

3.0 Experimentelle Untersuchungen

3.1 *Untersuchungsprotokoll, Untersuchung am Phantom*

Zur Überprüfung der Übertragbarkeit des unter 2.3 beschriebenen Zusammenhanges von Schichtdicke und Erkennbarkeit von Läsionen im Dün- und Dickdarm wurde zunächst eine Phantomstudie durchgeführt. Gegenstand der Untersuchung sollten verschiedene Datensätze sein, welche mit unterschiedlicher Schichtdicke in einem Spiral-CT angefertigt wurden. Das Ziel war zu definieren, mit welchem Untersuchungsprotokoll polypöse Wandveränderungen unterschiedlicher Größe unter idealisierten Bedingungen eines zum Teil geknickten Darmes mit simulierten Falten erkannt werden.

Material und Methode

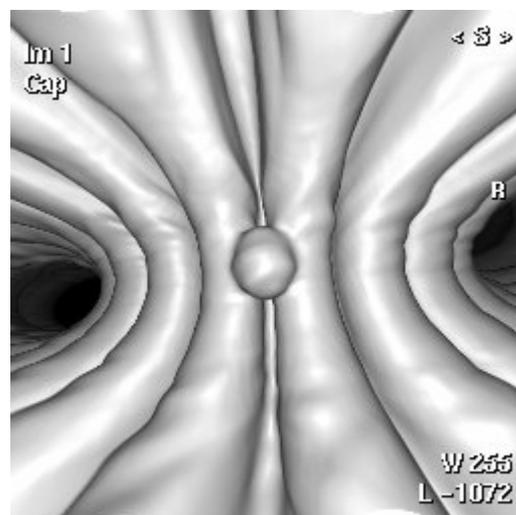
Ein 115 cm langer Polyethylenschlauch mit 3,5 cm Durchmesser diente zur Simulation eines distendierten Darms. Der Schlauch wurde mehrfach um die Längsachse gedreht und zum Teil scharf geknickt, so dass relative Stenosen des Lumens von 50% entstanden. Zusätzlich wurde der Schlauch zu einem Knäuel zusammengebunden. Die simulierten Falten des Schlauches hatten eine Dicke und einen Abstand von 7 mm. Insgesamt neun rundliche, polypöse Läsionen aus Kaugummi wurden in definierte Positionen innerhalb des Phantoms platziert. Die Größen waren: 3 x 1 mm, 2 x 2 mm, 2 x 3 mm und 2 x 4 mm. Anschließend wurde das Phantom mit einem Spiral-CT-Scanner (Tomoscan AVEU, Philips Medizinsysteme) in vier verschiedenen Protokollen untersucht, wobei drei Schichtdicken (7, 3 und 1.5 mm) und bei 3 mm Schichtdicke zwei Rekonstruktionsintervalle (2 und 1 mm) zur Anwendung kamen. Der Tischvorschub betrug bei 7 mm Schichtdicke 7 mm/s, bei 3 mm 5 mm/s und bei 1.5 mm 3 mm/s. Alle im Weichteilfilter rekonstruierten Bilder wurden auf eine Workstation (EasyVision, Philips Medizinsysteme) übertragen. Nach manueller Definition eines Pfades durch das gesamte Phantom wurden mit einem Abstand von jeweils einem Zentimeter virtuell-endoskopische Bilder mittels Volumenrekonstruktions-Technik bei einem Blickwinkel von 120° rekonstruiert und als feststehende Bilder in DICOM-Format gespeichert. Zwei Befunder sollten im Anschluss die Anzahl der Läsionen und deren Lokalisation anhand der Länge des Pfades im Phantom bestimmen, wobei die Befunder die freie Wahl der Bilder hatten, sich vor und zurück bewegen und auch Vergrößerungen herstellen konnten. Perspektive, Licht- und Schatteneffekte waren nicht veränderbar. Die vier Sitzungen für jeweils eine Phantomuntersu-

chung lagen drei Tage auseinander, und die Orientierung im Phantom wurde durch eine unterschiedliche Ausrichtung der Bilder und gering variierende Ausgangsvergrößerung zusätzlich erschwert, um Wiedererkennungseffekte weitestgehend zu reduzieren.

Ergebnisse

Mit dem Untersuchungsprotokoll 7/7/4 (Schichtdicke/Tischvorschub/Rekonstruktionsintervall) konnten nur die beiden 4 mm großen Läsionen erkannt werden, alle anderen Läsionen blieben unentdeckt. Bei 3 mm Schichtdicke und 5 mm Tischvorschub wurden mit 2 mm Rekonstruktionsintervall sowohl die 4 mm Läsionen als auch eine zusätzliche 3 mm und eine falsch positive Läsion gesehen, mit 1 mm Rekonstruktionsintervall erschienen die Bilder etwas schärfer in den Konturen, und eine zusätzliche 3 mm Läsion und keine falsch Positiven wurden detektiert. Jeweils eine 2 mm und eine 1 mm Läsion wurden mit 1.5 mm Schichtdicke zusätzlich zu den größeren Läsionen erkannt und an richtiger Position bestimmt. Abbildung 19 zeigt ein Beispiel einer 2 mm polypösen Läsion, aufgenommen mit 1.5 mm Schichtdicke. Der Polyp lag genau im kurzen Radius einer Knickbildung zwischen zwei simulierten Falten.

Abbildung 19



2 mm Polyp in einem Dünndarmphantom. Der Polyp wurde nur bei 1.5 mm Schichtdicke erkannt, bei 3 und 7 mm Schichtdicke war die Läsion nicht sichtbar.

3.2 *Untersuchungsprotokoll, Untersuchung an Datensätzen*

Die in der Phantomstudie gewonnenen Erkenntnisse sollten in einem zweiten Schritt an realen Patientendaten mit histologisch gesicherten Läsionen überprüft werden. Da allein aus Strahlenschutzgründen Patienten nicht experimentell mehrfach untersucht werden können, musste sich die Auswertung auf einmalig mit der dünnsten und klinisch vertretbaren Schichtdicke aufgenommene Datensätze beziehen, welche mehrfach mit unterschiedlicher Schichtdicke rekonstruiert wurden [35]. Ziel der Untersuchung war festzustellen, welchen Einfluss unter realen Bedingungen die Auswahl der Schichtdicke auf die Erkennbarkeit von kolorektalen Polypen hat. Daraus sollten Schlussfolgerungen auf die Protokollführung für die unter 4.4 beschriebene klinische Studie gewonnen werden.

Material und Methode

Als Datenbasis für die Untersuchung dienten 23 Datensätze von Patienten, bei denen entweder durch eine Koloskopie (n=11) oder durch Operation (n=12) die Sicherung der Polypen erfolgt war. Alle Datensätze wurden an einem Mehrschicht-Spiral-CT (Toshiba Aquilion 4) mit gleichzeitiger Aufnahme von 4 Zeilen gewonnen. Die Patienten hatten ein Alter von 42-69 Jahren (Mittelwert: 54,3 Jahre). Die Patienten wurden wie folgt vorbereitet: Am Vortag des Untersuchungstages durfte ein leichtes Mittagessen eingenommen werden, wenn möglich ohne Ballaststoffe. Im Anschluss sollten die Patienten 45 ml einer Phosphosoda-Lösung (Fleet®) zusammen mit 30 ml Peritrast trinken. Das Abendessen musste ausfallen, statt dessen sollten die Patienten erneut 45 ml der Phosphosoda-Lösung und 30 ml Peritrast (300 mg Jod/ml) trinken. Die Untersuchung im CT erfolgte dann am folgenden Morgen zwischen 8:00 und 9:00 Uhr. Alle Patienten erhielten nach Ausschluss von Kontraindikationen 20 mg Butylscopolamin (Buscopan®) intravenös 1-3 Minuten vor der eigentlichen Spiral-Aufnahme. Die rektale Füllung erfolgte mittels Kohlendioxyd aus einer Gasflasche. Zwischen dem Patientenschlauch, welcher mit der rektal eingeführten Sonde verbunden war, und dem Flaschenventil befand sich zunächst ein Druckbegrenzer, um einen versehentlichen Überdruck auszuschließen. Zusätzlich hatte der Patientenschlauch ein seitliches Loch mit einem 1 cm großen Plastik-Plateau, so dass mit dem Daumen ein Handventil entstand und zu jedem Zeitpunkt manuell das Gasvolumen und der Druck kontrolliert werden konnte. Die Füllung erfolgte zunächst vor der Anfertigung der digitalen Übersicht in Rückenlage der Patienten. Anschließend wurde anhand der Übersicht die Spiral-Untersuchung geplant. Alle Patienten erhielten eine intrave-

nöse Kontrastmittelgabe von 120 ml Ultravist 300 (Schering AG, Berlin) mit einem Fluss von 2,5 ml/s. Das CT wurde in der portalvenösen Perfusionsphase nach 60 Sekunden durchgeführt.

Die Schichtdicke als primäre Kollimation betrug 1 mm, der Pitch-Faktor lag bei 5,5:4, so dass das gesamte Abdomen in einem Atemstillstand von 25-30 Sekunden untersucht werden konnte. Durch eine Untersuchungsrichtung von kranial nach kaudal wirken sich Atembewegungen für den Fall, dass der Patient nicht über die gesamte Zeit die Luft anhalten konnte, im Becken kaum auf die Bildqualität aus. Die Aufnahmen wurden alle mit 75 mAs und 120 kV durchgeführt. Zur Generierung verschiedener Datensätze mit unterschiedlichen Schichtdicken wurden die Rohdaten in 1 mm, 2 mm, 3 mm und 5 mm Dicke rekonstruiert. Eine 50%ige Überlappung der Schichten sollte sicherstellen, dass das Rekonstruktionsintervall kein limitierender Faktor für die Erkennung von Details werden kann. Die 23 Datensätze enthielten insgesamt 51 gesicherte kolorektale Polypen. Drei Karzinome bei drei Patienten wurden nicht in die Auswertung einbezogen. Die chirurgischen Darmresektionen wurden bei drei Patienten wegen des Karzinoms, bei neun Patienten wegen einer chronischen Sigmadivertikulitis im freien Intervall elektiv durchgeführt; diese Patienten hatten jedoch zuvor eine vollständige Koloskopie, ein Befund lag jeweils vor.

Alle 92 Datensätze wurden über eine Netzwerkverbindung auf eine Workstation (EasyVision, Philips Medizinsysteme) überspielt. Zwei Radiologen mit drei Monaten bzw. vier Jahren Erfahrung sollten die Datensätze zusammen im Konsensus beurteilen, Dazu wurden zunächst die axialen Schichten zur Verfügung gestellt, woraus sich die Befunder beliebige multiplanare Rekonstruktionen erstellen konnten. Danach sollten die Befunder nach dem Vorgehen der o.g. Untersuchung zur Pfadfindung im Kolon einen Start- und Endpunkt im Darm festlegen, der Startpunkt sollte sich 1 cm lumenseits entfernt vom tiefsten Punkt im Zäkum befinden, der Endpunkt 1 cm proximal des eingeführten Darmrohres. Die Klassifikation von Luft erfolgte bei -650 HE, dieser Wert hatte sich aus der Praxis als sehr stabil für eine durchgehende Pfadrekonstruktion empirisch ergeben. Nach Berechnung des Pfades sollten die Befunder zwei Filme erstellen lassen (antegrade und retrograde Flugrichtung) mit virtuell-endoskopischen Bildern bei einer Matrix von 512x512 Bildpunkten und einer Schrittweite von 3 Millimetern. Betrachtet werden sollten die axialen Bilder sowie beide Filme, Messungen von Polypengrößen durften nur bei einer binären Fenstereinstellung von -400/0 HE erfolgen. Die Polypen wurden in drei Größengruppen eingeteilt: 3-5 mm, 6-9 mm und größer 10 mm. Die Befundung erfolgte an zwei Tagen mit einer Woche Abstand, die Datensätze wurden gemischt vor-

gelegt, am ersten Tag die Datensätze mit 2 und 5 mm Schichtdicke, am zweiten Tag die Datensätze mit 1 und 3 mm Schichtdicke. Berechnet wurden die Sensitivitäten und Spezifitäten für jede Gruppe und jede Schichtdicke.

Ergebnisse

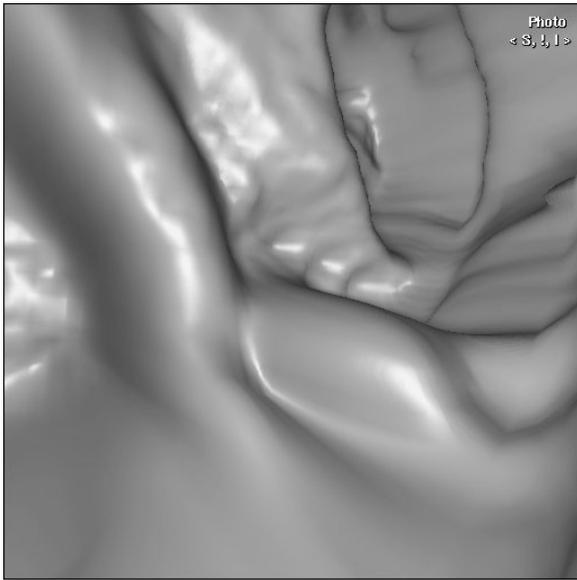
Für alle Polypen konnte eine globale Sensitivität in 92 Datensätzen von 94% erreicht werden. Diese Zahl enthält jedoch eine Gruppenbildung (Cluster-Fehler), da die Grundgesamtheit nicht aus 92 unabhängigen Datensätzen, sondern nur aus 23 Datensätzen besteht. Alle Polypen in der Gruppe >10 mm (n=8) wurden unabhängig von der Schichtdicke erkannt, ein 13 mm großer Stuhlrest wurde bei allen Schichtdicken fälschlich als Polyp interpretiert. In der Gruppe von 6-9 mm großen Polypen wurde bei 1, 2 und 3 mm Schichtdicke ein Polyp zwischen zwei Falten übersehen, bei 5 mm Schichtdicke wurden 3 Polypen übersehen. In der Gruppe 3-5 mm wurde bei 1 mm Schichtdicke nur ein Polyp nicht erkannt, hingegen bei 5 mm Schichtdicke konnten 7 Polypen nicht dargestellt werden. Die Wahl von 1 mm Schichtdicke hatte keinen Einfluss auf die Spezifität, 4 falsch positive Polypen in der Gruppe 3-5 mm, 2 in der Gruppe 6-9 mm, und 1 in der Gruppe >10 mm wurden befundet. Mit 5 mm Schichtdicke gab es keine falsch positiven Befunde. Tabelle 1 zeigt die Sensitivitäten und Spezifitäten für die drei Größengruppen in Abhängigkeit von der rekonstruierten Schichtdicke. Abbildung 20 zeigt ein Beispiel einer virtuell-endoskopischen Rekonstruktion aus den verschiedenen Datensätzen eines Patienten mit einem kleinen, 3 mm großen Polypen, welcher später im OP-Präparat gefunden werden konnte (OP wegen eines Kolonkarzinoms am Kolon sigmoideum). Der Polyp wurde mit den Schichtdicken 1, 2 und 3 mm erkannt, im Datensatz mit 5 mm Schichtdicke übersehen.

Tabelle 1

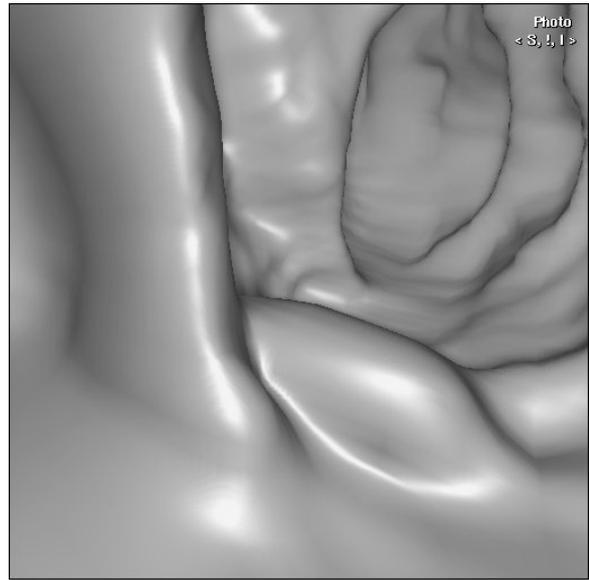
Sensitivitäten und Spezifitäten bei 51 Polypen in 23 Patienten. Globale Sensitivität: 94%

Sensitivität						Spezifität					
	1 mm	2 mm	3 mm	5 mm	n		1 mm	2 mm	3 mm	5 mm	n
3-5 mm	96%	93%	85%	74%	27	3-5 mm	87%	86%	92%	100%	27
6-9 mm	94%	94%	94%	81%	16	6-9 mm	88%	88%	94%	87%	16
>10 mm	100%	100%	100%	100%	8	>10 mm	89%	89%	89%	89%	8
Alle	96%	94%	90%	80%	51	Alle	88%	87%	92%	93%	51

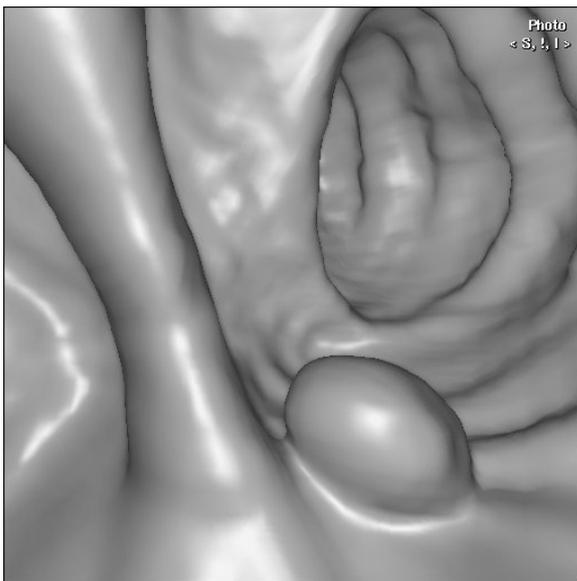
Abbildung 20



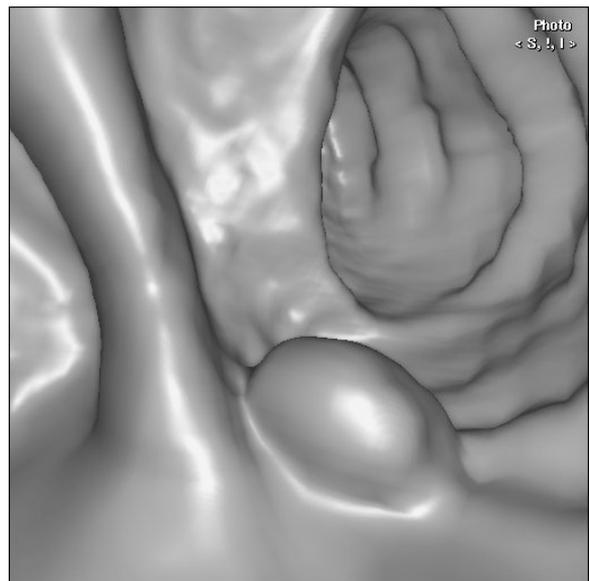
a



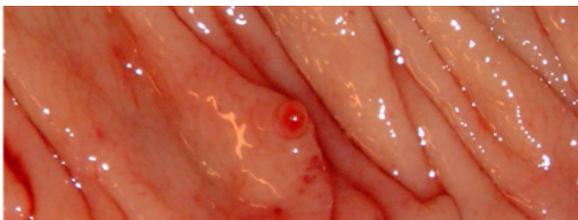
b



c



d



e

Darstellung eines 3 mm großen Polypen auf virtuell-endoskopischen Rekonstruktionen, berechnet von axialen Schnittbildern mit 5 mm Schichtdicke (a), 3 mm (b), 2 mm (c) und 1 mm (d). Korrelierender Polyp im OP-Präparat (e) nach Resektion wegen eines Karzinoms in distaler Lokalisation.

3.3 *Pfad-Findung*

Ziel der folgenden Untersuchung sollte sein, neben einer Evaluierung des unter 2.3 beschriebenen Pfad-Findungsalgorithmus dessen Effekte auf die Zeit eines Radiologen zu bestimmen, welche zur Erstellung einer Diagnose in der virtuellen Endoskopie des Dickdarmes nach Luftinsufflation zur Distension des Lumens erforderlich ist.

Material und Methode

Datensätze von 29 Patientenuntersuchungen (identische Vorbereitung der Patienten wie unter 3.2 beschrieben) wurden nach Anonymisierung auf eine programmierbare Unix-Workstation (UltraSparc 60, Doppelprozessor, 768 GigaByte RAM) übertragen. Die teilautomatisierte Pfaddefinition durch Festlegung eines Start- und Endpunktes wurde durch einen trainierten technischen Entwickler ohne weitergehende anatomische Kenntnisse durchgeführt. Die folgenden Definitionen wurden vorgenommen (MTA = medizinisch-technische Assistenz):

- Personalzeit = Zeitbedarf des Experten (Arztes) + Zeitbedarf der MTA
- Durchsatzzeit = Zeit zwischen Ankunft aller Bilder auf der Workstation bis zum Erreichen einer endgültigen Diagnose

Während der manuellen Navigation schreitet der Arzt systematisch durch den Dickdarm und bestimmt jedes Mal den nächsten zu rekonstruierenden Blickwinkel. Multiplanare Darstellungen in beliebiger Orientierung stehen jederzeit an der aktuellen Position innerhalb des Darmes zur Verfügung. In diesem Falle ist die Personalzeit identisch mit der Experten-Zeit und der Durchsatzzeit. Die automatisierte Prozedur wurde in drei Teile zerlegt:

- Definition des Start- und Endpunktes und Kontrolle des berechneten Pfades durch die MTA,
- „offline“ Kalkulation der virtuell-endoskopischen Bilder entlang des Pfades (Rechnerzeit)
- Betrachtung des fertigen Filmes (Expertenzeit-Zeit)

Daraus ergaben sich folgende Zeit-Definitionen:

- MTA-Zeit = Zeit zur Inspektion und Festlegung des Start- und Endpunktes + Zeit zur Überwachung der Pfadfindung am Computer
- Rechenzeit = Summe aus Pfadfindung, Zentrierung und Bildrekonstruktion
- Tracking = reiner Zeitbedarf des Rechners zur Erstellung des Pfades
- Zentrierung = „offline“-Berechnung der Zentrallinie
- Movie = Berechnung der virtuell-endoskopischen Bilder in zwei Richtungen mit 200x200 Bildmatrix, 90° Perspektive, 2% Tiefenkodierung (depth-encoding)
- Expertenzeit = Zeitbedarf des Arztes zur Betrachtung beider Movies ohne Erstellung von Schnapp-Schüssen zur späteren Dokumentation
- Obstruktionen = Anzahl der Stopps des Algorithmus, so dass eine manuelle Interaktion zur Fortsetzung des Pfades notwendig ist

Die virtuell-endoskopischen Bilder wurden sowohl mit ante- als auch retrograder Blickrichtung berechnet mit 300 Bildern pro Pfad. Alle Zeiten wurden für die 29 Datensätze getrennt bestimmt und statistisch mit den Zeiten bei der manuellen Navigation verglichen (paired T-Test)

Ergebnisse

Die Zeit zur manuellen Navigation betrug durchschnittlich 25:09 Minuten: Sekunden und wurde als Referenz zu 100% gesetzt. Die MTA benötigte zur Bestimmung des Start- und Endpunktes sowie zur Kontrolle des Pfades im Durchschnitt 5:56 Minuten: Sekunden, was in Relation zur Referenz 23,6% entspricht. Der Experte benötigte zum Durchmustern der vorbereiteten endoluminalen Bilder (Movies) im Durchschnitt 8:32 Minuten: Sekunden, entsprechend 34,0% der Referenz-Zeit. Die Personal-Zeit betrug demnach im Mittel 14:28 Minuten: Sekunden, entsprechend 57,6%, die Rechen-Zeit im Mittel 20:03 Minuten: Sekunden, entsprechend 79,8%, und die Durchsatzzeit betrug durchschnittlich 34:32 Minuten: Sekunden, entsprechend 137,3% der Referenz-Zeit. Die Experten-Zeit und die Personal-Zeit waren signifikant kürzer als die Experten-Zeit bei der manuellen Navigation ($p < 0,001$). Im Durchschnitt hat der Pfadfindungs-Algorithmus 1,1 Obstruktionen gefunden, welche eine Interaktion der MTA erforderte. Die längste Zeit mit 47:47 Minuten: Sekunden hat eine manuelle Navigation

durch einen Darm erfordert, welcher zahlreiche Windungen und ein elongiertes Kolon sigmoideum aufwies. Dabei ist es zweimal versehentlich zu einem Rückwärtslaufen gekommen, weil die Orientierung durch eng gestellte Falten im Sigma-Kolon verloren ging. Nach der semi-automatischen Pfaddefinition war die Betrachtung der virtuell-endoskopischen Bilder mit 12:40 Minuten:Sekunden zeitaufwendiger als im Durchschnitt, aber problemlos möglich. Eine Obstruktion wurde nicht detektiert. Dieser Fall zeigt, dass besonders bei anatomisch komplexen Lumina die Zeitersparnis durch „offline“-Kalkulation des Pfades groß ist. Die Tabelle 2 zeigt eine Übersicht der Messdaten für alle Patienten, Tabelle 3 eine Zusammenfassung der deskriptiven statistischen Auswertung.

Tabelle 2

Synopsis aller Messwerte von 29 Datensätzen

Manuelle Zeit	Durchsatz-Zeit	Experten-Zeit	Personal-Zeit	MTA-Zeit	Inspektion	Pfad-Kontrolle	Rechen-Zeit	Pfadfindung	Zentrierung	Movie	Obstruktionen
27,05	54,70	28,28	36,03	7,75	0,78	6,97	18,67	4,98	2,47	11,22	2,00
13,78	52,48	7,82	16,15	8,33	1,95	6,38	36,33	4,52	2,57	29,25	2,00
17,82	59,82	14,73	20,71	5,98	2,17	3,82	39,10	4,45	2,28	32,37	0,00
34,05	38,92	9,95	14,50	4,55	0,68	3,87	24,42	4,43	1,75	18,23	0,00
40,76	28,52	6,92	13,59	6,67	1,22	5,45	14,93	2,33	1,12	11,48	2,00
12,75	39,23	4,55	19,30	14,75	0,90	13,85	19,93	3,68	1,78	14,47	4,00
26,58	22,03	3,27	7,09	3,82	0,68	3,13	14,95	2,78	1,67	10,50	3,00
35,68	32,98	4,83	9,93	5,10	2,05	3,05	23,05	4,08	2,52	16,45	3,00
35,35	19,63	3,92	7,14	3,22	1,97	1,25	12,50	1,82	0,80	9,88	0,00
17,90	34,45	8,72	12,32	3,60	1,02	2,58	22,13	3,37	1,43	17,33	1,00
40,66	32,68	5,33	8,76	3,43	0,37	3,07	23,92	4,55	2,42	16,95	0,00
21,93	23,52	4,72	7,25	2,53	0,30	2,23	16,27	2,13	0,83	13,30	1,00
29,25	36,48	7,87	13,42	5,55	1,32	4,23	23,07	2,03	0,93	20,10	2,00
11,82	51,42	16,02	26,84	10,82	6,87	3,95	24,58	4,97	1,78	17,83	1,00
19,05	22,15	3,43	6,68	3,25	1,75	1,50	15,47	1,97	0,90	12,60	0,00
13,65	65,23	7,23	28,13	20,90	0,92	19,98	37,10	8,43	4,52	24,15	0,00
35,95	35,22	9,07	19,72	10,65	3,18	7,47	15,50	3,08	1,28	11,13	2,00
27,62	32,50	9,08	12,65	3,57	0,62	2,95	19,85	2,80	1,47	15,58	2,00
24,56	58,92	25,50	34,78	9,28	1,80	7,48	24,13	4,13	2,28	17,72	2,00
26,07	29,98	7,15	10,80	3,65	0,58	3,07	19,18	3,25	1,57	14,37	0,00
24,57	35,12	4,20	11,18	6,98	1,28	5,70	23,93	5,08	2,25	16,60	2,00
20,20	22,12	3,73	6,36	2,63	0,68	2,05	15,75	2,53	0,88	12,33	1,00
24,88	15,37	3,47	6,62	3,15	0,55	2,60	8,75	0,88	0,28	7,58	0,00
19,19	25,82	5,40	10,22	4,82	2,97	1,85	15,60	2,20	0,93	12,47	0,00
47,79	28,35	12,68	16,95	4,27	3,07	1,20	11,40	1,77	0,83	8,80	0,00
11,77	35,95	16,47	19,40	2,93	0,82	2,12	16,55	2,48	1,05	13,02	0,00
19,65	24,58	6,38	10,10	3,72	1,02	2,70	14,48	2,23	1,08	11,17	0,00
7,95	23,73	3,20	6,18	2,98	0,38	2,60	17,55	3,38	1,97	12,20	1,00
41,15	19,65	3,67	7,00	3,33	1,45	1,88	12,65	1,90	1,07	9,68	2,00

Tabelle 3

Synopsis der statistischen Auswertung der einzelnen Zeitmessungen

	Mittelwert	SD	SEM	Min.	Max.	Normalvert.
Manuelle Zeit	35,15	10,4	1,9	07,95	47,79	ja
Durchsatz-Zeit	34,54	13,4	2,5	15,37	65,23	ja
Experten-Zeit	08,54	06,3	1,2	03,20	28,28	ja
Personal-Zeit	14,48	08,3	1,5	06,18	36,03	ja
MTA-Zeit	05,94	04,1	0,8	02,53	20,90	ja
Inspektion	01,49	01,3	0,2	00,30	06,87	ja
Pfad-Kontrolle	04,48	04,0	0,7	01,20	19,98	ja
Rechen-Zeit	20,06	07,4	1,4	08,75	39,10	ja
Pfadfindung	03,32	01,5	0,3	00,88	08,43	ja
Zentrierung	01,61	00,8	0,2	00,28	04,52	ja
Movie-Erstellung	15,13	05,7	1,1	07,58	32,37	ja
Obstruktionen	01,14	-	-	0	4	

3.4 Hybridtechnik

Alternativ zu der Darstellung des Darmlumens mittels virtuell-endoskopischer Rekonstruktionen und der dafür erforderlichen Navigationshilfe sollte in der folgenden Untersuchung herausgefunden werden, welche Detektionsrate mit der unter 2.4 dargestellten Hybridtechnik an klinischen Datensätzen mit endoskopisch oder histologisch gesicherten Polypen erreichbar ist und welcher Zeitaufwand mit der Erstellung und Interpretation der Hybridbilder einhergeht.

Material und Methode

Bei klinischen Untersuchungen von 103 Patienten (Toshiba Aquilion 4, Toshiba Medical Systems, Nasu, Japan) im Alter zwischen 39 und 71 Jahren (1 mm Schichtdicke, 0.6 mm Rekonstruktionsintervall, 75 mAs, 120 kV, Prämedikation mit Buscopan, intravenöse Kontrastierung mit 120 ml Ultravist 370; identisches Protokoll zur Untersuchung zur Bestimmung der optimalen Schichtdicke) wurden Hybridrekonstruktionen auf einer EasyVision-Workstation (Philips Medizinsysteme) in axialer und koronaler Orientierung angefertigt und zur Befundung zwei Radiologen zusätzlich zu axialen Schichten und endoluminalen Rekonstruktionen jeweils alleine und zu axialen Schichten in Zusammenschau mit endoluminalen Rekonstruktionen vorgelegt. Die erforderliche Zeit zur Erstellung der Rekonstruktionen (endolumi-

nal, Hybriddarstellungen axial und koronal), sowie die Befundungszeiten und Detektionsraten von Polypen wurden registriert.

Ergebnisse

Zur Berechnung der endoluminalen Bilder durch den gesamten Dickdarm waren im Durchschnitt 31:00 Minuten erforderlich (22:00-39:00), für die Hybriddarstellungen durchschnittlich 6:24 Minuten (6:02-6:46). Zum Erstellen und Durchmustern aller endoluminalen Blicke zusammen mit den axialen Originalschichten benötigten beide Radiologen durchschnittlich 34:20 Minuten (26:00-43:30), für die Hybriddarstellungen 10:51 Minuten (6:30-15:30). Von insgesamt 32 endoskopisch und chirurgisch gesicherten Polypen wurden maximal 28 Polypen gefunden, wobei kein Unterschied bestand zwischen der Betrachtung der endoluminalen Bilder alleine, einer kombinierten Betrachtung aus axialen Schichten und endoluminalen Rekonstruktionen sowie der Betrachtung der Hybrid-Rekonstruktionen. Nur die Interpretation der axialen Schichten alleine resultierte in einer geringeren Detektionsrate von 26 Polypen. Ursache waren zwei 4 mm große Polypen, welche beide genau am Rand zweier Falten lagen und auch retrospektiv nur in Kenntnis der Lokalisation sichtbar waren. Die Detektionsraten nach Größe aufgeschlüsselt und in Sensitivitäten umgerechnet sind in der Tabelle 4 zusammengestellt.

Tabelle 4

Detektionsrate für Polypen mit unterschiedlichen Darstellungsverfahren

	axial	endo	ax+end	hybrid	n		axial	endo	ax+end	hybrid	n
3-5 mm	7	9	9	9	12	3-5 mm	58%	75%	75%	75%	12
6-9 mm	13	13	13	13	14	6-9 mm	93%	93%	93%	93%	14
>10 mm	6	6	6	6	6	>10 mm	100%	100%	100%	100%	6
Alle	26	28	28	28	32	Alle	81%	88%	88%	88%	32

3.5 *Diskussion*

Untersuchungsprotokoll

In der Phantomstudie an einem simulierten Darm mit polypösen Läsionen konnte ein theoretisch vermuteter Zusammenhang zwischen Schichtdicke und erkennbarer Läsion bestätigt werden. Das Phantom hat sich als ausreichend für die Überprüfung der Erkennbarkeit polypöser Läsionen herausgestellt, weil die Länge des Schlauches einem Dickdarm sehr ähnlich ist und das Faltenrelief der Struktur zum Beispiel im Kolon sigmoideum ähnelt. Nachteilig sind hingegen fehlende Flüssigkeitsspiegel, welche in einem echten Darm die Erkennbarkeit reduzieren können, sowie fehlende höhergradige Stenosen oder Faltenabbrüche. Aufgrund der Regelmäßigkeit der Schlauchfalten war die Erkennbarkeit von Strukturstörungen erleichtert. Zusätzlich fehlten Wandunregelmäßigkeiten oder Stuhlreste, welche bei einem Patienten die Unterscheidung von wahrer Pathologie und falschpositiven Befunden erschwert. Im Phantom war es auch nicht möglich oder sinnvoll, Spezifitäten zu berechnen, da wegen der Gleichmäßigkeit und Übersichtlichkeit keine falsch positiven Befunde erhoben wurden. Dennoch konnte aus dem Phantomversuch die Schlussfolgerung gezogen werden, dass für die Anwendung der virtuellen Endoskopie am Patienten eine möglichst dünne Schichtdicke gewählt werden muss, soll die Detektion von kleinen Polypen möglich sein. Eine genauere Aussage über die minimale Größe detektierbarer Polypen konnte aufgrund der geringen Anzahl der Polypen im Phantom und wegen der idealisierten Bedingungen nicht getroffen werden. Für eine Patientenuntersuchung muss jedoch gewährleistet sein, dass die gesamte Datenakquisition innerhalb eines Atemstillstandes möglich ist, weil sonst bei Unterteilung der Aufnahme in zwei Akquisitionen die Gefahr besteht, dass an der Nahtstelle ein nicht-abgebildeter Bereich übrig bleibt, verbunden mit dem Risiko, einen relevanten Befund an dieser Stelle zu übersehen. Eine großzügige Überlappung könnte dieses Risiko minimieren, der Nachteil zweier getrennter Akquisitionen, welche eine durchgehende Navigation durch den Darm nicht erlauben, bliebe dennoch bestehen.

Im Spiral-CT legt der Untersucher bei der Planung fest, mit welcher Schichtdicke die Akquisition erfolgen soll und bestimmt damit auch die Schichtdicke der Rekonstruktion. Eine nachträgliche Änderung der Rekonstruktionsschichtdicke ist nicht mehr möglich, von einer Addition mehrerer Schichten auf einer Workstation abgesehen. In der Mehrschicht-Spiral-CT ist es dagegen möglich, bei der Datenakquisition eine sehr dünne Schicht zu wählen, mit der eine

durchgehende Schichtung während eines Atemstillstandes gerade noch möglich und klinisch vertretbar erscheint. Aus diesen Rohdaten lassen sich nun mehrere Datensätze rekonstruieren mit unterschiedlicher „Rekonstruktions“-Schichtdicke. Dünner als die primäre Schichtdicke kann die „Rekonstruktions“-Schichtdicke auch im Mehrschicht-Spiral-CT nicht werden, jedoch dicker; typischerweise erlauben die gängigen Algorithmen eine bis zu achtfache „Rekonstruktions“-Schichtdicke in Relation zur primären Schichtdicke.

Um die Abhängigkeit der Detektionsrate von der gewählten Schichtdicke am Patienten zu untersuchen, lag es daher nahe, ein Protokoll mit 1 mm Schichtdicke im Mehrschicht-Spiral-CT zu wählen und die Datensätze mit unterschiedlicher Schichtdicke zu rekonstruieren. Der Vorteil eines solchen Vorgehens liegt insbesondere auch in der intraindividuellen Vergleichbarkeit der Datensätze und der Elimination anderer, patientenabhängiger Faktoren. Aus den gewonnenen Daten der Auswertung wird deutlich, dass die Sensitivität zur Detektion von Polypen mit abnehmender Schichtdicke zunimmt, die Spezifität jedoch abnimmt, da der Anteil falsch positiver Befunde steigt. Analog zu anderen Experimenten mit Digitalisierung eines analogen Signals mittels einer räumlichen Frequenz [36] kann als Grundlage in Anlehnung an das Nyquist-Theorem gelten, dass die kleinste detektierbare, relevante morphologische Veränderung an einer Oberfläche in etwa der primären Schichtdicke bei überlappender Schichtrekonstruktion entspricht. Für die virtuell-endoskopischen Rekonstruktionen bedeutet dies, dass bei einer Schichtdicke von 5 mm ein 3 mm großer Darmpolyp nicht sicher erkannt werden kann und klinisch eine Schichtdicke von 1 mm erforderlich ist, wenn die z-Achsen-Auflösung kein limitierender Faktor für die Polypendetektion sein soll.

Zusammen mit der Phantomuntersuchung kann als Schlussfolgerung für die Auswahl eines optimierten Untersuchungsprotokolls festgehalten werden, dass für Patientenuntersuchungen die dünnst-mögliche Schichtdicke gewählt werden sollte, wenn das Ziel die Erkennung auch kleinerer Polypen ist. Dieses Ergebnis steht in Einklang mit einer Untersuchung von Taylor [37]; die Autoren fanden heraus, dass in einem OP-Präparat mit 117 Polypen unterschiedlicher Größe die Wahl der primären Schichtdicke den entscheidenden Einfluss auf die Detektionsrate der Polypen hat. Dass auch die Wahl des Pitch-Faktors in der Studie eine Rolle spielte, ist dem verwendeten Rekonstruktions-Algorithmus anzuschuldigen und kann nicht als generelle Aussage zum Effekt eines schnelleren Tischvorschubs gelten. Auch Laghi [38] fand in einem Phantomversuch mit 27 simulierten Polypen heraus, dass ein Untersuchungsprotokoll mit 1 mm Schichtdicke die höchste Detektionsrate und der Pitch-Faktor keinen nennens-

werten Einfluss hat. Eine hohe räumliche Auflösung bringt allerdings eine reduzierte Spezifität mit sich, da der Anteil falsch positiver Befunde steigt. Die wesentliche Ursache liegt in der fehlerhaften Deutung von im Darm verbliebenen Stuhlresten, welche insbesondere bei einer Größe von 3-5 mm von vitalem Gewebe nicht immer unterscheidbar sind. Als Folge einer dünn-schichtigen Untersuchung enthalten die axialen Schichtbilder – wenn die Strahlendosis für die Gesamtuntersuchung nicht erhöht wird – mehr Bildrauschen mit einem Zusammenhang von $1:\sqrt{2}$. Eine Halbierung der Schichtdicke bedeutet einen Anstieg des Bildrauschens um den Faktor Quadratwurzel aus 2. Die Konsequenz eines erhöhten Bildrauschens und der Möglichkeit der Anwendung glättender Rekonstruktionsfilter wurde in 2.3 bereits dargelegt.

Darstellungshilfen

Besonders die Betrachtung von Bilddaten mit dünner Schichtführung erfordert Erfahrung und Konzentration des Untersuchers, da typischerweise mehr als 500 Bilder durchzumustern sind. Eine manuelle Navigation durch den Darm ist mühsam und erfordert einen zusätzlichen Zeitaufwand. Sowohl Macari als auch Hoppe konnten zeigen [34,39], dass die Betrachtung der axialen Originalschichten weiterhin als Referenz zu betrachten ist, dennoch scheint der Stellenwert der endoluminalen Betrachtung oder alternativer Visualisierungstechniken zu steigen: in der Studie von Pickardt [40] wurde die konventionelle Befundungsreihenfolge – zuerst axial, dann dreidimensional – umgedreht. Die axialen Schichten dienten als „Problemlöser“, während die primäre Befundung an drei-dimensionalen Rekonstruktionen stattfand.

Soll eine drei-dimensionale Darstellung oder Navigation durch den Darm zügig und ohne unnötige Zeitverzögerung erfolgen, ist eine Definition des Darmlumens mittels eines Pfades erforderlich. Auch Workstations der neuesten Generation mit Navigation in nahezu Echtzeit berechnen zunächst einen Pfad durch den Darm. Die Auswertung der vorliegenden Untersuchung zur Pfaddefinition an Patienten-Datensätzen hat gezeigt, dass durch den Einsatz einer semi-automatischen Pfadberechnung mit „offline“-Berechnung virtuell-endoskopischer Bilder die Zeit, welche der Radiologe mit der Diagnosefindung einer Dickdarmuntersuchung beschäftigt ist, deutlich reduziert werden kann, wobei sowohl die Zeiten für die Computerkalkulation durch schnellere Hardware als auch die Zeiten des Personals durch Lernkurven relativ verkürzt werden können. Dieser Effekt entsteht sowohl durch Verlagerung von Aufgaben auf medizinisch-technisches Personal (MTA) als auch durch den Einsatz der Rechenleistung

außerhalb der Befundungs-Zeit. Da für die meisten Rekonstruktionsverfahren (siehe 2.4) wie Kolondissektion, aufgeklappter Würfel oder Tissue-Transition-Projection eine Pfaddefinition entweder Bestandteil oder von erheblichem Vorteil ist, erscheint eine Weiterentwicklung der Pfadfindung in Hinsicht auf eine vollständig automatisierte Prozedur von großem Interesse. Da die Experten-Zeit gleichzeitig auch die teuerste Zeit ist, lässt sich durch die Verlagerung von Tätigkeiten auf Computer und technisches Personal eine Kosteneinsparung für die Durchführung einer virtuellen Endoskopie des Dickdarmes ableiten.

Unabhängig von einer Pfaddefinition durch den Darm ist die Darstellung in Hybridtechnik. Die eigene Untersuchung an automatisch rekonstruierten Datensätzen hat gezeigt, dass die Hybriddarstellung in Bezug auf die Detektionsrate einer kombinierten Betrachtung endoluminaler Rekonstruktionen und axialer Schnittbilder (Originalschichten) nicht unterlegen ist. Mit beiden Verfahren konnte eine Detektionsrate von 88% erreicht werden. Da die Herstellung von Hybriddarstellungen keine Bildinterpretation erfordert – im Gegensatz zur semi-automatischen Berechnung eines Pfades durch den Dickdarm – kann diese Aufgabe entweder von technischem Personal, oder auch vollständig automatisch an einem Rechner erfolgen, womit sich die tatsächlich absorbierte Zeit des Radiologen auf unter 5 Minuten pro Fall reduzieren lässt. Die Bilddarstellung einer axialen Schicht erfolgt in der Regel mit einer Bildpunkte-Matrix von 512x152 Punkten. In diese Matrix fügt sich auch die dreidimensionale Bildinformation ein, so dass für die Darstellung kleiner morphologischer Details nur wenige Bildpunkte zur Verfügung stehen. Bei Betrachtung der Hybriddarstellungen ohne Vergrößerung kann der Befunder auch in den dreidimensionalen Anteilen keine einzelnen Bildpunkte abgrenzen. Wird jedoch ein Darmanteil stark vergrößert, so erfolgt nicht automatisch eine neue Interpolation, sondern nur eine optische Vergrößerung mit der Folge, dass einzelne Bildpunkte als Würfel oder Quader sichtbar werden und den glatten Bildeindruck stören. Als Ausweg kann eine primäre Bildrekonstruktion mit einer Matrix von 1024x1024 Punkten erfolgen. Die Konsequenz davon sind Bilder von vierfacher Größe mit entsprechendem Speicherplatzbedarf, was sich beim Laden der Bilder über Netzwerk und beim interaktiven Betrachten auf einigen Workstations negativ bemerkbar macht.

Die Anwendung der Hybridtechnik steht in Konkurrenz zu der Alternative einer automatischen Pfadberechnung durch den Dickdarm mit anschließender Betrachtung der beiden Filme aus endoluminalen Rekonstruktionen. Je nach Verfügbarkeit ermöglichen beide Techniken, die Befundungs-Zeit für eine virtuelle Endoskopie des Dickdarmes zu reduzieren durch Ver-

lagerung von automatisierbaren Prozessen auf entweder einen Computer-Algorithmus oder auf technisches Personal. Es ist anzunehmen, dass beide Verfahren von der technischen Weiterentwicklung der Computer-Hardware profitieren werden und auch in Zukunft alternativ für den Nutzer zur Auswahl zur Verfügung stehen.