 1994.
- William E. Lorensen und Harvey E. Cline. Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. In Maureen C. Stone, Hrsg., *Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Seiten 163–169. ACM Press, 1987.
- Aidong Lu, Christopher J. Morris, David S. Ebert, Penny Rheingans, und Charles Hansen. Non-photorealistic volume rendering using stippling techniques. In *Proceedings of the conference on Visualization '02*, Seiten 211–218. IEEE Computer Society, 2002.
- Eric B. Lum und Kwan-Liu Ma. Hardware-accelerated parallel non-photorealistic volume rendering. In Adam Finkelstein, Hrsg., *Proceedings of the second international symposium on Non-photorealistic animation and rendering*, Seiten 67–ff. ACM Press, Juni 2002.
- Wojciech Matusik, Chris Buehler, und Leonard McMillan. Polyhedral visual hulls for Real-Time rendering. In *Proceedings of 12th Eurographics Workshop on Rendering*, Seiten 115–126, 2001.
- Sebastian Mirschel. Erstellung eines Prototypen für ein fallbasiertes Lernsystem in der Leberchirurgie. Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Mai 2004.
- Karl-Josef Moll und Michaela Moll. *Kurzlehrbuch Anatomie*. Urban & Fischer, 16. Aufl., 2000.
- Didier Mutter und Jacques Marescaux. *WSCHOLE2 – Laparoscopic cholecystectomy for symptomatic cholelithiasis*. WebSurg - Customer Service – IRCAD / Hôpitaux Universitaires Strasbourg, 2003. CD-ROM.
- Bernd Nettelbeck. Zeitlich gesteuerte Änderung von Darstellungsstilen. Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Germany, Februar 2003.

- Frank H. Netter. *Farbatlantzen der Medizin - The Ciba Collection of Medical Illustrations*, Bd. 1, Herz. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 3. Aufl., 1998.
- Steffen Oeltze. Visualisierung von baumartigen anatomischen Strukturen mit Convolution Surfaces. Diplomarbeit, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2004.
- Karl J. Oldhafer, Bernhard Preim, Christina Dörge, Heinz-Otto Peitgen, und Christoph E. Broelsch. Akzeptanz einer computergestützten Operationsplanung in der Viszeralchirurgie – Ergebnisse einer bundesweiten Befragung. *Zentralblatt für Chirurgie*, 127(2):128–133, 2002.
- David L. Page, Yiyong Sun, Andreas Koschan, Joonki Paik, und Mongi A. Abidi. Robust crease detection and curvature estimation of piecewise smooth surfaces from triangle mesh approximations using normal voting. In *Proceedings of the International Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, Bd. I, Seiten 162–167. IEEE, Dezember 2001.
- Oscar Meruvia Pastor und Thomas Strothotte. Frame-Coherent Stippling. In *Eurographics Conference 2002*, Seiten 145–152. The Eurographics Association, 2002.
- Emil Praun, Hugues Hoppe, Matthew Webb, und Adam Finkelstein. Real-Time Hatching. In Lynn Pocock, Hrsg., *Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Seiten 579–584. ACM Press, Juni 2001.
- Bernhard Preim, Milo Hindennach, Wolf Spindler, Andrea Schenk, Arne Littmann, und Heinz-Otto Peitgen. Visualisierungs- und Interaktionstechniken für die Planung lokaler Therapien. In Thomas Schulze, Stefan Schlechtweg, und Volkmar Hinz, Hrsg., *Simulation und Visualisierung 2003*, Seiten 237–248, Erlangen, San Diego, März 2003. SCS–Society for Computer Simulation Int., SCS–European Publishing House.
- Bernhard Preim, Wolf Spindler, und Heinz-Otto Peitgen. Interaktive medizinische Volumenvisualisierung - ein Überblick. In Thomas Schulze, Peter Lorenz, und Volkmar Hinz, Hrsg., *Simulation und Visualisierung 2000*, Seiten 69–88, Genf, Belgien, März 2000. SCS–Society for Computer Simulation Int., SCS Europe.
- Alfred Priesching. *Leberresektionen. Chirurgische Anatomie, Indikationen, Technik*. Urban & Schwarzenberg Verlag, München, 1986.
- Reinhard Putz und Reinhard Pabst. *Sobotta – Atlas der Anatomie des Menschen, Band 1, Kopf, Hals, obere Extremität*. Urban & Schwarzenberg, 20. Aufl., 1993.
- Penny Rheingans und David Ebert. Volume Illustration: Nonphotorealistic Rendering of Volume Models. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 7(3):253–264, 2001.

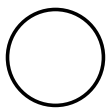
- Jens Riedel, Reiner Singer, Jörn Heid, und Franz Josef Leven. *CAMPUS: Ein simulatives und flexibles fallbasiertes web-based Training System für die medizinische Ausbildung*, Bd. 7. Shaker Verlag, Aachen, Mai 2000.
- Felix Ritter. Interaktives Zusammensetzen von 3D-Modellen zur Unterstützung des räumlichen Verständnisses. Diplomarbeit, Otto-von-Guericke Universität Magdeburg, 1999.
- Andrew W. Rogers. *Textbook of Anatomy*. Churchill Livingstone, 1992.
- T.A. Ryan und C.B. Schwartz. Speed of perception as a function of mode of representation. *American Journal of Psychology*, 69:60–69, 1956.
- Takafumi Saito und Tokiichiro Takahashi. Comprehensible rendering of 3-D shapes. In Forest Baskett, Hrsg., *Proceedings of the 17th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Seiten 197–206. ACM Press, August 1990.
- Volker Schumpelick, Niels M. Bleese, und Ulrich Mommsen. *Kurzlehrbuch Chirurgie*. Georg Thieme Verlag, 6. Aufl., September 2003.
- Johannes Sobotta. *Sobotta interaktiv: Bewegungsapparat*. Urban & Schwarzenberg, März 2000. CD-ROM.
- Mario Costa Sousa und Przemyslaw Prusinkiewicz. A Few Good Lines: Suggestive Drawing of 3D Models. *Computer Graphics Forum*, 22:381–390, September 2003.
- Paul S. Strauss und Rikk Carey. An Object-Oriented 3D Graphics Toolkit. In James J. Thomas, Hrsg., *Proceedings of the 19th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Seiten 341—349. ACM Press, 1992.
- Thomas Strothotte und Stefan Schlechtweg. *Non-Photorealistic Computer Graphics: Modeling, Rendering, and Animation*. Morgan Kaufmann, San Francisco, April 2002.
- Bjarne Stroustrup. *Die C++ Programmiersprache*. Addison-Wesley, 1. Aufl., Mai 2000.
- TeraRecon. VOLUMEPRO VP1000D, Februar 2004. URL http://www.terarecon.com/products/volumepro_prod.html.
- Walter Thiel. *Photographischer Atlas der Praktischen Anatomie*. Springer-Verlag Berlin, 2. Aufl., Oktober 2002.
- Ulf Tiede, Thomas Schiemann, und Karl Heinz Höhne. Visualizing the Visible-Human. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 16(1):7–9, Januar 1996.
- Andreas Versalius. *De Humani Corporis Fabrica*. National Library of Medicine, Basel, 1543.
- Anton Waldeyer und Anton Mayet. *Anatomie des Menschen*. de Gruyter, 15. Aufl., 1987.

- Colin Ware. *Information Visualization*. Morgan Kaufmann Publishers, 2000.
- Josie Wernecke. *The Inventor Mentor: Programming Object-Oriented 3D Graphics with Open Inventor, Release 2*. Addison-Wesley, 1. Aufl., März 1994a.
- Josie Wernecke. *The Inventor Toolmaker: Extending Open Inventor, Release 2*. Addison-Wesley, 1. Aufl., Mai 1994b.
- Lance R. Williams. Pyramidal parametrics. In Peter P. Tanner, Hrsg., *Proceedings of the 10th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, Seiten 1–11. ACM Press, Juli 1983.
- Johannes Zander, Tobias Isenberg, Stefan Schlechtweg, und Thomas Strothotte. High Quality Hatching. *Computer Graphics Forum (Proceedings of Eurographics)*, 23(3), September 2004.
- Jianlong Zhou, Manfred Hinz, und Klaus D. Tönnies. Hybrid Focal Region-Based Volume Rendering of Medical Data. In *Bildverarbeitung für die Medizin 2002*, Seiten 113–116. Springer-Verlag, März 2002.
- Karel J. Zuiderveld und Max A. Viergever. Multi-modal volume visualization using object-oriented methods. In *Proceedings of the 1994 symposium on Volume visualization*, Seiten 59–66. ACM Press, 1994.

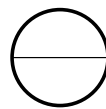
A Symbole

Die Symbole stammen aus der auf Szenengraphen basierenden Bibliothek OPEN INVENTOR. Da die Symbole nicht ausreichen, um die Funktionalität der Knoten zum Erstellen der Liniengrafiken und zum Modifizieren der Volumendaten darzustellen, wurden neue Symbole selbst hinzugefügt.

Verwendete Open Inventor-Symbole



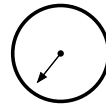
SoGroup – ganze Subgraphen können unter einem solchen Gruppenknoten zusammengefasst werden.



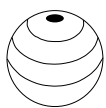
SoSeparator – Spezieller Gruppenknoten. Alle Wechsel der Eigenschaften wie Material oder Transformationen, die im Subgraphen vorgenommen werden, wirken sich nicht auf nachfolgende Knoten aus.



SoSubGraph – Schematische Darstellung eines Subgraphen.



SoSwitch – Auch zur Darstellung des LOD verwendet. Nur eines der in diesem Knoten hängenden Kinder wird traversiert.



SoAppearance – Die Darstellungsparameter werden mit diesem Knoten gesetzt.

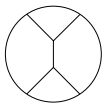


SoTransform – Knoten zum modifizieren der Transformationsmatrix.

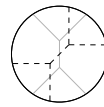


SoShape – Geometrische Daten.

Neue Symbole



SoGenerateWingedEdge – Erzeugt *Winged-Edge* Datenstruktur anhand von Geometriedaten.



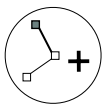
SoModifyWingedEdge – Modifiziert die *Winged-Edge*-Datenstruktur.



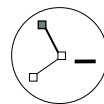
SoGenerateZBuffer – Rendert ausschließlich den *z*-Buffer für einen SoShape.



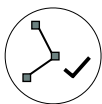
SoRemoveZBuffer – Löscht den gesamten *z*-Buffer.



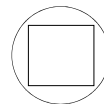
SoGenerateLines – Knoten zur Liniengenerierung wie etwa Silhouetten.



SoRemoveLines – Knoten zum Löschen von Linien wie etwa der *Hidden Line Remover*.



SoDisplayLines – Rendern aller Linien auf den Bildschirm.



SoVolRen – Rendern eines Volumendatensatzes.

B Szenengraphen

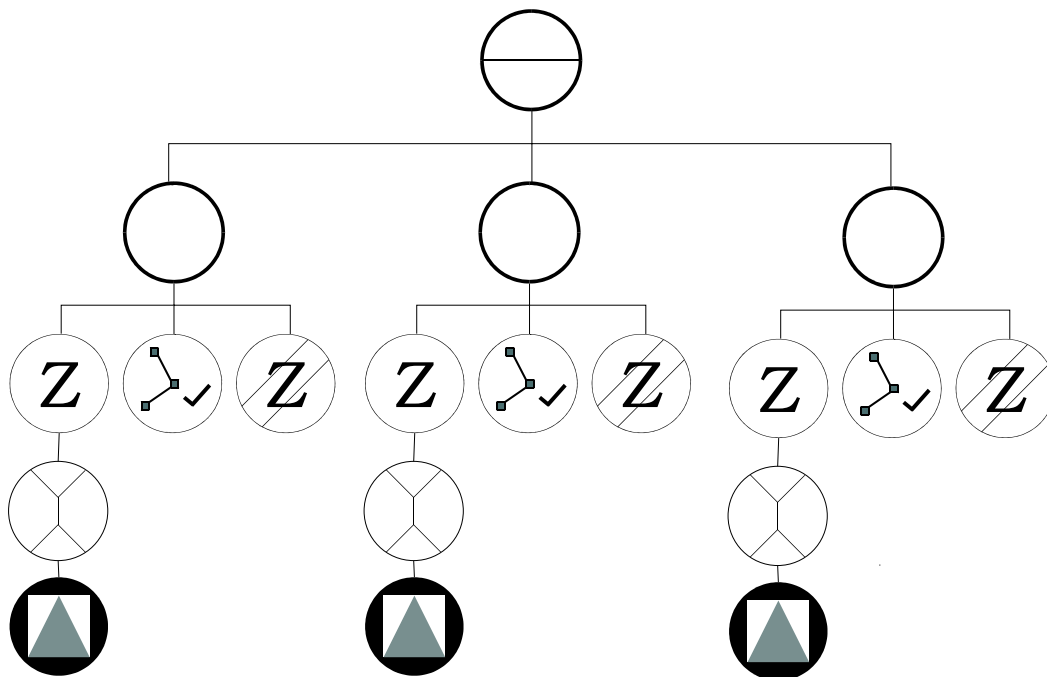


Abbildung B.1: Szenengraph zur Generierung von transparenten Silhouetten. Sollen zusätzliche, nicht transparente Gebiete dargestellt werden, so müssen die z -Buffer für diese Objekte vor jeder Bestimmung einer transparenten Silhouette mit gesetzt werden.

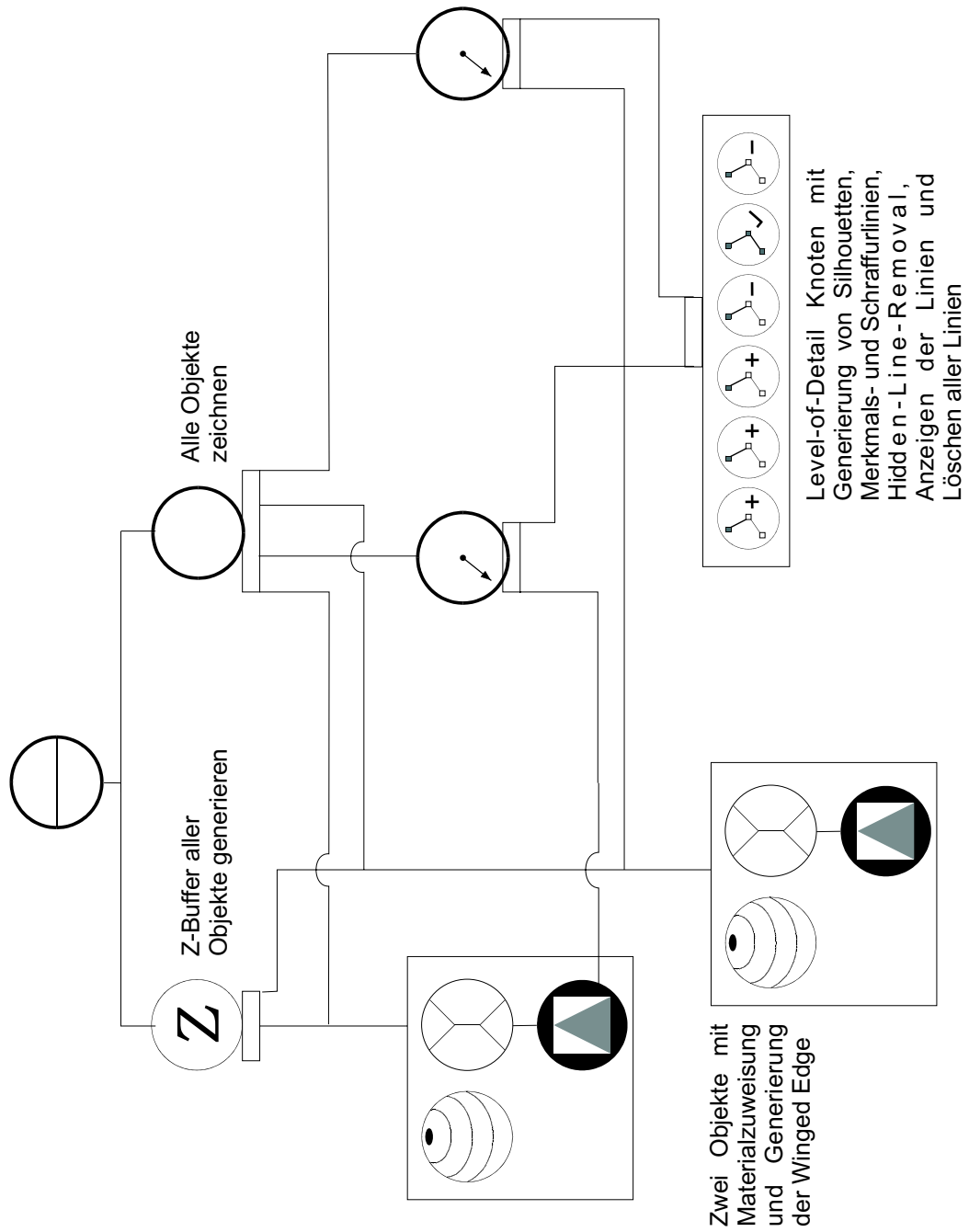


Abbildung B.2: Szenengraph mit Cache. Durch den Cache können alle Knoten zur Erstellung der Liniengrafiken wiederverwendet werden.

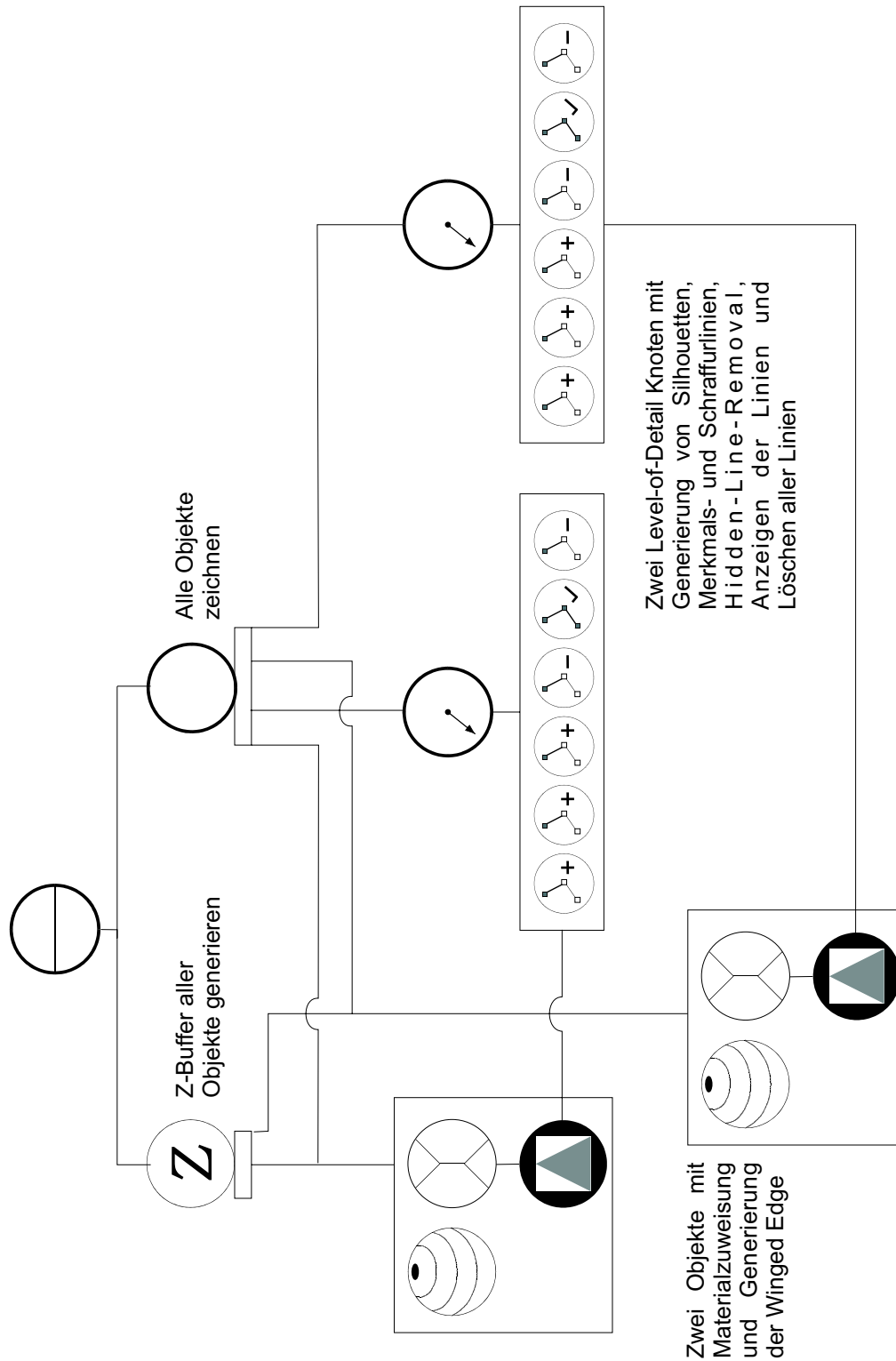


Abbildung B.3: Szenengraph ohne Cache. Alle Knoten zur Erzeugung der Liniengrafiken müssen für jedes Objekt aufs Neue eingefügt werden.

C Fragebogen

An dieser Stelle wird der Fragebogen vorgestellt, der zur Evaluierung an die Mediziner am Allgemeinen Krankenhaus Celle versendet wurde. Die Fremdwörter und anatomischen Gegebenheiten, die in dem Fragebogen verwendet werden, werden kurz erläutert, da sie für das Verständnis der Fragen notwendig sind. Die gleiche Erklärung wurde auch den Computergrafikern und Laien mitgeliefert, welche diesen Fragebogen ebenfalls ausgefüllt haben.

Hepar ist Latein und heißt übersetzt *Leber*. Aus diesem Begriff leiten sich die Wörter *intrahepatisch* und *extrahepatisch* ab. Intrahepatisch sind hierbei die Strukturen innerhalb der Leber und extrahepatisch alle Strukturen außerhalb der Leber.

Bei den Medizinerinnen ist im Bezug auf den Patienten links und rechts vertauscht, da sie immer von der linken und der rechten Seite des Patienten ausgehen, nicht von ihrer eigenen Blickrichtung. Der so genannte rechte Rippenbogen ist deswegen im Bild links zu sehen.

Die Lage der Nieren und der Lungenflügel dürfte allgemein bekannt sein (jeweils die braunen Organe oben und unten). Das blau dargestellte Organ ist die Milz, das grüne Organ ist die Gallenblase. Die blassrote opake Struktur ist nicht die Leber (das wurde von vielen Befragten angenommen), sondern der Lebertumor. Die Leber selbst ist ebenfalls blassrot, aber transparent dargestellt, um die Gefäße im Inneren anzeigen zu können.

Auf der vorletzten Seite wird die Leber in einer anderen Form dargestellt. Hier ist nur die Leber ohne extrahepatische Strukturen zu sehen. Die Leber wurde in ihre einzelnen Couinaud-Segmente unterteilt. Diese Segmente bezeichnen die einzelnen Gebiete der Leber, die von einem der Teilläste der Leberarterie versorgt werden. Die Leberarterie selbst ist anhand der Risikoanalyse farblich kodiert.

FRAGEBOGEN

zur Verwendung computergestützter
Visualisierungstechniken für die medizinische Ausbildung

**Christian Tietjen & Sebastian Mirschel &
Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim
23. April 2004**



Sehr geehrte Damen und Herren,

in der Arbeitsgruppe Visualisierung beschäftigen wir uns mit computer-gestützten Visualisierungstechniken für die medizinische Ausbildung (Anatomie, Chirurgie) und erbitten Ihre Meinung zu ausgewählten Beispielfildern. Trotz des Umfangs gehen wir davon aus, dass der Fragebogen in 15-20 Minuten ausgefüllt werden kann.

Es kommt uns darauf an, Bildinhalte möglichst gut zu vermitteln. Die Ihnen vorliegenden Bilder sind einer interaktiven 3D-Darstellung entnommen, in der die Inhalte frei bewegt werden können. Sie spiegeln das wieder, was zurzeit technisch möglich ist. Die Befragung dient dazu, geeignete Techniken zu identifizieren, um sie in fallbasierte Lernsysteme zu integrieren.

Auf jeder Seite werden Ihnen zwei Bilder präsentiert. Dazu gibt es zwei Frage-Antwort-Typen. Zum einen erfragen wir Ihre Präferenz bei einer gegebenen Fragestellung. Zum anderen erfragen wir eine Bewertung auf einer Skala (-, -, 0, +, ++). Die Fragen beziehen sich immer auf den direkten Vergleich der Bilder.

Sollte Ihnen etwas auffallen, was von unseren Fragen nicht erfasst wird, bitten wir Sie, dies zu vermerken oder auch direkt im Bild einzuzuzeichnen. Am Ende des Fragebogens werden wir Sie bitten, das Bild zu präzisieren, das Ihnen am besten gefallen hat.

Wir möchten uns ganz herzlich für Ihre Mühe bedanken.

Sebastian Mirschel & Christian Tietjen & Prof. Dr.-Ing. Bernhard Preim

Zu Beginn möchten wir Ihnen einige persönliche Fragen stellen.

Wie alt sind Sie? Jahre
Geschlecht? männlich weiblich

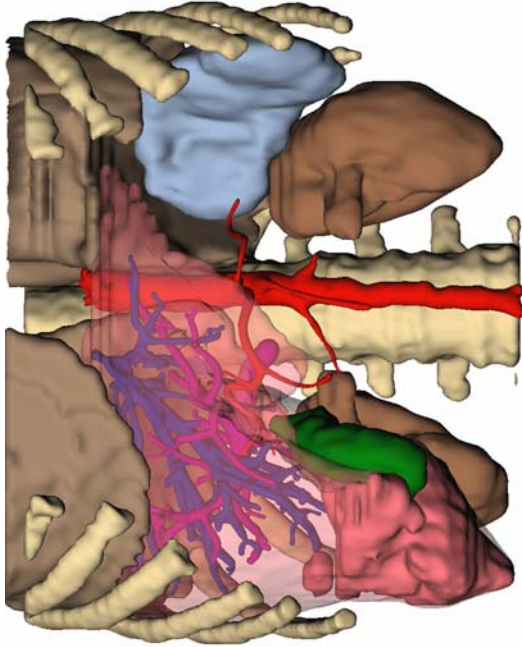
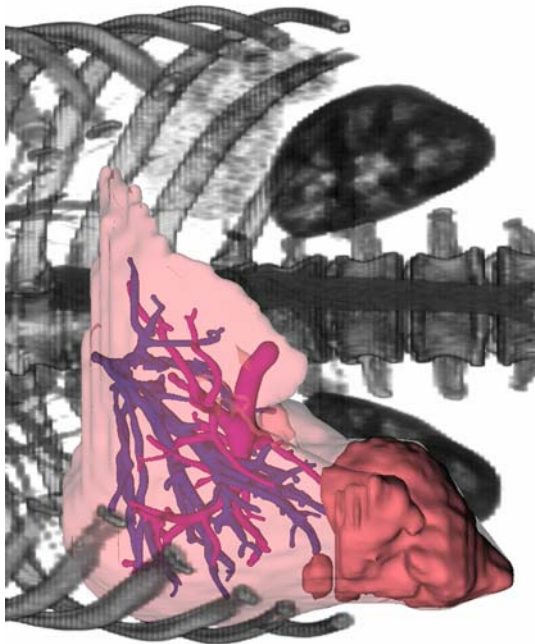
Sind Sie Facharzt?

Welche Gebietsbezeichnung haben Sie?
Wie würden Sie Ihre Erfahrung im Umgang mit dem PC einstufen?
sehr wenig (-) bis sehr gut (++)
Wie würden Sie Ihre Erfahrung im Umgang mit 3D-Anwendungen einstufen?
sehr wenig (-) bis sehr gut (++)

Wie schätzen Sie die Wichtigkeit der nachfolgenden extrahepatischen Strukturen in einer leberspezifischen Fragestellung ein? Von irrelevant (-) bis zwingend notwendig (++):

Wirbelsäule	-	0	++
Rippen rechts	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rippen links	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lunge rechts	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Lunge links	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Niere rechts	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Niere links	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Aorta	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Gallenblase	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Milz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Welche Strukturen sind bei leberspezifischen Fragestellungen zusätzlich relevant?



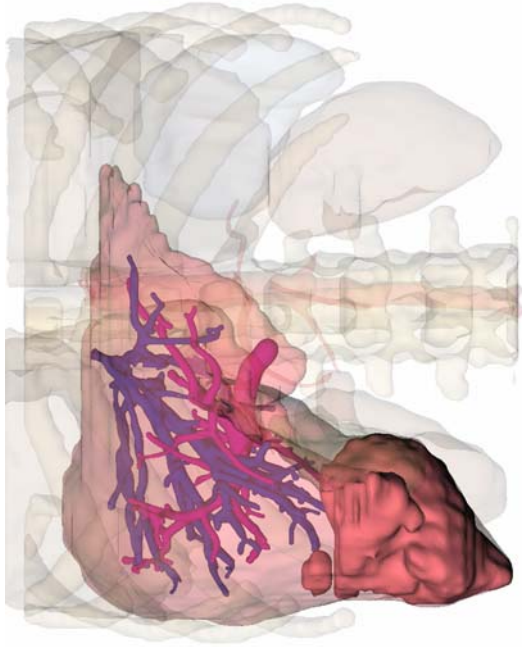
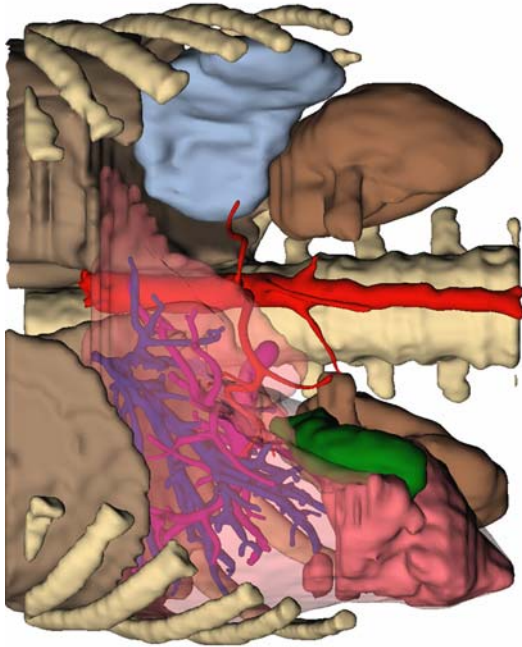
Welches Bild gefällt Ihnen auf den ersten Blick besser?

links		rechts	
<input type="checkbox"/>	--	<input type="checkbox"/>	--
<input type="checkbox"/>	++	<input type="checkbox"/>	++

Wie gut sind die extrahepatischen Strukturen untereinander differenzierbar?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++)

Wie gut ist die Leber mit ihren intrahepatischen Strukturen von den umgebenden Strukturen zu unterscheiden? (gar nicht (-) bis sehr gut (++)

Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorsektion vorbereiten wollen?



Welches Bild gefällt Ihnen auf den ersten Blick besser?

links

rechts

--
 +

--
 ++

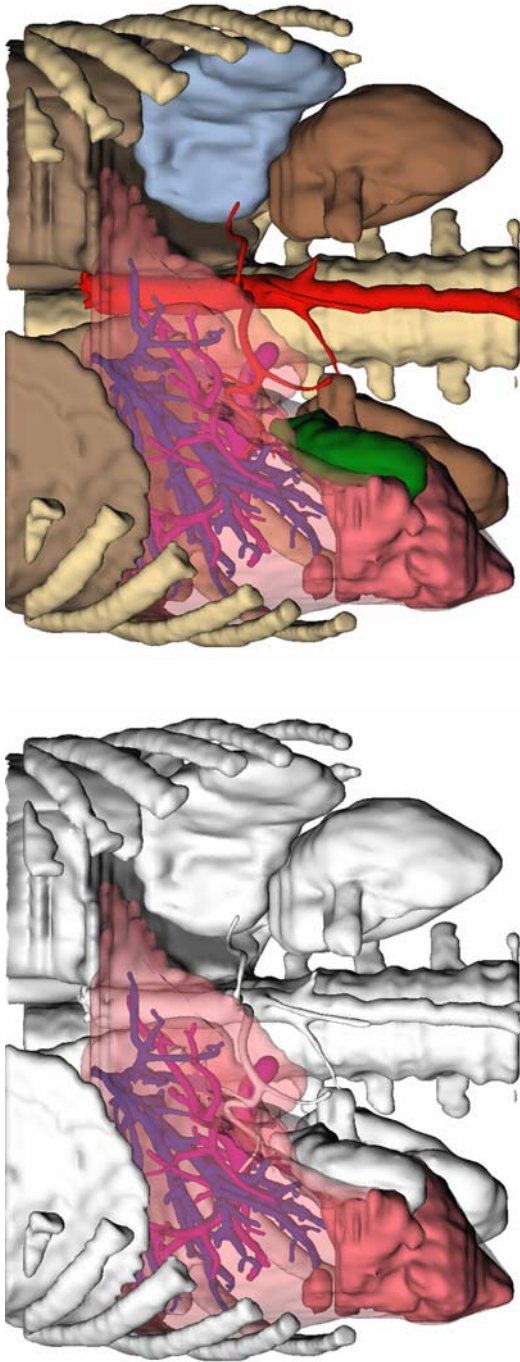
Können Sie die Lagebeziehungen zwischen der Milz und dem linken Lungenflügel erkennen?
(nein, überhaupt nicht (--)) bis ja, sehr gut (++)

Wie gut ist die Leber mit ihren intrahepatischen Strukturen von den extrahepatischen Strukturen zu unterscheiden? (gar nicht (--)) bis sehr gut (++)

Wie gut sind die extrahepatischen Strukturen untereinander zu differenzieren?
(gar nicht (--)) bis sehr gut (++)

Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorsektion vorbereiten wollen?

4 von 14



Welches Bild gefällt Ihnen auf den ersten Blick besser?

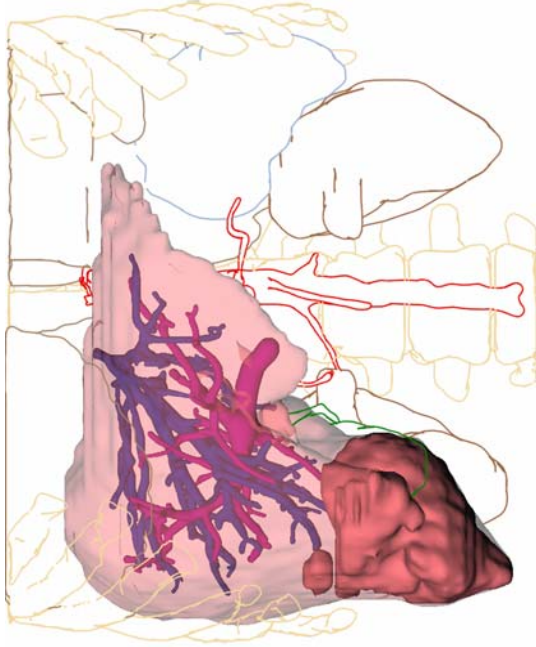
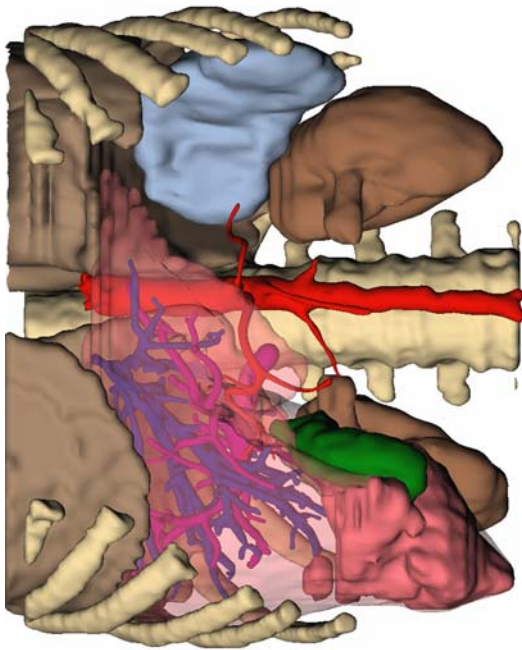
		links	rechts
<input type="checkbox"/>	--	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	+	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	++	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Wie gut sind die extrahepatischen Strukturen untereinander differenzierbar?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Erscheint Ihnen die Aorta zu aufdringlich? (überhaupt nicht (-) bis sehr aufdringlich(++))

Wie gut ist die Leber von den umgebenden Strukturen zu unterscheiden?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorsektion vorbereiten wollen?



Welches Bild gefällt Ihnen auf den ersten Blick besser?

links

rechts

Wie auffänglich finden sie die Aorta? (gar nicht auffänglich(-) bis sehr auffänglich(++))

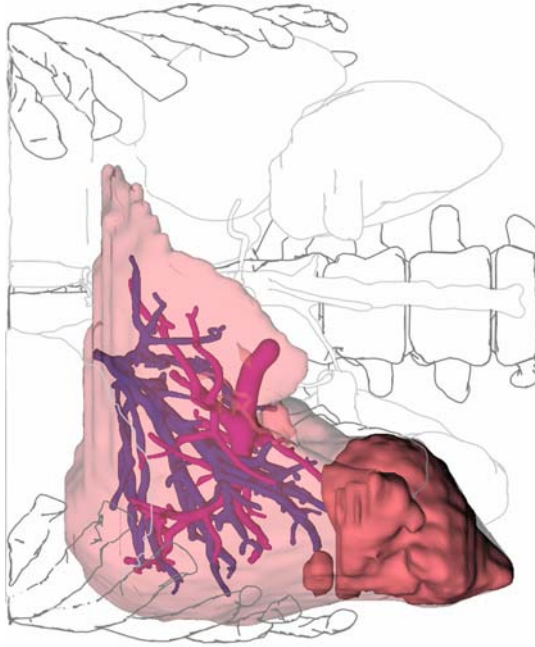
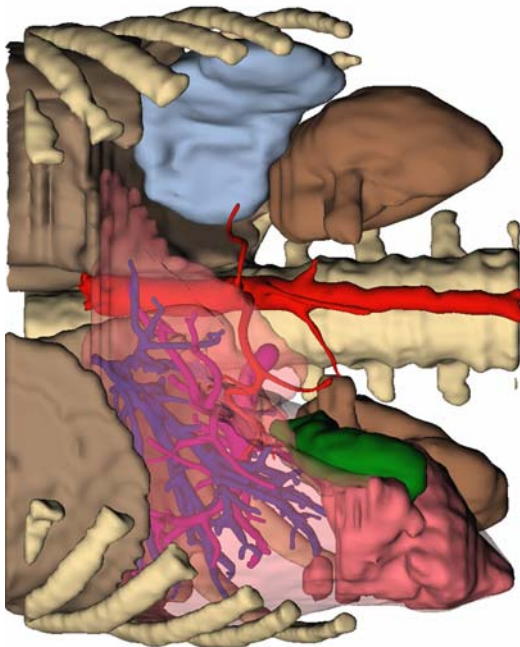
Wie gut lassen sich die extrahepatischen Strukturen unterscheiden?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Wie gut ist die Differenzierung zwischen intra- und extrahepatischen Strukturen?
(sehr schlecht (-) bis sehr gut (++))

Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorresektion vorbereiten wollen?

--

++



Welches Bild gefällt Ihnen auf den ersten Blick besser?

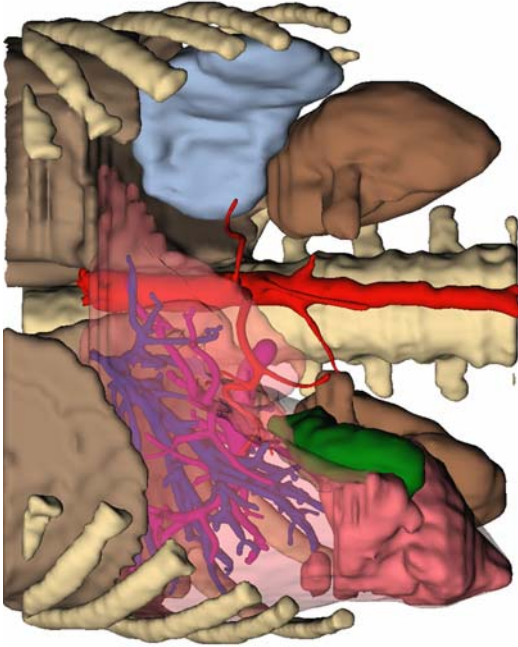
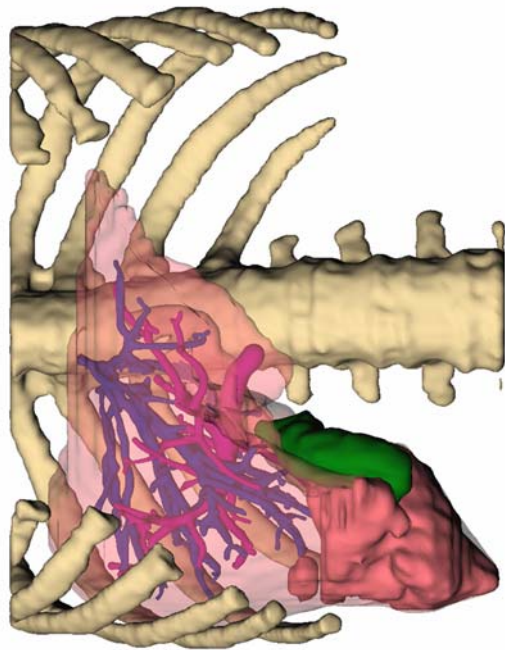
Im linken Bild behindern einige Organe die Sicht auf die Leber. Im rechten Bild ist die Sicht freigegeben. Dafür ist z.B. der Verlauf des rechten Lungenflügels schwer zu erkennen.

Sind die extrahepatischen Strukturen ausreichend dargestellt, um die Lage der Leber beurteilen zu können? (gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Sind ihrer Meinung nach für eine freie Sicht auf die Leber Veränderungen der Darstellung der extrahepatischen Strukturen wünschenswert? (überhaupt nicht (-) bis auf jeden Fall (++))

Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorsektion vorbereiten wollen?

	links	rechts
<input type="checkbox"/> --	<input type="checkbox"/> --	<input type="checkbox"/> --
<input type="checkbox"/> ++	<input type="checkbox"/> ++	<input type="checkbox"/> ++



Welches Bild gefällt Ihnen auf den ersten Blick besser?

- links rechts

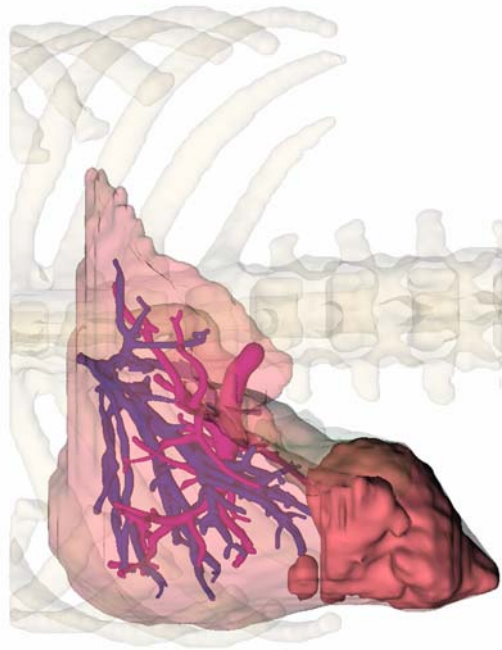
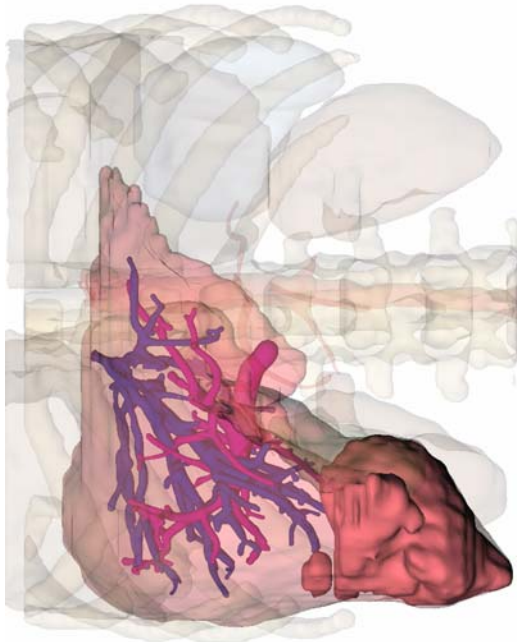
Im linken Bild treten die hinteren Rippenbögen deutlich mehr hervor, da sie nicht überdeckt werden.

Wie gut ist die Leber von den umgebenden Strukturen differenzierbar?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Wie schätzen Sie die Übersichtlichkeit der extrahepatischen Strukturen ein?
(sehr unübersichtlich (-) bis sehr übersichtlich (++)

Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorsektion vorbereiten wollen?

- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| <input type="checkbox"/> -- | <input type="checkbox"/> ++ |
| <input type="checkbox"/> -- | <input type="checkbox"/> ++ |
| <input type="checkbox"/> -- | <input type="checkbox"/> ++ |
| <input type="checkbox"/> -- | <input type="checkbox"/> ++ |
| <input type="checkbox"/> -- | <input type="checkbox"/> ++ |



Welches Bild gefällt Ihnen auf den ersten Blick besser?

<input type="checkbox"/> links	<input type="checkbox"/> rechts
<input type="checkbox"/> --	<input type="checkbox"/> --
<input type="checkbox"/> ++	<input type="checkbox"/> ++

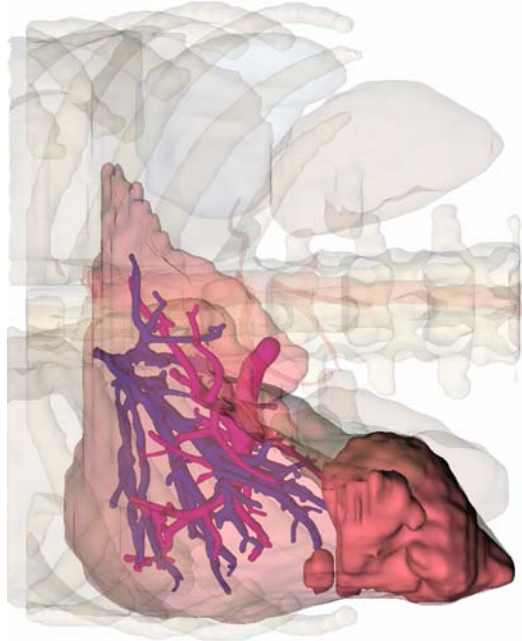
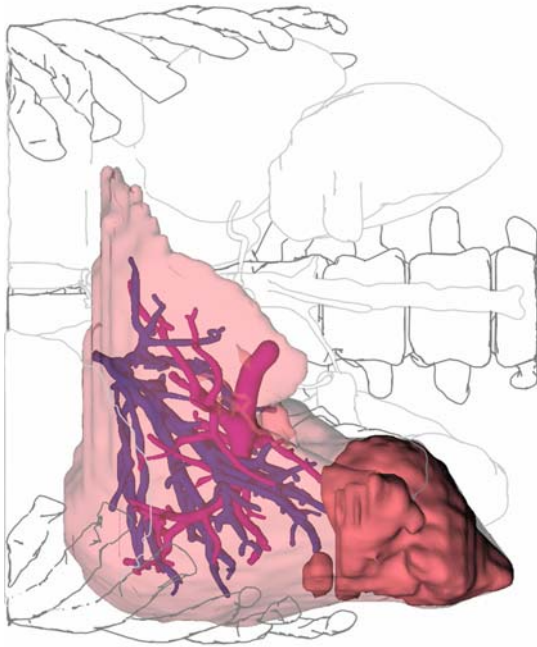
Im rechten Bild sind nur Gallenblase und Knochen als umgebende Strukturen dargestellt.

Können Sie die Lage der Leber in Relation zum Brustkorb einschätzen?
(nein, überhaupt nicht (--) bis ja, sehr gut (++))

Wie gut ist die Leber von den umgebenden Strukturen zu unterscheiden?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Wie gut sind die verbleibenden extrahepatischen Strukturen untereinander differenzierbar?
(sehr schlecht (-) bis sehr gut (++))

Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorsektion vorbereiten wollen?



Welches Bild gefällt Ihnen auf den ersten Blick besser?

	links	rechts
<input type="checkbox"/> links	--	--
<input type="checkbox"/> --	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> ++	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> gar nicht (-) bis sehr gut (++)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Können Sie die Lage der Leber zum Brustkorb einschätzen? (nein, überhaupt nicht (-) bis ja, sehr gut (++))	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Wie gut sind die extrahepatischen Strukturen untereinander differenzierbar? (gar nicht (-) bis sehr gut (++))	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorsektion vorbereiten wollen?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

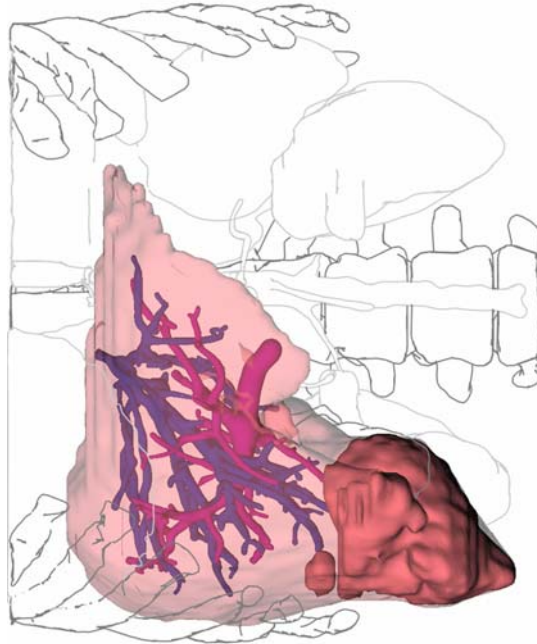
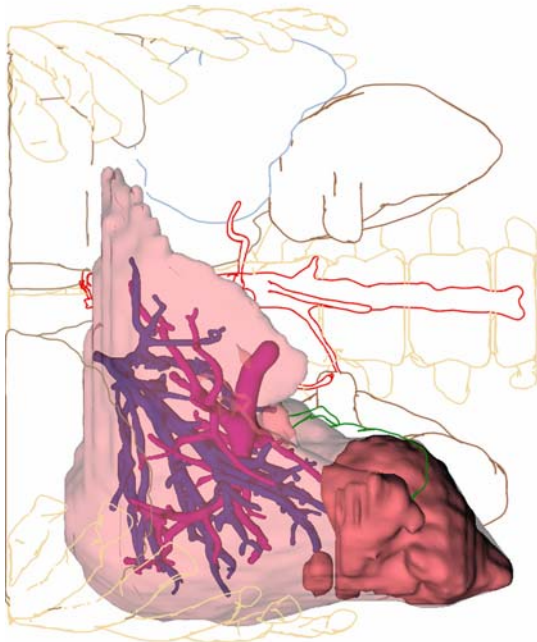
Auf dieser Seite geht es um die direkte Gegenüberstellung der beiden Visualisierungstechniken.

Wie gut ist die Leber von den umgebenden Strukturen zu unterscheiden?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Können Sie die Lage der Leber zum Brustkorb einschätzen?
(nein, überhaupt nicht (-) bis ja, sehr gut (++))

Wie gut sind die extrahepatischen Strukturen untereinander differenzierbar?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorsektion vorbereiten wollen?

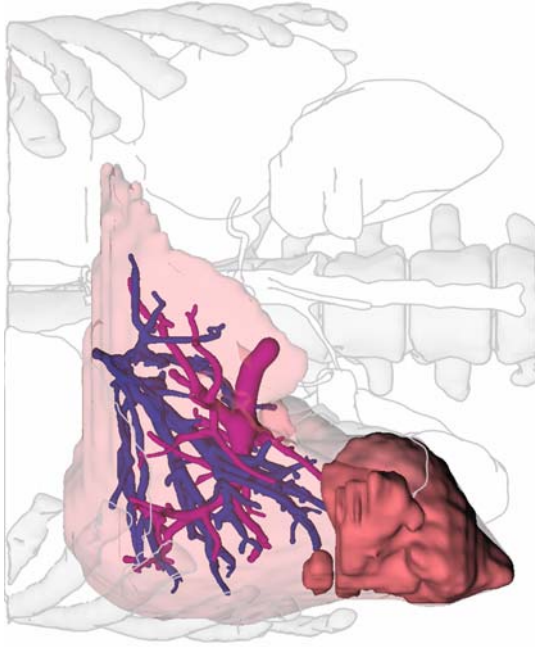
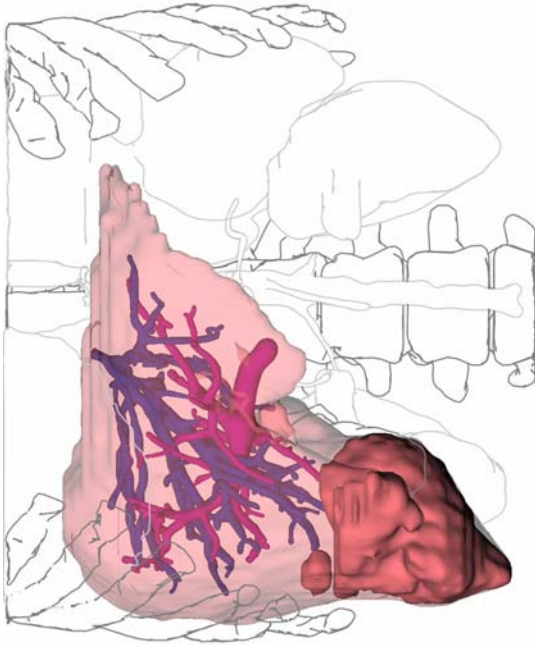


Welches Bild gefällt Ihnen auf den ersten Blick besser?

<input type="checkbox"/> links	<input type="checkbox"/> rechts
<input type="checkbox"/> --	<input type="checkbox"/> --
<input type="checkbox"/> +	<input type="checkbox"/> ++
<input type="checkbox"/> ++	<input type="checkbox"/> ++

Wie gut ist die Leber von den umgebenden Strukturen zu unterscheiden?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorsektion vorbereiten wollen?



Welches Bild gefällt Ihnen auf den ersten Blick besser?

links

rechts

Bei diesen beiden Darstellungen wurden Knochen und Gallenblase auf verschiedene Weisen hervorgehoben.

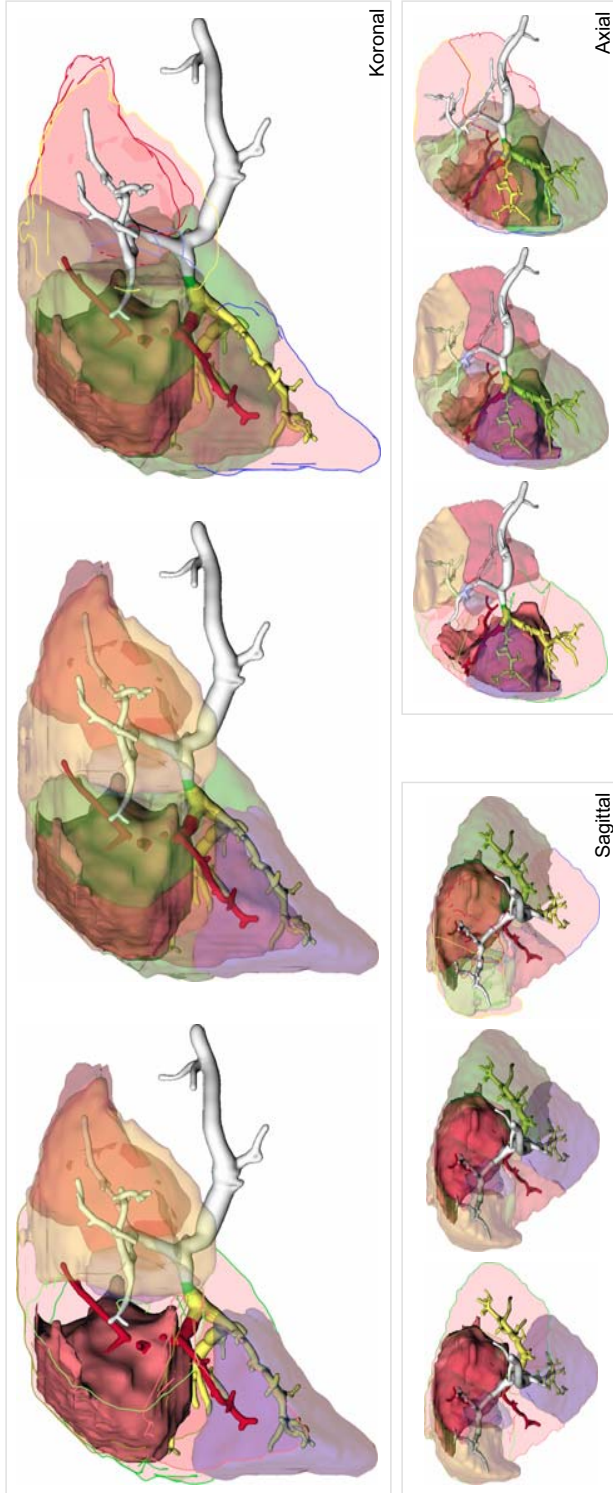
Wie gut ist die Leber von den umgebenden Strukturen zu unterscheiden?
(sehr schlecht (-) bis sehr gut (++))

Wie gut sind die extrahepatischen Strukturen untereinander differenzierbar?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorsektion vorbereiten wollen?

++

-



Welche Darstellungsart gefällt Ihnen auf den ersten Blick besser?

Drei unterschiedliche Darstellungsarten in den drei Standardschnittrichtungen:

Links: Infiltrierte Couinaud-Segmente wurden mit Silhouetten dargestellt.

Mitte: Alle Gebiete wurden transparent dargestellt.

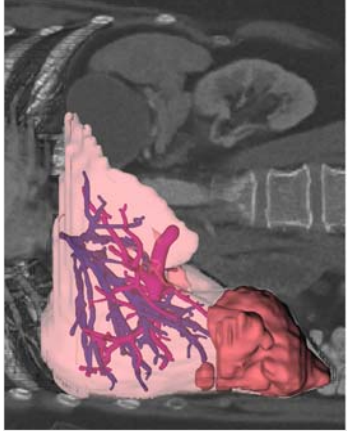
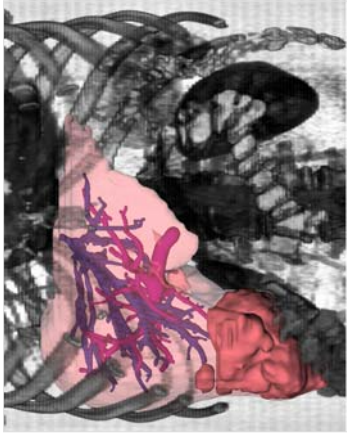
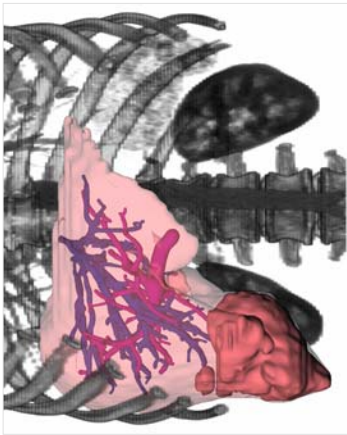
Rechts: Infiltrierte Couinaud-Segmente wurden transparent dargestellt.

Inwieweit stören Sie die transparenten Gebiete bei der Sicht auf den Tumor?
(gar nicht (-) bis sehr stark (++)

Wie hilfreich schätzen Sie die Abgrenzung der Segmente durch Silhouetten ein?
(gar nicht (-) bis sehr hilfreich (++)

Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorresektion vorbereiten wollen?

<input type="checkbox"/>	links	<input type="checkbox"/>	mittig	<input type="checkbox"/>	rechts
<input type="checkbox"/>	--	<input type="checkbox"/>	--	<input type="checkbox"/>	--
<input type="checkbox"/>	++	<input type="checkbox"/>	++	<input type="checkbox"/>	++
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
				13 von 14	



Welches Bild gefällt Ihnen auf den ersten Blick besser?

links

mittig

rechts

--

--

--

++

++

++

Wie gut ist die räumliche Lage der extrahepatischen Strukturen einzuschätzen?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Wie gut sind die extrahepatischen Strukturen untereinander differenzierbar?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Wie gefällt Ihnen die Darstellung des rechten Rippenbogens in Relation zur Leber?
(gar nicht (-) bis sehr gut (++))

Mit welchem Bild würden sie sich auf eine Tumorsektion vorbereiten wollen?

**Zum Abschluss möchten wir Sie noch bitten,
das beste Bild des gesamten Fragebogens zu prämierem!!!**
~ Ihren Favoriten einfach gut kenntlich einkreisen ~

Nochmals vielen Dank für die Zeit, die Sie für uns investiert haben.

D Auswertungsdaten

	Graphiker		Laien		Facharzt	
	Summe / Anzahl	Tendenz	Summe / Anzahl	Tendenz	Summe / Anzahl	Tendenz
Erster Eindruck	VR	PR opak 0,55 0,45	PR opak 0,29 0,71	PR opak 0,43 0,57	PR opak 0,00 1,00	PR opak 1,00 -0,50
Nach kritischer Betrachtung		VR -0,10 -0,10	VR -0,23 -0,23	VR -0,23 -0,23	VR 0,25 -0,50	VR 0,25 -0,50
Erster Eindruck	PR opak	PR Transp. 0,61 0,39	PR Transp. 0,44 0,56	PR Transp. 0,11 0,13	PR opak	PR Transp. 0,75 0,25
Nach kritischer Betrachtung		PR opak -0,21 0,05	PR opak -0,13 0,05	PR opak -0,13 0,05	PR opak	PR opak -0,50 0,50
Erster Eindruck	PR opak s/w	PR opak 0,85 0,15	PR opak 0,61 0,39	PR opak 0,23 0,77	PR opak s/w	PR opak 0,75 0,25
Nach kritischer Betrachtung		PR opak s/w -0,69 -0,48	PR opak s/w -0,69 -0,48	PR opak s/w -0,67 -0,67	PR opak s/w	PR opak s/w -0,50 -0,50
Erster Eindruck	NPR	PR opak 0,54 0,46	NPR 0,51 0,49	NPR 0,03 0,97	PR opak	NPR 0,75 0,25
Nach kritischer Betrachtung		NPR -0,07 0,89	NPR -0,03 0,97	NPR -0,03 0,97	NPR	NPR -0,50 0,00
Erster Eindruck	PR opak	NPR s/w 0,24 0,76	NPR s/w 0,55 0,45	NPR s/w -0,10 -0,03	PR opak	NPR s/w 0,75 0,25
Nach kritischer Betrachtung		NPR s/w 0,45 0,55	NPR s/w 0,49 0,51	NPR s/w -0,03 -0,03	PR opak	NPR s/w 0,75 0,25
Erster Eindruck	PR opak teilw.	PR opak 0,86 0,14	PR opak teilw. 0,76 0,24	PR opak -0,51 0,49	PR opak teilw.	PR opak 0,50 0,50
Nach kritischer Betrachtung		PR opak teilw. -0,71 -0,69	PR opak teilw. -0,71 -0,69	PR opak teilw. -0,51 -0,51	PR opak teilw.	PR opak 0,00 1,00
Erster Eindruck	PR Transp.	PR Transp. teilw. 0,48 0,52	PR Transp. teilw. 0,56 0,44	PR Transp. teilw. 0,11 0,11	PR Transp.	PR Transp. teilw. 0,50 0,50
Nach kritischer Betrachtung		PR Transp. teilw. 0,05 0,36	PR Transp. teilw. 0,05 0,36	PR Transp. teilw. 0,11 0,11	PR Transp.	PR Transp. teilw. 0,50 0,50
Erster Eindruck	NPR s/w	PR Transp. 0,83 0,17	PR Transp. 0,49 0,51	PR Transp. 0,03 0,97	PR opak	PR opak 0,50 0,50
Nach kritischer Betrachtung		PR Transp. -0,67 -0,83	PR Transp. -0,67 -0,83	PR Transp. -0,47 -0,47	PR opak	PR opak 0,50 0,50
Erster Eindruck	NPR	NPR s/w 0,37 0,63	NPR s/w 0,24 0,76	NPR s/w 0,51 0,49	NPR	NPR s/w 1,00 0,00
Nach kritischer Betrachtung		NPR s/w 0,26 0,10	NPR s/w 0,26 0,10	NPR s/w 0,51 0,49	NPR	NPR s/w 1,00 0,00
Erster Eindruck	NPR s/w	NPR s/w Shad. 0,08 0,92	NPR s/w Shad. 0,07 0,93	NPR s/w Shad. 0,86 0,14	NPR s/w	NPR s/w Shad. 0,00 1,00
Nach kritischer Betrachtung		NPR s/w Shad. 0,83 0,17	NPR s/w Shad. 0,83 0,17	NPR s/w Shad. 0,86 0,14	NPR s/w	NPR s/w Shad. 0,00 1,00

Abbildung D.1: Auflistung der erhobenen Daten.

Entscheidung der Mediziner

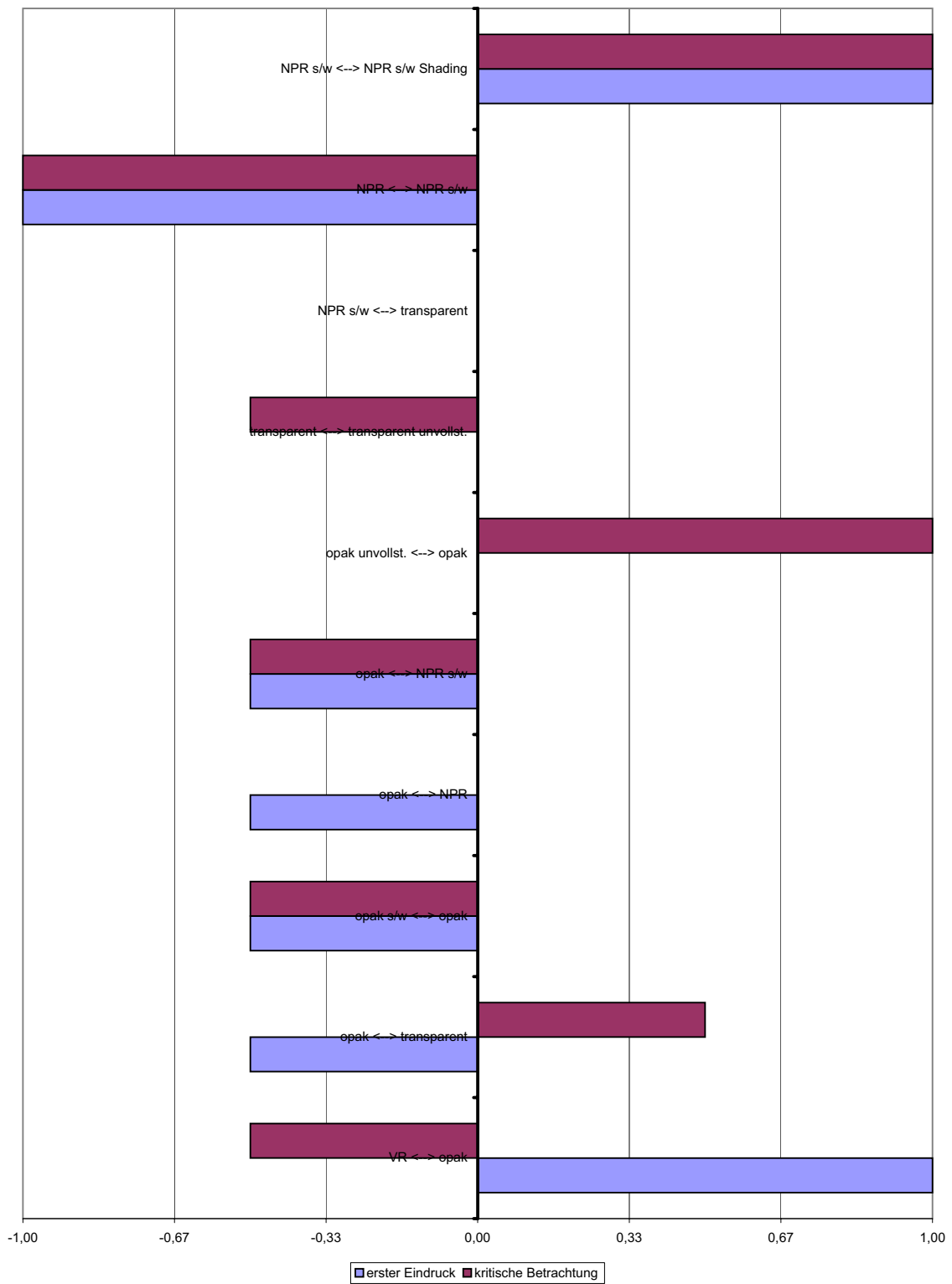


Abbildung D.2: Entscheidung der Mediziner. Es konnten nur 4 Bögen ausgewertet werden. Die hier dargestellten Ergebnisse sind daher nur begrenzt Aussagekräftig.

Entscheidung der Computergrafiker

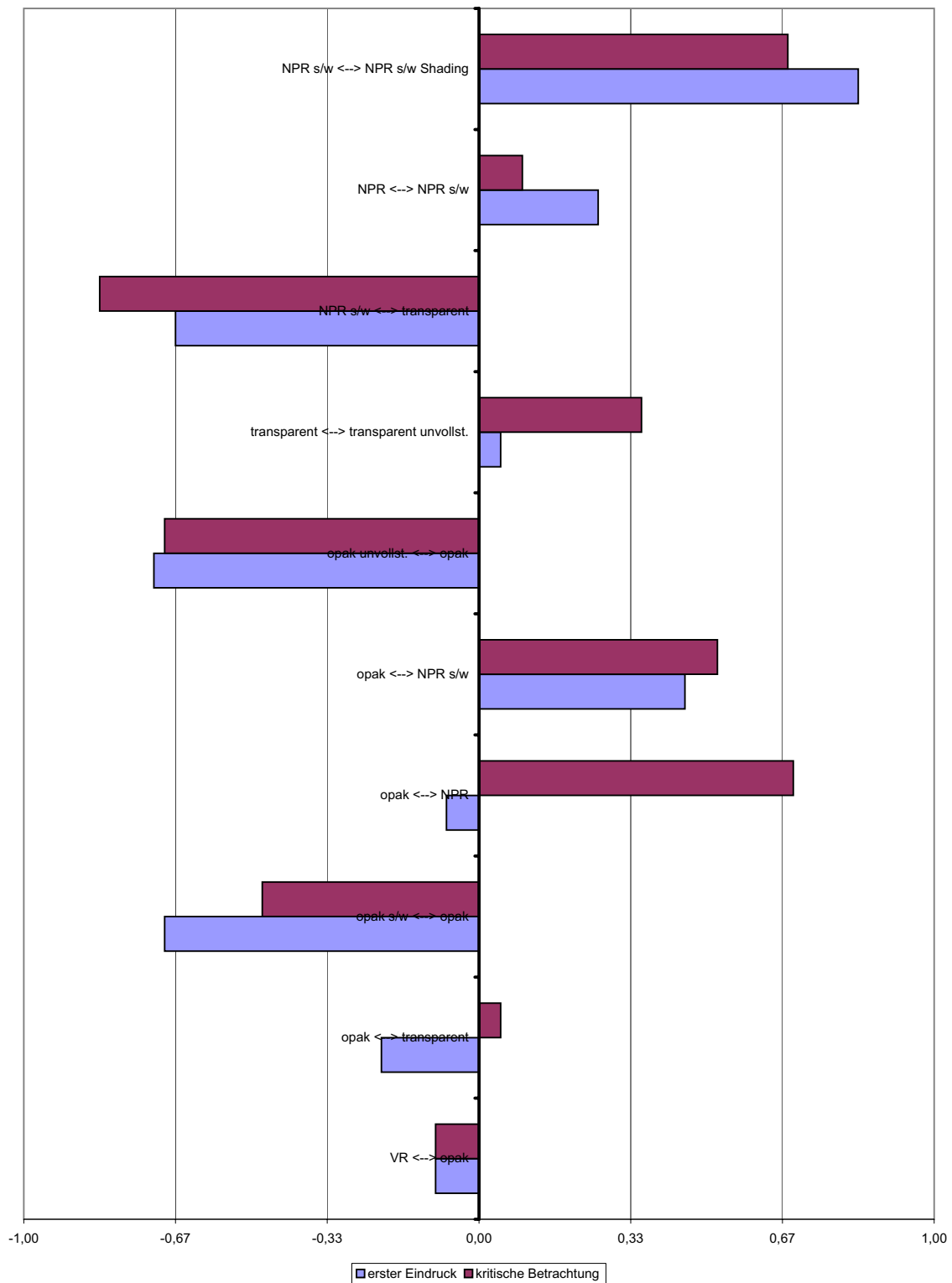


Abbildung D.3: Entscheidung der Computergrafiker. Es konnten 13 Bögen ausgewertet werden. Besonders stark ausgeprägt sind die Tendenzen zur NPR-Darstellung.

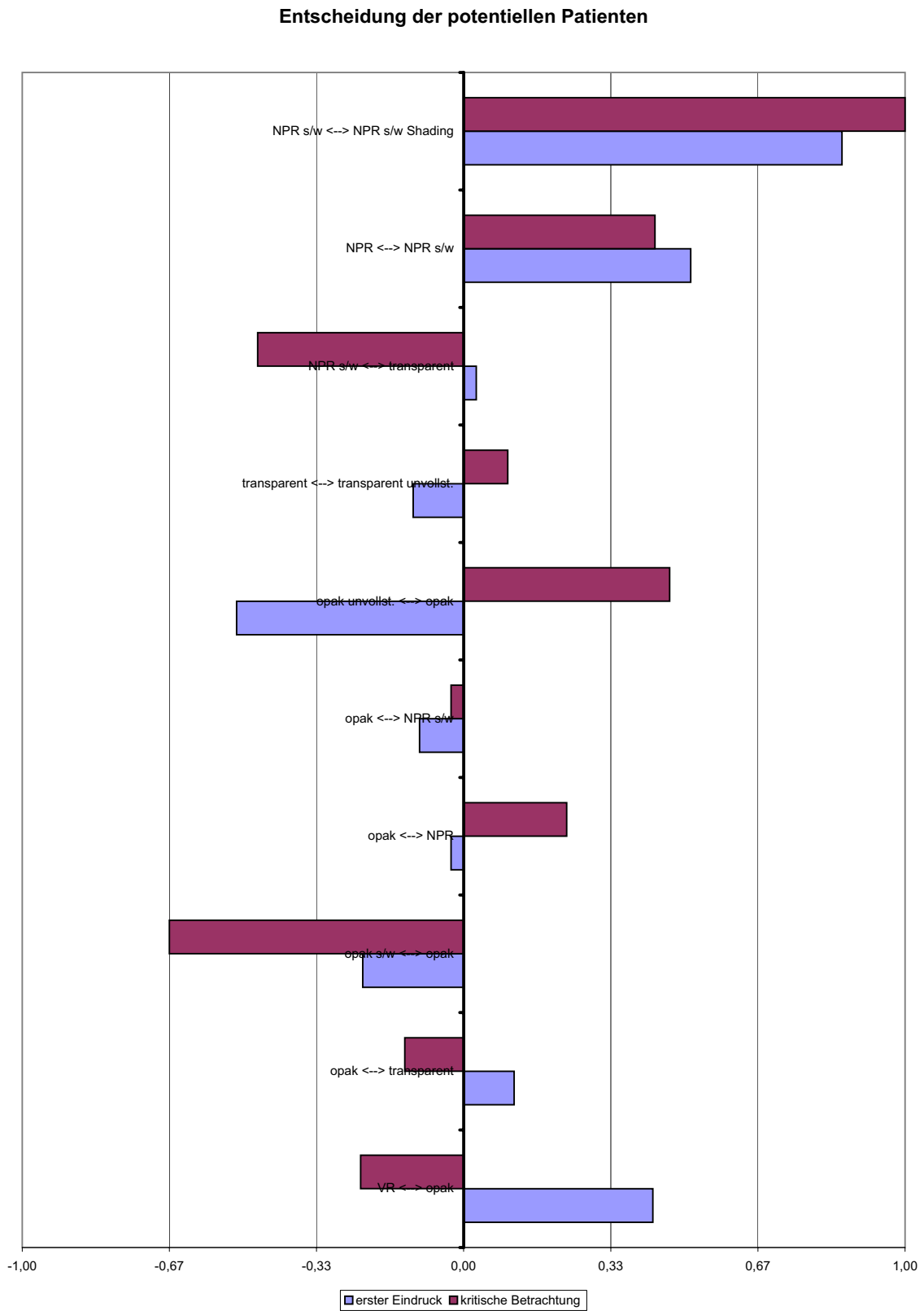


Abbildung D.4: Entscheidung der potentiellen Patienten. Es konnten 12 Bögen ausgewertet werden.

Entscheidung Insgesamt

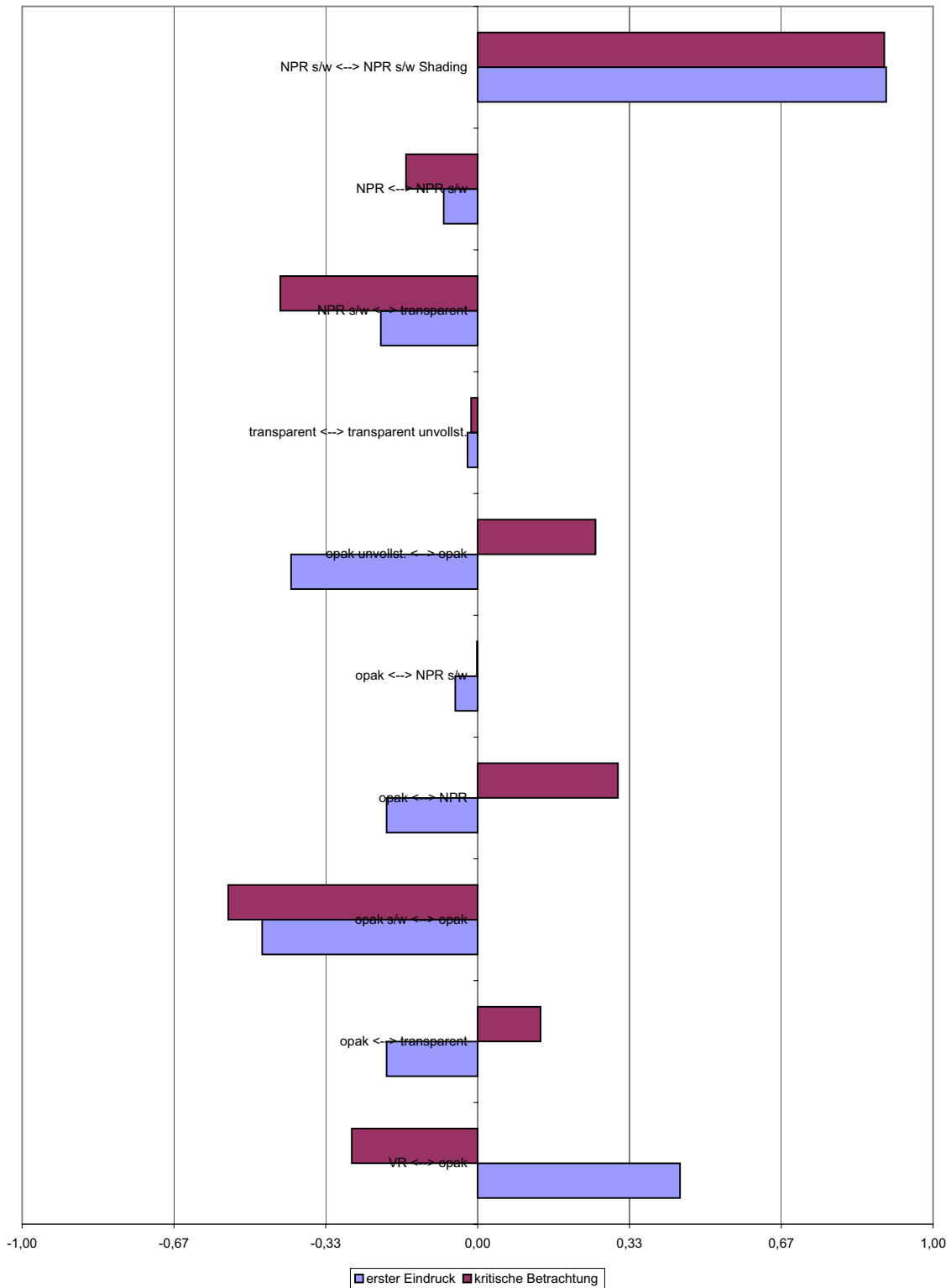


Abbildung D.5: Entscheidung insgesamt. Alle 29 Auswertungen werden hier zusammengefasst. Weiterhin stark ausgeprägt sind die Tendenzen zur s/w flächenhaften Darstellung, der Vorteil der NPR- gegenüber der transparenten Darstellung und die Verbesserung der NPR-Variante durch zusätzliches Shading.