

Aus der
Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Radiologie
der Klinik und Poliklinik für Radiologie
Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf
Direktor: Prof. Dr. Gerhard Adam

Stellenwert der MR-Kolonographie
Vergleich zwischen multiplanarer Rekonstruktion
und virtueller Koloskopie

Dissertation

Zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin

Dem Fachbereich Medizin der Universität Hamburg vorgelegt von

Norman von Sternberg-Gospos

aus Breslau

Hamburg, 2002

Angenommen von dem Fachbereich Medizin
Der Universität Hamburg am: 27. Januar 2003

Gedruckt mit Genehmigung des Fachbereichs
Medizin der Universität Hamburg

Dekan: Prof. Dr. C. Wagener

Referent: Prof. Dr. P. Steiner

Korreferent: Prof. Dr. G. Adam

Meiner Frau Kamila gewidmet

Inhalt

<i>Inhalt</i>	4
1 <i>Einleitung</i>	7
1.1 Erläuterung der Thematik	7
1.2 Erfassung des wissenschaftlichen Umfeldes	9
1.3 Problemstellung	10
1.4 Ziele der Arbeit	11
2 <i>Material und Methoden</i>	12
2.1 Angaben zum Untersuchungsgut	12
2.2 3D-MRT des Kolons	14
2.2.1 Untersuchungsablauf	14
2.2.2 Multiplanare Rekonstruktion	16
2.2.3 3D-Visualisierung mit der "Virtuoso®"	16
2.2.4 3D-Visualisierung mit dem VOXEL-MAN	17
2.3 Koloskopie	27
2.4 Analyse	30
2.4.1 Qualitative Analyse.....	30
2.4.2 Pathologische Befunde	31
2.4.3 Evaluierung der Benutzerschnittstelle	33
3 <i>Ergebnisse</i>	34
3.1 Koloskopie	34
3.1.1 Anatomie.....	36
3.1.2 Pathologische Befunde	39
3.2 Qualitative Analyse	40
3.2.1 Kontrastmittelfüllung.....	40
3.2.2 Verunreinigungen	42

3.2.3	Luft.....	43
3.2.4	Aliasingeffekte.....	44
3.2.5	Bewegungsartefakte.....	45
3.3	Pathologische Befunde.....	46
3.3.1	Multiplanare Rekonstruktion.....	46
3.3.2	Virtuelle Koloskopie.....	52
3.4	Evaluierung der Benutzerschnittstelle.....	63
3.4.1	Siemens „Virtuoso®“.....	63
3.4.2	VOXELMAN-Visualisierungssystem.....	65
4	<i>Diskussion</i>.....	66
4.1	MR-Kolonographie.....	66
4.1.1	MRT-Aufnahmetechnik.....	66
4.2	2D und 3D Visualisierung.....	68
4.2.1	Oberflächendarstellung.....	70
4.3	Automatische Pfadbestimmung durch das Kolon.....	71
4.4	Limitationen.....	72
4.4.1	Limitationen der MR-Kolonographie.....	72
4.4.2	Limitationen der virtuellen Koloskopie.....	73
4.5	Patientenakzeptanz.....	74
4.6	CT-Kolonographie.....	74
4.7	Stellenwert einer Screeninguntersuchung beim Kolonkarzinom.....	75
4.8	Kosten der virtuellen Koloskopie.....	76
4.9	Weiterentwicklung der Benutzerschnittstelle.....	77
4.9.1	Sphärische QuickTime-VR Panorama Ansichten.....	77
4.9.2	Kombination der Kolonansichten im Display.....	80
4.10	Schlussfolgerung.....	83
4.11	Ausblick.....	84
5	<i>Zusammenfassung</i>.....	86

6	<i>Literaturverzeichniss</i>	88
7	<i>Danksagung</i>	95
8	<i>Lebenslauf</i>	97
8.1	Persönliche Daten	97
8.2	Schulbildung	97
8.3	Studium	97
9	<i>Erklärung</i>	98

1 Einleitung

1.1 Erläuterung der Thematik

Das kolorektale Karzinom ist der zweithäufigste zum Tode führende Tumor in Europa und den Vereinigten Staaten [Institute NC 1999] und entsteht meistens aus einem adenomatösen Polypen [Vogelstein et al. 1988]. Der Zeitraum zur karzinomatösen Transformation beträgt ungefähr 10 Jahre oder mehr [Eide 1991]. Polypen unter 6 mm Größe sind lediglich in 0,1 % maligne [Waye et al. 1988], während Adenome über 10 mm Größe in 10 % der Fälle ein invasives Karzinom beherbergen [Morson 1974]. Die derzeit üblichen Früherkennungsprogramme sind nicht geeignet, um diese Polypen zu erfassen.

Mit dem Nachweis von okkultem Blut im Stuhl (Hämocculttest) wird bei adenomatösen Polypen eine Sensitivität von unter 10% erreicht [Ahlquist et al. 1993].

Von der Koloskopie als Vorsorgeuntersuchung wird zu wenig Gebrauch gemacht. Die Koloskopie wird vom Patienten als sehr unangenehm empfunden. Vor allem bei Patienten, die sich noch keiner Koloskopie unterzogen haben, ist die Hemmschwelle für die Untersuchung sehr groß [Bowdy 1998], zudem bedarf sie einer unangenehmen Vorbereitung und es besteht eine zumindest geringe Verletzungsgefahr.

Daher wäre es sinnvoll eine bildgebende Methode anbieten zu können, die bei geringer Invasivität eine gleichzeitig hohe diagnostische Treffsicherheit aufweist. Optimal wäre eine hohe Rate an richtig negativen Befunden. Eine solche Methode könnte dann theoretisch als „Screening“ für Kolorektale Tumore eingesetzt werden. Die bisherigen Methoden, wie Hämocculttest und Koloskopie erscheinen dafür ungeeignet. Seit einiger Zeit beschäftigen sich einige Zentren mit der Methode der „virtuellen“ Koloskopie. Das Prinzip dabei ist, dass aus Schichtbildaufnahmen des Abdomens die Kolonwand dreidimensional dargestellt wird. Das Kolon kann dann mit einer virtuellen Kamera von innen betrachtet werden.

Virtuelle Datensätze können sowohl auf Computertomographien (CT) oder magnetresonanztomographischen (MRT) Daten beruhen.

In der Bowman Gray School of Medicine in North Carolina beschrieb Vining 1994 als erster die Virtuelle Koloskopie aus einem CT-Datensatz [Vining et al. 1994].

Die bisher durchgeführten Studien zur virtuellen Koloskopie wurden überwiegend mit dem Spiral-CT durchgeführt [Rogalla et al. 2000, Pineau, Vining 1999, Fletcher et al. 2000, Dachman et al. 1998, Hopper et al. 1998, Fenlon et al. 1999, Macari et al. 1999, Yee et al. 2001, Hung et al. 1999, Morrin et al. 2001, Laghi et al. 1999]. Durch die Strahlenbelastung sind die Anwendungsmöglichkeiten als Screeningmethode jedoch eingeschränkt.

Die Weiterentwicklung der Magnet-Resonanz-Tomographie (MRT) des Gastrointestinaltrakts hat die MR-Kolonographie (MRK) als eine Alternative zur Früherkennung des Kolonkarzinoms ermöglicht. Dank der Entwicklung schneller Pulssequenzen können inzwischen großvolumige dreidimensionale MRT-Datensätze mit hoher räumlicher Auflösung erstellt werden [Luboldt et al. 1997, Luboldt et al. 1998].

Die Befundung von MRT-Bildmateriall wird bisher fast nur anhand von Schichtbildern und deren Multiplanaren Rekonstruktionen (MPR) durchgeführt. Bei der MPR können beliebige Schnittbilder in allen drei Raumrichtungen des Volumens angezeigt werden.

Neue leistungsfähige Algorithmen zur dreidimensionalen Visualisierung ermöglichen die Darstellung großer Datenmengen in einer für den Betrachter optimierten Weise. Der Mensch besitzt die Fähigkeit zur Interpretation räumlicher Informationen und begreift somit die räumlichen Ausmaße eines dreidimensionalen Körpers anhand eines einzelnen 3D-Bildes viel leichter als mit einer Serie von Schnittbildern.

Durch die gestiegene Rechenleistung und Speicherkapazität von Computersystemen können 3D-Ansichten von räumlichen Körpern in kurzer Zeit aus 2D-Schichten berechnet werden.

Insbesondere die Beurteilung der gewundenen schlauchförmigen Strukturen des Darms bereitet auf Schichtbildern Schwierigkeiten. Sie liefern lediglich eine Fülle von scheibenförmigen Anschnitten. Diese zusammensetzen, ist für das menschliche

Gehirn sehr schwer. Auf dem 3D-Bild lässt sich das gesamte Kolon aufgrund der Fähigkeit des Menschen zur räumlichen Interpretation auf einen Blick erfassen.

Im Gegensatz zu den 2D-Tomogrammen und deren multiplanaren Rekonstruktionen, die automatisch berechnet und direkt auf einem Bildschirm betrachtet werden können, erfordert die dreidimensionale Darstellung des Kolons aus einer räumlichen Schichtbildsequenz weitere Verarbeitungsschritte der MRT-Daten. Es muss eine Schwellwertsegmentation durchgeführt werden, d. h. die Volumenelemente (engl. Voxel), die durch das Kontrastmittel aufgehellt sind, werden dem Kolon zugeordnet, dunkle Volumenelemente dem Hintergrund.

Das so erstellte 3D-Modell des Kolon kann dann von außen (Volume oder Surface Rendering) oder von innen (Virtuelle Koloskopie) betrachtet werden.

Am Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin (IMDM) in Hamburg wurde mit dem VOXEL-MAN-Visualisierungssystem ein neuer Algorithmus für eine besonders realistische Oberflächendarstellung implementiert [Tiede et al. 1998].

Einzigartig ist beim VOXEL-MAN-Visualisierungssystem die Möglichkeit der Darstellung verschiedener Visualisierungstechniken in einer einzelnen Ansicht. So können Oberflächen oder Volume Rendering Ansichten kombiniert mit internen Strukturen auf Schnittebenen oder Multiplanaren Rekonstruktionen dargestellt werden.

1.2 Erfassung des wissenschaftlichen Umfeldes

Die bisher durchgeführten Studien zur CT-Kolonographie [Rogalla et al. 2000, Pineau, Vining 1999, Fletscher, Lumboldt 2000, Dachman et al. 1998, Hopper et al. 1998, Fenlon et al. 1999, Macari et al. 1999, Yee et al. 2001, Hung et al. 1999, Morrin et al. 2001, Laghi et al. 1999] wiesen für die Erkennung von Patienten mit Polypen ≥ 10 mm eine Sensitivität zwischen 75% und 100% auf. Die Spezifität war bei fast allen Studien größer als 90%. [Fletscher, Lumboldt 2000]. Bisher wurden jedoch nur Studien mit geringer Anzahl von Fällen und ausgewählten Patienten durchgeführt. Für die Spezifität und Sensitivität der MR-Kolonographie (MRK) gibt es bisher nur wenige vergleichbare Daten [Luboldt et al. 2000].

Aufgrund von langen Messzeiten und damit assoziierter Bewegungsunschärfe der Randstrukturen war die MRK lange Zeit nicht möglich. Erst durch die Entwicklung schneller Pulssequenzen hat sich diese Situation geändert. Die relativ neue Ära der MRK in Verbindung mit der starken Konkurrenz durch die Spiral-CT erklärt jedoch, warum bisher nur wenige Publikationen zur MRK erschienen und noch kaum klinische Erfahrungen verfügbar sind.

Die bisher veröffentlichten Verfahren für die Visualisierung von Volumendaten lassen sich in zwei Klassen einteilen [Tiede et al. 1998]:

- Verfahren, die eine reine Oberflächenbeschreibung der Objekte in Form von Polygonen (meist Dreiecken) erzeugen.
- Verfahren, die den ursprünglichen Stapel von Schnittbildern als diskretes Volumen, bestehend aus elementaren Volumenelementen (Voxel), auffassen.

Die oberflächenbasierte Visualisierung bieten zwar den Vorteil von geringeren Rechenzeiten. Bei sehr kleinen Strukturen werden jedoch die linearen Flächenelemente sichtbar (Silhouetteneffekt). Außerdem werden die segmentierten Objekte auf ihre Oberfläche reduziert, wobei die ursprüngliche Grauwertinformation verloren geht. Gerade im diagnostischen Bereich sind interne Grauwertmuster aber von großem Interesse.

Die volumenbasierten Verfahren arbeiten mit den Intensitätswerten der Schnittbilder, so dass die in den Intensitätsmustern enthaltene Information für eine realistische Visualisierung ausgenutzt werden kann. Ein Kernproblem besteht jedoch darin, dass durch diskretes Abtasten die Auflösung des aus „Voxeln“ bestehenden Bildvolumens begrenzt ist und sich die bei der Segmentation gefundenen Organgrenzen als Treppenfunktion darstellen. Neben einer reinen Oberflächendarstellung bieten volumenbasierte Verfahren auch die Möglichkeit von Durchleuchtungsdarstellungen wie dem Volume-Rendering.

1.3 Problemstellung

Mit der multiplanaren Rekonstruktion (MPR) können gleichzeitig koronare, axiale und sagittale Bildebenen dargestellt werden. Im Kolon fällt es jedoch durch die fehlende Betrachtungsmöglichkeit zusammenhängender Wandstrukturen schwer Haustren von

endoluminal wachsenden Läsionen zu unterscheiden [Hara et al. 1996]. Werden jedoch zusätzlich durch Nachbearbeitung des MRT-Datensatzes 3D-Rekonstruktionen erstellt, könnte sich theoretisch die Früherkennung von endoluminallen wachsenden Tumoren vereinfachen. Mit dieser endoskopischen Ansicht sind die Wandstrukturen für den Untersucher leichter zu beurteilen.

Die Vor- und Nachteile der virtuellen im Vergleich zur realen Koloskopie sind noch nicht ausreichend erörtert.

Darüber hinaus ist unklar, welche Visualisierungsverfahren am besten für eine schnelle und zuverlässige Befundung geeignet sind.

1.4 Ziele der Arbeit

Auf dem Boden einer MRT-Untersuchung des Kolons soll geprüft werden, ob sich die virtuelle Koloskopie prinzipiell als Screening-Methode zur Erkennung von Polypen und Raumforderungen des Kolons eignen würde. Dabei soll die diagnostische Treffsicherheit dieser Methode mit der konventionellen Koloskopie verglichen werden.

Die virtuelle Koloskopie wird dazu mit dem Ergebnis der multiplanaren MRK verglichen. Die Relevanz der Information aus der zusätzlichen 3D-Rekonstruktion des Kolons soll dabei überprüft werden.

In diesem Zusammenhang soll insbesondere das VOXEL-MAN-Visualisierungssystem für die virtuelle Koloskopie evaluiert und mit dem kommerziellen Softwarepaket „Virtuoso[®]“ der Firma Siemens verglichen werden.

Die verschiedenen Verfahren zur Volumenvisualisierung, die in den beiden Softwarepaketen enthalten sind, stellen eine repräsentative Auswahl der zu diesem Zweck zur Zeit verwendeten Algorithmen dar. Sie sollen im Hinblick auf die Wiedergabemöglichkeit der anatomischen und pathologischen Verhältnisse des Kolon verglichen werden.

Die Vorgehensweise bei der Befundung mit dem VOXEL-MAN-Visualisierungssystem und der „Virtuoso[®]“ von Siemens wird analysiert, um Vorgaben für eine optimierte komfortable Benutzerschnittstelle zu entwickeln.

2 Material und Methoden

2.1 Angaben zum Untersuchungsgut

Nach dem positivem Votum der zuständigen Ethik Kommission wurde diese prospektive Studie im Zeitraum vom August 1998 bis August 1999 am Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf durchgeführt. Es wurden insgesamt 31 Patienten untersucht. 15 der Patienten waren männlichen Geschlechts, 16 weiblich. Das Alter der Patienten lag zwischen 34 und 83 Jahren. Das Durchschnittsalter war 54 [siehe Abb. 2.1].

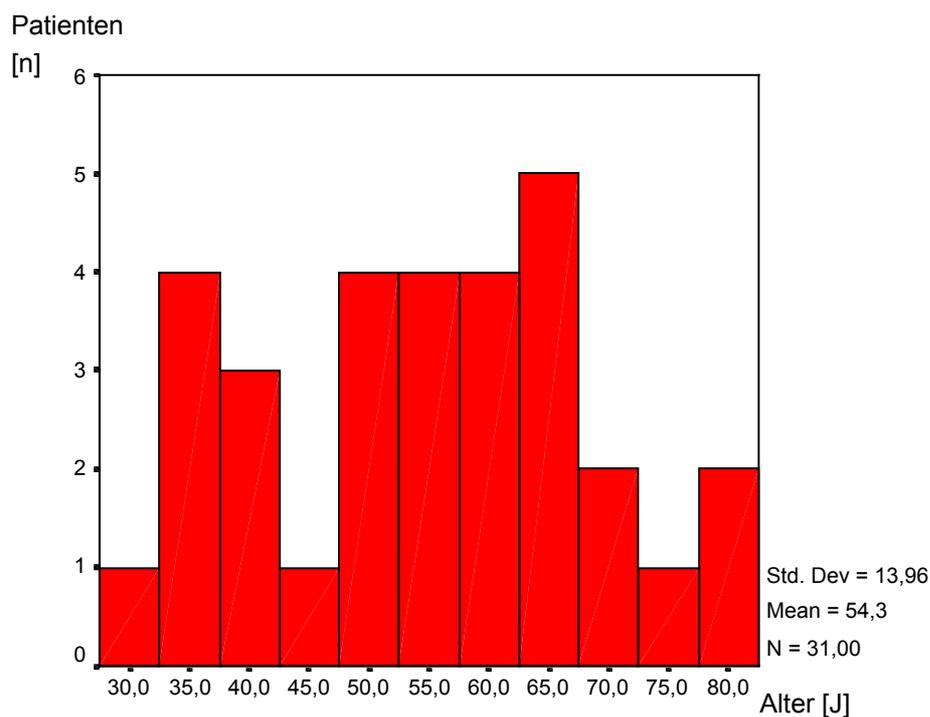


Abb. 2.1: Altersverteilung der Patienten

Einschlusskriterien

- Patienten, die in der Regel auf einer internistischen oder chirurgischen Station des Universitätsklinikum Eppendorf behandelt und in der Abteilung für Endoskopische Diagnostik des Universitätsklinikums Hamburg Eppendorf zur Koloskopie angemeldet waren [Tab. 2.1].
- Voraussetzung war die schriftliche Einverständniserklärung des Patienten nach entsprechender Aufklärung über den Ablauf der MR-Kolonographie.

Ausschlusskriterien

- Patienten zur Abklärung einer entzündlichen Darmerkrankung (Morbus Crohn, Colitis Ulcerosa) wurden nicht berücksichtigt .
- Patienten mit Kontraindikation einer MRT-Untersuchung, wie Schwangerschaft, Herzschrittmacher oder das Vorhandensein von ferromagnetischen Implantaten.

Tabelle 2.1: Indikationen n=Anzahl der Fälle

n	Indikation
4	Ausschluss von Adenomen
4	Tumorsuche
3	unklare Oberbauchbeschwerden
3	unklare Anämie
2	Z.n. Rektumextripation
2	Akromegalie, Ausschluss von Adenomen
2	unkl. Hepatopathie
2	rezidiv. Obstipation
1	Teerstuhl zur Abklärung
1	Präoperative Diagnostik
1	Abtragen bekannter Polypen
1	Diarrhöen unklarer Genese
1	Gewichtsabnahme, Blut im Stuhl, Tumorausschluss
1	Pleurale und pulmonale Raumforderung unklarer Genese
1	maligner Pleuraerguss
1	Perikarderguss
1	MALT Lymphom

Einen Tag vor der Untersuchung wurde bei allen Patienten eine Säuberung des Kolons mit 3-4 Liter Endofalk®-Lösung (Dr. Falk Pharma GmbH, Freiburg, GER) durchgeführt. Die Patienten mussten 20 Stunden Nahrungskarenz einhalten.

Die MRK und Koloskopie wurden am selben Tag durchgeführt. Dabei wurde die MRK stets vor der Koloskopie terminiert.

2.2 3D-MRT des Kolons

2.2.1 Untersuchungsablauf

Die MRK erfolgte an einem Siemens Magnetom Vision (1,5Tesla) Magnetresonanztomographen (Siemens AG, Erlangen, GER). Um das Kolon in seiner Gesamtheit mit homogener Signalverteilung abbilden zu können, wurde eine „Phased-Array-“ Oberflächen-Körperspule benutzt. Unmittelbar vor der MRK wurde dem Patienten eine Venenverweilkanüle in eine oberflächliche Armvene gelegt. Die Patienten wurden mit dem Kopf voran und ausgestreckten Armen in Bauchlage auf dem MRT-Untersuchungstisch positioniert.

Um bei Inkontinenz eine Verschmutzung des Gerätes zu vermeiden, wurden die Patienten auf einer wasserdichten Folie und mehreren Lagen saugfähigem Papier gelagert. Ein 150 cm langer Darmkatheter mit 8 mm Durchmesser wurde mit der Spitze ca. 8 cm tief in das Rektum eingeführt. Mit dem Druck einer Kontrastmittelsäule von ca. 1,5 m wurde ein körpertemperatur-warmer rektaler Einlauf, bestehend aus Wasser, versetzt mit paramagnetischem Kontrastmittel (GD-DTPA, Magnevist, Schering AG, Berlin) im Verdünnungsverhältnis 1:100 verabreicht. Die Einlaufmenge lag bei durchschnittlich 2300 ml [siehe Abb. 2.2.] Zur Reduktion der Peristaltik wurde Scopolamin (Buscopan 10 mg) i.v. appliziert.

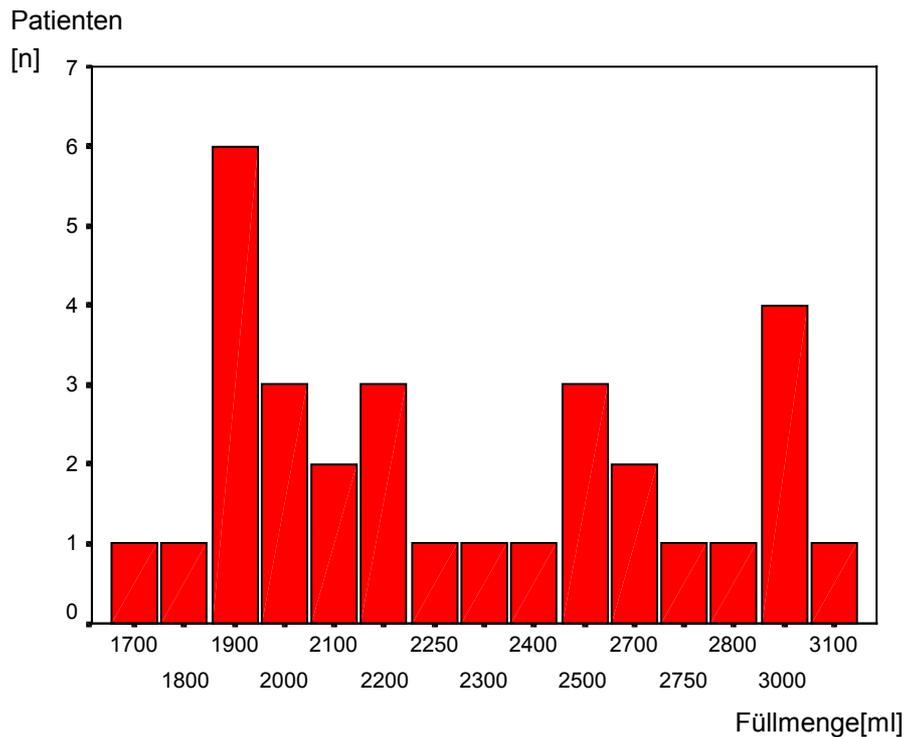


Abb. 2.2: Rektale Kontrastmittelfüllmenge

2.2.1.1 Übersicht

Zunächst wurden zur Orientierung und graphischen Planung des Untersuchungsvolumens sogenannte „Scout-Sequenzen“ in sagittaler, coronarer und axialer Ebene erstellt. Die Parameter der Scout-Sequenz sind Tab. 2.2 zu entnehmen.

2.2.1.2 MRT Fluoroskopie

Während des Kontrastmitteleinlaufs wurden nicht schichtselektive Gradienten-Echo-Sequenzen, sogenannte MRT-Fluoroskopien durchgeführt (siehe Tab. 2.2). Diese Sequenz ermöglicht die Abbildung großer Teile des Abdomens in einer Sekunde. Auf diese Weise konnte alle 30 sec. eine Kontrolle der erzielten Kolonfüllung erfolgen. Das Kontrastmittel wurde solange eingefüllt, bis das gesamte Kolon möglichst luftfrei gefüllt und distendiert war.

2.2.1.3 3D Turbo-Flash-Gradienten-Echo-Sequenz

Sofort nach Beendigung des Kontrastmittel-Einlaufs und Sicherstellung, dass möglichst der gesamte Kolonrahmen mit der Flüssigkeit gefüllt und distendiert war, wurde die für die Auswertung der Daten entscheidende 3D-Gradienten-Echosequenz (3D-GRE) erstellt. Abhängig vom Umfang des Patienten wurden 48-64 koronare Schichten

akquiriert. Der dafür benötigte Zeitraum betrug ca. 25 sec.. Zur Reduktion von Bewegungsartefakten mussten die Patienten für die Dauer der Messung den Atem in Inspirationsstellung anhalten. Die genaueren Parameter sind der Tab. 2.2 zu entnehmen. Die für die 3D-GRE resultierende Auflösung betrug somit 2,2 * 1,8 * 1,9 mm.

Tabelle 2.2: Sequenz-Protokoll

Sequenz	TR(ms)	TE(ms)	Matrix	FOV(mm)	Sl (mm)	Zeitd. (s)
Scout	15	6	128*256	500*500	10	10
Fluoroskopie	1000	2,3	64*128	450*450	300	1
3D GRE	4,0	1,8	156*256	340*450	1,9	23-30

TR: Repetitionszeit, TE: Echozeit, , FOV: Gesichtsfeld (field of view), Sl: Schichtdicke, Zeitd.: Zeitdauer

2.2.2 Multiplanare Rekonstruktion

Von der coronaren 3D GRE-Sequenz wurden multiplanare Rekonstruktionen erstellt. Sowohl die MRT-Konsole, die Siemens Virtuoso®, als auch das Voxelman-Visualisierungssystem boten die Möglichkeit der multiplanaren Rekonstruktion. An der MRT-Konsole und der daran angeschlossenen Workstation wurden mit der kommerziell implementierten Software die Nachverarbeitungsschritte durchgeführt. Dabei konnte das Volumen interaktiv in den drei orthogonalen Ebenen betrachtet werden. Eine coronare, eine sagittale und eine axiale Ansicht wurden erstellt und ausgewertet.

2.2.3 3D-Visualisierung mit der "Virtuoso®"

Die "Virtuoso®" ist ein kommerzielles Software-Paket von der Siemens AG (3DVirtuoso CT/MR Workstation Version VA30A) und läuft auf einer Silicon Graphics Workstation. Die Patientendatensätze wurden im DICOM-Format aus dem Netzwerk auf die "Virtuoso®" geladen. Das Programm liefert unterschiedliche Darstellungsmöglichkeiten der MRT-Daten. Die folgenden Programm-Module konnten für die Patientendaten dieser Studie genutzt werden.

2.2.3.1 2D-Darstellung

Die Schichtbilder konnten in der MRT Standard-Bilddarstellung betrachtet werden. Die Bilder konnten einzeln nacheinander oder gleichzeitig mehrere Bilder nebeneinander dargestellt werden.

2.2.3.2 MPR

Bei Aufruf von MPR schaltet der Bildschirm in eine 4-Segment Darstellung. Dadurch konnte die geladene Serie interaktiv in den drei orthogonalen Ebenen betrachtet werden. Die coronare, sagittale und axiale Ansicht belegten drei Bildsegmente. Im Bildsegment unten rechts konnte eine Mehrschichtansicht angezeigt werden. Dabei konnte eine Serie entlang einer beliebigen (auch gekrümmten) Achse reformatiert werden.

2.2.3.3 3D-Rekonstruktion

Die Virtuoso[®] ermöglichte die Erstellung und Speicherung von 3D-Objekten. Durch eine Schwellwert-Segmentation konnte eine polygonale Oberflächendarstellung des Kolons errechnet werden.

2.2.3.4 Fly-Through

Im Fly-Through-Modul konnte die virtuelle Koloskopie erstellt werden. Die in dem Modul 3D-Rekonstruktion zuvor erstellte polygonale Kolonoberfläche wurde im Fly-Through-Modul „durchflogen“ und von Innen endoskopisch betrachtet.

Mit einem Volume-Rendering konnten 3D-Ansichten unter Nutzung von mehreren Schwellwertbereichen auch ohne vorherige Segmentation berechnet werden.

Ein Auto-Path-Finder ermöglichte eine halbautomatische Pfadbestimmung durch das Kolon.

2.2.3.5 Real Time 3D Renderer

Real Time 3D Renderer (RT3D) ist das interaktive 3D Volume Rendering Modul (Volumenwiedergabemodul) für die Virtuoso[®]. Die gesamten im Datensatz enthaltenen Grauwertinformationen eines Bildes wurden ohne Segmentation einer Oberfläche dargestellt. Eine Gewebeklassifikation wurde durch die Zuordnung von Helligkeit, Transparenz und Farbe auf die verschiedenen Anteile des Volumendatensatzes ermöglicht.

2.2.4 3D-Visualisierung mit dem VOXEL-MAN

Am Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin (IMDM) wurde seit 1984 an der Entwicklung des Voxel-MAN-Visualisierungssystems gearbeitet [Abb. 2.3].

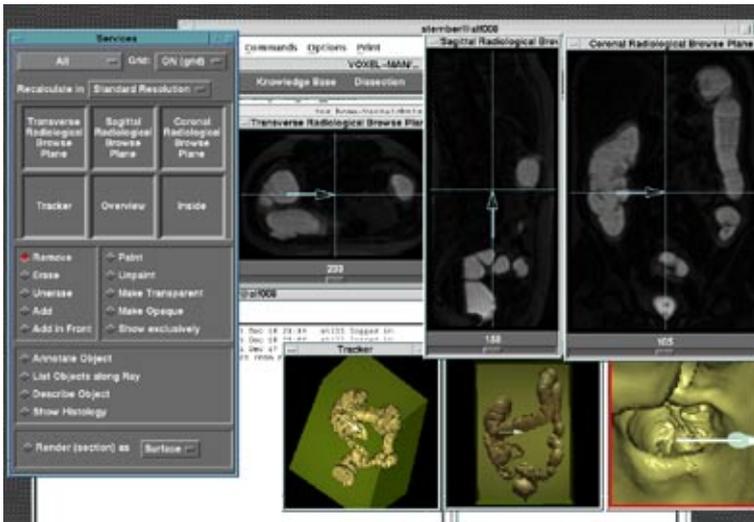


Abb. 2.3: Voxel-MAN-Visualisierungssystem

Dieses komplexe Programm ermöglicht die Anwendung von verschiedenen Visualisierungstechniken auf medizinische Volumendatensätze, die mit tomographischen bildgebenden Verfahren, insbesondere der CT und MRT erstellt wurden. Verschiedene Visualisierungstechniken, wie Oberflächendarstellung, Maximum-Intensitäts-Projektion (MIP), Volume-Rendering oder die Darstellung interner Strukturen auf Schnittebenen können auf einer einzelnen Ansicht kombiniert werden.

Für die 3D-Darstellung des Kolons, die in dieser Arbeit aus der 3D Turbo-Flash-Gradienten-Echo-Sequenz berechnet wurde, hat man sich für eine Oberflächendarstellung, die sowohl von außen als auch von innen (Virtuelle Koloskopie) betrachtet werden kann, entschieden. Daneben wurden die internen Strukturen auf einer coronaren, transversalen und sagittalen Schicht in multiplanarer Rekonstruktion dargestellt.

Die einzelnen Schritte dieser Visualisierung werden nachfolgend erläutert (Abb. 2.4).

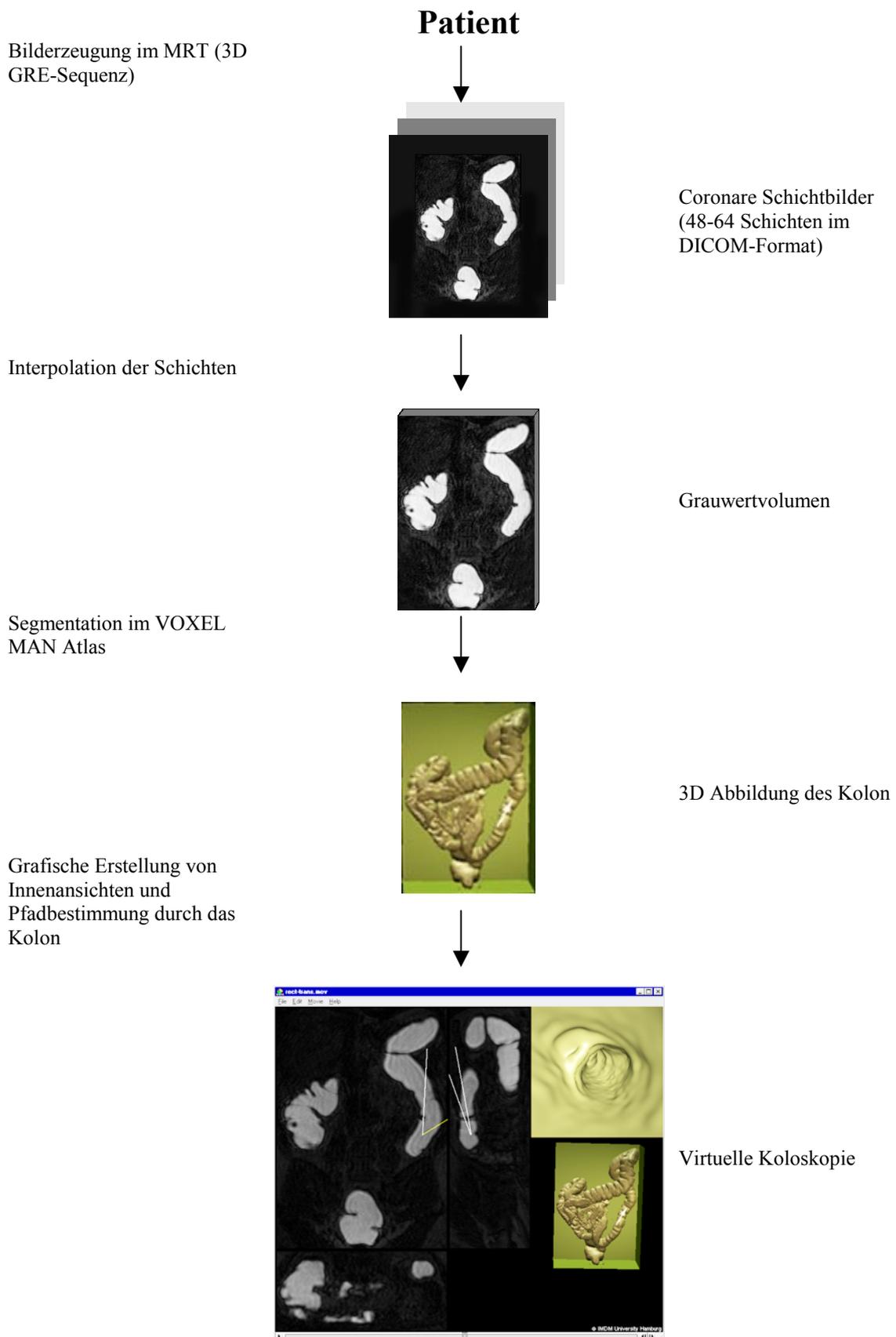


Abb. 2.4: Verfahrensschritte zur Erstellung einer virtuellen Koloskopie

2.2.4.1 Erzeugung eines Grauwertvolumens

Aus der Abteilung für Diagnostische und Interventionelle Radiologie wurden die MRT-Schichtbilder über das UKE-Netzwerk ins IMDM übertragen. Dort wurden die Patientendaten an einem Außernetz-PC mit dem Programm MagicView 300 (Siemens AG, Erlangen, GER) empfangen (Abb. 2.5). Die Schnittbilder wurden aufgerufen und auf eine korrekte Datenübertragung geprüft. Eine Verbindung zum IMDM Innennetz wurde aufgebaut um die Schichtbilder im DICOM-Format auf einer UNIX-Workstation abzuspeichern.

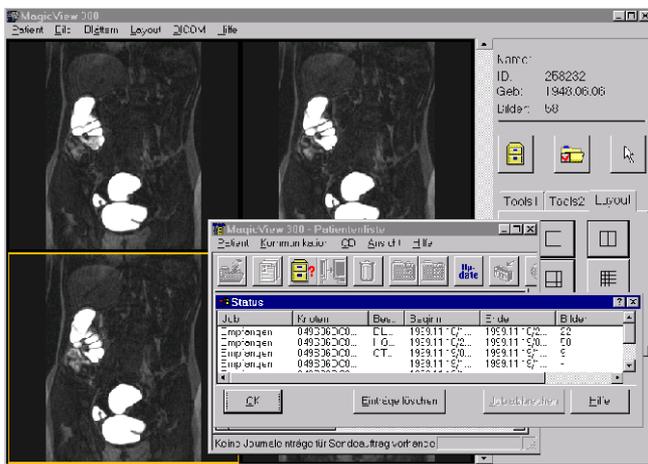


Abb. 2.5: MagicView300

Zunächst wurden die Schichtbilder mit dem Programm „c import“ in das IMDM eigene Format für Volumendaten überführt (Abb. 2.6). Durch Interpolation zwischen den Schnittbildern wurden isotrope Volumina mit kubischen Volumenelementen (Voxeln) erzeugt. Jedes einzelne Voxel in diesem Grauwertvolumen enthielt einen diskreten Grauwert aus der MRT-Sequenz.

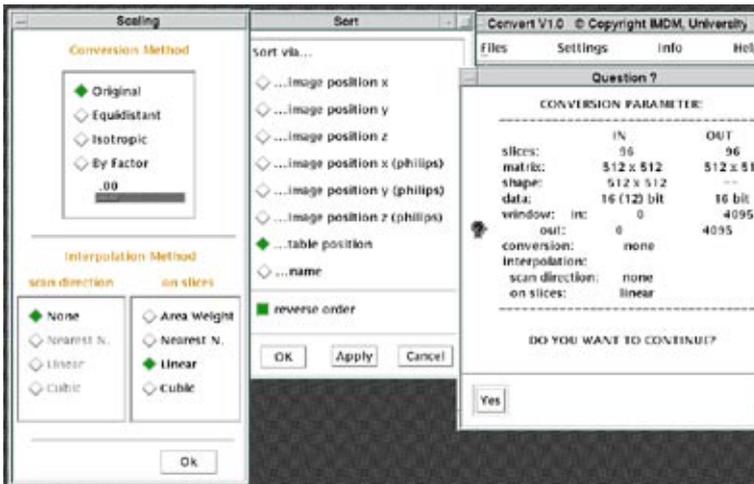


Abb. 2.6: „c import“

Mit dem vom IMDM geschriebenen Programm „c movie“ wurde das mit „c import“ erstellte Volumen betrachtet (Abb. 2.7). Leere Hintergrundbereiche, die kein kontrastmittelgefülltes Kolon enthielten, wurden vermessen. In einem zweiten Schritt wurden dann mit dem Programm „c shape“ diese Bereiche vom Volumen entfernt, um eine Datenreduktion zu erreichen.

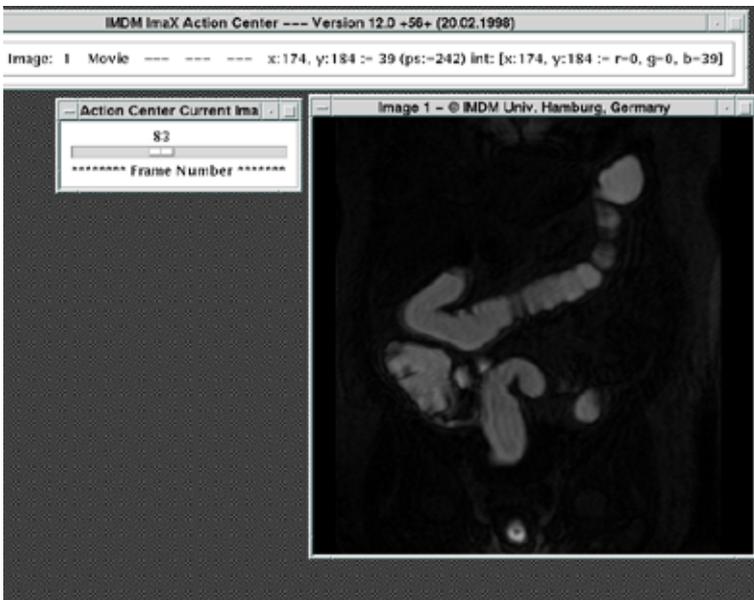
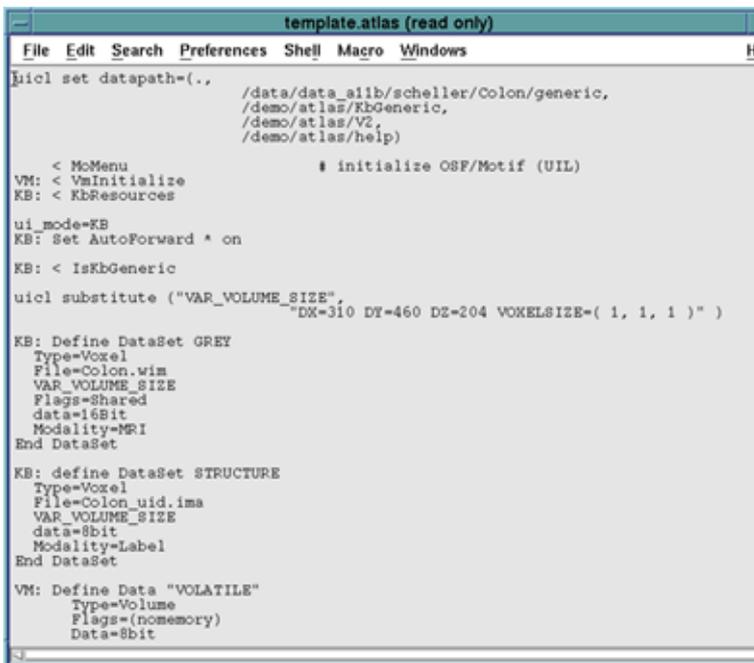


Abb. 2.7: „c movie“ Vermessungswerkzeug

2.2.4.2 Erstellen des Atlas-Aufrufs

Mit dem Programm „VOXEL-MAN-Atlas“ wurde die 3D-Visualisierung durchgeführt. Das Skript „template.atlas“ hat den Aufruf des Datenvolumens im „VOXEL-MAN“-Atlas ermöglicht (Abb. 2.8). Es musste für jeden Patienten modifiziert werden. Die Größe des zuvor mit „c shape“ reduzierten Datenvolumens musste in das Skript „template.atlas“ eingetragen werden. Dazu wurden die Ausmaße des Volumens in allen drei Raumrichtungen mit dem Programm „c comment“ ermittelt.

Nachdem die Modifikationen erfolgt sind, konnte nun mit dem Skript „template.atlas“ der „VOXEL-MAN“-Atlas mit dem MRT-Volumen des zu bearbeitenden Patienten gestartet werden.



```
template.atlas (read only)
File Edit Search Preferences Shell Macro Windows He
!icl set datapath=(.,
                /data/data_s11b/scheller/Colon/generic,
                /demo/atlas/KbGeneric,
                /demo/atlas/V2,
                /demo/atlas/help)

< McMenu          # initialize OSP/Motif (UIL)
VM: < VmInitialize
KB: < KbResources

ui_mode=KB
KB: Set AutoForward * on
KB: < IsKbGeneric

uicl substitute ("VAR_VOLUME_SIZE",
                "DX=310 DY=460 DZ=204 VOXELSIZE=( 1, 1, 1 )" )

KB: Define DataSet GREY
Type=Voxel
File=Colon.vim
VAR_VOLUME_SIZE
Flags=Shared
data=16bit
Modality=MRI
End DataSet

KB: define DataSet STRUCTURE
Type=Voxel
File=Colon_uid.ima
VAR_VOLUME_SIZE
data=8bit
Modality=Label
End DataSet

VM: Define Data "VOLATILE"
Type=Volume
Flags=(nomemory)
Data=8bit
```

Abb. 2.8: *template.atlas*

2.2.4.3 Segmentation

Bei der Segmentation musste die Kolonoberfläche aus dem Grauwertvolumen ermittelt werden. Im „VOXEL-MAN“-Atlas war ein Segmentations-Werkzeug integriert [Höhne, Hansen 1992]. Wie von kommerziellen Programmen gewohnt, konnte man mit mehreren „Pull-down-Menüs“ in wenigen aufeinanderfolgenden Schritten das Kolon darstellen (Abb. 2.9). Zunächst wurde in einem Histogramm des Grauwertvolumens der Schwellwert ermittelt, der sich am Übergang zwischen dem mit Kontrastmittel gefüllten

Kolon und dem umgebenden Gewebe befand. Alle Voxel im Volumen, die einen helleren Grauwert haben als der Schwellwert, wurden nachfolgend markiert und mit dem Attribut Kolon versehen. Die Oberfläche der markierten Voxel repräsentierte nun die innere Wand des Kolon.

Bei dieser Segmentation wurden häufig auch Teile vom Dünndarm durch Kontrastmittel, dass die Ileocaecalklappe passiert hat, markiert. Manchmal ist die Dünndarmoberfläche an Berührungspunkten mit dem Kolon verschmolzen. Mit einem „Radierwerkzeug“ konnte die Markierung an dem Übergang vom Kolon zum Ileum aufgehoben werden. Durch „Erosion“ konnten die Markierungen bei den äußersten Voxeln der Kolonoberfläche gelöscht werden. Auf diese Weise wurden eventuelle Verbindungen zum Dünndarm aufgehoben. Wenn die Erosion keine zufriedenstellende Ergebnisse lieferte, konnte auch das „Radierwerkzeug“ wieder eingesetzt werden. Das Kolon konnte mit einer Analyse zusammenhängender Komponenten gesondert dargestellt werden, so dass nur noch das isolierte Kolon markiert war. Mit der Zuweisung des Attributs Kolon zu den markierten Voxeln war die Segmentation abgeschlossen.

Das Skript „template.atlas“ wurde nochmals modifiziert, damit beim nächsten Atlasaufruf das fertig segmentierte Kolon erscheint.

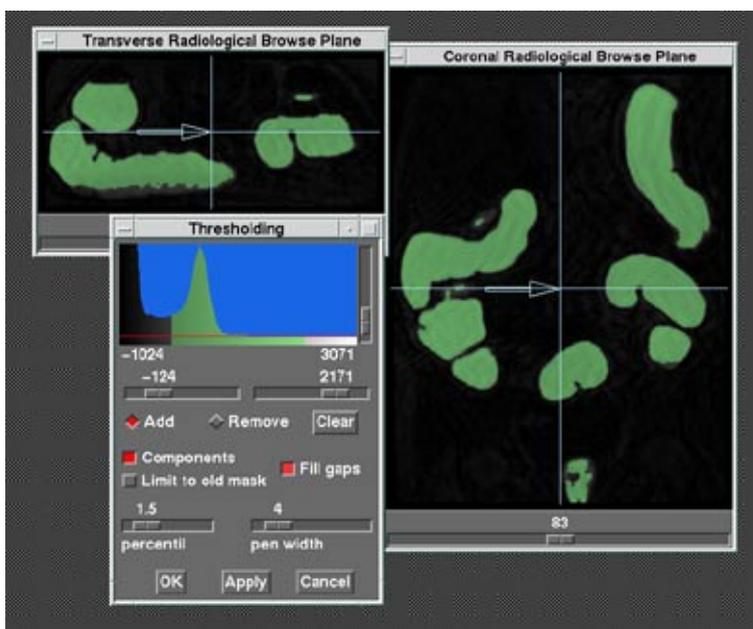


Abb. 2.9: Schwellwertbestimmung

2.2.4.4 Oberflächendarstellung

Das VOXEL-MAN-Visualisierungssystem ermöglichte eine genaue Darstellung der Oberfläche des Kolon im Subvoxelbereich unter Ausnutzung des Partial-Volumen-Effekts von MRT-Sequenzen [Tiede et al. 1998]. Diese Aufgabe wurde von einem im „VOXEL-MAN-Atlas“ integrierten Modul, dem sogenannten „Visualisierer“, übernommen. Es handelte sich um einen „Renderer“, der jede Kameraeinstellung vom segmentierten Objekt in eine dreidimensionale Ansicht umsetzen konnte.

Für die Bestimmung der sichtbaren Oberflächen des segmentierten Kolons wurde von einem virtuellem Betrachterstandort aus das Strahlverfolgungsverfahren (engl. Ray-Tracing oder Ray-Casting) [Foley et al. 1990] eingesetzt. Bei dieser Methode wurde für jeden Bildpunkt (engl. Pixel) des resultierenden zweidimensionalen Bildes ein Abtaststrahl entsprechend der Abbildungsgeometrie erzeugt. Für jeden Strahl mussten dann die Schnittpunkte mit der Kolonoberfläche ermittelt werden. In den Voxeln, die genau auf der Kontrastmitteloberfläche liegen, ist der Grauwert ein Mischwert aus dem Grauwert des Kontrastmittels und Umgebung (Partial-Volumen-Effekt). Das VOXEL-MAN-Visualisierungssystem nutzte den Partial-Volumen-Effekt zur trilinearen Interpolation des Grauwerts an der jeweiligen Abtastposition im Subvoxelbereich.

Da auch die Oberflächennormale an der Schnittstelle mit Hilfe des Grauwertgradienten im Subvoxelbereich ermittelt werden konnte, ließ sich die Kolonoberfläche mit dem Phongschen Beleuchtungsmodell in photorealistischer Qualität darstellen.

2.2.4.5 Auto-Path-Finder

Mit dem Entwurf und der Implementation eines Werkzeugs zur Generierung von Animationen durch automatische Navigation in schlauchförmigen Hohlstrukturen konnte das VOXEL-MAN-Visualisierungssystem für die Erstellung von endoskopischen Ansichten verwendet werden. Für die Bewegung durch das Kolon wird der vom Betrachter am weitesten entfernte Punkt der Darmwand mit Hilfe eines „Z-Buffers“ ermittelt [Hausig 1998]. Im "VOXEL-MAN"-Atlas war der Auto-Path-Finder als „Pull-down-Menü“ integriert.

Bei der Ermittlung eines Pfades durch das Kolon, wurde zunächst die initiale Kameraposition mit im Atlas als „Pull-down-Menüs“ integrierten Skripten erstellt (Abb.

2.10). Dabei wurde die Kamera so im Rektum positioniert, dass eine nach proximal gerichtete virtuelle endoskopische Ansicht entsteht.

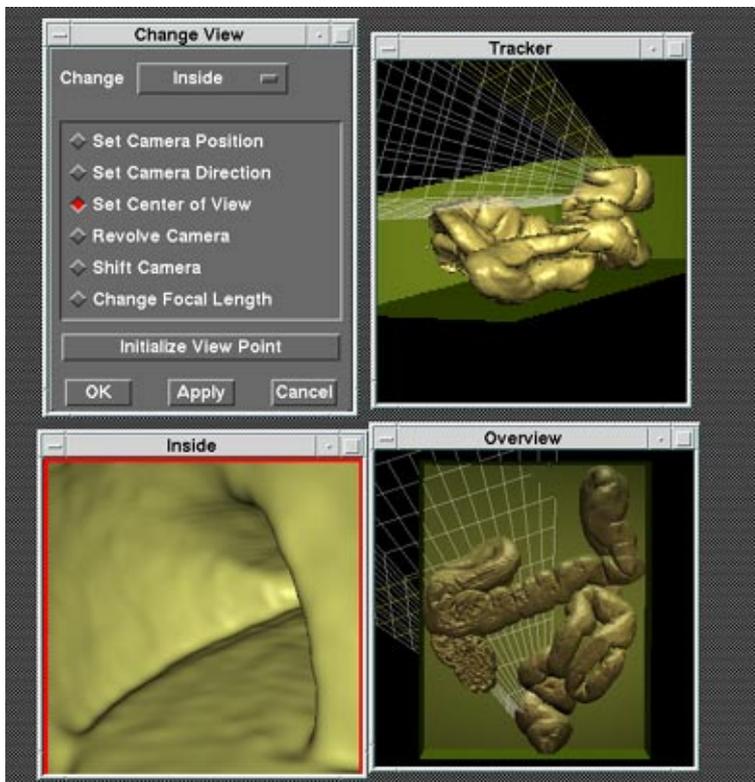


Abb. 2.10: *initiale Kameraposition*

Der Auto-Path-Finder suchte sich einen Weg durch das Kolon indem er die Kamera immer einen Schritt weiter in Richtung des im Bild am weitesten entferntesten Punktes bewegt hat. Dabei wurden sogenannte „Keyframes“ erzeugt. Ein Keyframe beschreibt den Zustand der Animation in einem Zeitpunkt, also einzelne endoskopische Ansichten des Kolons. Durch Interpolation zwischen den „Keyframes“ entstehen Trajektorien, die den Weg durch das Kolon beschreiben. Da im Bereich von Flexuren und ausgeprägten Haustren die virtuelle Kamera häufig gegen die Darmwand stößt, musste man die Kameraposition gelegentlich mit dem Befehl „change view“ manuell korrigieren.

2.2.4.6 Filmerstellung

Mit Hilfe der mit dem Auto-Path-Finder ermittelten Keyframes und der Trajektorie konnten virtuelle Flüge durch das Kolon als Filme im „Quicktime“-Format berechnet werden. Im resultierenden Film erlaubte eine Bildschirmunterteilung mehrere Kolon-

Ansichten gleichzeitig. Neben der Darstellung der virtuellen Endoskopie befand sich auch eine Außenansicht des gesamten Kolons zur besseren Orientierung. Zusätzlich wurden Rekonstruktionen der MRT-Schichtbilder als Coronar-, Sagittal- und Transversalansichten mitgeführt (Abb. 2.11).

Bei der Filmerstellung mussten, wie auch schon beim Erstellen des Atlasaufrufs, mehrere Skripte nacheinander abgearbeitet werden. Zunächst wurden die unterschiedlichen Kameraansichten mit dem „script.ani“ erzeugt. Die Kameraansichten mit der 3D-Rekonstruktion standen bereits nach Anwenden des „script.ani“ im "Quicktime"-Format zu Verfügung, die Schichtbilder mussten jedoch noch mit dem Skript „ima2mac“ ins "Quicktime"-Format überführt werden. Die einzelnen Kameraansichten wurden dann mit dem script „merge.tcl“ zu einem Bild zusammengesetzt. Die fertiggestellte Virtuelle Koloskopie konnte dann mit dem „Quick Time Movie Player“ betrachtet werden.

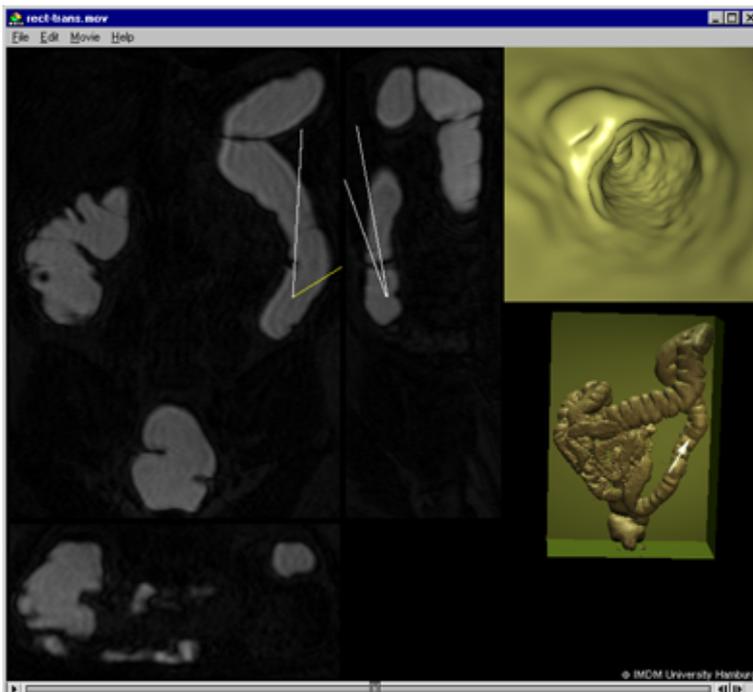


Abb. 2.11: Virtuelle Koloskopie

2.3 Koloskopie

Die Untersuchung erfolgte mit einem Routine-Koloskop (Model CF-140 I ; Olympus Europa, Hamburg) in der Klinik für interdisziplinäre Endoskopie im Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf (Abb. 2.12 und Abb. 2.13).



Abb. 2.12: Koloskopie

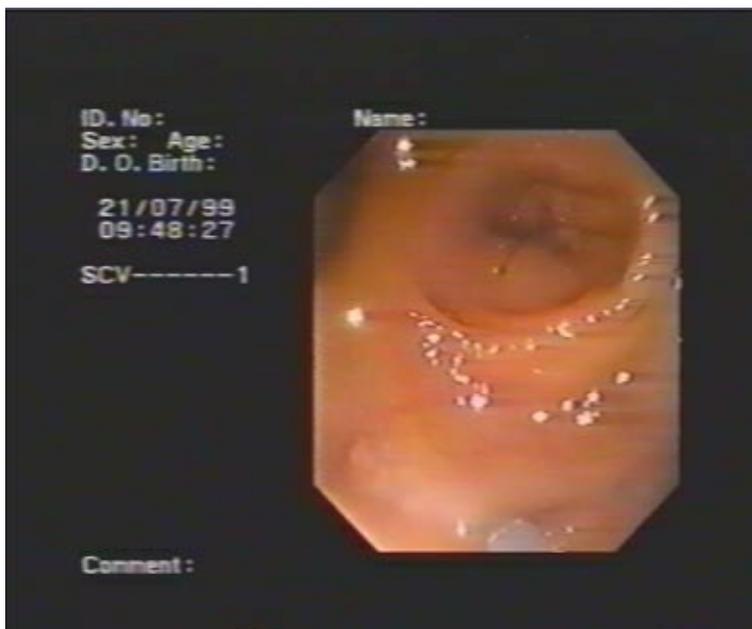


Abb. 2.13: Koloskopie Display-Ansicht

2.3.1.1 Medikation

Die Untersuchungen wurden in Analgosedation mit Propofol durchgeführt. Die durchschnittliche Menge betrug ca. 100 mg (20 mg - 560 mg) Propofol [siehe Tab. 2.3 und Abb. 2.14]. Je nach Bedarf wurden auch 2,5 , 5 oder 10 mg Diazepam und selten 1 mg Rohypnol verabreicht. Zur Darmdilatation wurde in wenigen Fällen Buscopan (20-60 mg) appliziert.

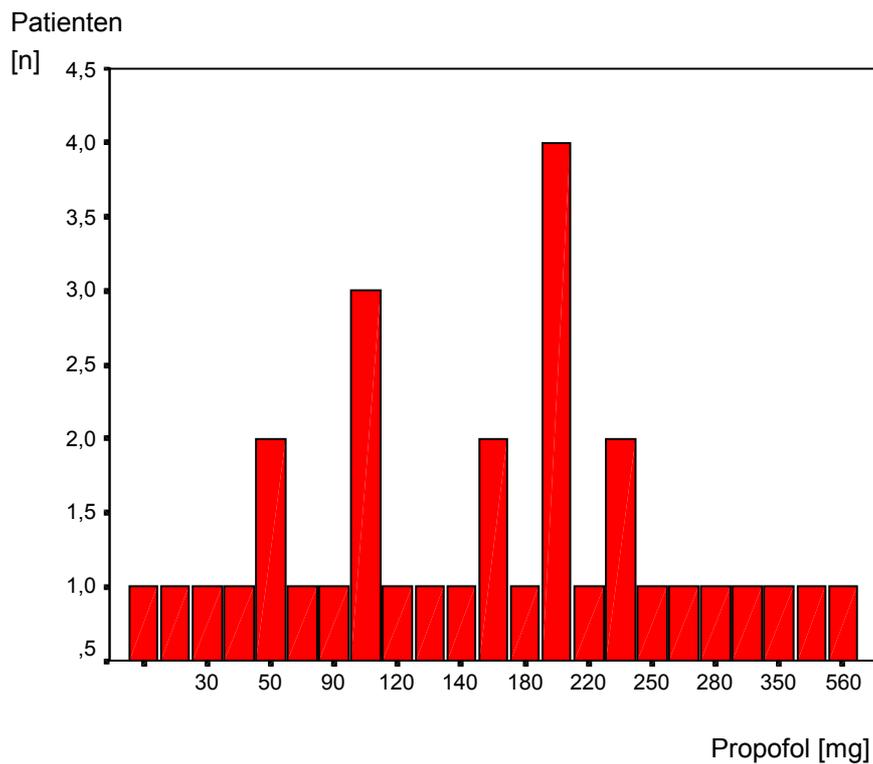


Abb. 2.14: Propofolgaben

Tabelle 2.3: Medikamentengaben

Patient	Propofol (mg)	Diazepam (mg)	Buscopan (mg)
1	120		
2	130	10	
3	230	10	60
4	200		20
5	20	5	
6	300	5	20
7	200		
8	180	10	
9	560	5	
10	90	5	
11	250	10	
12	140	5	20
13	50		
14	280	5	20
15	80	5	
16	260	5	20
17	430		20
18	150	5	
19	350		
20	200	5	
21	40	5	
23	100	5	
24	50	5	
25	30	2	
26	100	5	
27	150	5	
28	200		
29	100	5	
30	220	5	20
31	230	10	20
Total	30	23	9

2.3.1.2 Dokumentation

Von allen Patienten lag ein schriftlicher Koloskopiebefund vor. Polypen bis ca. 5 mm wurden als Polypenknospe oder kleiner Polyp bezeichnet. Größere Polypen und tumoröse Raumforderungen wurden mit Millimeterangabe ausgemessen. Weiterhin wurden auch Divertikel befundet.

Bei 11 Patienten wurden Videosequenzen der Koloskopie aufgezeichnet, um den direkten Vergleich zwischen der realen und virtuellen Koloskopie zu ermöglichen.

Die schriftlichen Ergebnisse der konventionellen Koloskopie und die vorhandenen Videoaufzeichnungen dienten als „Goldstandard“ im Vergleich mit den MRT-Daten.

2.4 Analyse

Die Auswertung der Koloskopie lag in Form von ärztlichen Befunden aus der Klinik für interdisziplinäre Endoskopie im Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf vor.

Auf dem Boden der 3D Turbo-Flash-Gradienten-Echo-Sequenz (3D-GRE) erfolgte die Analyse der MRT-Untersuchungen. Es wurden die folgenden Analysemethoden durchgeführt:

1. multiplanaren Rekonstruktion (MPR)

An der MRT-Konsole, bzw. entsprechenden Workstation wurde von der coronaren 3D GRE-Sequenz multiplanare Rekonstruktionen erstellt.

2. Virtuelle Koloskopie

bei der virtuellen Koloskopie kamen zwei Softwaresysteme zur Anwendung:

- a) Das kommerzielles Software-Paket „Virtuoso®“ der Siemens AG
- b) Das Voxel-MAN-Visualisierungssystem, das am Institut für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin (IMDM) entwickelt wurde.

Für beide Analysemethoden wurde das Kolon in sechs Segmente unterteilt: Rektum, Sigma, C. descendens, C. transversum, C. ascendens, Coecum. Alle Analysen wurden von zwei Untersuchern durchgeführt. Die Befunderhebung erfolgte durch Konsensusentscheidung. Die Analyse wurde auf einem Blatt Papier mit der Skizze des Kolons dokumentiert [siehe Abb. 2.15]. Alle Befunde wurden mit der konventionellen Koloskopie verglichen.

2.4.1 Qualitative Analyse

Anschließend wurde die Qualität der Kontrastmittelfüllung beurteilt. In der MPR wurde die Qualität der Kontrastmittel-Füllung bei der MRK ermittelt. Das Kolon wurde dabei in sechs Abschnitte unterteilt: Rektum, Sigma, Colon Descendens, Colon Transversum, Kolon Ascendens, Coecum. Bei jedem Patienten wurde in jedem der sechs Abschnitte die Kontrastmittelfüllung bewertet. Dabei wurde folgende 5-Punkte-Skala benutzt: ungenügend(1), gering(2), mäßig(3), gut(4), sehr gut(5).

Die verschiedenen Artefakte durch Luft, Verunreinigungen, Aliasingeffekte und Bewegungsartefakte wurden beschrieben.

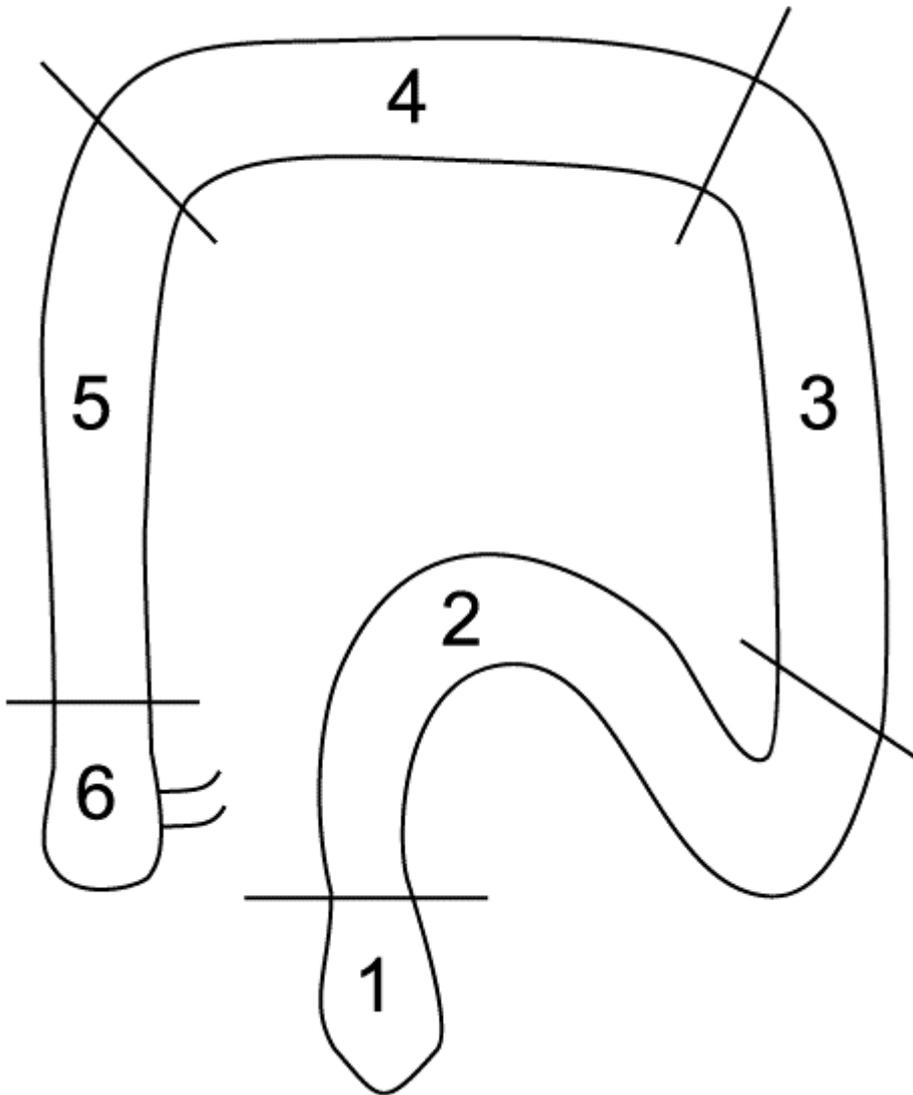
2.4.2 Pathologische Befunde

Bei 1. der multiplanaren Rekonstruktion (MPR):

In den multiplanaren Schichten wurde der Innenraum des Kolon auf das Vorhandensein von Kontrastmitteldefekten untersucht. Diese wurden bei entsprechendem Aussehen als Raumforderungen (Polypen/Tumore) definiert. Bei den Raumforderungen wurden die drei folgenden Größen unterschieden: < 5 mm, 5-10 mm, >10 mm. Kolonwandausstülpungen in den multiplanaren Schichten wurden als Divertikel bezeichnet.

Bei 2. der Virtuellen Koloskopie:

Der Bereich innerhalb der Kolonwand wurde auf das Vorhandensein von Kontrastmitteldefekten untersucht. Diese wurden bei entsprechendem Aussehen als Raumforderungen (Polypen/Tumore) definiert. Bei den Raumforderungen wurden die drei folgenden Größen unterschieden: < 5 mm, 5-10 mm, >10 mm. Ausstülpungen der Kolonwand wurden als Divertikel bezeichnet.



1=Rektum, 2=Sigma, 3=C.descendens, 4=C. transversum, 5=C. ascendens, 6=Coecum

Abb. 2.15: Skizze für die Auswertung

Für die Raumforderung als pathologischer Befund wurden die verschiedenen Untersuchungsmethoden verglichen. Bei der Auswertung der Raumforderungen wurde die Koloskopie als „Goldstandard“ definiert. Die beiden Auswertungsmöglichkeiten der MRK die MPR und die Virtuelle Koloskopie wurden in ihrem diagnostischem Wert jeweils mit dem „Goldstandard“ verglichen.

Für zwei Befundgruppen „Raumforderungen über 5 mm“ und „alle Raumforderungen“ wurde jeweils die Sensitivität, Spezifität, der positive und negative Vorhersagewert ermittelt.

2.4.3 Evaluierung der Benutzerschnittstelle

Die verschiedenen 3D-Visualisierungsmethoden wurden im Hinblick auf ihren sinnvollen Einsatz zur Erkennung von pathologischen Befunden bewertet.

Mit dem Voxelman-Visualisierungssystem wurde eine Virtuelle Koloskopie mit Oberflächendarstellung im Subvoxelbereich getestet. Eine Außenansicht und multiplanare Rekonstruktionen wurden im Echtzeitmodus simultan demonstriert und erleichterten die Orientierung.

3 Ergebnisse

31 Patienten wurden einer MRT-Untersuchung und einer Koloskopie unterzogen. Bei einem Patienten war das Kolon aufgrund von schlechter Vorbereitung so stark verschmutzt, dass es in der Koloskopie, MPR und Virtuellen Koloskopie nicht beurteilt werden konnte. Die folgende Auswertung basiert daher auf den Daten von 30 Patienten.

3.1 Koloskopie

Von den 30 untersuchten Patienten wiesen 17 Patienten mindestens einen pathologischen Befund auf, bei den übrigen 13 Patienten lag kein pathologischer Befund vor (Tab. 3.1).

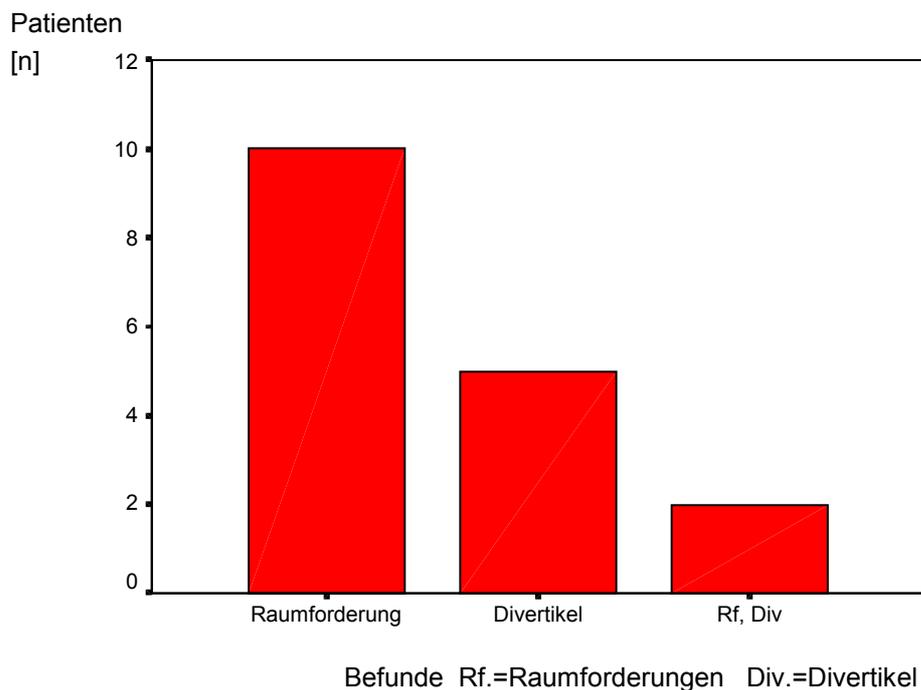


Abb. 3.1: Häufigkeit pathologischer Befunde

Die 17 Patienten wiesen folgende pathologische Befunde auf: 10 Patienten hatten mindestens eine Raumforderung, 5 Patienten hatten ein oder mehrere Divertikel und

zwei Patienten hatten sowohl Raumforderungen als auch Divertikel (Abb. 3.1 und Tab. 3.1).

Tabelle 3.1: pathologische Befunde Koloskopie

Patient	Raumforderung	Divertikel
3	Raumforderung	
4	Raumforderung	
6	Raumforderung	
9	Raumforderung	Divertikel
10		Divertikel
11	Raumforderung	
12	Raumforderung	
14	Raumforderung	Divertikel
17		Divertikel
18		Divertikel
19	Raumforderung	
20		Divertikel
25	Raumforderung	
26	Raumforderung	
27		Divertikel
30	Raumforderung	
31	Raumforderung	
Total	12	7

Bei den untersuchten Patienten wurden insgesamt 23 Raumforderungen gefunden. Davon waren 17 kleiner als 5 mm. Drei Raumforderungen waren 5-10 mm groß und drei Raumforderungen waren größer als 10 mm. Die meisten Raumforderungen waren im Rektum, Sigma und Colon descendens lokalisiert. Im Colon transversum wurden bei keinem der Patienten Raumforderungen gefunden.

Bei sieben der Patienten wurden Divertikel im Sigma vorgefunden (siehe Tab. 3.2).

Tabelle 3.2: Pathologische Befunde in den einzelnen Kolonabschnitten bei der Koloskopie

	Gesamt	Rektum	Sigma	C. desc.	C. transv.	C. ascend.	Caecum
RF<5 mm	17	5	3	4	0	2	3
RF5-10mm	3	0	2	0	0	1	0
RF>10 mm	3	2	0	0	0	1	0
Divertikel	7	0	7	0	0	0	0

3.1.1 Anatomie

Bei vier von den 13 Patienten ohne pathologischen Befund wurde eine Videoaufzeichnung der Untersuchung durchgeführt.

Anhand der Reihenfolge der Darmabschnitte und der anatomischen Merkmale der Kolonwand war eine Orientierung möglich, in welchem Darmabschnitt sich das Koloskop gerade befand.

Das Rektum ist ein Kapazitätsorgan mit drei Mucosafalten (Houstonfalten) (Abb. 3.2).

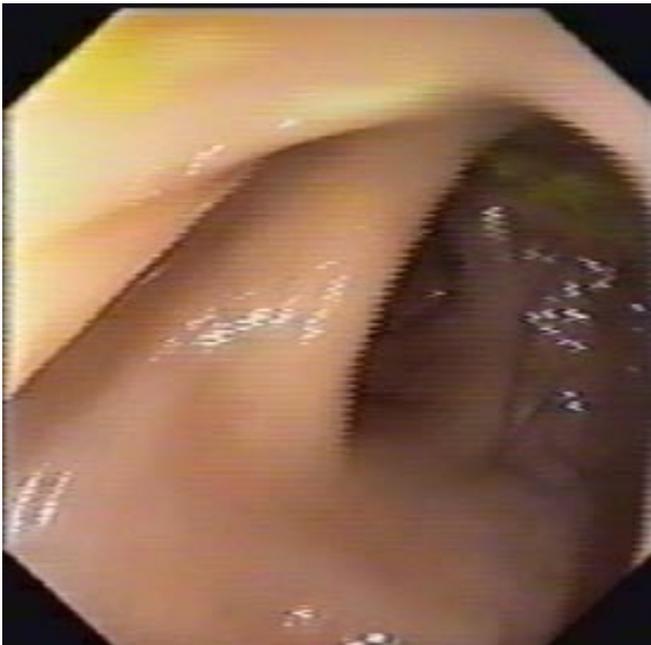


Abb. 3.2: Koloskopie: Rektum

Das Sigma ist durch seine Biegungen charakterisiert. Durch den erhöhten Muskeltonus stellt sich das Lumen meist eng dar (Abb. 3.3).

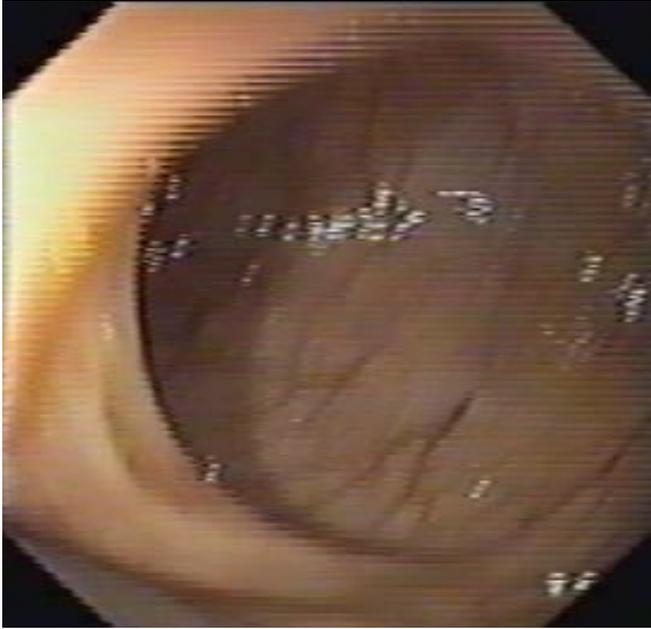


Abb. 3.3: Koloskopie: Sigma

Das Kolon descendens erkennt man an seinem geraden Verlauf und dem noch relativ runden Lumen innerhalb der Haustren (Abb. 3.4).

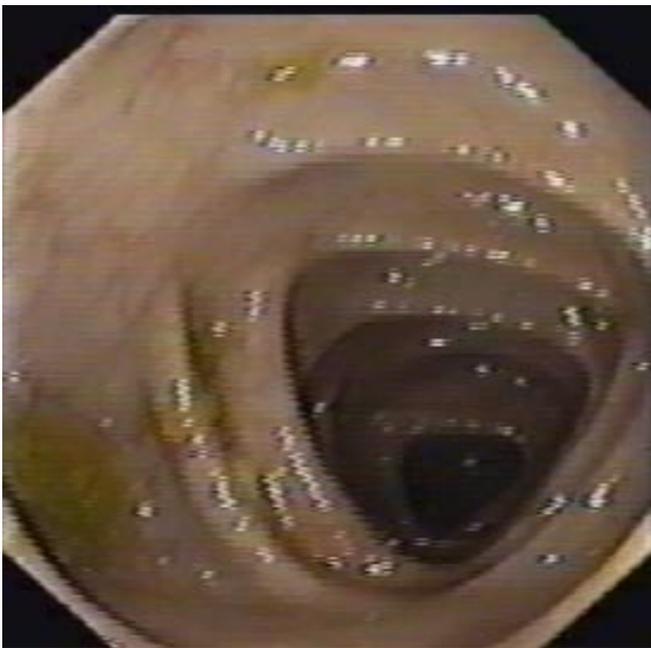


Abb. 3.4: Koloskopie: C. descendens

Im Kolon transversum besitzen die Haustren aufgrund der ausgeprägten longitudinalen Taenien eine dreieckige Konfiguration (Abb. 3.5).

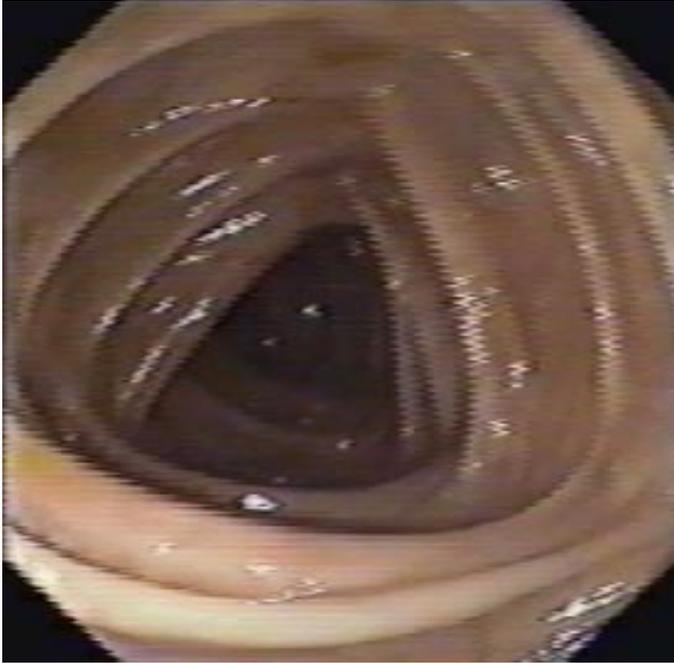


Abb. 3.5: Koloskopie: C. transversum

Das Kolon ascendens hat wie das Kolon transversum eine dreieckige Konfiguration der Haustren.

Im Caecum sieht man die Ileocaecal-Klappe und an deren Grund eine kleine Öffnung in den Blinddarm, der auf dem Caecum sehr unterschiedlich liegt (Abb. 3.6).



Abb. 3.6: Caecum

3.1.2 Pathologische Befunde

Polypen

Polypen waren Raumforderungen, die sich gleichmäßig und rund von der Darmwand abhoben und in der Oberflächenbeschaffenheit wenig Unterschied von der Darmwand zeigten. Sie wurden bei der Koloskopie abgetragen oder verödet (Abb. 3.7 und Abb. 3.8).

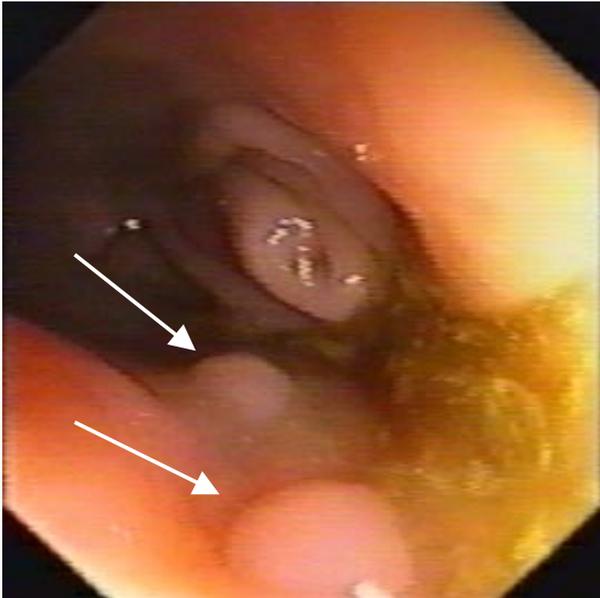


Abb. 3.7: Koloskopie: zwei kleine Polypen

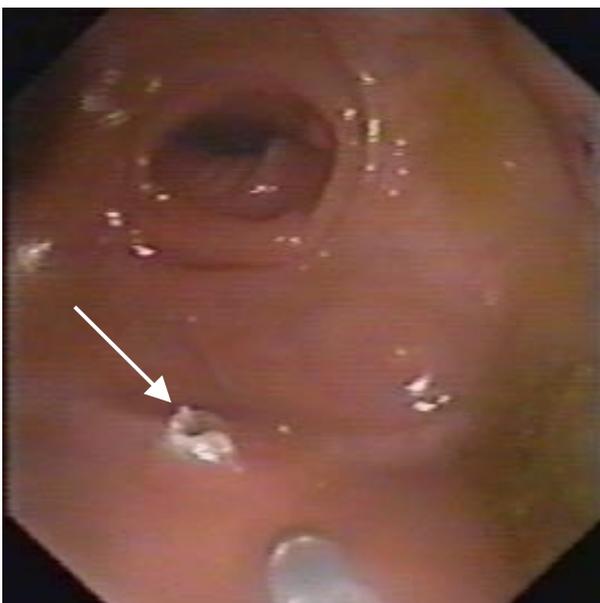


Abb. 3.8: Koloskopie: Polyp verödet

Tumore

Tumore sind größere Raumforderungen, die eine unregelmäßige Oberfläche zeigten (Abb. 3.9).

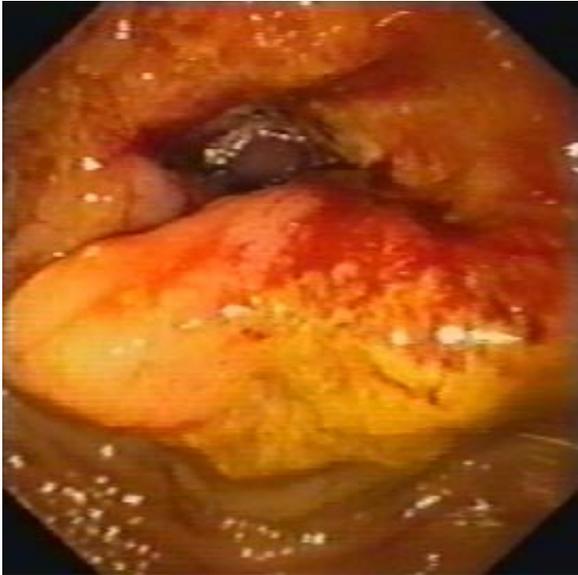


Abb. 3.9: Koloskopie: Lumen einengender Tumor

Divertikel

Divertikel zeigen sich als ringförmige Vertiefungen der Darmwand oder Ausstülpungen in den Haustren.

3.2 Qualitative Analyse

3.2.1 Kontrastmittelfüllung

Im Rektum, C. desc, C. transv. war die Kontrastmittelfüllung bei 77,4% der Patienten sehr gut. Im Sigma war die Kontrastmittelfüllung nur bei 67,7% der Patienten sehr gut. Die Prozentwerte bei den übrigen Bewertungen sind in der Tabelle 3.3 zusammengestellt.

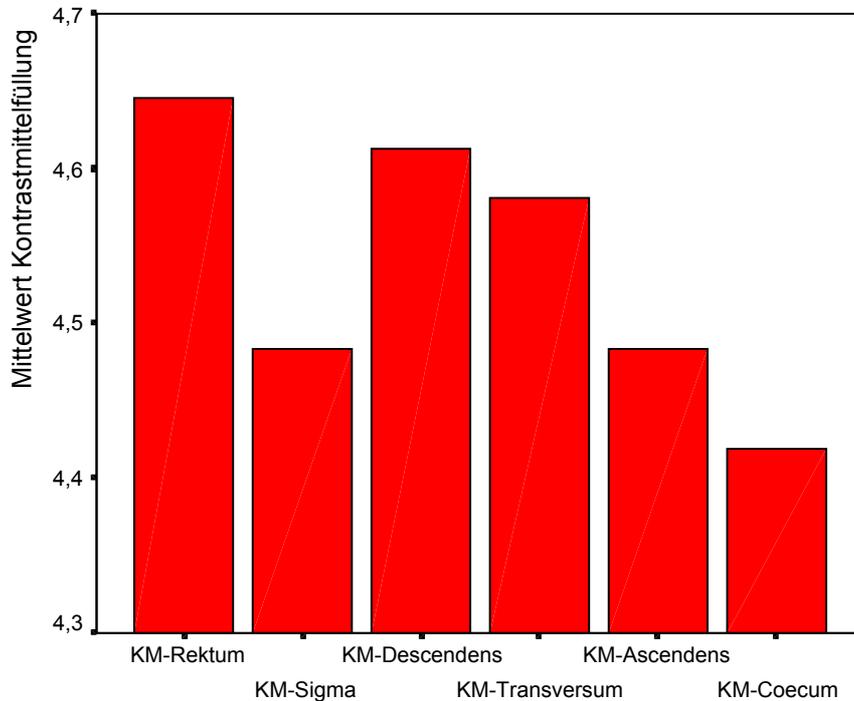
Für die unterschiedlichen Darmabschnitte wurde jeweils die durchschnittliche Qualität ermittelt (Abb. 3.10). Bei allen Darmabschnitten lag die durchschnittliche Qualität im Mittel zwischen gut und sehr gut. Die beste Kontrastmittelfüllung lag im Rektum, im C.

desc. Und im C. transv. Etwas schlechter war die Kontrastmittelfüllung im Sigma, C. asc. und Coecum.

Tabelle 3.3: Kontrast-Qualität

KM-Rektum		
Qualität	n	%
Ungenügend	0	0
Gering	1	3,2
Mäßig	2	6,5
Gut	4	12,9
Sehr gut	24	77,4
Total	31	100,0
KM-Descend		
Qualität	n	%
Ungenügend	0	0
Gering	1	3,2
Mäßig	3	9,7
Gut	3	9,7
Sehr gut	24	77,4
Total	31	100,0
KM-Ascende		
Qualität	n	%
Ungenügend	0	0
Gering	2	6,5
Mäßig	3	9,7
Gut	4	12,9
Sehr gut	22	71,0
Total	31	100,0

KM-Sigma		
Qualität	n	%
Ungenügend	0	0
Gering	1	3,2
Mäßig	4	12,9
Gut	5	16,1
Sehr gut	21	67,7
Total	31	100,0
KM-Transvers		
Qualität	n	%
Ungenügend	0	0
Gering	1	3,2
Mäßig	4	12,9
Gut	2	6,5
Sehr gut	24	77,4
Total	31	100,0
KM-Coecum		
Qualität	n	%
Ungenügend	0	0
Gering	1	3,2
Mäßig	6	19,4
Gut	2	6,5
Sehr gut	22	71,0
Total	31	100,0



Y-Achse: Kontrastmittelfüllung 1=Ungenügend, 2=Gering, 3=Mäßig, 4=Gut, 5=Sehr gut
 X-Achse: Kolonabschnitte

Abb. 3.10: Kontrastmittelfüllung in den Kolonabschnitten

Pathologische Befunde setzen sich in der virtuellen Koloskopie nicht immer von der Darmwand ab und liegen gelegentlich innerhalb von Artefakten oder sind von benachbarten Artefakten kaum zu unterscheiden.

Nachfolgend werden die Artefakte, die beobachtet werden konnten besprochen.

3.2.2 Verunreinigungen

Verunreinigungen stellten sich häufig als wandständige Raumforderungen dar (Abb. 3.11). Sie konnten mit Tumoren verwechselt werden. Es ist in der virtuellen Koloskopie nicht auszuschließen, dass sich ein Polyp innerhalb der Verunreinigung befindet.

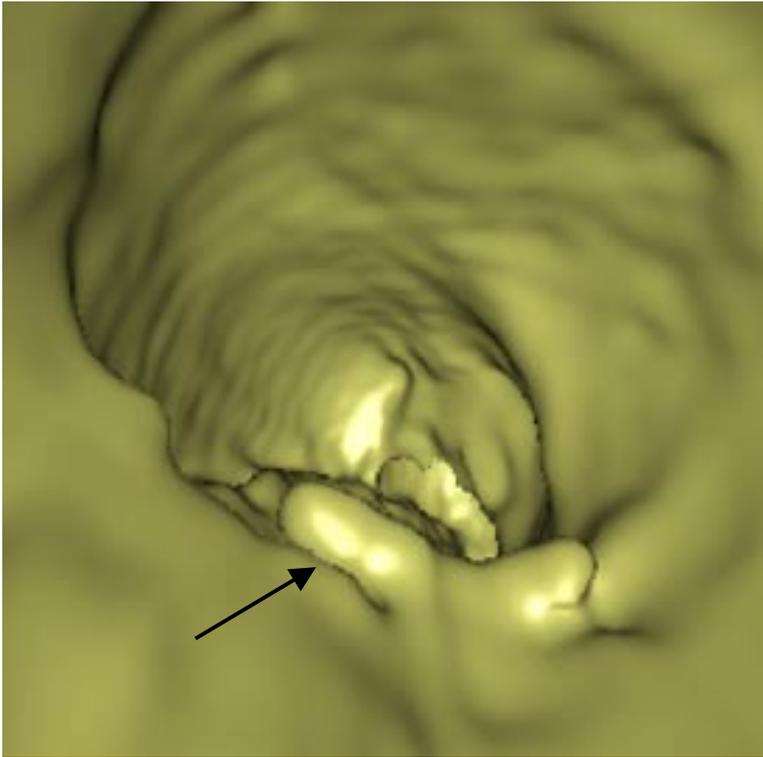


Abb. 3.11: Verunreinigungen

3.2.3 Luft

Im Darm verbliebene Luft ist aufgrund der Spiegelbildung meist leicht zu erkennen (Abb. 3.12 und Abb. 3.13). Die mit Luft bedeckten Darmabschnitte können jedoch nicht beurteilt werden. Kleinere Luftblasen können gelegentlich Polypen vortäuschen. Bei einem der Patienten wurde in der MPR eine Luftblase fälschlicherweise als Polyp erkannt. In der VC konnte aufgrund der besseren räumlichen Darstellung dieser Befund richtig eingeordnet werden.

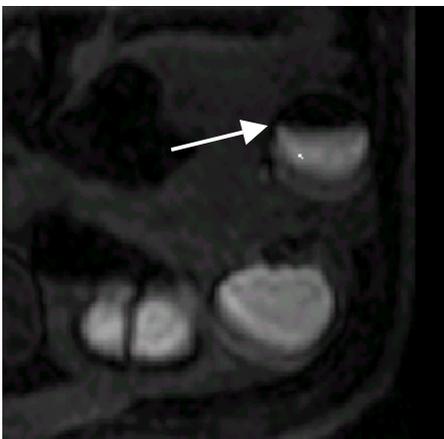


Abb. 3.12: Luft im Kolon mit Spiegelbildung

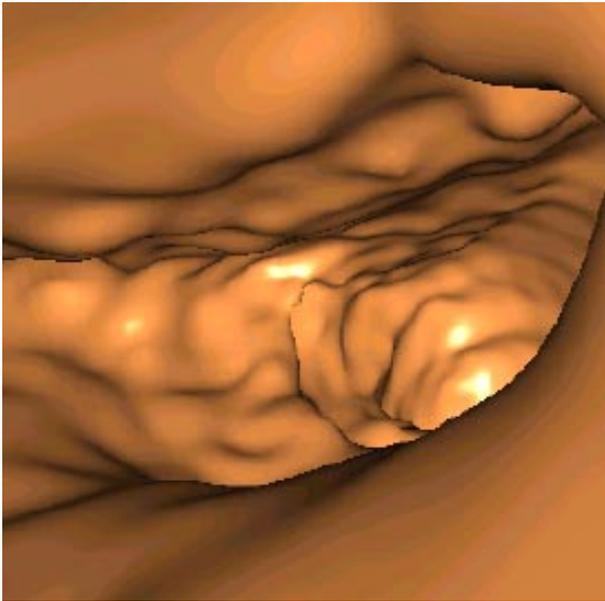


Abb. 3.13: Luft (Spiegelbildung im oberen Bildabschnitt)

3.2.4 Aliasingeffekte

Je kleiner der Schwellwert, desto mehr signalarme Bereiche werden mit aufgenommen und desto ausgedehnter ist der Darminhalt. Löcher in der Wand können entstehen (Abb. 3.14). Je größer der Schwellwert, desto kleiner wird das Lumen und frei schwebende oder wandständige Artefakte tauchen auf (Abb. 3.15).



Abb. 3.14: Aliasingeffekt: bei zu kleinem Schwellwert entstehen Löcher in der Darmwand

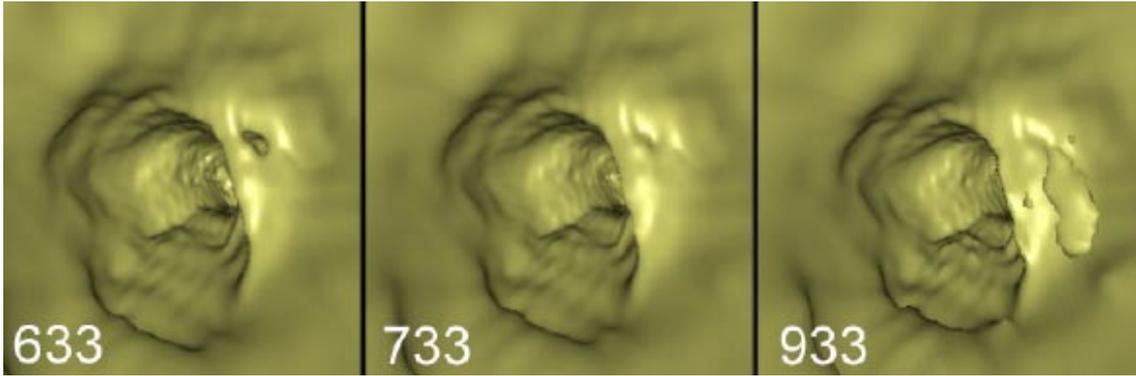


Abb. 3.15: *Aliasingeffekt: bei zu großem Schwellwert entstehen Artefakte*

3.2.5 Bewegungsartefakte

Die Abb. 3.16 stellt einen Luftspiegel dar. Durch die Bewegung sieht jedoch die Oberfläche wellenförmig zerfetzt aus.

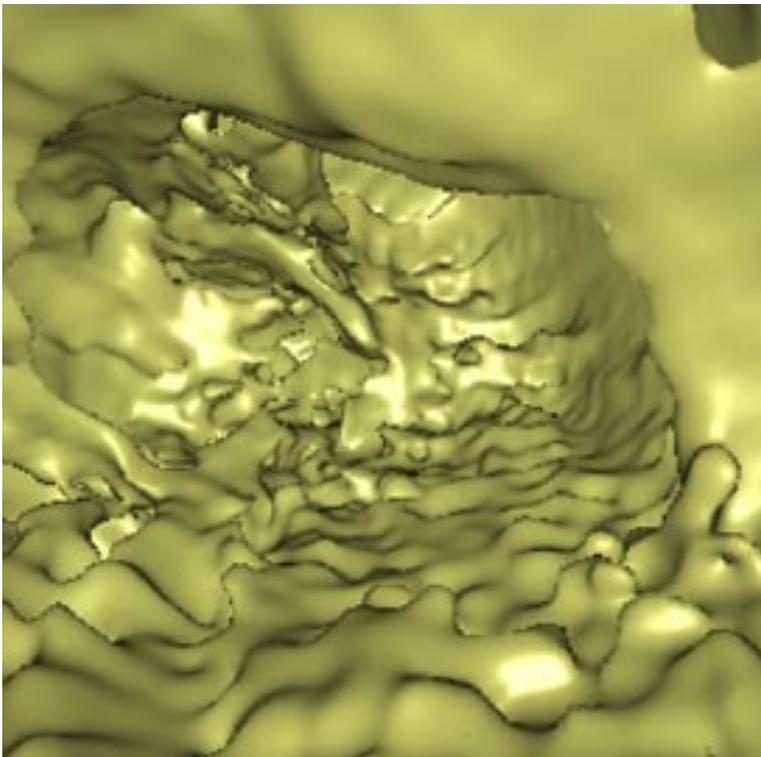


Abb. 3.16: *Bewegungsartefakte*

3.3 Pathologische Befunde

3.3.1 Multiplanare Rekonstruktion

Bei der Auswertung der MPR wiesen 14 der 30 ausgewerteten Patienten mindestens einen pathologischen Befund auf, bei 16 Patienten lag kein pathologischer Befund vor.

Von den 14 Patienten mit pathologischen Befunden hatten 8 Patienten mindestens eine Raumforderung, 3 Patienten ein oder mehrere Divertikel und 3 Patienten sowohl Raumforderungen als auch Divertikel (siehe Abb. 3.17 und Tab 3.4).

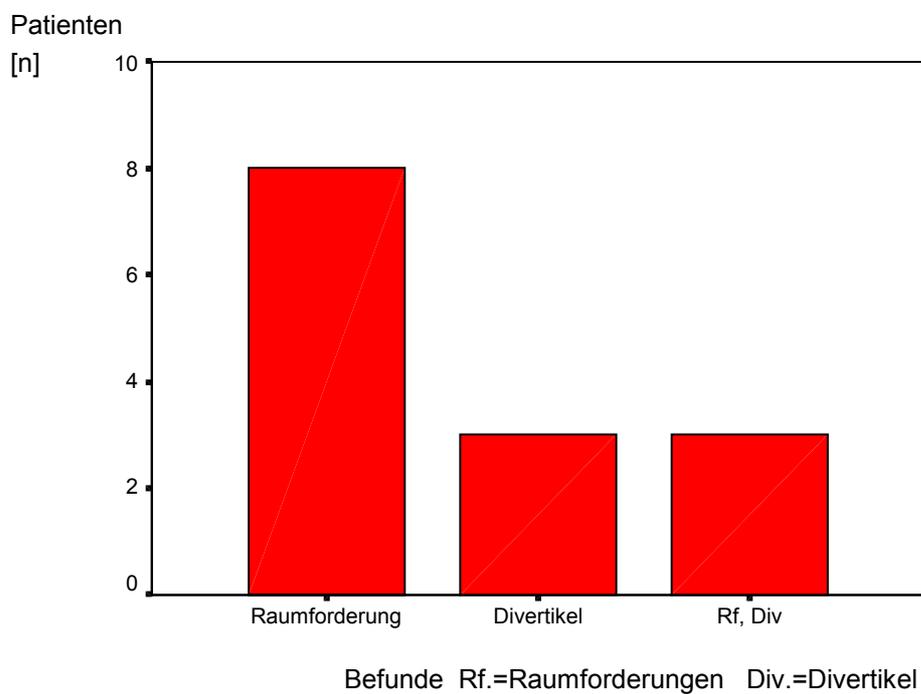


Abb. 3.17: Häufigkeit pathologischer Befunde

Tabelle 3.4: pathologische Befunde MPR

Patient	Raumforderung	Divertikel
4	Raumforderung	
6	Raumforderung	
9	Raumforderung	Divertikel
14	Raumforderung	Divertikel
15	Raumforderung	
17		Divertikel
18	Raumforderung	Divertikel
19	Raumforderung	
20		Divertikel
21	Raumforderung	
25	Raumforderung	
26	Raumforderung	
27		Divertikel
30	Raumforderung	
Total	11	6

Bei den untersuchten Patienten wurden insgesamt 13 Raumforderungen gefunden. Davon waren 8 kleiner als 5 mm. Zwei Raumforderungen waren 5-10 mm groß und drei Raumforderungen waren größer als 10 mm. Die meisten Raumforderungen waren im Colon descendens, Sigma und Rektum lokalisiert. Im Colon transversum wurden bei keinem der Patienten Raumforderungen gefunden.

Bei sieben der Patienten wurden Divertikel im Sigma vorgefunden (siehe Tab. 3.5).

Tabelle 3.5: Pathologische Befunde in den einzelnen Kolonabschnitten bei der MPR

	Gesamt	Rektum	Sigma	C. desc.	C. transv.	C. ascend.	Caecum
RF<5 mm	8	1	3	4	0	0	0
RF5-10mm	2	0	1	0	0	1	0
RF>10 mm	3	2	0	0	0	1	0
Divertikel	6	0	6	0	0	0	0

3.3.1.1 Spezifität und Sensitivität bei RF

Für Raumforderungen über 5 mm ergab sich somit eine Sensitivität von 90% und eine Spezifität von 100%. Der positive Vorhersagewert lag bei 100%, der negative Vorhersagewert lag bei 96,2% (Tab. 3.6).

Für alle Raumforderungen ergab sich eine Sensitivität von 66,7% und eine Spezifität von 83,3%. Der positive Vorhersagewert lag bei 72,7%, der negative Vorhersagewert lag bei 78,9% (Tab. 3.7).

Tabelle 3.6: Raumforderungen > 5 mm

		MPR		Total
		RF	keine RF	
Koloskopie	RF	4	1	5
	keine RF	0	25	25
Total		4	26	30

RF=Raumforderungen

Sensitivität: $4/5 = 90,0\%$

Spezifität: $25/25 = 100\%$

pos. Vorhersagew.: $4/4 = 100\%$

neg. Vorhersagew.: $25/26 = 96,2\%$

Tabelle 3.7: Alle Raumforderungen

		MPR		Total
		RF	keine RF	
Koloskopie	RF	8	4	12
	keine RF	3	15	18
Total		11	19	30

Sensitivität: $8/12 = 66,7\%$

Spezifität: $15/18 = 83,3\%$

pos. Vorhersagew.: $8/11 = 72,7\%$

neg. Vorhersagew.: $15/19 = 78,9\%$

3.3.1.2 Anatomie

In der Koloskopie dienten die anatomischen Merkmale der Koloninnenwand und die Struktur der Kolonfalten (*plicae semilunares*) als Orientierung, in welchem Darmabschnitt der Untersucher sich gerade befand. Obwohl diese Merkmale auf den MRT-Schichtbildern schwer nachvollziehbar waren, ist die Einteilung des Kolons in seine sechs Abschnitte sofort erkennbar, da diese Abschnitte auf einigen Schichtbildern gleichzeitig sichtbar sind und aufgrund deren räumlichen Anordnung die eindeutige Zuordnung aller Abschnitte sofort möglich ist. Vielfach täuschten in der MPR Abschnitte von Kolonfalten Polypen vor. War ein fraglicher Polyp in den zwei anderen Ebenen auf mehreren Schichten hintereinander sichtbar, konnte der Normalbefund Kolonfalte meist richtig gedeutet werden. Trotzdem wurde in einem Fall eine Falte fälschlicherweise als Polyp befundet.

3.3.1.3 Polypen

Die meisten Polypen waren im Rektum, Sigma und Colon descendens lokalisiert (Abb. 3.18). Im Colon transversum wurden bei keinem der Patienten Polypen gefunden.

Von den Raumforderungen im Rektum, die kleiner als 5 mm waren, wurde trotz der regelmäßig guten Beurteilbarkeit dieser Region nur einer erkannt (Tab. 3.5). Aufgrund der vielen Windungen und Verengungen im Sigma waren Polypen dort nur schwer zu identifizieren. Zusätzlich erschwerten Kolonfalten in Abschnitten ohne pathologischen Befund, Luftblasen und andere Artefakte häufig die Auswertung.

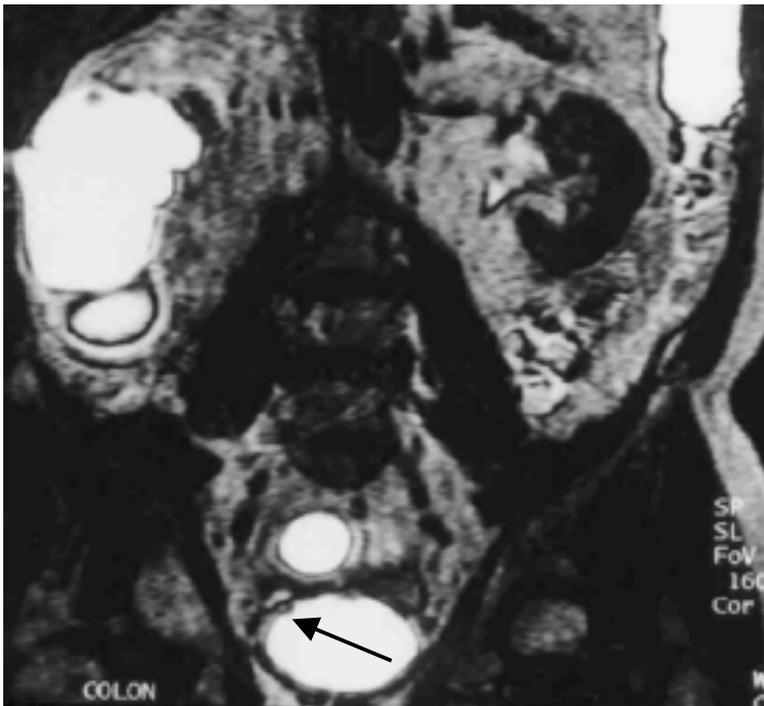


Abb. 3.18: Coronare MRT-Schicht: kleiner Polyp im Rektum

3.3.1.4 Tumore

Bei drei der untersuchten Patienten wurde ein Tumor gefunden. In zwei Fällen befand sich der Tumor im Rektum (Abb. 3.19 und Abb. 3.20) und bei einem Patienten im Colon ascendens (Abb. 3.21).



Abb. 3.19: MPR(coronare Schicht): Lumen einengender Tumor

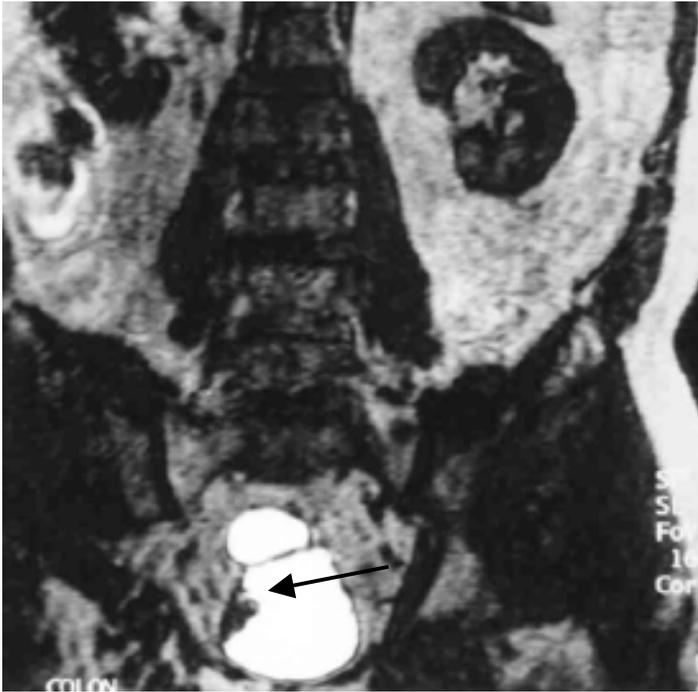


Abb. 3.20: MPR: Tumor im Rektum



Abb. 3.21: MPR: Tumor im C. ascendens

3.3.1.5 Divertikel

Divertikel zeigen sich in den Schnittbildern der MPR als Ausstülpungen oder Anhängsel an der Kolonwand (Abb. 3.22). Löcher in den Haustren lassen sich in der MPR nicht so gut erkennen.

Bei sieben der Patienten wurden Divertikel im Sigma vorgefunden. Bei der MPR konnten nur sechs von den sieben erkannt werden.

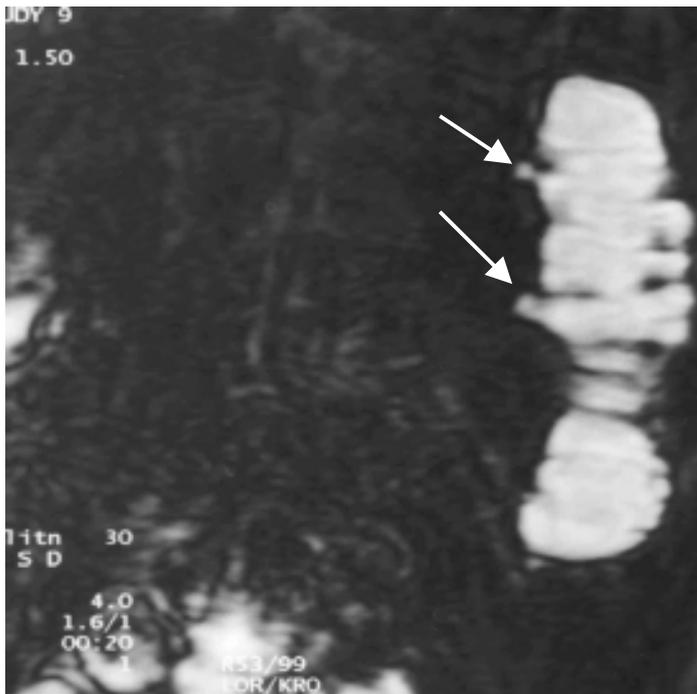


Abb. 3.22: MPR: Sigmadivertikel

3.3.2 Virtuelle Koloskopie

Bei der Auswertung der virtuellen Koloskopie wiesen 13 der 30 Patienten mindestens einen pathologischen Befund auf, bei 17 Patienten lag kein pathologischer Befund vor (Tab. 3.8)

Von den 13 Patienten mit pathologischen Befunden hatten 7 Patienten mindestens eine Raumforderung, 4 Patienten ein oder mehrere Divertikel und 2 Patienten sowohl Raumforderungen als auch Divertikel (Abb. 3.23 und Tab. 3.8).

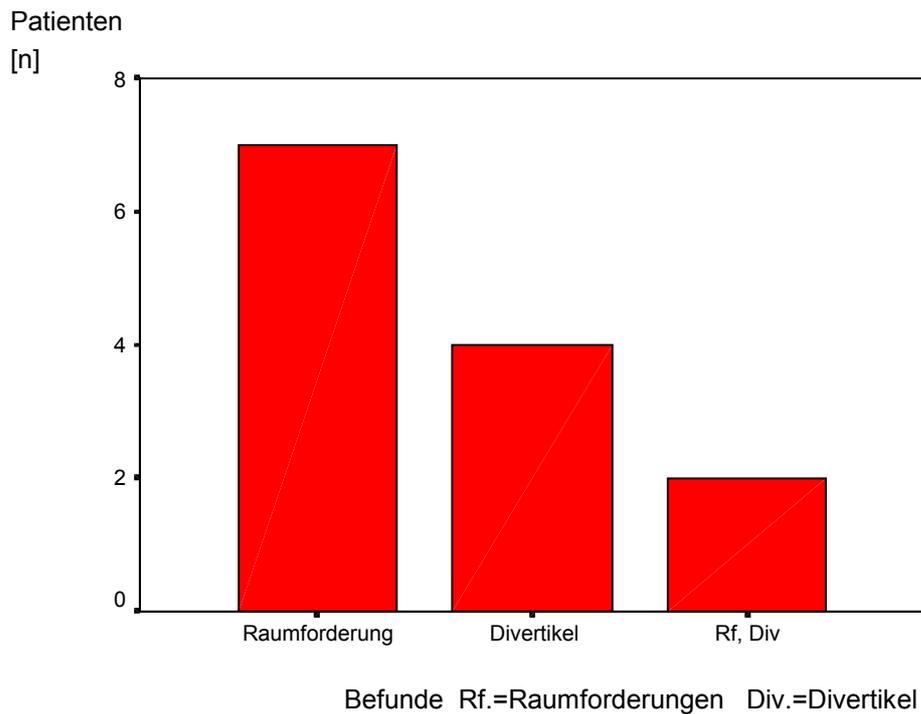


Abb. 3.23: Häufigkeit, pathologischer Befunde

Tabelle 3.8: pathologische Befunde MPR

Patient	Raumforderung	Divertikel
4	Raumforderung	
6	Raumforderung	
9	Raumforderung	Divertikel
14	Raumforderung	Divertikel
15	Raumforderung	
17		Divertikel
18		Divertikel
19	Raumforderung	
20		Divertikel
25	Raumforderung	
26	Raumforderung	
27		Divertikel
30	Raumforderung	
Total	11	6

Bei den untersuchten Patienten wurden insgesamt 11 Raumforderungen gefunden. Davon waren 6 kleiner als 5 mm. Zwei Raumforderungen waren 5-10 mm groß und drei Raumforderungen waren größer als 10 mm. Die meisten Raumforderungen waren im

Colon descendens, Rektum und Sigma lokalisiert. Im Colon transversum wurden bei keinem der Patienten Raumforderungen gefunden.

Bei sieben der Patienten wurden Divertikel im Sigma vorgefunden (siehe Tab. 3.9).

Tabelle 3.9: Pathologische Befunde in den einzelnen Kolonabschnitten bei der virtuellen Koloskopie

	Gesamt	Rektum	Sigma	C. desc.	C. transv.	C. ascend.	Caecum
RF<5 mm	6	1	1	4	0	0	0
RF5-10mm	2	0	1	0	0	1	0
RF>10 mm	3	2	0	0	0	1	0
Divertikel	6	0	6	0	0	0	0

3.3.2.1 Spezifität und Sensitivität bei RF

Für Raumforderungen über 5 mm ergab sich eine Sensitivität von 90% und eine Spezifität von 100%. Der positive Vorhersagewert lag bei 100%, der negative Vorhersagewert lag bei 96,2% (Tab. 3.10).

Für alle Raumforderungen ergab sich eine Sensitivität von 66,7% und eine Spezifität von 94,4%. Der positive Vorhersagewert lag bei 88,9%, der negative Vorhersagewert lag bei 81,0% (Tab. 3.11).

Tabelle 3.10: Raumforderungen > 5 mm

		VC		Total
		RF	keine RF	
Koloskopie	RF	4	1	5
	keine RF	0	25	25
Total		4	26	30

Sensitivität: $4/5 = 90,0\%$

Spezifität: $25/25 = 100\%$

pos. Vorhersagew.: $4/4 = 100\%$

neg. Vorhersagew.: 25/26 =96,2%

Tabelle 3.11: Alle Raumforderungen

		VC		Total
		RF	keine RF	
Koloskopie	RF	8	4	12
	keine RF	1	17	18
Total		9	21	30

Sensitivität: 8/12 =66,7%

Spezifität: 17/18 =94,4%

pos. Vorhersagew.: 8/9 =88,9%

neg. Vorhersagew.: 17/21 =81,0%

3.3.2.2 Anatomie

Wie in der Koloskopie unterscheiden sich auch in der VC die einzelnen Kolonabschnitte anhand Beschaffenheit der Kolonwand und der Anzahl der Windungen. Für die Orientierung haben diese Unterschiede keine Bedeutung. In der virtuellen Koloskopie ist die Einteilung des Kolons in seine sechs Abschnitte sofort erkennbar, da diese Abschnitte auf dem Übersichtsbild gleichzeitig sichtbar sind und aufgrund deren räumlichen Anordnung die eindeutige Zuordnung aller Abschnitte sofort möglich ist (siehe Abb. 2.11). Bedeutend sind die unterschiedlichen Darmabschnitte für die Navigation durch das Kolon, da diese je nach Kolonabschnitt leichter oder schwerer fällt.

Das Rektum ist ein Kapazitätsorgan mit drei Mucosafalten (Houstonfalten). Es ist in der VC meist weit gedehnt und leicht passierbar (Abb. 3.24).

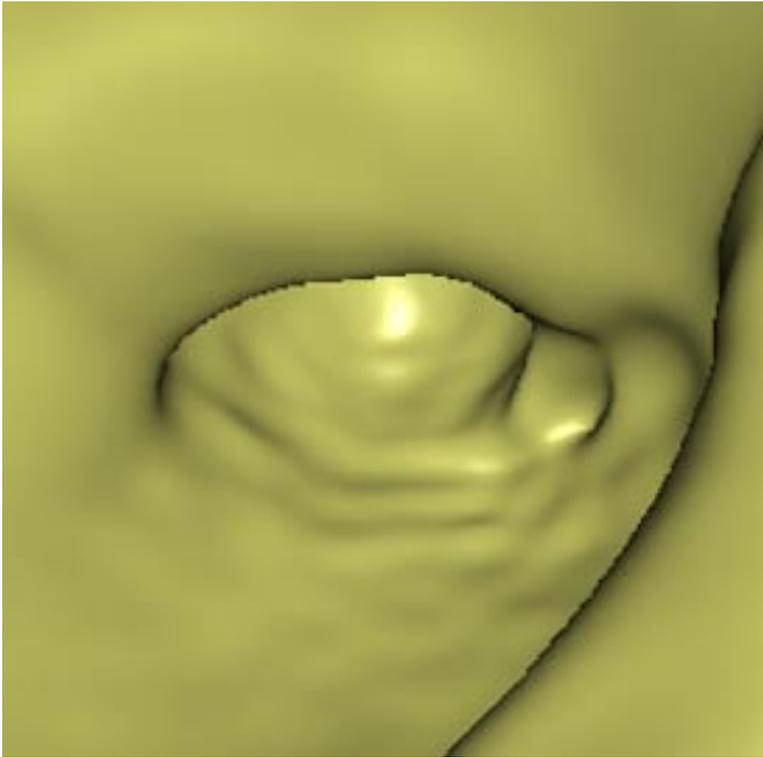


Abb. 3.24: VC: Rektum

Im Sigma erschweren die vielen Biegungen die Navigation in der VC (Abb. 3.25). Auch der erhöhte Muskeltonus führt trotz Muskerelaxantien gelegentlich zu Verengungen durch die man nur schwer navigieren kann.

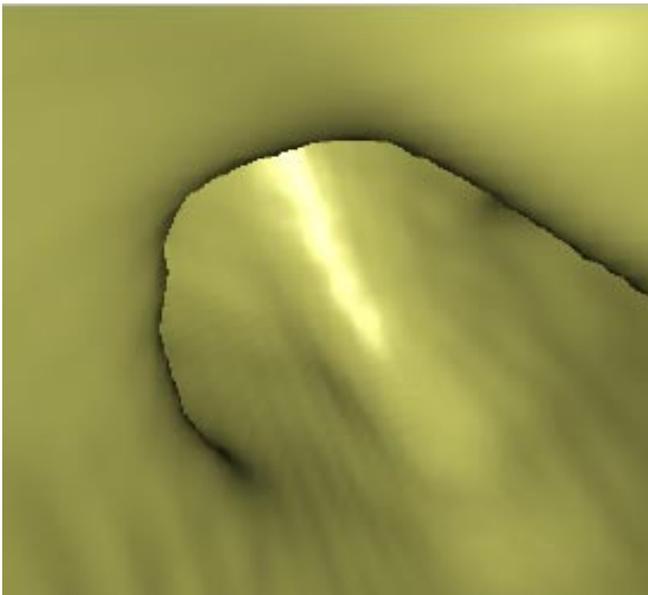


Abb. 3.25: VC: Sigma

Das Kolon descendens erkennt man an seinem geraden Verlauf und dem runden Lumen innerhalb der Haustren (Abb. 3.26).

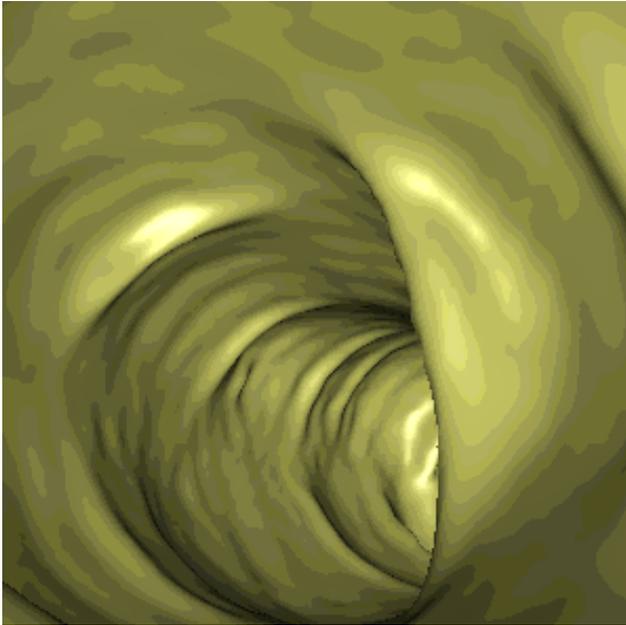


Abb. 3.26: VC: C. descendens

Die linke Flexur macht im günstigstem Fall eine 90° Biegung (Abb. 3.27), häufig aber auch eine spiralenförmige ausgeprägte Windung (Abb. 3.28).

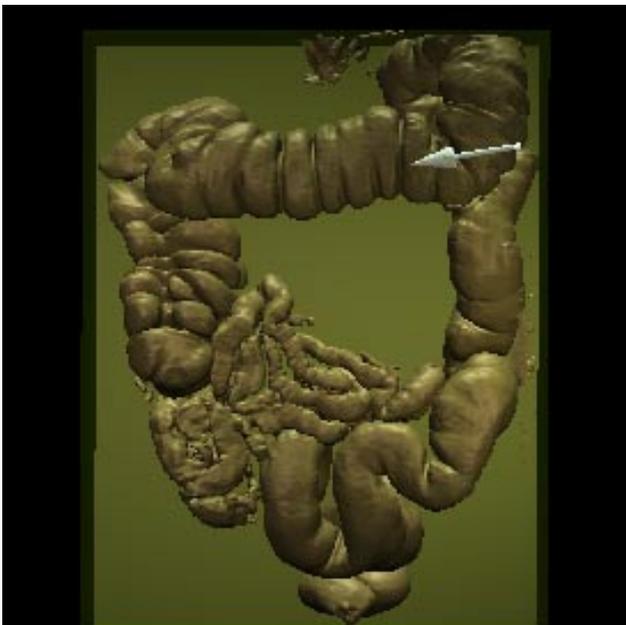


Abb. 3.27: linke Flexur: wenig gewunden



Abb. 3.28: linke Flexur: stark gewunden

Im Kolon transversum besitzen die Haustren aufgrund der ausgeprägten longitudinalen Taenien eine dreieckige Konfiguration (Abb. 3.29). Die Navigation ist hier meist schnell und unkompliziert.

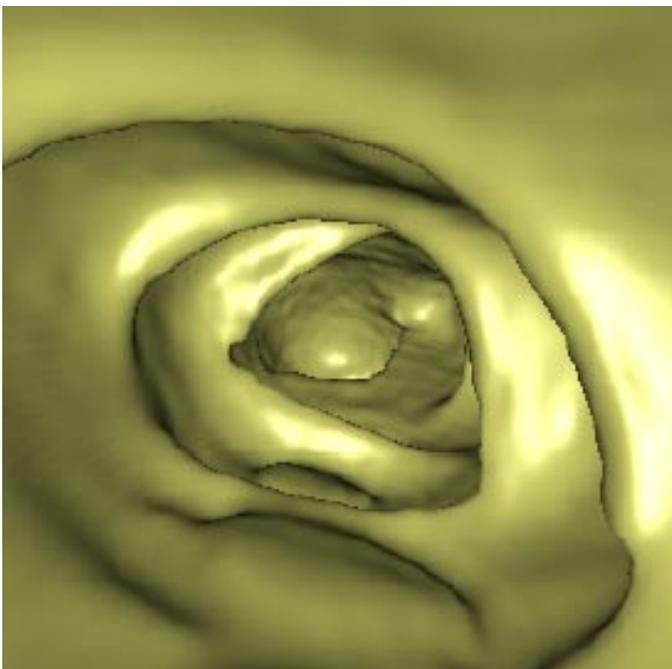


Abb. 3.29: VC: C. transversum

Die Windung der rechten Flexur ist meist einfacher, als die der linken und führt zum Kolon ascendens, das wie das Kolon transversum eine dreieckige Konfiguration der Haustren besitzt und leicht passierbar ist.

Im Caecum sieht man die Ileocaecal-Klappe und an deren Grund eine kleine Öffnung in den Blinddarm (Abb. 3.30), der auf dem Caecum sehr unterschiedlich liegt.

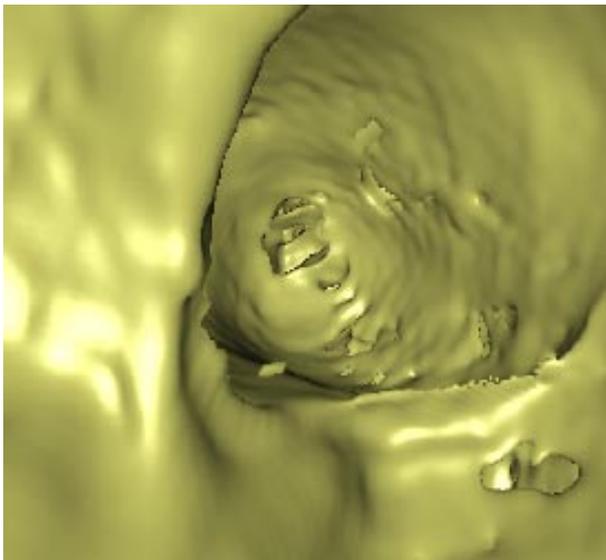


Abb. 3.30: VC: Caecum

3.3.2.3 Polypen

Die meisten Polypen waren im Rektum, Sigma und Colon descendens lokalisiert (Abb. 3.31 und Abb. 3.32). Im Colon transversum wurden bei keinem der Patienten Polypen gefunden.

Da die Polypen im Rektum bei den untersuchten Patienten meist kleiner als 5 mm waren, wurde trotz der guten Beurteilbarkeit nur einer erkannt (Abb. 3.33). Aufgrund der vielen Windungen und Verengungen im Sigma waren Polypen dort nur schwer zu identifizieren. Allerdings erwies sich hier die virtuelle Koloskopie als sehr hilfreich. Zwei Patienten, bei denen in der MPR Polypen falsch positiv identifiziert wurden, konnten in der dreidimensionalen Darstellung als Normalbefund erkannt werden.

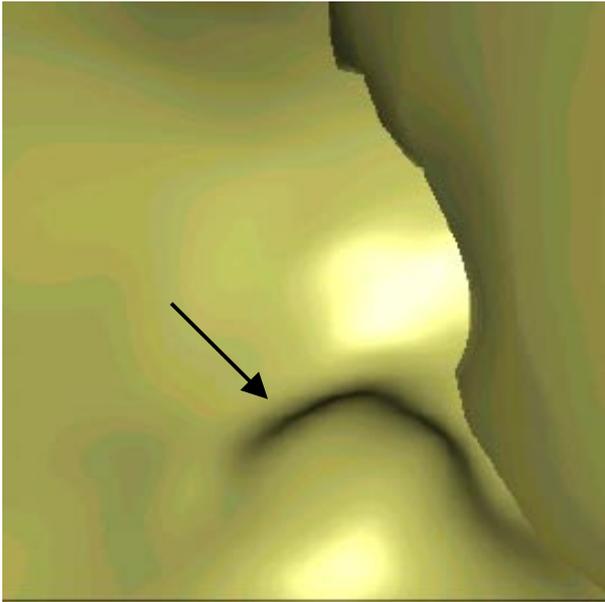


Abb. 3.31: VC: Polypen

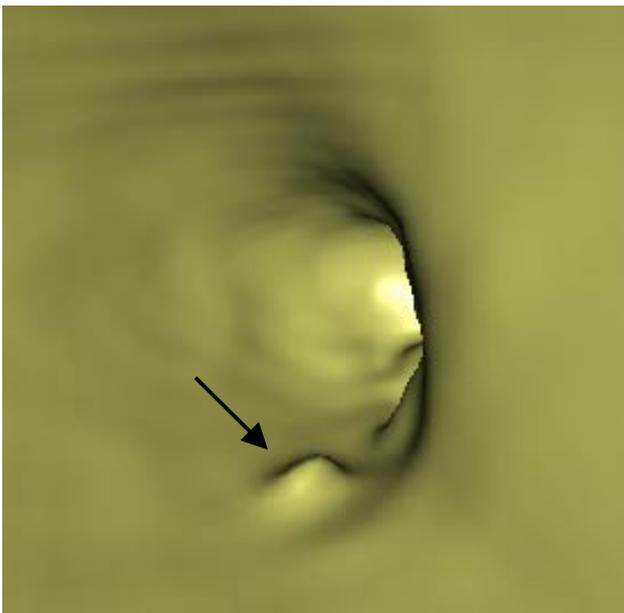


Abb. 3.32: VC: kleiner Polyp

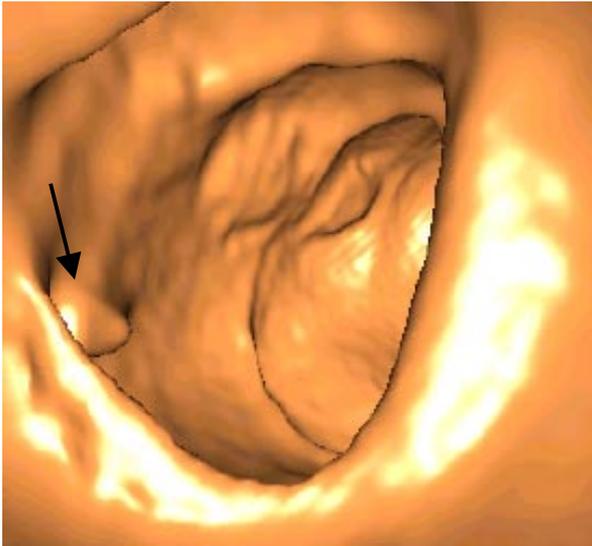


Abb. 3.33: VC: Polyp im Rektum

3.3.2.4 Tumore

Bei drei der untersuchten Patienten wurde ein Tumor gefunden. In zwei Fällen befand sich der Tumor im Rektum (Abb. 3.34 und Abb. 3.35) und bei einem Patienten im Kolon ascendens (Abb. 3.36).

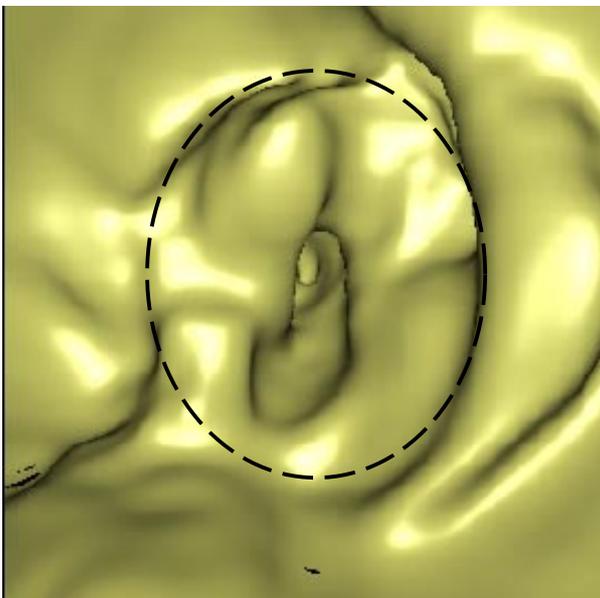


Abb. 3.34: Lumen einengender Tumor (innerhalb der Linie)

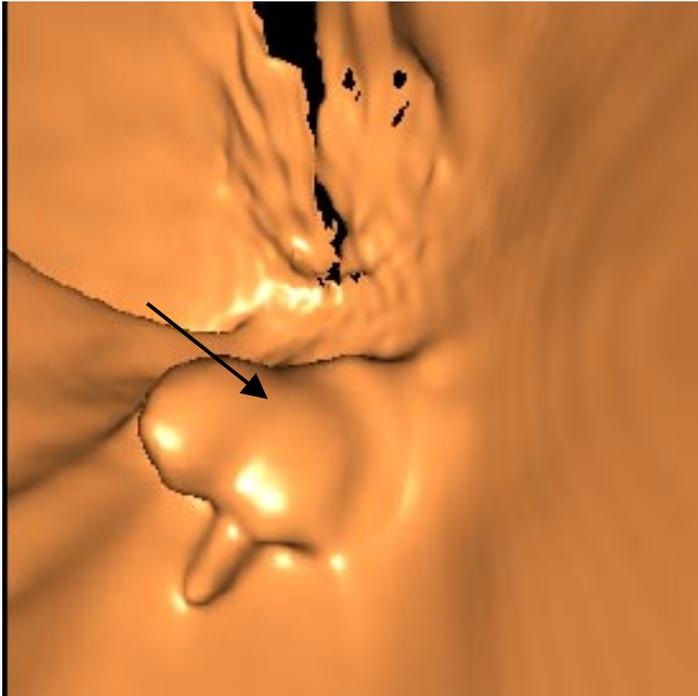


Abb. 3.35: VC: Tumor im Rektum

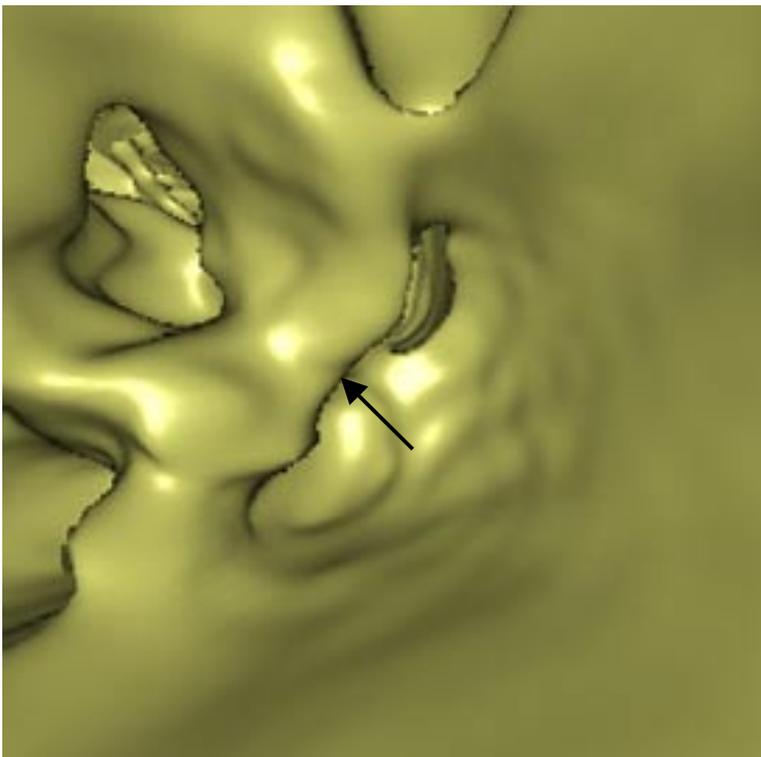


Abb. 3.36: VC: Tumor im Kolon ascendens

3.3.2.5 Divertikel

Divertikel zeigten sich als ringförmige Vertiefungen der Darmwand oder Löcher in den Haustren. Bei sieben der Patienten wurden Divertikel im Sigma vorgefunden (Abb. 3.37). Bei der VC konnten nur sechs von den sieben erkannt werden.

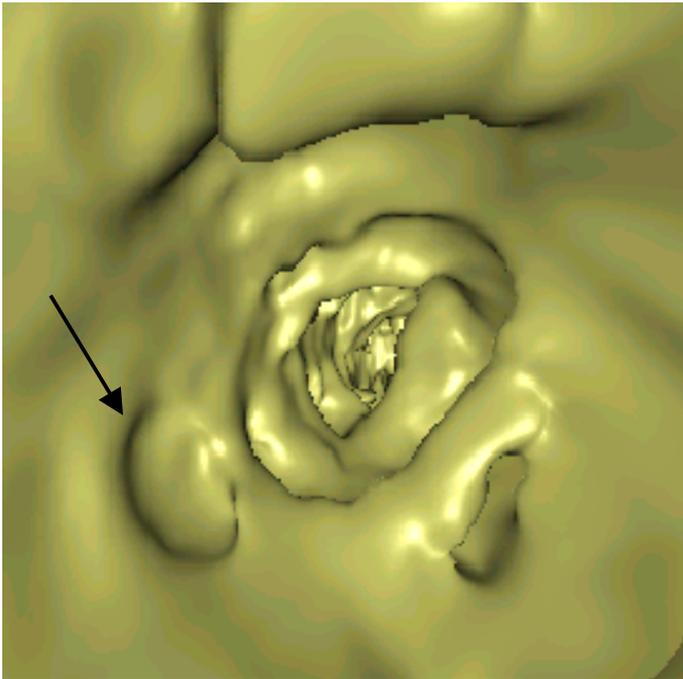


Abb. 3.37: VC: Sigmadivertikel

3.4 Evaluierung der Benutzerschnittstelle

3.4.1 Siemens „Virtuoso®“

3.4.1.1 Fly-Through

Für die Beurteilung des Kolons mit der Siemens „Virtuoso®“ hat sich das Fly-Through Modul mit dem Volume Rendering Modus als am besten geeignet erwiesen. Die Gegenüberstellung von Außen- und Innenansicht des Kolons und die halbautomatische Navigation ermöglichte ein systematisches Absuchen nach Unregelmäßigkeiten in der Darmwand. Für die Differenzierung zwischen Artefakten und pathologischen Veränderungen war es häufig erforderlich in einzelnen Darmabschnitten den

Grauwertbereich, der sich als Fenster im Histogramm darstellte, zu verändern. Zusätzlich mussten in jedem Darmabschnitt die Originalschichten im MPR-Modus hinzugezogen werden. Durch die Erstellung der 3D-Ansichten war die Darmwand mit pathologischen Strukturen und Artefakten leichter zu erkennen und anschaulicher. Durch die Bildbearbeitung sind jedoch ursprüngliche Informationen verloren gegangen. In der MPR waren die Grauwertinformationen vollständig vorhanden. Strukturen innerhalb und außerhalb der Darmwand waren auf den Schnittbildern zu sehen. Gerade bei der Differenzierung von fraglichen Befunden und Artefakten war es wichtig die MPR mit einzubeziehen.

Der zeitliche Aufwand der Auswertung lag zwischen 15 und 30 Minuten. Eine große Anzahl von Artefakten und eine Dickdarm Anatomie mit viel Haustren und Windungen verlängerten die Untersuchungszeit.

3.4.1.2 3D-Rekonstruktion

Alternativ war es im Fly-Through Modul möglich gewesen, zunächst im Modul 3D-Rekonstruktion das Kolon durch eine Schwellwert-Segmentation als polygonale Oberfläche darzustellen. Diese konnte dann im Fly-Through Modul sowohl von Innen als auch von Außen dargestellt werden. Aus zwei Gründen war die vorherige Segmentierung einer Polygonoberfläche schlechter geeignet als die Anwendung des Volume Rendering:

1. Bei dieser Methode konnte der Schwellwert nachträglich ohne erneute Segmentation nicht mehr geändert werden.
2. Die polygonalen Oberflächenstruktur führte zu Silhouetteneffekten. Dadurch waren kleine Strukturen wie z. B. Haustren und kleine Polypen häufig verzerrt und schlechter zu Beurteilen als im Volume Rendering

3.4.1.3 Real Time 3D Renderer (RT3D)

Mit dem Real Time 3D Renderer ließen sich schnell Außenansichten vom gesamten Kolon erstellen. Die Einstellung der Parameter für das Volume Rendering war sehr komfortabel. Ein schnelles Auffinden deutlicher pathologischer Veränderungen war leicht möglich, da man in der Außenansicht große Kolonabschnitte schnell erfassen konnte. Alle pathologischen Veränderungen waren auch im Real Time 3D Renderer

nachvollziehbar. Aufgrund der vielen Windungen im Kolon und Kontrastmittel im Dünndarm kam es häufig zu Überlagerungen. Das systematische Absuchen des Dickdarms war deshalb im Real Time 3D Renderer deutlich schwieriger als im Fly-Through Modul.

3.4.2 VOXELMAN-Visualisierungssystem

Die Oberflächendarstellung mit dem VOXELMAN-Visualisierungssystem erreichte nahezu eine photorealistische Qualität. Auch kleinste Polypen (siehe Abb. 3.32) die in der endoskopischen Ansicht stark vergrößert dargestellt waren, hatten eine glatte Oberfläche.

Die Erstellung der virtuellen Koloskopie mit dem VOXELMAN-Visualisierungssystem erforderte einen hohen Zeitaufwand von mehreren Stunden, da die virtuelle Endoskopie bisher nur versuchsweise in diesem Programm implementiert und bis zur fertigen virtuellen Koloskopie eine Vielzahl von Verarbeitungsschritten erforderlich war (siehe Kapitel 2.2.4).

Bei der Segmentation ist es mit wenig Aufwand möglich gewesen, störende Dünndarmanteile zu entfernen. Dies erleichterte deutlich die Orientierung im Kolon, da in der Außenansicht Kolonanteile nicht mehr von Dünndarmschlingen verdeckt wurden.

Mit Auto-Path-Finder ließen sich nur Teilstücke im Kolon automatisch durchfahren. Die vielen Haustren im Kolon führten dazu, dass sich der Auto-Path-Finder häufig in einer Falte, wie in einer Sackgasse verlief. Die virtuelle Kamera musste dann immer wieder korrigiert werden.

4 Diskussion

4.1 MR-Kolonographie

Für Raumforderungen über 5 mm ergab sich für die MPR eine Sensitivität von 90% und eine Spezifität von 100%. Durch die VC konnte bei Raumforderungen über 5 mm keine Verbesserung der Sensitivität und Spezifität erzielt werden. Für alle Raumforderungen ergab sich bei der MPR eine Sensitivität von 66,7% und eine Spezifität von 83,3%. Durch Einbeziehung der VC konnte die Spezifität unter Einbeziehung der Raumforderungen unter 5 mm auf 94,4% verbessert werden, die Sensitivität ist gleich geblieben.

Studien anderer Forschungsgruppen kamen zu ähnlichen Werten für Spezifität und Sensitivität. In einer Studie an 117 Patienten konnte bei Polypen über 10 mm eine Sensitivität von 93% und eine Spezifität von 99% erreicht werden [Luboldt et al. 2000]. Bei einer weiteren Studie an 70 Patienten wurde für Polypen über 10 mm eine Sensitivität von 96% und eine Spezifität von 93% erreicht [Pappalando et al. 2000].

4.1.1 MRT-Aufnahmetechnik

In dieser Studie wurde der Patient nur in Bauchlage untersucht. Es hat sich in anderen Studien als sinnvoll erwiesen zusätzlich zur Untersuchung in Bauchlage eine Untersuchung in Rückenlage durchzuführen [Luboldt et al. 2000]. Diese ermöglichte Verunreinigungen von Raumforderungen zu unterscheiden und die durch Luft einschüsse verdeckten Bereiche in der zweiten Untersuchung zu sehen. Wir verzichteten auf die Untersuchung in Rückenlage um die Untersuchungszeit zu reduzieren.

4.1.1.1 Kontrast

Zur Erhöhung des Kontrasts in der T1-gewichteten 3D-Gradienten-Echosequenz wurde in dieser Studie Gadoliniumkomplexe (Gd-DTPA, Magnevist, Schering, Berlin) im Verdünnungsverhältnis 1:100 verwendet. Auch von anderen Forschungsgruppen wird

Magnevist meist zum Kontrast verwendet, wobei oft andere Konzentrationen verwendet werden. In Zürich wurde in einer Studie das optimale Verdünnungsverhältnis von Magnevist mit 1:50 ermittelt [Luboldt et al. 2000]. Eine Gadolinium-Konzentration von 10 mmol im Einlauf wirkt bei T1 gewichteten Sequenzen signalverstärkend und bei T2 gewichteten Sequenzen signalauslöschend [Luboldt et al. 1999b].

Die Kosten für das Kontrastmittel können gegebenenfalls gesenkt werden, wenn die Gadoliniumkomplexe im Einlauf teilweise oder ganz durch eisenhaltige Kontrastmittel wie Eisenglycerolphosphate ersetzt werden [Luboldt et al. 1999]. Durch Zusatz von Methylcellulose wurde versucht, die Viskosität des Einlaufs zu erhöhen. Durch Verhinderung eines Reflux über die Ileocaecalklappe kann auf diese Weise eine erhöhte Füllung des Kolons erreicht werden [Fletscher, Luboldt 2000].

Alternativ zu signalverstärkenden Kontrastmitteleinläufen können auch Einläufe mit signalauslöschenden Kontrastmitteln wie Wasser und Luft zur Dehnung des Kolon verwendet werden. In Verbindung mit intravenösem Kontrastmittel kann auf diese Weise eine Darstellung der Darmwand erfolgen [Morris et al. 2001].

Die Verwendung eines Einlaufs zur Kontrastierung erfordert die gleiche Vorbereitung durch Darmreinigung wie die Koloskopie. Ein optimaler Kontrast zwischen Darmwand und Lumen ist für die virtuelle Koloskopie besonders wichtig, da Stuhlreste Polypen vortäuschen können und verunreinigte Bereiche nicht beurteilt werden können. Im Gegensatz zur VC kann der Untersucher bei der endoskopischen Koloskopie die Stuhlreste während der Untersuchung wegspülen. Eine Möglichkeit bei der MR-Kolonographie das Lumen trotz Stuhl von der Darmwand abzugrenzen, ist das "fecal-tagging" (Stuhlmarkierung) [Weishaupt et al. 1999]. Bei einer zusätzlichen oralen Aufnahme von kontrastgebenden Substanzen (Gadolinium, Eisenhaltige Kontrastmittel) wird der Stuhl angefärbt und kann dadurch im T1-gewichteten Bild von der umgebenden Darmwand unterschieden werden. Mit dem "fecal-tagging" gewinnt die MR-Kolonographie einen entscheidenden Vorteil gegenüber der Koloskopie. Auf Darmvorbereitung mit abführenden Mitteln, die für die Patienten der unangenehmste Teil der Untersuchung ist, kann verzichtet werden.

In einer Studie konnte bei 22 von 24 teilnehmenden Patienten mittels "fecal-tagging" ohne abführende Darmvorbereitung ein ausreichender Kontrast zwischen Lumen und

Darmwand erreicht werden. Für alle Raumforderung ergab sich eine Sensitivität von 89,3% (25 von 28) [Lauenstein et al. 2002]. Die Patienten haben mit Beginn von 36 Stunden vor der Untersuchung zu vier täglichen Hauptmahlzeiten 200 ml eines hochkonzentrierten Bariumsulfathaltigen Kontrastmittels (1 mg/ml barium sulfate, Micropaque; Guerbet, Sulzbach, Germany) erhalten. Zusätzlich sollte kohlenhydrathaltige Kost und manganhaltiges Obst und Schokolade vermieden werden [Papanikolaou et al. 2000]. In einer T1 gewichteten 3D-Gradienten-Echosequenz führte der Bariumsulfathaltige Stuhl mit zusätzlich durch Einlauf gegebenem Wasser zu einer Signalauslöschung im Lumen, während die intravenöse Gabe von paramagnetischem Kontrastmittel (gadobenate dimeglumine, Multihance; Bracco, Milan, Italy) zu einer Signalverstärkung der Darmwand führte.

4.1.1.2 Sedierung

Während bei der Koloskopie die Patienten mit Propofol sediert wurden und zusätzlich bei 77% der Patienten eine Gabe von Diazepam erforderlich war, wurde bei der MRK weder eine Sedierung noch eine Analgesie gebraucht. Dies spricht für die geringe Invasivität der MRT-Untersuchung und dürfte auch die gute Akzeptanz der Untersuchung bei den Patienten erklären.

4.2 2D und 3D Visualisierung

Es wurde bereits der Vergleich zwischen der realen endoskopischen und virtuellen Koloskopie unternommen [Hara et al. 1996b], der zusätzliche Nutzen der 3D-Visualisierung ist bisher jedoch noch nicht geklärt worden. Während schon zu Beginn der Auseinandersetzung mit der virtuellen Koloskopie der zusätzliche Nutzen der 3D-Visualisierung propagiert wurde [Hara et al. 1996b], haben andere Autoren vermutet, dass eine 2D-Darstellung für ein erstes Screening ausreichend ist [Dachman et al. 1998]. Unsere Studie zeigte jedoch deutlich einen Vorteil der zusätzlichen 3D-Visualisierung gegenüber alleinigen 2D-Darstellung mittels multiplanarer Rekonstruktion. Da die multiplanare Rekonstruktion meist in die Software der MRT-Konsolen integriert ist, können ohne zusätzlichen Aufwand Schichten in der sagitalen, axialen und coronaren Ebene betrachtet werden. Das systematische Absuchen des gewundenen Kolons nach Raumforderungen ist jedoch für den Betrachter sehr anspruchsvoll. Eine 2D-Schicht weist mehrere Anschnitte des Kolons auf. Es erfordert Übung und räumliches

Vorstellungsvermögen um anhand der 2D-Schichten in der multiplanaren Rekonstruktion den Verlauf des Kolons nachzuvollziehen. Dies ist jedoch erforderlich, um das Kolon systematisch nach Raumforderungen abzusuchen. Werden in einer Schicht mehrere Anschnitte gleichzeitig beurteilt, ohne den Verlauf des Kolons nachzuvollziehen, ist die Gefahr groß, dass einzelne Abschnitte übergangen und Raumforderungen übersehen werden.

Um das Kolon in 2D-Schichten vollständig zu untersuchen, sind weit über hundert Einzelschichten zu beurteilen.

Da die erfolgreiche Befundung mittels 2D-Schichtbildern vom Untersucher ein systematisches und geübtes Vorgehen verlangt, können Spezifität und Sensitivität bei verschiedenen Untersuchern erheblich schwanken [Beaulieu et al. 1999].

Besonders schwierig ist bei der 2D-Befundung die Unterscheidung von Haustren und Raumforderungen. Die Haustren bilden im Lumen des Kolon Falten, die sich in ihrer Größe und Ausdehnung erheblich unterscheiden können. Häufig sind sie zum Lumen hin etwas verdickt. Trotz Einbeziehung von mehreren hintereinanderliegenden Schichten in verschiedenen Ebenen, lässt sich oft nicht eindeutig sagen, ob es sich nur um eine Falte oder einen in Faltennähe oder sogar auf der Falte sitzenden Polypen handelt. Auch in unserer Untersuchung wurde in der multiplanaren Rekonstruktion eine unauffällige Kolonfalte als Polyp fehlgedeutet, wie sich in der 3D-Visualisierung und der endoskopischen Koloskopie herausstellte. Unsere Untersuchung hat gezeigt, dass auch einige Artefakte in der 3D-Visualisierung deutlich einfacher als solche zu Erkennen sind und nicht mit Raumforderungen fehlgedeutet werden. Wenn Raumforderungen in ihrer vollständigen räumlichen Ausdehnung betrachtet werden, fällt die Differenzierung zwischen Polypen und Artefakten, wie Kotresten und Luftblasen deutlich einfacher aus als in Schichtbildern. Kotreste haben eine charakteristische meist längliche und breitbasige Form in Richtung des Kolonverlaufs. Bei Luftblasen kommt die Spiegelbildung und die symmetrische Form von Luftpneumothorax deutlicher zur Geltung. So wurde in dieser Studie in der multiplanaren Rekonstruktion eine Luftblase als Polyp fehlgedeutet, wie sich in der 3D-Visualisierung und der endoskopischen Koloskopie herausstellte. Insgesamt konnte die Spezifität der MRT-Untersuchung unter Einbeziehung aller Raumforderungen von 83,3% (multiplanaren Rekonstruktion) auf 94,4% (virtuellen Koloskopie) bei gleich bleibender Sensitivität verbessert werden.

4.2.1 Oberflächendarstellung

Mit der Siemens „Virtuoso®“ und dem VOXEL-MAN-Visualisierungssystem konnte eine Auswahl der wichtigsten zur Verfügung stehenden Methoden zur 3D-Visualisierung von Objekten in CT- und MRT-Datensätzen miteinander verglichen werden.

4.2.1.1 Oberflächenbasierte Visualisierung

Im Programmteil 3D-Rekonstruktion der Siemens „Virtuoso®“ lässt sich eine polygonale Objektoberfläche erzeugen. Dabei wird die Kolonoberfläche durch eine Anordnung von Dreiecken repräsentiert, nachdem Sie vorher durch Schwellwertsegmentation (siehe 2.2.4.3) bestimmt wurde. Die ursprüngliche Volumeninformation der MRT-Daten geht bei dieser Berechnung verloren. Das ist auch der Hauptnachteil dieser Methode. Nachträgliche Schwellwertänderungen, die bei der Auswertung gelegentlich nötig sind, lassen sich nur durch erneute Segmentierung realisieren. Bei kleinen Strukturen werden außerdem die linearen Flächenelemente sichtbar (Silhouetteneffekt).

Der Marching-Cube-Algorithmus [Lorenzen, Cline 1987], der höher aufgelöste Abbildungen erzeugt, ist ein Zwitter aus Volumen- und Oberflächenvisualisierung. Hierbei wird einerseits aus dem Grauwertvolumen unter Ausnutzung des Partial-Volumen-Effekts (siehe 2.2.4.4) mit Hilfe von Schwellenwerten und Interpolation die Objektgrenze im Subvoxelbereich durch Anordnen von Dreiecken approximiert. Es wird aber andererseits eine polygonale Repräsentation der Objektoberflächen erzeugt, wobei die ursprüngliche Volumeninformation verloren geht und letztendlich eine oberflächenbasierte Darstellung erfolgt. Dieses Verfahren ist den heuristischen Triangulationsansätzen weit überlegen.

4.2.1.2 Volumenbasierte Visualisierung Volume-Rendering

Im Fly-Through Modul der Siemens „Virtuoso®“ wurde ein Volume Rendering Verfahren zur Oberflächendarstellung verwendet. Die wesentliche Eigenschaft des Volume-Rendering ist die Visualisierung eines Datenvolumens ohne explizite Repräsentation der Objektoberfläche. Es wurden die gesamten im Datensatz enthaltenen Grauwertinformationen in einem Bild ohne Segmentation einer Oberfläche dargestellt. Eine Gewebeklassifikation wurde durch die Zuordnung von Helligkeit, Transparenz und Farbe auf die verschiedenen Anteile des Volumendatensatzes ermöglicht. Im Allgemeinen erzeugt das Volume-Rendering keine expliziten Oberflächen. Da ein Grauwertbereich visualisiert wird, sind die Objektoberflächen häufig verschwommen.

Attributgesteuerte Oberflächendarstellung im Subvoxelbereich

Die im VOXEL-MAN-Visualisierungssystem eingesetzte attributgesteuerte Oberflächendarstellung im Subvoxelbereich wurde in Kapitel 2.2.4.4. beschrieben. Sie ermöglicht eine photorealistische Darstellung der Oberflächen. Auch bei den vergrößerten endoskopischen Ansichten entstehen durch die Berechnung der Oberfläche im Subvoxelbereich keine Silhouetteneffekte. Bei kleineren Strukturen ist diese Visualisierungsmethode dem oben genannten Marching-Cube-Algorithmus überlegen [Tiede et al. 1990].

Bedingt durch die enormen Datenmengen, die bei der Bildberechnung vom Rechner zu verarbeiten sind, ergaben sich beim VOXEL-MAN-Visualisierungssystem Nachteile aufgrund der derzeit noch fehlenden Interaktivität in Echtzeit. Das rasante Fortschreiten der Computertechnik wird hier aber in Zukunft eine Problemlösung bieten.

4.3 Automatische Pfadbestimmung durch das Kolon

Um die Erstellung der virtuellen Koloskopie zu erleichtern wurden verschiedene Ansätze realisiert um automatisch den Pfad durch das Kolon zu ermitteln. Im VOXEL-MAN-Visualisierungssystem wurde für die Erstellung von endoskopischen Ansichten der Auto-Path-Finder [Hausig 1998] verwendet. Für die Bewegung durch das Kolon wird der vom Betrachter am weitesten entfernte Punkt der Darmwand mit Hilfe eines „Z-Buffers“ ermittelt (siehe 2.2.4.5). Mit dem Auto-Path-Finder ließen sich nur

Teilstücke im Kolon automatisch durchfahren. Die vielen Haustren im Kolon führen dazu, dass sich der Auto-Path-Finder häufig in einer Falte, wie in einer Sackgasse verläuft. Die virtuelle Kamera muss dann immer wieder korrigiert werden.

Im Fly-Through Modul der Siemens „Virtuoso®“ wird bei der Vorwärtsbewegung an den Kolonwänden ein Kraftfeld erzeugt, dass die virtuelle Kamera immer wieder in tangentialer Richtung Kolonwand gelenkt wird. Die Kolonwand ist nicht passierbar. Dieser Ansatz wird auch in [Wan et al. 2001] beschrieben.

Ein häufig verwendeter Ansatz ist Skeletierung [Zhou, Toga 1999]. Die Oberfläche des Kolon wird wie die Schalen einer Zwiebel schrittweise bis zum zentralen Pfad reduziert.

Eine andere Möglichkeit ist das Entfalten der Kolonwand und Darstellung als 2D Karte [Bartoli et al. 2001]. Ärzte sind jedoch mit dieser Darstellungsform wenig vertraut und das Entfalten führt zu geometrischen Verzerrungen, durch die eine Analyse erschwert wird.

4.4 Limitationen

4.4.1 Limitationen der MR-Kolonographie

Bei den in dieser Studie untersuchten 31 Patienten lagen Indikationen vor, die mit einem höheren Risiko für kolorektale Raumforderungen vergesellschaftet waren (siehe Tab. 2.1). Um die Eignung der Untersuchung als Screeningmethode abschätzen zu können, müssen noch Studien mit einem deutlich größeren Patientenkollektiv und durchschnittlichem Risiko für kolorektale Raumforderungen durchgeführt werden.

Sowohl für die reelle Koloskopie als auch für die MR-Kolonographie musste eine abführende Vorbereitung des Darms durchgeführt werden. Die Vorbereitung wird von den Patienten als sehr belastend wahrgenommen (siehe Kapitel 4.5). Die Einsatzfähigkeit der Untersuchung als Screeninguntersuchung wird damit eingeschränkt. Trotz Vorbereitung verbleiben häufig Stuhlverunreinigungen und Lufteingüsse, die Teile der Darmwand verdecken. An diesen Stellen ist eine Beurteilung in der multiplanaren Rekonstruktion nicht möglich und pathologische Befunde können übersehen werden. Seltener können Verunreinigungen und Luftblasen Raumforderungen vortäuschen und senken damit die Spezifität der Untersuchung. In

Zukunft könnte das "fecal-tagging" [Lauenstein et al. 2002] eine Lösung dieser Probleme darstellen, da abführende Vorbereitung des Darms entfällt (siehe Kapitel 4.1.1.1). Auch Luftblasen stellen bei Lauenstein kein Problem dar, da sie wie der kontrastierte Stuhl signalauslöschend wirken.

Schwierigkeiten bereitet manchmal eine unzureichende Darmdistension, die vor allem im Colon Sigmoideum lokalisiert ist, so dass eine Beurteilung in diesen Bereichen nicht möglich ist.

Selten kommt es bei den Einläufen, die vor der Untersuchung gegeben werden müssen, zu Dehnungsschmerzen. Eine Schmerzmedikation war jedoch bei unseren Patienten nicht erforderlich gewesen.

Ist die Bauhin-Klappe insuffizient, kann es zum Abfluss des Kontrastmittels in den Dünndarm kommen. Durch Überlagerungen des Dünndarms über das Kolon werden das Auffinden und die Beurteilung des Kolons erschwert. Der Verlauf des Kolons ist dann schwer nachvollziehbar und es kann zu Verwechslung von Dünn- und Dickdarmschlingen kommen.

4.4.2 Limitationen der virtuellen Koloskopie

Der Zeitbedarf für die Erstellung der virtuellen Koloskopie ist hoch. Sowohl beim VOXEL-MAN-Visualisierungssystem als auch bei der Siemens „Virtuoso®“ erfordert die automatische Pfaderstellung durch das Kolon viele manuelle Korrekturen. Beim „VOXEL-MAN“ erfordert das Rendern einen erheblichen Zeitaufwand.

Für die virtuelle Koloskopie muss ein Schwellwert auf der Helligkeitsskala festgelegt werden, über den die Kontrastmitteloberfläche und damit die Darmwand definiert wird. Wird ein zu hoher Schwellwert gewählt sieht man häufig Pseudoläsionen in der Darmwand. Ein zu tiefer Schwellwert erzeugt Artefakte im Lumen.

Stuhlverunreinigungen und Luft erschweren wie bei der MRK mit multiplanarer Rekonstruktion die vollständige Beurteilung der Darmwand und können Raumforderungen vortäuschen. Eine unzureichende Darmdistension vor allem im Colon Sigmoideum erschwert das Auffinden eines Pfades durch das Lumen. Das Lumen kann in wenigen Fällen streckenweise verschlossen sein, so dass ein Passieren mit der virtuellen Kamera und die Beurteilung in diesen Bereichen nicht möglich ist.

Bei einer insuffizienten Bauhin-Klappe erschwert in den Dünndarm abgeflossenes Kontrastmittel durch Überlagerungen die Analyse. Mit zusätzlichem Aufwand können die Kontrastgefüllten Dünndarmschlingen in der virtuellen Koloskopie entfernt werden.

Die noch nicht ausgereifte Software, der hohe Aufwand und der Mangel an Erfahrungen begrenzen noch den Einsatz der virtuellen Koloskopie [Rex et al. 1999, Menselson et al. 2000]. Der Zusammenhang der Sensitivität und der Erfahrung des Untersuchers, wurde an einer Lernkurve bei der CT-Kolonographie demonstriert [Spinzi et al. 2001]. In den ersten 25 Fällen wurde eine Sensitivität von 35% erreicht. Nach 75 Fällen konnte diese auf 92% gesteigert werden.

4.5 Patientenakzeptanz

Die Patientenakzeptanz ist mit entscheidend für den Erfolg eines Screening-Verfahrens für das kolorektale Karzinom [Lieberman 1995]. Befragungen von Patienten, die im Rahmen einer Studie sowohl eine Koloskopie als auch eine MR-Kolonographie erfahren haben, zeigten einen kleinen Akzeptanzvorteil der MR-Kolonographie [D'Abbraccio et al. 1999]. In einer anderen Studie zeigte sich, dass 60% der potentiellen Patienten sich für eine MR-Kolonographie entscheiden, wenn sie zwischen der MR-Kolonographie und der Koloskopie wählen dürfen [Antuaco et al. 2001]. Von großem Interesse ist allerdings, dass der für den Patienten unangenehmste Teil der Untersuchung die abführende Vorbereitung war, die sowohl bei der endoskopischen, als auch bei der MR-Kolonographie durchgeführt werden musste. Durch die neue Möglichkeit des „faecal-tagging“ [Lauenstein et al. 2002] entfällt die abführende Vorbereitung des Patienten. Mit dieser Weiterentwicklung könnte die MR-Kolonographie gegenüber der endoskopischen Koloskopie deutlich an Akzeptanz gewinnen.

4.6 CT-Kolonographie

Die bisher durchgeführten Studien zur virtuellen computertomographischen Koloskopie wurden überwiegend mit dem Spiral-CT [Rogalla et al. 2000, Pineau, Vining 1999, Fletcher et al. 2000, Dachman et al. 1998, Hopper et al. 1998, Fenlon et al. 1999, Macari et al. 1999, Yee et al. 2001, Hung et al. 1999, Morrin et al. 2001, Laghi et al. 1999] durchgeführt. Für die Erkennung von Patienten mit Polypen ≥ 10 mm lag die

Sensitivität bei den Studien zwischen 75% und 100%. Die Spezifität war bei fast allen Studien größer als 90%. [Fletscher, Lumboldt 2000]. Bisher wurden jedoch noch keine Studien an großen Patientenkollektiven mit durchschnittlichem Risiko durchgeführt.

Bei der CT-Kolonographie erfolgt die Füllung des Kolons mit Luft. Die Verwendung von Luft führt gelegentlich zu krampfartigen Schmerzen. Durch Verwendung von CO₂ anstelle von Luft können diese Nebenwirkungen gemildert werden [Stevenson et al. 1992].

Eine CT-Kolonographie ist mit einer relevanten Strahlendosis vergesellschaftet [Dixon, Dendy 1998]. Dies ist vor allem bei Patienten kritisch, die sich freiwillig einem Screening unterziehen und dementsprechend gesundheitsbewusst sind. Zusätzlich muss daher stets das theoretische Risiko eines strahleninduzierten Tumors diskutiert und abgewogen werden.

4.7 Stellenwert einer Screeninguntersuchung beim Kolonkarzinom

Das kolorektale Karzinom entsteht in 80 – 85% der Fälle aus adenomatösen Polypen [Winawer et al. 1993, Vogelstein et al. 1988, Toribara, Sleisenger 1995]. Der Zeitraum zur karzinomatösen Transformation beträgt ungefähr 10 Jahre oder mehr [Eide 1991].

Es ist nachgewiesen, dass die Mortalitätsrate beim Kolonkarzinom mit einem Screening ab dem 50. Lebensjahr von Patienten ohne Symptome und durchschnittlichem Risiko reduziert werden kann [Selby et al. 1992, Newcomb et al. 1992, Mandel et al. 1993, Hardcastle et al. 1996, Kronborg et al. 1996].

Die Prävalenz von Polypen bei Personen über 50 Jahre beträgt 30-50% und nur etwa aus 3% der Polypen entwickelt sich ein kolorektales Karzinom [Eide 1991]. Polypen unter 6 mm Größe sind lediglich in 0,1 % maligne [Waye et al. 1988], während Adenome über 10 mm Größe in 10 % der Fälle ein invasives Karzinom beherbergen [Morson 1974]. Daraus ergibt sich, dass beim Screening Polypen unter 6 mm nicht berücksichtigt werden müssen. Eine Entfernung dieser Polypen würde unnötig zum Risiko einer Darmperforation führen [Ueyema et al. 1995, Hoff et al. 1996], ohne Reduktion des Risikos ein kolorektales Karzinom zu entwickeln. Damit ist die geringere Genauigkeit der MR-Kolonographie bei Polypen bis 5 mm nicht von Bedeutung.

4.8 Kosten der virtuellen Koloskopie

Der Preis einer MR-Kolonographie ist bisher noch nicht definiert. Er wird wahrscheinlich im Bereich des Preises für ein Abdomen-MR liegen. Im Vergleich zur endoskopischen Koloskopie sind Nutzen und Kosten noch abzuwägen. Eine entsprechende Kostenrechnung basierend auf dem Markov-Modell existiert bisher nur für die virtuelle CT-Kolonographie [Sonnenberg et al. 1999]. Wird ein positiver Befund in der CT-Kolonographie gefunden, muss eine Koloskopie folgen um eventuelle Polypen zu entfernen. Die Gesamtkosten setzen sich also aus der CT-Kolonographie als Screening-Verfahren und der nachfolgenden Koloskopie zusammen. Die Anzahl der Koloskopien hängt von der Häufigkeit positiver Ergebnisse des Screening-Verfahrens ab. Sie setzen sich aus richtig positiven und falsch positiven Ergebnissen zusammen. Die Berechnungen basieren auf einer für die USA gültigen Kostengrundlage. Sonnenberg errechnet 24 586 \$ für ein gerettetes Lebensjahr für die CT-Kolonographie und 20 930 \$ für ein gerettetes Lebensjahr bei der konventionellen Koloskopie. Um Kostengleichheit beider Methoden zu erreichen, müsste die Compliance-Rate bei der virtuellen Untersuchung um 15 bis 20 Prozent besser ausfallen, oder die Kosten der virtuellen Untersuchung müssten um mindestens 54 % sinken. Da in Deutschland für die Kosten für eine ambulante Koloskopie günstiger anzusetzen sind als in den USA und die Abdomen-MR teurer ausfällt als die Abdomen-CT, müsste mit den neuen Verfahren eine deutlich höhere Compliance bei niedrigeren Kosten erreicht werden, damit die MR-Kolonographie mit der Koloskopie als Screening-Verfahren konkurrieren kann. Das Ziel des Screenings ist aber nicht nur, Kosten zu sparen, sondern auch möglichst häufig Karzinome zu verhindern. Da die Koloskopie aufgrund der schlechten Patientenakzeptanz nicht wirksam als Screening-Verfahren eingesetzt werden konnte, müssen eventuell auch etwas höhere Kosten in Kauf genommen werden, um möglichst viele Patienten vor der Entwicklung eines kolorektalen Karzinoms zu bewahren.

4.9 Weiterentwicklung der Benutzerschnittstelle

4.9.1 Sphärische QuickTime-VR Panorama Ansichten

Seid einiger Zeit besteht im „QuickTime player“ (Apple Computer, inc.) die Möglichkeit Panoramaansichten darzustellen [Apple Computer, Inc 2001]. Diese konnte in das VOXEL-MAN-Visualisierungssystem integriert werden [Tiede et al. 2002]. Die in dieser Studie erstellten „QuickTime-Filme“ (siehe 2.2.4.6) ermöglichten nur endoskopische Ansichten in eine Richtung. Es musste schon während der Filmerstellung mit der Analyse begonnen werden, da auffällige Wandstrukturen durch manuelle Kameraführungskorrektur erfasst werden mussten. Wurde das Kolon lediglich mit der vom Auto-Path-Finder vorgegebenen Kameraführung abgesucht, konnte es vorkommen, dass auffällige Befunde der Kolonwand nicht im Blickfeld waren. Die neuen Panoramaansichten im „QuickTime player“ bietet nahezu die gleichen Navigations- und Betrachtungsmöglichkeiten, wie mit einem Endoskop. Der Betrachter kann die Kamera nicht wie bisher nur vorwärts und rückwärts bewegen, sondern auch nach oben oder unten und links oder rechts schwenken. Damit sind alle Wandbereiche des Kolons einsehbar. Die neuen Panoramaansichten ermöglichen eine Trennung der zeit- und rechenaufwändigen Filmerstellung von der Befundung, die dann mit wenig Zeitaufwand an jedem handelsüblichen PC durchgeführt werden kann. So kann der „QuickTime-Film“ von nicht ärztlichem Personal erstellt und an anderer Stelle vom Radiologen befundet werden.

Die Panoramaansichten werden folgendermaßen erstellt (Abb. 4.1): von einem Betrachterstandpunkt werden sechs 3D Ansichten, die mit den Oberflächen eines Würfels korrespondieren erstellt. Der Betrachterstandpunkt liegt in der Mitte des Würfels. Von diesem aus wird eine Ansicht in Richtung des zentralen Pfades berechnet, dann wird nach rechts geschwenkt und das zweite Bild berechnet. Noch mal um 90° gedreht wird eine rückwärts gerichtete Ansicht berechnet. Mit der nächsten Drehung wird eine Linksansicht erzeugt. Für die letzten beiden Ansichten wird nach oben und nach unten geschwenkt. Diese Bilder wurden vom „QuickTime player“ mit Zusatzinformationen gespeichert, so dass sie als Panorama erkannt werden. Die Verzerrungen an den Übergängen werden vom „QuickTime player“ automatisch

korrigiert. Mit den zwei Freiheitsgraden der Maus kann durch das Panoramabild navigiert werden.

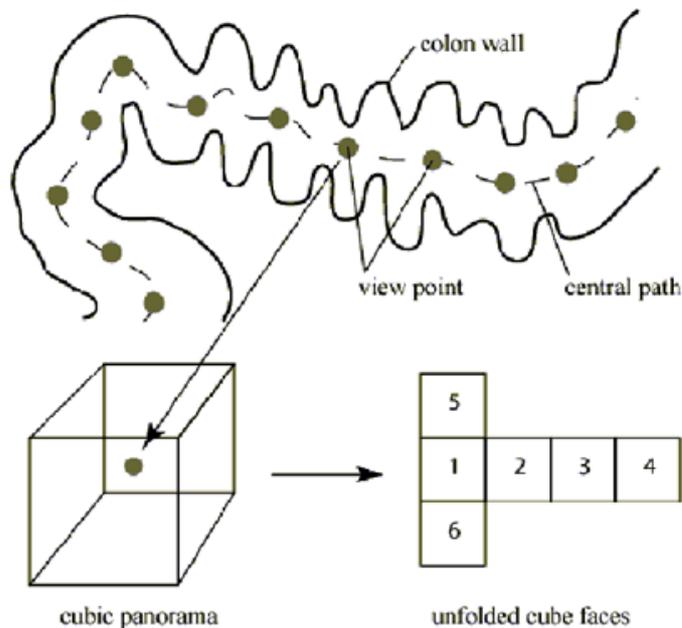


Abb. 4.1: In jeder Position werden sechs Ansichten berechnet, die Oberflächen eines Würfels repräsentieren

Um eine Film vom ganzen Kolon zu erzeugen, werden im Abstand von wenigen Millimetern entlang des zentralen Pfades neue Panoramaansichten, wie oben beschrieben, erstellt. In einem „QuickTime VR“ Film können bis zu 255 solcher Panoramaansichten erstellt werden. Diese Anzahl ist für eine virtuelle Koloskopie ausreichend.

Zusätzlich zu den Innenansichten werden Schichtbilder der coronaren, axialen und transversalen Ebene und eine 3D-Übersichtsaufnahme des Kolons mitgeführt (Abb. 4.2). Wird ein Punkt in der endoskopischen Ansicht der Kolonwand mit einem Kreuz ausgewählt, werden die entsprechenden Stellen auf den Schichtbildern und auf der 3D-Übersicht markiert. Im zusätzlich abgespeicherten z-buffer sind die Abstände vom Betrachter zur Kolonwand in den Panoramabildern vorhanden, über den die korespondierende Stellen in den Schichtbildern ermittelt werden (Abb. 4.3).

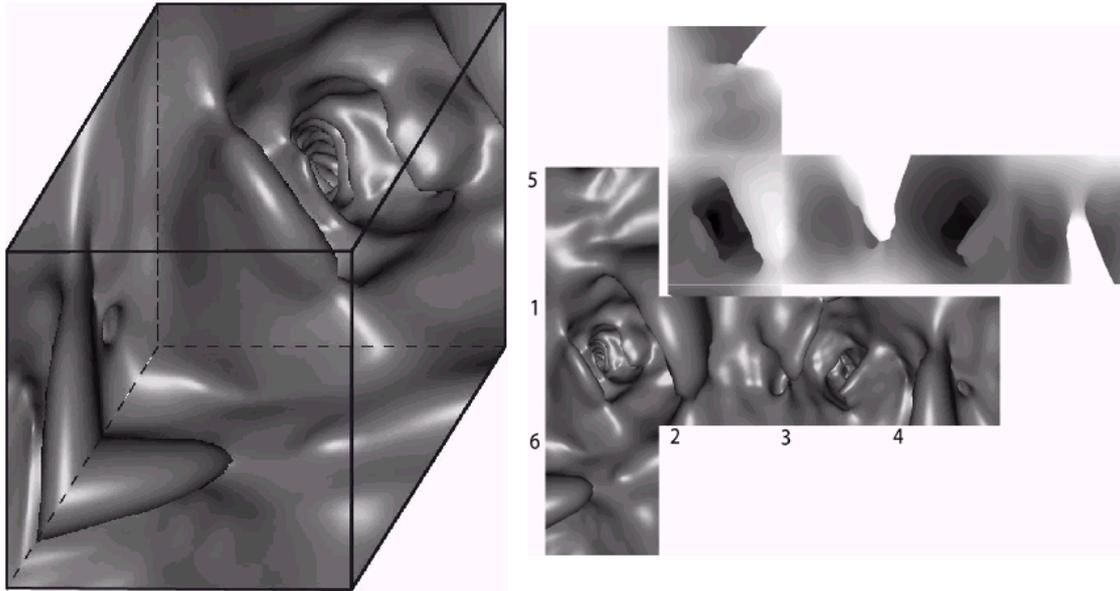


Abb. 4.2: links: würfelförmige Panoramaprojektion, rechts: Darstellung der entfalteten Würfeloberflächen und der entsprechenden z-buffer

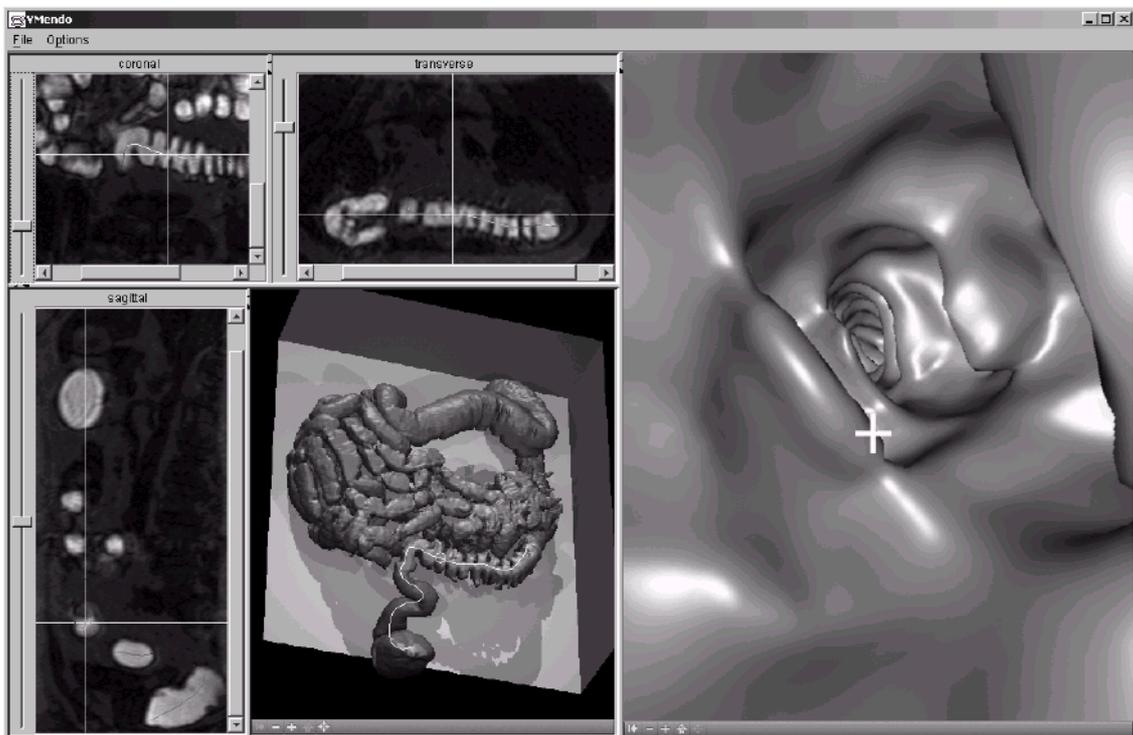


Abb. 4.3: Benutzerschnittstelle mit endoskopischer Ansicht (rechts), einem 3D-Übersichtsbild mitte) und einer coronaren, sagitalen, und transversalen Schicht. Die markierte Position in der Kolonwand (weißes Kreuz) korrespondiert mit den Markierungen in den Schichtbildern und dem Übersichtsbild.

Die „QuickTime VR“ Filme mit Panoramaansichten bieten dem Untersucher eine komfortable Benutzerschnittstelle. Er hat die Möglichkeit an jedem handelsüblichem PC innerhalb von 10 Minuten die virtuelle Koloskopie zu befunden. Der Untersucher kann in „Echtzeit“ durch das Kolon navigieren und kann in jede Raumrichtung die Kolonwand nach Auffälligkeiten absuchen. In den drei Ebenen der Schichtbilder kann er Abschnitte der Kolonwand jederzeit mit den original MRT-Daten vergleichen. Auf der 3D-Übersicht kann jederzeit die Lage der virtuellen Kamera verfolgt werden.

4.9.2 Kombination der Kolonansichten im Display

Das VOXEL-MAN-Visualisierungssystem ermöglicht eine Darstellung von verschiedenen Visualisierungsarten auf einem Monitor. Dieser entscheidende Vorteil dieses Programms könnte für die virtuelle Koloskopie genutzt werden.

Man könnte in einer Abbildung die 3D-Rekonstruktion mit Schnittbildern kombinieren, was bereits im VOXEL-MAN 3D Navigator [Höhne et al. 2000] im IMDM realisiert worden ist. So würden die Vorteile der beiden Darstellungsmöglichkeiten in einer Abbildung kombiniert. Man müsste dann nicht bei der Analyse der einzelnen Kolonabschnitte in zwei Monitorbereichen die MPR- und die 3D-Darstellung betrachten. Alle nötigen Informationen würden auf einmal in einer Abbildung vorliegen. Die folgende in einer Bildbearbeitung erstellte Abbildung soll die mögliche Darstellungskombination veranschaulichen (Abb. 4.4). Zusätzlich zu der Innenansicht aus der virtuellen Koloskopie würde die Umgebung beim Vorwärtsbewegen durch den Darm auf Schichten dargestellt und scheibenweise abgetragen. Diese Schichtbilder befinden sich immer in 90° zur Bewegungsrichtung. Auf der Abbildung wurde eine Schicht vor dem Polypen, eine Schicht in Höhe des Polypen und eine Schicht nach dem Polypen dargestellt. Darunter ist die Lage der Schichten jeweils in der Außenansicht zu sehen.



Abb. 4.4: 3D-Ansicht und Schicht kombiniert

Um kleine Befunde, die z. B. hinter Schleimhautfalten versteckt sind, nicht zu übersehen, könnte in einer Abbildung die Vorderansicht mit der Rückansicht kombiniert werden (Abb. 4.5). Auf diese Weise könnte man einen zweiten Rückwärtsdurchgang sparen. In einem in die Benutzerschnittstelle integrierten Histogramm könnte wie bei der Siemens „Virtuoso®“ der Schwellwert nachträglich korrigiert werden.

Eine automatische Ausrichtung der Innenansichten in der Horizontalen könnte die Erkennung von Luftblasen vereinfachen, weil diese sich dann immer oben befinden würden.



Abb. 4.5: Vorder- und Rückansicht kombiniert

Zusätzlich zur Untersuchung in Bauchlage ist es durchaus sinnvoll, eine Untersuchung in Rückenlage durchzuführen (siehe 4.4.1 MRT-Aufnahmetechnik). Eine Darstellung beider Untersuchungen in einer Abbildung und die gleichzeitige Betrachtung könnte einen deutlichen Zeitgewinn während der Befundung bringen (Abb. 4.6).

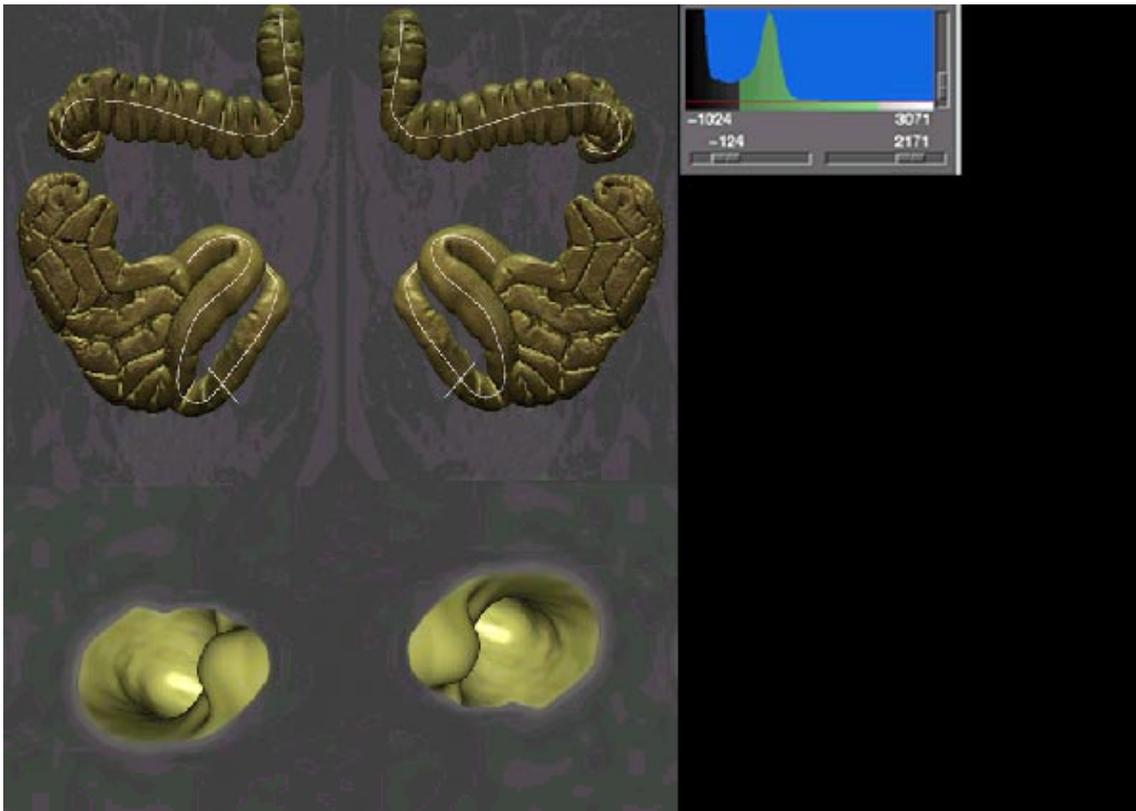


Abb. 4.6: Bauch- und Rückenlage kombiniert

4.10 Schlussfolgerung

Nutzen der 3D Visualisierung

Auf dem Boden der limitierten Patientenzahl dieser Arbeit hat sich herausgestellt, dass die alleinige Nutzung einer multiplanaren Rekonstruktion für die Befundung des Kolons nicht ausreichend erscheint. Haustren und kleine Luftblasen täuschten in der MPR Polypen vor. In der zusätzlich beurteilten 3D-Darstellung konnten diese falsch positiven Befunde leichter als solche erkannt werden. Die Spezifität der MRT-Untersuchung konnte bei Betrachtung aller Raumforderungen von 83,3% auf 94,4% verbessert werden. Die Sensitivität hat sich in dieser Studie nicht verbessert.

Eine alleinige Befundung der, in der 3D-Rekonstruktion dargestellten, Kolonoberfläche war zwar möglich, aber das Hinzuziehen der MPR-Schichtbilder erleichterte das Erkennen von Artefakten. Für eine genaue Beurteilung der Darmwand ist die Kombination von 3D-Rekonstruktion und 2D Schichtbildern am besten geeignet.

4.11 Ausblick

Aufgrund des technischen Fortschritts insbesondere in der MRT-Technologie kann wahrscheinlich in den nächsten Jahren eine noch höhere Ortsauflösung und somit bessere Trennschärfe erreicht werden. Für den möglichen Einsatz der virtuellen Koloskopie als Screeninguntersuchung muss zusätzlich eine gute Patientenakzeptanz erreicht werden. Entscheidend wird dabei die Weiterentwicklung des "fecal-tagging" sein, um auf die belastende Darmvorbereitung mit Abführmitteln zu verzichten.

Das rasante Fortschreiten der Software- und Hardwaretechnik wird eine hochaufgelöste 3D-Rekonstruktion in Echtzeit ermöglichen. Eine automatische Polypenerkennung stellt eine große Herausforderung dar. Über Analyse von Form und Gestalt der Kolonoberfläche könnten Polypen identifiziert werden. Durch nachfolgenden Einsatz von Filtern kann die Zahl der falsch positiven Befunde reduziert werden [Summers et al. 2000, Summers et al. 2001].

5 Zusammenfassung

Ziel der Studie war die Erprobung der sogenannten MR-Kolonographie als Methode zum eventuellen Polypenscreening des Kolons. Insbesondere sollte der Stellenwert der konventionellen multiplanaren Darstellung aus einem 3D Datensatz mit einer virtuell-endoskopischen Ansicht verglichen werden. Zusätzlich sollte das VOXEL-MAN-Visualisierungssystem für die virtuelle Koloskopie evaluiert werden.

Insgesamt wurden 31 Patienten vor der Koloskopie mittels MRT untersucht. Das Kolon wurde unter MRT-Sichtkontrolle mit einer Gadolinium-Wasser-Mischung gefüllt und als 3D-Datensatz atemangehalten in Bauchlage aufgenommen. Die 3D-Datensätze wurden zunächst als multiplanare Rekonstruktion (MPR) analysiert. Dann wurden die MRT-Datensätze mit verschiedenen 3D-Visualisierungsverfahren weiter verarbeitet. Dabei wurde mit der kommerzielle Software Siemens „Virtuoso®“ die Möglichkeit einer polygonaler Oberflächendarstellung und dem Volume Rendering genutzt. Mit dem im IMDM in Hamburg entwickelten VOXEL-MAN-Visualisierungssystem wurde ein neues Verfahren zur volumenbasierten Visualisierung evaluiert.

Mittels MPR konnte für Raumforderungen größer als 5 mm eine Sensitivität von 90% und eine Spezifität von 100% erreicht werden. Durch die zusätzliche 3D-Visualisierung konnte bei Raumforderungen über 5 mm keine Verbesserung der Sensitivität und Spezifität erzielt werden. Für alle Raumforderungen, d. h. unter Einschluss von Polypen < 5 mm, ergab sich eine Sensitivität von 66,7% und eine Spezifität von 83,3%. Durch Einbeziehung der 3D-Visualisierung konnte die Spezifität bei allen Raumforderungen auf 94,4% verbessert werden, die Sensitivität blieb konstant.

Auch bei kleinen Strukturen in vergrößerten endoskopischen Ansichten, lieferte die Oberflächendarstellung des VOXEL-MAN-Visualisierungssystems mit der attributgesteuerten Oberflächendarstellung im Subvoxelbereich eine hohe Bildqualität.

Somit erhöht die 3D-Visualisierung in der virtuellen Koloskopie die Genauigkeit der Befundung gegenüber der alleinigen Auswertung mittels MPR, und sollte wann immer möglich auch im Routinebetrieb durchgeführt werden.

Durch die hohe Qualität der Oberflächendarstellung und Möglichkeit einer kombinierten Darstellung endoskopischer Ansichten und Schnittbilder in einem Monitorbild eignet sich die attributgesteuerte Oberflächendarstellung im Subvoxelbereich für die Weiterentwicklung der Virtuellen Koloskopie. Bisher werden diese Möglichkeiten in kommerziellen Visualisierungssystemen noch nicht genutzt.

6 Literaturverzeichnis

- Ahlquist DA, Wieand HS, Moertel CG et al. (1993) Accuracy of fecal occult blood screening for colorectal neoplasia. A prospective study using Hemoccult and HemoQuant tests. *J Am Med Assoc* 269:1262-1267
- Antuaco TL, Banaad-Omiattek GD, Howden CW (2001) Differing attitudes toward virtual and conventional colonoscopy for colorectal cancer screening: surveys among primary care physicians and potential patients. *Am J Gastroenterology*; 96:887-893
- Apple Computer, Inc (2001) Interactive Movies: Quicktime VR, http://developer.apple.com/techpubs/quicktime/qtdevdocs/PDF/insideqt_qtvr.pdf
- Bartoli AV, Wegenkittl R, König A, Gröller E (2001) Virtual Colon Unfolding, Technical Report TR-186-2-01-08, April 2001 : Institute of Computer Graphics and Algorithms, Visualisation and Animation Group, Viena University of Technology
- Beaulieu CF, Brooke Jeffrey R, Karadi C, Paik D DS, Napel S (1999) Display Modes for CT Colonography. *Radiology* 212: 203-212
- Bowdy M (1998) Lag in colorectal screening rates prompts innovation, *JNCI* 90:886-887
- D'Abbraccio F, Luboldt W, Debatin JF, Marincek B, Fried M, Bauerfeind P. (1999) Acceptance of virtual colonoscopy. *Digestive Diseases Week*, May 1999, Orlando, USA
- Dachman AH, Kuniyoshi JK, Boyle CM, et al. (1998) Interactive CT colonography with three-dimensional problem solving for detection of colonic polyps. *AJR* 1998; 171:989-995
- Dixon AK, Dendy P. (1998) Spiral CT: how much does radiation dose matter? *Lancet* 352:1082-3.
- Eide TJ (1991) Natural history of adenomas. *World J Surg* 15:3-6
- Fenlon HM, Nunes DP, Schroy PC, Barish MA, Clarke PD, Ferrucci JT (1999) A

- comparison of virtual and conventional colonoscopy for the detection of colorectal polyps. *N Engl J Med* 341: 1496-1503
- Fletscher JG, Lumboldt W (2000) CT colonography and MR colonographie: current status, research directions and comparison. *Eur. Radiol.* 10:786-801
- Fletcher JG, Johnson CD, Welch TJ, MacCarty RL, Ahlquist DA, Reed JE, Harmsen WS, Wilson LA (2000) Optimization of CT colonography technique: a prospective trial in 180 patients. *Radiology*; 216(3): 704-11
- Foley JD, van Dam A, Feiner SK, Hughes JF (1990) *Computer Graphics : Principles and Practice, Second Edition. The System Programming Series.* Addison-Wesley Publishing Company, S. 701ff
- Hara AK, Johnson CD, Reed JE et al. (1996) Detection of colorectal polyps by computed tomographic colography: feasibility of a novel technique, *Gastroenterology* 110:284-290
- Hara AK, Johnson CD, Reed JE et al. (1996b) Colateral polyp detection with CT colography: two- versus three-dimensional techniques. *Radiology*; 200:49-54
- Hardcastle JD, Chamberlain JQ, Robinson MH et al. (1996) Randomised controlled trial of fecal-occult-blood screening for colorectal cancer. *Lancet* 348:1472-1477
- Hausig N (1998) Entwurf und Implementation eines Werkzeugs zur Generierung von Animationen durch automatische Navigation in schlauchförmigen Hohlstrukturen: Diplomarbeit Universität Hamburg, Fachbereich Informatik
- Hoff G, Sauar J, Vatn MH et al. (1996) Polypectomy of adenomas in the prevention of colorectal cancer: 10 years`follow-up of the Telemark Polyp Study I. A prospective, controlled population study. *Scand J Gastroenterol* 31: 1006-1010
- Hopper KD, Khardewal M, Thompson C, Wraver JS, Iyriboz TA (1998) CT colonoscopy : experience of 100 cases. *Radiology* 209[Suppl]:656-657
- Höhne KH, Pflesser B, Pommert A, Priesmeyer K, Riemer M, Schiemann T, Schubert R, Tiede U, Fredeking H, Gehrmann S, Noster S, Schuhmacher U (2000) *VOXEL-MAN 3D Navigator : Inner Organs* , Springer, Berlin Heidelberg New York
- Hung RK, Yee J, Resazo J, Henry C (1999) CT colonography at the San Francisco VAMC: pictorial tour. *RSNA EJ/Radiographics Archives* 1999, vol 3

Institute NC (1999) Surveillance, epidemiology, and end results (SEER).

<http://www.seer.ims.nci.nih.gov>

Kronborg O, Fenger C, Olsen J, Jorgenson OD, Sondergaard O (1996) Randomised study of screening for colorectal cancer with fecal-occult-blood test. *Lancet* 348: 1467-1471

Laghi A, Pavone P, Panebianco V, Catalano C, Baeli I, Passeriello R (1999) Spiral CT colography and volume-rendered virtual colonoscopy: an initial prospective study. *Eur Radiol*):816

Lauenstein T, Goehde S, Ruehm S, Holtmann G, Debatin J (2001) MR Colonography with Barium-based Fecal Tagging: Initial Clinical Experience. *Radiology*; 223:248-254

Lieberman DA (1995) Cost-effectiveness model for colon cancer screening. *Gastroenterology* 109: 1781±1790

Lorenzen WO, Cline HE (1987) Marching Cubes: A high resolution 3D surface construction algorithm *Comput. Graphics*, 21(4): 163-169

Lubold W, Bauerfeind P, Pelkonen P, Steiner P, Krestin GP, Debatin J (1997) 3D-MRT des Kolons: Methodik und erste Ergebnisse. *Fortschr. Röntgenstr.* 167,3:252-256

Luboldt W, Steiner P, Bauerfeindt P, Pelkonen P, Debatin JF (1998) Detection of mes lesions with MR colonography. *Radiology* 207:59-65

Luboldt W, Frohlich J, Schneider N, Weishaupt D, Landolt F, Debatin JF (1999) MR colonography: optimized enema composition. *Radiology* 212: 265±269

Luboldt W, Bauerfeind P, Wildermuth S Debatin J (1999b) Contrast optimization for assessment of the colonic wall and lumen in MR colonography. *J Magn Reson Imaging* 9:745-750

Lubold W, Bauerfeind P, Wildermuth S, Marincek B, Fried M, Debatin J (2000) Colonic Masses: Detection with MR Colonography, *Radiologie* 216:383-388

Macari M, Megibow AJ, Milano A, Berman P (1999) CT colonography detection of colorectal polyps and neoplasms in asymptomatic patients. *Eur Radiol* 9:818

Mandel JS, Bond JH, Church TR et al. (1993) Reducing mortality from colorectal cancer by screening for fecal occult blood. *Minnesota Colon Cancer Control*

- Study. *N Engl J Med* 328: 1365-1371
- Menselson RM, Foster NM, Edwards JT, Wood CJ, Rosenberg MS, Forbes GM (2000) Virtual colonoscopy compared with conventional colonoscopy: a developing technology. *Med J Aust* 173:472-475
- Morrin MM, Farrell RJ, Kruskal JB, McGee JB (1999) Prospective comparison of virtual CT colonography in patients undergoing elective colonoscopy. *Gastroenterology* 116[Suppl]: A461
- Morrin MM, Hochmann MG, Farrell RJ, Marquesuzaa H, Rosenberg S, Edelman RR (2001) MR colonography using colonic distention with air as the contrast material: work in progress. *Am J Roentgenol* 176:144-146
- Morson B (1974), The polyp-cancer sequence in the large bowel, *Proc R Soc Med* 67:451-457
- Newcomb PA, Norfleet RG, Storer BE, Surawicz TS, Marcus PM (1992) Screening sigmoidoscopy and colorectal cancer mortality. *J Natl Cancer Inst* 84:1572-1575
- Papanikolaou N, Karantanas A, Maris T, Gourtsoyiannis N. (2000) MR cholangiopancreatography before and after oral blueberry juice administration. *J Comput Assist Tomogr* 2000; 24:229-234
- Pappalardo G, Poletini E, Frattaroli FM, Casciani E, D'orta C, D'amato M, Gualdi GF (2000) Magnetic resonance colonography versus conventional colonoscopy for the detection of colonic endoluminal lesions. *Gastroenterology* 119:300-304
- Pineau BC, Vining DJ (1999) Ability of virtual colonoscopy to detect patients with colorectal polyps. *Gastroenterology* 116[Suppl]: A485
- Rogalla P, Meiri N, Ruckert JC, Hamm B (2000) Colonography using multislice CT, *Eur J Radiol.* 36(2):81-5
- Rex DK, Vining D, Kopecky KK, (1999) An initial experience with screening for colon polyps using spiral CT with and without CT colonography (virtual colonoscopy). *Gastrointest Endosc* 50:309-313
- Selby JV, Friedman GD, Quesenberry CP, Weiss NS (1992) A case-control study of screening sigmoidoscopy and mortality from colorectal cancer. *N Engl J Med* 326: 653-657
- Sonnenberg A, Delco F, Bauerfeind P. (1999) Is virtual colonoscopy a cost-effective

- option to screen for colorectal cancer? *Am J Gastroenterol* 94:2268–74.
- Spinzi G, Belloni G, Martegani A, Sangiovanni A, Del Favero C, Minoli G (2001) Computed tomographic colonography and conventional colonoscopy for colon diseases: a prospective, blindet study. *Am J Gastroenterol* 96:394-400
- Stevenson GW, Wilson JA, Wilkinson J, Norman G, Good-acre RL. (1992) Pain following colonoscopy: elimination with car-bon dioxide. *Gastrointest Endosc* 38:564–7
- Summers RM, Beulieu CF, Pusanik LM et al. (2000) Automated polyp detector for CT colonography : feasibility study. *Radiology* 216:284-290
- Summers RM, Johnson CD, Pusanik LM, Mallay JD, Youssef AM, Reed JE (2001) Automated polyp detector for CT colonography: feasibility assesment in a human population. *Radiology* 219:51-59
- Tiede U, Höhne KH, Bomans M, Pommert A, Riemer M, Wiebecke G (1990) Investigation of Medical 3D-Rendering Algorithms, *IEEE Comput. Graphics Appl.*, 10(2):41-53
- Tiede U, Schiemann T, Höhne KH (1998) High quality rendering of attributet volume data. In David Ebert, Hans Hagen, Holly Rushmeier (Eds.), *Proc. IEEE Visualization '98*, 255-262, Los Alamitos, CA, IEEE Computer Society Press
- Tiede U, von Sternberg-Gospos N, Steiner P, Höhne KH (2002) Virtual Endoscopy using spherical Quick Time-VR panorama views, James D. Westwood et al. (eds.): *Medicine meets Virtual Reality 02/10*, *Studies in Health Technology and Informatics* 85, IOS Press, Amsterdam, 2002, 523-528
- Toribara NW, Sleisenger MH (1995) Screening for colorectal cancer. *N Engl J Med* 332:861-867
- Ueyema T, Kawamoto K, Iwashita I et al. (1995) Natural history of minute sessile colonic adenomas based on radiographic findings. Is endoscopic removal of every colonic adenoma necessary? *Dis Colon Rectum* 38:268-272
- Vining DJ, Gelfand DV, Bechthold RE, Scharling ES, Grishaw EK, Schifrin RY (1994) Technical feasibility of colon imaging with helical CT and virtual reality, *Am J Roentgenol* 162:104
- Vogelstein B, Fearon ER, Hamilton SR et al. (1988) Genetic alterations during

- colorectal-tumor development. N Engl J Med 319:525-532
- Wan M., Dachille F, Kaufman A (2001) Distance-Field Based Skeletons for Virtual Navigation, Visualization 2001, San Diego, CA, October 2001, in press
- Waye JD, Lewis BS, Frankel A, Gellar SA (1988) Small colon polyps, Am j Gastroentorology 83:120-122
- Weishaupt D, Patak MA, Froehlich J, Ruehm SG, Debatin JF (1999) Faecal tagging to avoid colonic cleansing before MRI colonography, Lancet 354: 835-836
- Winawer SJ, Zauber AG, Ho MN et al (1993) Prevention of colorectal cancer by colonoscopic polypectomy. The National Polyp Study Workgroup. N Engl J Med 329:1977-1981
- Yee J, Akerkar GA, Hung RK, Steinhauer-Gebaver AM, Wall SD, McQuaid KR (2001) Colorectal neoplasia: performance characteristics of CT colonography for detection in 300 patients. Radiology 2001; 219:685-692
- Zhou Y, Toga AW (1999) Efficient Skeletonization of Volumetric Objects, IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, vol. 5 (3), 1999, pp. 196-209

7 Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Steiner für seine intensive Betreuung und Unterstützung in allen Phasen der Arbeit. Ich freue mich, dass er mir die Möglichkeit gegeben hat, dieses innovative Forschungsgebiet an der Schnittstelle zwischen Medizin und Informatik kennen zu lernen. Durch diese Arbeit entstanden maßgebliche Impulse für meinen weiteren Berufsweg.

Herrn Prof. Dr. Höhne und Herrn Dr. Tiede danke ich für die Einführung in das „VOXELMAN“-Programm und die intensive Betreuung meiner Dissertation seitens der Medizininformatik. Danken möchte ich auch allen weiteren Mitarbeitern des Institutes für Mathematik und Datenverarbeitung in der Medizin, die mir immer bei Problemen mit den Computersystemen zur Seite gestanden haben. Martin Riemer hat mich entgegenkommend von den Anfängen bis zum Druck bei der Systemadministration unterstützt.

Herrn Prof. Dr. Soehendra danke ich für die Befunde und Aufzeichnungen der in der Studie verwendeten Koloskopien.

Meinen Eltern möchte ich dafür danken, dass sie mir das Studium der Medizin ermöglicht und mich mit großem Verständnis unterstützt haben.

Schließlich bedanke ich mich bei meiner Frau Kamila für Ihr Verständnis für meine häufige Abwesenheit während dieser Zeit.

8 Lebenslauf

8.1 Persönliche Daten

Norman von Sternberg-Gospos

Packersweide 30

20539 Hamburg

Tel.: 040 / 788 333 48

geboren am 08.01.72 in Breslau

Staatsangehörigkeit deutsch

8.2 Schulausbildung

1979 bis 1980	Grundschule in Breslau
1981	Grundschule in Düsseldorf
1981 bis 1983	Grundschule in Hamburg
1983 bis 1988	St. Ansgar Gymnasium in Hamburg
1988 bis 1992	Gymnasium Neu Wulmstorf
1992	Allgemeine Hochschulreife

8.3 Studium

1992 bis 2002	Studium der Zahnmedizin und Medizin
09 / 1993	naturwissenschaftliche Vorprüfung für Zahnärzte
03 / 1995	Zahnärztliche Vorprüfung
03 / 1996	Ärztliche Vorprüfung
12 / 1998	Staatsexamen Zahnmedizin
04 / 2000	1. Staatsexamen Medizin
09 / 2001	2. Staatsexamen Medizin
10 / 2002	3. Staatsexamen Medizin

9 Erklärung

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

Norman von Sternberg Gospos

