

5.0 Diskussion

Der Begriff „virtuelle Endoskopie“ suggeriert, dass eine Endoskopie als Blick in ein Hohlorgan mittels eines optischen Betrachtungsgerätes nicht tatsächlich, sondern nur scheinbar erfolgt. So sehr diese Terminologie, zuerst in den Sprachgebrauch durch die Untersuchungen von Vining et al. 1994 eingeführt [10,11], bei flüchtiger Betrachtung der rekonstruierten Bilder im Vergleich zur realen Endoskopie auch zutrifft, modern klingt und in den Trend der aktuellen Computertechnologie passt, so sehr impliziert sie ein fundamentales Missverständnis des zugrunde liegenden Prinzips: durch endoluminale, dreidimensionale Rekonstruktion aus aneinandergesetzten Schnittbildern lässt sich zwar ein täuschend echter Bildeindruck erzielen, das eigentliche Substrat der bildlichen Darstellung ist jedoch grundverschieden. In der wahren, realen Endoskopie erfolgt eine optische Betrachtung der das eingestrahlte Licht reflektierenden Oberfläche. Das optisch durch Lichtleiter oder auch Linsensysteme sichtbare Bild stellt ein für das Auge wahres Abbild der Realität dar, so als könnte die endoluminale Oberfläche ohne Hilfsmittel mit bloßem Auge betrachtet werden. Technische Variationen, zum Beispiel die Anwendung von ultraviolettem Licht nach endogener (über einen intravenösen Zugang applizierter) oder exogener (über des Endoskop applizierter) Färbung, haben zu einer verbesserten Detektion gesuchter Pathologien geführt: die Chromoskopie hat mittlerweile einen klinisch akzeptierten Stellenwert [118-120]. Endoluminale Darstellungen hingegen nehmen eine Grenzschicht verschiedener Gewebe als Grundlage, wobei sich die Grenzschicht aus einer bestimmten physikalischen Eigenschaft ergibt. Im Falle der Computertomographie des Darmes definiert die unterschiedliche Radiodensität von Luft (oder Kohlendioxid) und Weichteilgewebe die Grenze. Zwischen optischer Sichtbarkeit und physikalischer Grenzschicht im CT besteht kein zwingender Zusammenhang, so dass die virtuell rekonstruierte Oberfläche einer endoluminalen Ansicht nur bedingt die tatsächliche, optisch abbildbare Oberfläche widerspiegelt.

In klinischem Zusammenhang bedeutet dies: die scheinbare Oberfläche einer „virtuellen Endoskopie“ kann nicht als virtueller Ersatz der wahren Oberfläche betrachtet werden, sondern kommt der wahren Oberfläche nur sehr nahe. Hinzu kommt, dass die Darstellung im CT keineswegs „virtuell“ ist. Tatsächlich im Raum bestehende Dichteunterschiede werden geometriegetreu abgebildet und nach Rechenvorschrift bearbeitet. Die in einer endoluminalen Darstellung erkennbare „Oberfläche“ repräsentiert verzerrungsfrei die „Realität“, auch wenn die physikalische Grundlage von einer optischen Betrachtung verschieden ist.

Dieser Tatsache trägt eine veränderte Terminologie Rechnung [121]: CT-Kolographie, CT-Koloskopie, CT-Kolonographie oder CT-Kolonoskopie beschreiben anschaulich, dass der Darm mittels CT untersucht und graphisch, ohne festgelegten Bezug auf eine Darstellungsart, dargestellt oder betrachtet wird. Damit bleibt auch offen, welche Darstellungsart sich im klinischen Einsatz bewährt und vernünftig erscheint; noch immer ist strittig, ob nicht die Betrachtung der ursprünglich aufgenommenen Schnittbilder einer nachverarbeiteten, dreidimensionalen Darstellung vorzuziehen ist [40].

Auch für die virtuelle Endoskopie des Tracheobronchialbaumes erscheint die Bezeichnung CT-Bronchographie/-skopie treffend und sinnvoll. Gleiches gilt für die Anwendung an weiteren Organen: CT-Intestinoskopie, CT-Aortoskopie, CT-Zystoskopie und weitere mehr. Gegen die genannte, inhaltlich präzise Namensgebung spricht die im Allgemeinen attraktive Verwendung des Wortes „virtuell“ und damit verbundene Assoziation von „virtuellen Realitäten“. Ursache für eine rasante Entwicklung und den zunehmenden klinischen Einsatz der CT-Koloskopie ist nicht zuletzt die Attraktivität der Methode in der laienhaften Öffentlichkeit, die zum großen Teil auf der Faszination der „virtuellen Realität“ beruht. Solange nicht erforderliche rechtfertigende Indikationen zur Anwendung medizinischer Diagnostik umgangen werden, erscheint eine für die Öffentlichkeit attraktive Namensgebung „virtuelle Endoskopie“ legitim und wird auch in Zukunft Bestand haben.

5.1 *CT-Endoskopie der Nase und Nasennebenhöhlen*

Die virtuelle Endoskopie der Nase und Nasennebenhöhlen stellt eine der zahlreichen neuen Anwendungen dieser Technik dar [122]. Die NNH sind prädestiniert für eine virtuelle Endoskopie, da sie Luft als natürliches Kontrastmittel enthalten und im CT zuverlässig abzubilden sind. Die meisten Anteile der NNH sind heute einer endoskopischen Betrachtung zugänglich, und die FESS hat in den letzten Jahren weiterhin an Bedeutung gewonnen. Die eigene Untersuchung an 45 Patienten hat gezeigt, dass virtuell-endoskopische Bilder allein zur Diagnostik der Nase und NNH nicht ausreichen. Insbesondere die für den endoskopischen Zugang notwendigen Informationen wie Septumdeviation oder weitere ossäre Normvarianten lassen sich in der angewendeten Technik der virtuellen Endoskopie ohne Transparenz der Mukosa nicht ausreichend oder gar nicht beurteilen. Der Ansatz, mit einer Nachverarbeitung eine klinische Modalität wie die Endoskopie zu simulieren, erscheint fraglich, da eine der Indikationen zur Computertomographie gerade das Defizit der Endoskopie darstellt: die fehlende Sicht „hinter

die Kulissen“. Die Probleme der virtuellen Endoskopie in Bezug auf Größenabschätzung, perspektivische Verzerrung, Orientierungsschwierigkeit etc. sollen durch die Anwendung eines Schnittbildverfahrens überwunden werden. In dieser Hinsicht entstehen Zweifel am Sinn, ein etabliertes, klinisches Verfahren mit seinen Limitationen imitieren zu wollen. Auf der anderen Seite stößt die computertomographische Darstellung zahlreicher dünn-schichtiger Schnittbilder auf das Problem der begrenzten Fähigkeit des Menschen zur dreidimensionalen Vorstellung. Je nach Übung sind Radiologen und HNO-Ärzte bedingt in der Lage, axiale oder koronale Bilder im Kopf so zusammensetzen, dass eine der Endoskopie vergleichbare dreidimensionale Vorstellung entsteht. Die praktische Erfahrung mit virtuell-endoskopischen Rekonstruktionen hat gezeigt, dass in vielen Fällen die Betrachtung nur weniger 3D-Rekonstruktionen trotz vorangegangenen Studiums der axialen oder koronalen Schichten zu einem „Aha-Erlebnis“ wird, weil die Zusammenhänge und anatomischen Relationen klarer verständlich werden. Die Frage nach der Rolle virtuell-endoskopischer Darstellungen in Zukunft kann wie folgt beantwortet werden:

Diagnostischer Stellenwert. Bei einfachen diagnostischen Fragestellungen muss der Wert der zusätzlich angefertigten virtuellen Bilder als nur bedingt nützlich interpretiert werden, nicht nur weil die Erstellung der Bilder Zeit und damit indirekt auch Geld kostet, sondern auch weil gezeigt werden konnte, dass der diagnostische Gewinn im Vergleich zu der Aussage von koronalen oder axialen Schichten nicht offensichtlich ist. Gerade häufige und klinisch wichtige Fragestellungen nach Normvarianten lassen sich auf den endoluminalen Rekonstruktionen schwer oder gar nicht beurteilen. Halbtransparente Rekonstruktionen wären notwendig, um auch unter der Mukosa liegende Knochen darstellen zu können. Im Falle einer vollständigen Okklusion einer NNH fehlt Kontrast gebende Luft, und eine virtuelle Rekonstruktion ist gänzlich unmöglich. Dennoch, wenn virtuell-endoskopische Bilder nahezu automatisch oder mit nur minimaler Intervention durch eine MTA oder Radiologen erstellt werden und dann ohne zusätzlichen Zeit-Aufwand vorliegen, wird der klinisch-diagnostische Stellenwert steigen; denn mit wenigen aussagekräftigen Bildern kann ein Befund schnell und in seiner dreidimensionalen Ausdehnung erkannt werden. Eine sehr viel versprechende Technik ist die Hybriddarstellung, da sie beinahe vollautomatisch erfolgen kann und die Vorteile der Schnittbild-darstellung und der 3D-Darstellung miteinander teilweise kombiniert.

Stellenwert als Lehrmittel. Eine zweite Funktion erfüllt die virtuelle Endoskopie als Lern- und Lehrmittel, sowohl für Radiologen als auch für HNO-Ärzte [123,124]. Noch ist es auf aktuell

verfügbaren Rechnern nicht möglich, interaktiv die virtuellen Rekonstruktionen zu manipulieren, zum Beispiel Polypen zu entfernen oder ganze Operationstechniken virtuell durchzuführen und eine vollständige Simulation des späteren Operations Situs zu erreichen. Mit steigender Rechenleistung und Weiterentwicklung virtueller Operationsinstrumente werden virtuelle Rekonstruktionstechniken einen Stellenwert in der Ausbildung erhalten, initiale Ansätze dazu sind schon als FESS-Trainings-Simulatoren beschrieben [125,126]. Erste Experimente mit präoperativer Markierung basierend auf virtuell-endoskopischen Rekonstruktionen wurden bereits durchgeführt und haben viel versprechende Ergebnisse hervorgebracht [127].

Bild gesteuerte Chirurgie. Intraoperative Steuerung endoskopischer Eingriffe anhand zuvor erstellter Rekonstruktionen erreicht erst Praktikabilität, wenn Hochgeschwindigkeitsrechner mit interaktiver Manipulation und Erstellung virtuell-endoskopischer Rekonstruktionen angepasst an den augenblicklichen Situs verfügbar sind [46]. Dazu ist Voraussetzung, dass die verwendeten chirurgischen Instrumente (Skalpell, Drainagen etc.) simuliert auf der virtuellen Rekonstruktion in Echtzeit in der aktuellen Position sichtbar sind und eingepasst werden in das Koordinatensystem der virtuellen Rekonstruktion. Erste Experimente wurden 1996 durchgeführt und in der klinischen Anwendung [128] geprüft. Die räumliche Auflösung mit einer Genauigkeit von 1-2 mm ist heute durch Anwendung von Mehrschicht-Spiral-CTs und hochauflösenden 3D-Sequenzen in der MRT möglich [127,129,130]. Dennoch können substantielle Diskrepanzen zwischen präoperativer Bildgebung und OP-Situs auftreten, bedingt durch die übliche Gabe anti-inflammatorischer Agenzien intraoperativ zur Abschwellung der Mukosa für eine verbesserte Sicht in den Situs. Eine abschwellende Medikation wird jedoch nicht für die Bildgebung präoperativ angewendet, obwohl auch für die Berechnung einer virtuellen Endoskopie ein größeres Lumen von Vorteil sein kann und die Navigation erleichtern würde. Initiale Ergebnisse einer interaktiven Echtzeit-Navigation intraoperativ wurden bereits präsentiert [131] und zeigen die Richtung der Entwicklung einer computer-aided surgery (CAS) auf.

Informationskompression, klinische Kommunikation. Die vierte Funktion virtuell-endoskopischer Bilder liegt in der eigentlichen Darstellung selbst: ein einzelner Blick kann einen Befund in seiner Lage und Form sowie der anatomischen Relation eindrucksvoller und klarer dokumentieren als die Betrachtung zahlreicher axialer oder koronaler Schichten. In dieser Hinsicht fungiert die virtuelle Endoskopie weniger als diagnostisches Mittel denn als Werkzeug zur Daten- oder Informationskompression und –Extraktion, welches die Kommunikation zwi-

schen Radiologen und HNO-Ärzten erleichtert. Eine Verbesserung der klinischen Versorgung kann daraus resultieren.

5.2 *CT-Intestinoskopie*

Die Pilotstudie hat ergeben, dass virtuelle Endoskopien des Dünndarms basierend auf computertomographischen Bilddaten nach Füllung des Lumens mit radiodichtem Kontrastmittel technisch möglich sind und vor allem die Beurteilbarkeit der axialen Originalschichten durch die Kontrastierung nicht beeinträchtigt ist. Die vollständige Füllung des Dünndarms – eine Bedingung für eine vollständige virtuelle Endoskopie – kann zuverlässig nur nach duodenaler Intubation mittels Sonde und Instillation des Kontrastmittels über die Sonde erfolgen. Die natürliche dreifache Peristaltik des Dünndarms verhindert bei oraler Verabreichung des Kontrastmittels eine durchgehende Füllung des Lumens. Ob eine durchgehende Füllung tatsächlich zur Erkennung relevanter Pathologien erforderlich ist, kann auch mit Hilfe der Literatur nicht beantwortet werden. Beispiele sind jedoch nicht selten, bei denen endoluminale Befunde nicht erkennbar gewesen wären, wäre das Lumen nicht hinreichend gefüllt und distendiert. Insofern sind der klinische Aufwand einer Sondeneinlage und die damit verbundene Unannehmlichkeit für den Patienten dann zu rechtfertigen, wenn ein diagnostischer Gewinn aus der Füllung resultiert. Allein die virtuelle Endoskopie kann nicht als Rechtfertigung betrachtet werden. Neben der Füllung des Dünndarms mit radiodichtem Kontrastmittel hat sich die Verwendung von reiner Methylzellulose als Füllmedium ebenfalls bewährt [132,133]. Diese „negative“ Kontrastierung ermöglicht, nach Gabe von intravenösem Kontrastmittel die Perfusion der Mukosa zu beurteilen. Bei Hyperperfusion zusammen mit morphologischen Veränderungen kann auf eine entzündliche Aktivität zum Beispiel bei M. Crohn-Erkrankung geschlossen werden. Nachteilig ist, dass der Kontrast zwischen intravenös kontrastierter Mukosa und Darmlumen nicht ausreicht, um eine zuverlässige Klassifikation und Darstellung der Oberfläche zu gewährleisten.

Wurde der Dünndarm zur Beantwortung der klinischen Fragestellung durchgehend mit Kontrastmittel gefüllt, gelten für die Anwendung der virtuellen Endoskopie ähnliche Betrachtungen wie für die Anwendung der Technik an den Nasennebenhöhlen. Da die Rekonstruktionen auf den vorhandenen axialen Schichten aufbauen, kann es methodisch bedingt nicht vorkommen, dass neue, auf den axialen Schichten nicht sichtbare Pathologien ausschließlich auf den Rekonstruktionen erkennbar sind. Hingegen sind Befunde im Darmlumen unter Umständen

eindrucksvoller und überzeugender darstellbar als auf mehreren multiplanaren Reformatierungen. Der zusätzliche Zeitaufwand für den Befunder, einen durchgehenden Pfad durch den Dünndarm mit 5-7 Metern durchschnittlicher Länge zu definieren, erscheint kaum gerechtfertigt. In Anlehnung an die eigene Untersuchung zur Effizienzverbesserung durch Einsatz eines Pfadfindungs-Algorithmus für den Dickdarm erscheint es vorstellbar, dass bei automatischer Verfügbarkeit einer virtuellen Endoskopie ohne nennenswerte Interaktion des Befunders die klinische Bedeutung für den Dünndarm steigt. Zurzeit sind virtuelle Rekonstruktionen nur zur selektiven Dokumentation eines auf den axialen Schichten entdeckten Befundes in klinischem Kontext vertretbar.

Die schon beschriebenen alternativen Darstellungsverfahren TTP und Hybriddarstellung zeichnen sich auch für den Dünndarm dadurch aus, dass für ihre Erstellung keine manuelle Interaktion und keine „Vorab-Interpretation“ der Bilder erforderlich sind. Nach entsprechender Klassifikation des Dünndarm-Inhalts sind beide Rekonstruktionstechniken automatisch anwendbar. Eine farbliche Unterscheidung zwischen Darmwand und axialem Schichtbild erleichtert die Interpretation, die Orientierung im Abdomen bleibt durch die axiale Darstellung erhalten. Wie unter 3.4 ausgeführt, lässt sich sowohl die obere als auch die untere „Hälfte“ der endoluminalen Rekonstruktion auf die axiale Schicht projizieren. Die TTP-Darstellung beruht auf einer Interpolation ersten Grades, die räumliche Auflösung ist gering reduziert. Die Rekonstruktionen imitieren den Bildeindruck einer konventionellen Dünndarmuntersuchung in Doppelkontrast-Technik, liegen mit ihrer Auflösung allerdings eine Zehnerpotenz unter der Auflösung eines konventionellen Sellinks. Die Bilder wirken weich und abgerundet und haben ihren Stellenwert vor allem in der Darstellung der groben Anatomie des Dünndarms und dessen Verteilung im Abdomen.

Zusammenfassend kann der Stellenwert der virtuellen Endoskopie des Dünndarms als additive Visualisierungstechnik beschrieben werden. Die verbesserte Diagnostik des Dünndarms beruht im Wesentlichen auf der für den Dünndarm optimierten Füllungs-Technik. Automatisierte Berechnungen der virtuellen Endoskopie entlang eines Pfades oder höher auflösende Darstellungstechniken haben das Potenzial, den Stellenwert von dreidimensionalen Rekonstruktionen zu erhöhen. Konkurrenz ist dem Verfahren durch die Einführung der Kapselendoskopie entstanden, welche vor allem das für den Patienten unangenehme Schlauchschlucken umgeht. Erste Vergleichsuntersuchungen wurden bereits durchgeführt und zeigen eine Überlegenheit der Kapselendoskopie bei subtilen Befunden der Mukosa [134].

5.3 CT-Bronchoskopie

Die Bronchoskopie als eigenständige Untersuchungstechnik existiert seit mehr als 100 Jahren. Im Jahre 1897 hat Gustav Kilian zum ersten Mal die Untersuchung der unteren Trachea und der Hauptbronchien mittels eines starren Laryngoskops vorgestellt [135]. Seit dieser Zeit wurde die Technik der Bronchoskopie stetig verbessert, so dass heute die Durchführung einer Bronchoskopie mit einem flexiblen Video-Endoskop zu einer Standard-Untersuchung in der Pulmonologie gehört. Nach einer Erhebung des American College of Chest Physicians geht hervor, dass bereits 1989 insgesamt 53.639 Bronchoskopien in den USA durchgeführt wurden; diese Zahl verdeutlicht, welche klinische Bedeutung die Bronchoskopie eingenommen hat, und durch technische Verbesserungen der Endoskope hat der klinische Wert weiter zugenommen [136,137]. Dennoch bleibt die starre oder flexible Bronchoskopie auch in der Hand eines erfahrenen Pulmonologen eine invasive Technik mit entsprechenden Risiken, weshalb der Indikationsstellung Beachtung zukommt und ein unselektierter Einsatz kritisch betrachtet werden muss [138-141].

Das Ziel des Einsatzes der virtuellen Bronchoskopie, basierend auf computertomographischen Bilddaten, ist schon allein wegen der fehlenden Möglichkeit einer direkten Inspektion der Mukosa nicht der Ersatz der flexiblen Bronchoskopie [142]; auch zur Durchführung einer Computertomographie wird das Vorliegen einer rechtfertigenden Indikation gefordert, zumal die potenziellen Risiken einer CT (Strahlenexposition, Anwendung intravenöser Kontrastmittel) gegen die Risiken der invasiven Bronchoskopie abzuwägen sind. Liegt bei einem Patienten die Indikation zur CT jedoch vor, erscheint die Verwendung der Bilddaten zur Berechnung einer virtuellen Bronchoskopie naheliegend und sinnvoll, zumal bei Anwendung eines Mehrschicht-Spiral-CTs das Untersuchungsprotokoll nicht oder nur gering modifiziert werden muss [143] und dabei die diagnostische Bildqualität zur Beurteilung des Lungenparenchyms und Mediastinums nicht beeinträchtigt wird.

Lungenkrebs stellt hinter den Erkrankungen des Herz-Kreislaufsystems die Todesursache Nummer eins sowohl in Europa als auch in den USA dar. Eine Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen Anzahl der gerauchten Zigaretten und Lungenkrebs-Risiko ist hinlänglich bekannt und fundiert belegt [144,145], ebenso die Dichotomie der Prognose in Abhängigkeit vom Stadium der Erkrankung zum Zeitpunkt der Diagnose: die meisten Patienten haben bei Erst-diagnose ein fortgeschrittenes Tumorstadium mit unwahrscheinlicher Aussicht auf Heilung,

wohingegen Patienten mit Lungenkrebs im Frühstadium bei adäquater onkologischer Resektion Aussicht auf Heilung haben [146]. Alternative Therapie-Ansätze wie die photodynamische Therapie (PDT), Brachytherapie, Kryotherapie, Elektrokoagulation oder Nd-YAG-Laser Therapie für Frühstadien des Lungenkrebses befinden sich zurzeit in Evaluation, setzen jedoch eine rechtzeitige Diagnose voraus.

Der diagnostische Stellenwert der Computertomographie zur Detektion pulmonaler Rundherde und mediastinal vergrößerter Lymphknoten wird allgemein akzeptiert [147-149]. Konzepte zum Einsatz der CT in Niedrig-Dosis-Technik als Screening-Methode für Lungenkrebs werden aktuell diskutiert und bereits evaluiert [150-154]. Der Grund für die hohe Sensitivität der CT zur Detektion peripherer Lungenkarzinome liegt im natürlichen Kontrast von Luft gegen Weichteilgewebe sowie der hohen räumlichen Auflösung moderner Computertomographen im Submillimeterbereich. Zentrale Lungenkarzinome mit endoluminalem Wachstum hingegen sind nicht von Luft als natürliches Kontrastmittel umgeben und verändern die Morphologie der Mukosa im Frühstadium nur gering. Das Ziel der Studie zum Einsatz der virtuellen Bronchoskopie war daher zu prüfen, ob durch Berechnung virtuell-endoskopischer Bilder aus dünnschichtig aufgenommenen CT-Bilddaten eine vergleichbare diagnostische Genauigkeit zur Detektion von zentralen Lungenkarzinomen erreicht werden kann wie mit der flexiblen Bronchoskopie.

Gilt die flexible Bronchoskopie als diagnostischer Referenzstandard, kann die CT-Bronchoskopie in unserer Studie eine Sensitivität von 93,8% zur Unterscheidung erkrankter von nicht-erkrankten Individuen erreichen, ist aber mit 64,7% vergleichsweise wenig spezifisch. Die Ursache dafür liegt in der bereits ausgeführten unterschiedlichen physikalischen Grundlage der rekonstruierten Grenzfläche im CT und der optischen Oberfläche in der flexiblen Bronchoskopie. Zwar erscheint die morphologische Auflösung der CT-Bronchoskopie in der endoluminalen Vergrößerung hoch, ist jedoch rechnerisch interpoliert. CT-Bilder werden mit einer Bildmatrix von 512*512 Punkten rekonstruiert. Durch Auswahl eines reduzierten Field-of-views für die Rekonstruktion von 20-30 cm, womit sich sowohl die zentralen als auch peripheren Bronchien der 4.-5. Generation im sichtbaren Feld abbilden lassen, erreicht ein Bildpunkt im CT-Schnittbild eine Kantenlänge von 0,39-0,59 mm. Dies entspricht in Abhängigkeit vom verwendeten Rekonstruktionsfilter einer räumlichen Auflösung von etwa 1 mm. In der z-Achse (Längsachse des Patienten) beträgt die effektive Kantenlänge bei dem in der Studie verwendeten Scanprotokoll etwa 0,8 mm, die räumliche Auflösung etwa 1,5 mm. Eine

Gewebecharakterisierung, wie sie durch optische Betrachtung durch Farb- oder Texturunterschiede möglich ist, kann innerhalb eines einzelnen Bildpunktes nicht zuverlässig erfolgen, allein durch Bildrauschen sind einer sicheren Zuordnung Grenzen gesetzt. Daraus kann gefolgert werden, dass morphologische Veränderungen, soweit sie die Oberfläche durch Erhabenheiten oder Vertiefungen betreffen, besser zu erkennen sind als Art und Ursprung des Gewebes, welches der morphologischen Veränderung zu Grunde liegt. Im Wesentlichen handelt es sich um den Unterschied zwischen Hochkontrast- und Niedrigkontrastauflösung in der Computertomographie [155-157].

Vergleicht man die Sensitivität von flexibler und CT-Bronchoskopie in einer Subpopulation von Patienten mit histologisch gesichertem Malignom in Form eines primären Bronchialkarzinoms oder von Metastasen, so hat die CT-Bronchoskopie eine Sensitivität von 82,6% erreicht, die flexible Bronchoskopie von nur 43,5%, da das Tumorwachstum in 56,5% endoluminal nicht sichtbar war. Dieser zunächst unerwartete Unterschied lässt sich dadurch erklären, dass bei der Beurteilung der CT-Bronchoskopie nicht nur die endoluminale Bildrekonstruktion berücksichtigt wurde, sondern stets die axiale Bildinformation in die Bewertung des Falles einging – ein Vorgehen, welches aus klinischer Sicht auch sinnvoll erscheint. Die bloße Betrachtung endoluminaler Rekonstruktionen aus CT-Daten hätte fraglichen Sinn gehabt, da eine CT-Bronchoskopie aus den ohnehin zur Verfügung stehenden axialen Bildern errechnet wird. Zu einer ähnlichen Schlussfolgerung kommt auch Ferretti [158]: bei einer zu unseren Ergebnissen vergleichbaren globalen Sensitivität der CT-Bronchoskopie von 89% – untersucht wurden 28 Patienten, darunter waren nur 5 Patienten ohne Stenose im Tracheobronchialbaum – sehen die Autoren den Wert der endoluminalen Rekonstruktion in einer, wenn auch statistisch nicht signifikanten, Verbesserung der diagnostischen Konfidenz. Auch wenn die Ursache einer Stenose auf CT-Bildern alleine in 68% der Fälle und in Zusammenschau mit endoluminalen Bildern in 76% der Fälle möglich war, halten die Autoren die Betrachtung der axialen Schnittbilder für essenziell zur Diagnosefindung.

In teilweisem Widerspruch dazu stehen Ergebnisse von Summers et al. [159]. In einer prospektiven Studie bei 11 Patienten zeigte die CT-Bronchoskopie eine höhere Sensitivität zur Detektion einer Bronchialstenose (80%) als die axialen CT-Schichten. Allerdings wurden nur Patienten mit gutartigen Stenosen bei Wegenerscher Granulomatose untersucht, und die Ergebnisse sind kritisch bewertet worden [160]. Aus der gleichen Arbeitsgruppe [161] wurde in einer prospektiven Studie an 44 Patienten eine globale Sensitivität für endoluminale, obstruk-

tive oder mukosale Läsionen im Tracheobronchialbaum von 59% erzielt, allerdings mit konventioneller Dickschicht-Technik (5-10 mm). Die Verwendung von 1,25 mm Schichtdicke im Multislice-CT erzielte im gleichen Kollektiv eine Sensitivität von 83% sowohl für die Betrachtung der axialen Bilder als auch der in Oberflächentechnik berechneten virtuellen CT-Bronchoskopie-Bilder. Die Verbesserung der Sensitivität kann somit der dünneren Schichtführung zugeordnet werden, die endoluminale Darstellung des Tracheobronchialbaumes verbessert nicht per se die Detektionsrate. Bemerkenswert ist, dass im konventionellen Dickschicht-CT keine mukosalen Läsionen erkannt (0% Sensitivität), hingegen in Dünnschichttechnik 16% erkannt wurden. Dieses Ergebnis wird unterstützt durch Rapp-Bernhardt: Die Autoren haben ausschließlich Infiltrationen von Ösophaguskarzinomen virtuell-bronchoskopisch untersucht und festgestellt, dass flache, nur die Mukosa involvierende Läsionen schlecht erkennbar [162], Stenosen aber aufgrund des besseren Überblicks leichter einschätzbar sind. Weitere, zumeist vorläufige Studienergebnisse anderer Autoren [163-165] können zum Vergleich nicht herangezogen werden, da in den Studien keine Sensitivitäten oder Spezifitäten berechnet wurden.

Anhand der ROC-Analysen konnte in unserer Auswertung gezeigt werden, dass die höchste Treffsicherheit für die Unterscheidung erkrankt/nicht erkrankt durch die Zusammenschau aller drei untersuchten Kriterien - Form der Carinae, Form der Ostien und mukosale Architektur – erreicht werden kann, obwohl jeweils der Unterschied zu jedem einzelnen Kriterium statistisch nicht signifikant war. Die Ursache für den fehlenden Unterschied zwischen den Kriterien liegt in der Natur der Pathologie. Malignome wachsen, von seltenen polypenartigen endobronchialen Metastasen abgesehen, typischerweise unter Einbeziehung der Mukosa, verändern die Form der Carinae und damit auch die harmonische Öffnung der Ostien. Eine Auswertung der mukosalen Depositionen haben wir nicht durchgeführt, da Schleimablagerungen keinen pathophysiologischen Zusammenhang zu einem Tumorwachstum haben und eine isolierte Betrachtung dieses Kriteriums als Hinweis auf Tumor nicht sinnvoll erschien.

Beide diagnostische Verfahren haben methodisch bedingte Grenzen in der Darstellung peripherer Pathologien: flexible Endoskope können je nach Instrumentendurchmesser Bronchien nur bis zur 3. Generation (Segmentbronchien) einsehen [135,166], die CT-Bronchoskopie verliert mit Abnahme des Bronchusdurchmessers an morphologischer Genauigkeit. In der vorliegenden Studie konnte gezeigt werden, dass die Sensitivität der CT-Bronchoskopie zur Unterscheidung krank/nicht erkrankt für die bronchoskopisch einsehbaren Bronchien in etwa un-

verändert bleibt: in den Hauptbronchien und Bronchien der ersten Generation betrug die Sensitivität 87,5%, in den Bronchien der zweiten und dritten Generation 93,8%. Dieses Ergebnis ist nachvollziehbar, da Segmentbronchien bei einem Durchmesser von 2-3 mm und einer Größe der CT-Bildpunkte von 0,5*0,5*0,8 mm durch 30-75 Bildpunkte repräsentiert werden und die Interpolation und Oberflächenglättung in der endoluminalen Rekonstruktion noch nicht wesentlich ins Gewicht fällt. Die Spezifität sank jedoch bei kleineren Bronchien von 81,0% auf 64,7%, bedingt durch eine hohe Anzahl falsch positiver Befunde. Die Ursache dieser „Überinterpretation“ kann sowohl durch fehlende Erfahrung der Befunder in der Interpretation diskreter Veränderungen auf Segmentbronchusebene bedingt sein, als auch durch Betrachtung der Pixel basierten Rekonstruktion erklärt werden: wird ein Bildpunkt entweder durch eine tatsächlich vorliegende Dichteanhebung in der Realität oder auch nur zufällig durch Bildrauschen „heller“ und nicht mehr dem lufthaltigen Bronchus als zugehörig abgebildet, entsteht eine Wanderhabenheit, welche in Relation zum Durchmesser kleinerer Segmentbronchien offensichtlicher ins Auge fällt als in Relation zum Durchmesser größerer Bronchien. Im Extremfall könnte ein einzelner Bildpunkt, welcher nicht nach der Klassifikation als transparent bewertet wird, zu einem scheinbaren Verschluss des Bronchus führen, wenn dieser ebenfalls nur noch durch wenige Bildpunkte repräsentiert wird.

Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass der räumlichen Auflösung des CTs in allen drei Raumrichtungen eine entscheidende Bedeutung für die diagnostische Qualität der CT-Bronchoskopie zukommt, neben der richtigen Wahl des Schwellenwertes für die Klassifikation der Volumenrekonstruktion, in unserer Studie als Mittelwert zwischen Weichteilen und Luft gewählt, wie von Hopper vorgeschlagen [29]. Die räumliche Auflösung entlang der Längsachse des Patienten ist im CT in erster Linie durch die Wahl der Schichtdicke definiert [26,167, 168], beim Mehrschicht-Spiral-CT ist das Schicht-Sensitivitätsprofil über einen weiteren Bereich nahezu unabhängig vom relativen Tischvorschub [28,169]. Die Auflösung in der axialen Ebene ist hauptsächlich Bauart bedingt (Anzahl der Detektoren, Samplingfrequenz) und kann vom Anwender durch Verkleinerung des Rekonstruktions-Field-of-views und durch Wahl des Rekonstruktionsfilters beeinflusst werden. An beiden in der Studie eingesetzten CT-Geräten waren effektive Schichtdicke, Field-of-view und Rekonstruktionsfilter nahezu identisch. Die Geräte unterschieden sich nicht in Bezug auf Anzahl der Detektoren parallel zur Schichtebene und Sampling-Frequenz. Die beobachteten Unterschiede in der Bildqualität zwischen 4- und 16-Zeilen-CT lassen sich ausschließlich auf die 4-fache Scangeschwindigkeit des 16-Zeilers zurückführen: pro zurückgelegter Strecke beeinflussen weniger fortgeleitete

Herz- und Gefäßpulsationen die Bildqualität, so dass die Oberflächen glatter und weniger „gerippt“ erscheinen [170]. Auch wenn kein Einfluss dieser Bewegungsartefakte auf die diagnostische Genauigkeit der CT-Bronchoskopie festgestellt werden konnte, so besteht dennoch das Risiko, dass insbesondere flache Pathologien durch die wellenartigen Pulsationsartefakte maskiert werden [163].

Dass eine Beurteilung von Sekretablagerungen in der CT-Bronchoskopie unzuverlässig ist [161] und somit keine diagnostische Relevanz hat, konnte anhand der Auswertung der Korrelation zwischen beiden Verfahren belegt werden: die Übereinstimmung zwischen flexibler und CT-Bronchoskopie, ausgedrückt als Kappa-Wert und P-Wert im McNemar-Test, war für die Form der Carinae, Form der Ostien und Bewertung der mukosalen Architektur nur ausreichend bis mittelmäßig mit der Tendenz der CT-Bronchoskopie zur „Überdiagnose“, für die Beurteilung von Sekretablagerungen sogar schlechter als durch Zufall zu erwarten. Dieses Ergebnis zeigt, dass eine Charakterisierung von kleinen Wand-Unebenheiten – als solche präsentieren sich Sekretablagerungen in der CT-Bronchoskopie – bei der zur Zeit erreichbaren Niedrigkontrastauflösung der Computertomographen nur unzureichend möglich ist.

Die virtuelle CT-Bronchoskopie stellt ein wertvolles Instrument zur Betrachtung des Tracheobronchialbaumes dar, nicht wegen der Visualisierung ansonsten nicht sichtbarer Pathologien, sondern wegen der für das menschliche Auge einfacher nachvollziehbaren Darstellung eines Blickes in ein Hohlsystem. Die durch den Computer in die Darstellung „hinein“ gerechnete perspektivische Verzerrung lässt die endoluminalen Blicke natürlicher erscheinen. Da nur lufthaltige Strukturen transparent sind und die Bronchuswand als Ebene der Lichtreflexion dient, stellt die endoluminale Betrachtung eine Form der „Informationskompression“ dar, indem nur Strukturen erkennbar sind, die das Lumen der Trachea oder des Bronchus in jeglicher Art verändern, Strukturen außerhalb jedoch unsichtbar bleiben. Es ist nicht möglich, dass Sekundärrekonstruktionen aus axialen Bildern mehr diagnostische Informationen enthalten als die zu Grunde liegenden axialen Originalschichten. Die Pathologie ist nur für das menschliche Auge leichter und schneller erfassbar und mit Engrammen aus der realen optischen Betrachtung vergleichbar. Eine subtile Diagnostik anhand der axialen Schichtbilder erfordert Übung und Abstraktionsvermögen. Die klinische Rechtfertigung zum Einsatz der virtuellen CT-Bronchoskopie ergibt sich somit aus der diagnostischen Hilfestellung des Verfahrens für den Radiologen, weniger aus der Möglichkeit, den Bildeindruck eines konkurrierenden Verfahrens zu simulieren. Anwendungen der CT-Bronchoskopie als Verfahren zum Training [171,

172] und zur Therapieführung, wie für die Nase und Nasennebenhöhlen in 3.2 bereits ausgeführt, sind vielversprechend [173] und lassen Raum für weitere technische Entwicklungen offen.

5.4 *CT-Koloskopie*

Mit Ausnahme des Rektumkarzinoms besteht die primäre Therapie des Kolonkarzinoms in der Resektion des befallenen Darmabschnitts mit Dissektion der Lymphabflusswege nach onkologischen Kriterien. Zur Operationsplanung sind neben dem histologischen Nachweis des Tumorgeschehens die Lokalisation des Tumors und damit auch der Ausschluss weiterer Tumormanifestationen im Kolon erforderlich. In 12%-33% der Fälle wird das operative Vorgehen durch den präoperativen Nachweis weiterer resektionsbedürftiger Neoplasien (Zweitkarzinome, hochgradig dysplastische Polypen) im Kolon modifiziert [174-176]; 73% präoperativ bereits vorliegende neoplastische Polypen liegen nicht in dem durch das Index-Karzinom zu resezierenden Darmabschnitt [177]. Beide Anforderungen – Lokalisation und histologischer Nachweis des Index-Karzinoms und Ausschluss oder Detektion synchroner Zweitkarzinome oder neoplastischer Polypen – können mit der flexiblen Koloskopie in den meisten Fällen zufrieden stellend gelöst werden: in der klinischen Praxis wird bei Detektion einer Neoplasie im Dickdarm endoskopisch bereits eine Probiopsie entnommen, womit sich das Vorliegen einer malignen Entartung nachweisen lässt. Dass mit einer vollständigen Koloskopie zuverlässig weitere Manifestationen des Tumors (sporadisch oder hereditär) in Form von Polypen oder flachen Wanderherden ausgeschlossen werden können und die flexible Koloskopie einen hohen diagnostischen Stellenwert präoperativ hat, ist in zahlreichen Studien hinreichend sicher belegt [178-181].

Eine zuverlässige Lokalisationsangabe vor chirurgischer Resektion des Tumors gewinnt mit zunehmender Verbreitung laparoskopischer Eingriffe an Bedeutung. Vignati konnte bei 320 operativ korrelierten Patienten 44 Fehler bei der Lokalisation des Tumors nachweisen, 7 Karzinome wurden präoperativ endoskopisch übersehen [182]. Hancock wies bei 77 operativ korrelierten Patienten 6 fehlerhafte Lokalisationen des Tumors in der Koloskopie nach, welche ein verändertes operatives Vorgehen nach sich zogen [183]. Die Ursache ungenauer Lokalisationsangaben lässt sich durch die Diskrepanz der typischen Koloskoplänge von 80-100 cm und der durchschnittlichen Dickdarmlänge von 162 cm (Mittelwert aus eigenen Daten von 1622 im CT untersuchten Patienten) erklären. Zwar kann der erfahrene Endoskopiker anhand

der Morphologie des Darmes und Erkennung von Landmarken die Höhe des Tumors gut abschätzen, ohne Hilfsmittel wie Diaphanoskopie bei schlanken Patienten, Röntgendurchleuchtung während der Koloskopie oder magnetische Lokalisation der Endoskopspitze [184,185] bleibt die Lokalisationsangabe jedoch ungenau.

Als diagnostische Alternative präoperativ gilt bis heute die konventionelle Doppelkontrastuntersuchung (KE) des Dickdarms [186], auch wenn der klinische Wert umstritten ist [187, 188]. Im Vordergrund der Kritik steht die geringere Sensitivität des KEs bei der Detektion von Polypen [180] und Karzinomen: bei 389 untersuchten Patienten wurden 16 Zweitkarzinome in der Endoskopie gefunden und chirurgisch bestätigt, davon aber 8 Karzinome im präoperativen KE übersehen [189]. Andere Autoren berichten hingegen über eine Sensitivität des KEs von 96,5% zur Detektion von kolorektalen Karzinomen [190]. Sowohl Perzeptionsfehler [191,192] als auch technisch mangelhafte Untersuchungen [193] werden als Ursache für die zum Teil unzureichende Sensitivität des KEs angegeben; je nach Fragestellung, Erfahrung des Untersuchers und Prävalenz der Erkrankung im untersuchten Patientenkollektiv liegt die Sensitivität des KE zur Detektion polypenartiger Neubildungen im Darm zwischen 66% und 91% [194-198]. Auch wenn die Notwendigkeit einer präoperativen Darmreinigung von einzelnen Autoren zunehmend in Frage gestellt wird [199], ein weiterer Nachteil des Kontrasteinlaufs unter Verwendung bariumhaltiger Suspensionen hat dennoch präoperativ Relevanz: auf Grund der sehr seltenen, aber mit hoher Letalität einhergehenden Komplikation einer Barium-Peritonitis [200-202] sollten nach Durchführung eines KEs ein bis zwei Tage mit Spülung des Darmes vergehen, bis eine elektive chirurgische Intervention am Darm durchgeführt werden kann.

Die CT-Koloskopie ist in zahlreichen Studien auf Sensitivität und Spezifität zur Detektion von kolorektalen Polypen untersucht worden, je nach Patientenkollektiv (symptomatisch, asymptomatisch), Technik (Schichtdicke, Spiral-CT oder Mehrschicht-Spiral-CT, Kontrastmittel, Stuhlmarkierung), Betrachtung (axiale Bilder, multiplanare Rekonstruktionen, endoluminale Darstellung) und Auswertung nach Polypengröße liegt die Sensitivität zwischen 15% [203] und 70% [204] bei Polypen mit 5 mm Durchmesser oder weniger, und zwischen 70% [205] und 100% [39] bei Polypen größer als 1 cm. Als realistisch kann heute angesehen werden, dass die Detektionsrate der CT-Koloskopie für Polypen mit 6 mm Durchmesser oder größer mit der Detektionsrate der flexiblen Koloskopie vergleichbar ist; dies gilt nicht nur für Studienpopulationen mit hoher Prävalenz kolorektaler Polypen [206], sondern auch für

Screeningpopulationen mit sehr geringer Prävalenz von Polypen [40]. Die Detektionsrate der CT-Koloskopie für kolorektale Karzinome dürfte besser sein als die Detektionsrate für Polypen, da als gesichert gelten kann, dass, von seltenen Ausnahmen [207] abgesehen, das Karzinomrisiko mit der Polypengröße drastisch zunimmt [208-212]. In einer Auswertung von 20.000 Polypen hatten 5.137 Polypen eine Größe von 5 mm oder kleiner, und keiner dieser Polypen zeigte eine maligne Entartung [213]. Fenlon konnte an 38 Patienten zeigen, dass mittels CT-Koloskopie alle 38 Karzinome gefunden wurden (100%), die flexible Koloskopie bei 14 Patienten unvollständig war und nur 32 Karzinome (84%) fand [214]. Bei 29 hochgradig stenosierenden Kolonkarzinomen konnte Fenlon im proximalen, für die Koloskopie unzugänglichen Darmabschnitt zwei synchrone Karzinome und 24 Polypen nachweisen, welche chirurgisch korreliert wurden [215].

Da es sich bei der CT-Koloskopie um eine Schnittbilduntersuchung des Abdomens handelt, kann bei Verwendung von intravenösem Kontrastmittel im Falle des Vorliegens eines kolorektalen Karzinoms gleichzeitig ein Staging erfolgen. Die Detektionsrate der Computertomographie für Lebermetastasen ist in der Literatur gut dokumentiert und wird mit 67% [216] bis 85,1% bei einem positiven prädiktiven Wert von 96,1% angegeben [217]. In einer Meta-Analyse an 1.747 eingeschlossenen Patienten konnte Kinkel eine Sensitivität der CT von 72% belegen [218]. Das lokale Staging des Primärtumors kann im Spiral-CT mit einer Genauigkeit von 64,8-81% erfolgen, das Staging der lokalen Lymphknoten mit 67,6% [219,220].

Man darf soweit zusammenfassen:

1. Eine zuverlässige präoperative Lokalisation eines Kolon-Karzinoms ist chirurgischerseits wünschenswert.
2. Präoperativ sollten weitere resektionswürdige Befunde ausgeschlossen oder nachgewiesen werden.
3. Die flexible Koloskopie hat eine hohe Sensitivität für Polypen und Karzinome, zeigt jedoch Fehler in der Lokalisationsangabe.
4. Bei fortgeschrittenem Karzinom mit höhergradiger Stenosierung kann eine flexible Koloskopie des proximalen Darmabschnitts unmöglich sein, somit auch der Ausschluss weiterer Befunde.
5. Mittels Röntgenuntersuchung in Doppelkontrasttechnik (KE) kann die Tumorlokalisierung zuverlässig erfolgen.

6. Der KE hat eine hohe diagnostische Aussagekraft, jedoch nur in Händen erfahrener Untersucher und bei ausgereifter Technik.
7. Präoperativ sollte der Dickdarm, wenn möglich, bariumfrei sein.
8. Die CT-Koloskopie hat für chirurgisch relevante Polypen und Karzinome eine der flexiblen Koloskopie vergleichbare Sensitivität.
9. Die CT-Koloskopie kann eine zuverlässige Lokalisation des Tumors angeben.
10. Die CT-Koloskopie ermöglicht neben der Lokalisation des Primärtumors gleichzeitig ein Staging, insbesondere die Detektion von Lebermetastasen.

Aus den genannten Punkten leitete sich die Fragestellung ab, ob die CT-Koloskopie präoperativ:

1. eine zuverlässige Lokalisationsangabe treffen kann,
2. eine Sensitivität und Spezifität aufweist, welche dem Kolonkontrasteinlauf ebenbürtig ist,
3. in einer Untersuchung ein Tumorstaging durchführen kann.

Durch die Einteilung des Dickdarms in acht Segmente war in unserer Studie eine relativ genaue anatomische Zuordnung des Tumors präoperativ möglich. Da sich weder im KE noch im CT eine abweichende Lokalisation von der intraoperativen Lokalisation gezeigt hat, darf die CT-Koloskopie diesbezüglich als gleichwertig zum KE betrachtet werden. Dieses Ergebnis lässt sich durch die in der bildlichen Darstellung genutzte Möglichkeit der CT-Koloskopie erklären: die transparenten Rekonstruktionen des inflatierten Kolonrahmens unterschieden sich zwar physikalisch in der erreichbaren räumlichen Auflösung vom KE durch eine Zehnerpotenz, die anatomisch korrekte Wiedergabe durch ortsgetreue Abbildung des untersuchten Objektes im CT lässt den Bildeindruck zwischen CT und KE jedoch zum Verwechseln ähnlich werden. Hinzu kommt, dass die Befundung nicht auf eine den KE imitierende Darstellung fußt. Transparente Kolondarstellungen, möglicherweise zusammen mit anderen dreidimensional überlagerten anatomischen Landmarken wie Leber, Gefäßen, ossärem Skelett und andere, dienen hauptsächlich dem Zweck der Befunddokumentation. Die Leistungsfähigkeit der genauen anatomischen Zuordnung von Karzinomen im Dickdarm ergibt sich aus der Befundung der axialen oder multiplanaren Schnittbilder, die dem Radiologen als Grundlage der Diagnose dienen. Die CT-Koloskopie kann somit eine wesentliche Anforderung an die präoperative Diagnostik erfüllen und ist dem KE nicht unterlegen.

Die Ergebnisse des Vergleichs zwischen CT und KE haben deutlich gemacht, dass die CT-Koloskopie bei der Detektion von kolorektalen Karzinomen eine höhere Sensitivität hat als der KE. Unsere Ergebnisse stimmen für das CT mit den Ergebnissen von Fenlon und Yee überein [214,221]. Da das kleinste Karzinom in unserer Studie eine Größe von 9 mm hatte und die operierten Karzinome eine durchschnittliche Größe von 3,2 cm hatten, ist verständlich und nicht überraschend, dass bei adäquater Vorbereitung der Patienten, durchgehender Distension des Dickdarmes (zum Teil durch eine Zweituntersuchung in Bauchlage des Patienten erreicht) und dünner Schichtführung von 1 mm Dicke kein Karzinom übersehen wurde. Einschränkung muss allerdings erwähnt werden, dass die Studienpopulation durch die Einschlusskriterien stark selektioniert war und somit die Befunder im CT und beim KE von einer hohen Tumor-Wahrscheinlichkeit ausgehen konnten; immerhin 73% der eingeschlossenen Patienten hatten eine chirurgisch sanierungsbedürftige Dickdarmerkrankung. Auch die Sensitivität des CTs für kolorektale Polypen von 80% in unserer Studie steht in Einklang mit der Literatur [221,222] und ist im intraindividuellen Vergleich dem KE überlegen. Das Studiendesign und –protokoll war jedoch nicht zur Bestimmung der absoluten Detektionsrate für kolorektale Polypen optimiert. Letztendlich konnten nur 20 Polypen histologisch korreliert werden, 5 Polypen durch Koloskopie. Eine Sicherung von Normalbefunden erfolgte ebenfalls nicht.

Die Detektionsrate für Polypen im KE lag trotz des geringen Wertes von 68% immer noch im Rahmen publizierter Daten [194]. Auch die bei der ersten (präoperativen) Befundung übersehenen sechs Karzinome sind statistisch zu erwarten gewesen [193]. Von Interesse, aber nicht eigentliches Ziel der Studie war die Prüfung, ob die übersehenen Karzinome technische Ursachen, dazu zählen unzureichende Bilddokumentation, heterogener Bariumbeschlagn, intransparente Bariumseen, mangelhafte Distension u.a., oder eine perzeptive Ursache haben. Mehrere Autoren konnten zeigen, dass eine Doppelbefundung (second reading) die Detektionsrate im KE verbessert. Wir konnten diesen Effekt ebenfalls nachweisen, da in der zweiten postoperativen Befundung nur noch zwei Karzinome unentdeckt blieben, vier Karzinome aber in richtiger Lokalisation beschrieben wurden. Trotz der diagnostischen Verbesserung durch Doppelbefundung lassen die Ergebnisse die Schlussfolgerung zu, dass die CT-Koloskopie für den präoperativen Nachweis von Primärtumoren und synchronen Darm-Pathologien dem konventionellen Kontrasteinlauf nicht unterlegen ist.

Eine Sicherung der Lebermetastasen war im Studienprotokoll nicht vorgesehen. Das Untersuchungsprotokoll der CT-Koloskopie wich von der üblichen Technik im CT zur Detektion von Lebermetastasen nur in einem Punkt ab: der Darm wurde statt mit einer reinen oralen Kontrastierung nach Vorbereitung und Reinigung mit CO₂-Gas gefüllt. Ansonsten entspricht die Protokollierung einer üblichen CT-Untersuchung: Kontrastmittelgabe von 120 ml eines nicht-ionischen, jodhaltigen Kontrastmittels intravenös und Start des CTs während der portalvenösen Perfusionsphase, welche die höchste Detektionsrate für hypovaskularisierte Lebermetastasen aufweist [217,218]. Auch wenn in der Studie der histologische Nachweis diagnostizierter Lebermetastasen nur bei fünf Patienten erfolgte, so kann berechtigt angenommen werden, dass durch die Füllung des Dickdarmes mit CO₂-Gas die Detektion von Lebermetastasen nicht beeinträchtigt wird.

Der klinische Stellenwert eines präoperativen lokalen Stagings des Kolonkarzinoms ist umstritten [223]. Zwei Gründe sind anzuführen: zum einen war die Genauigkeit der in der Vergangenheit untersuchten diagnostischen Modalitäten unzureichend [224], um auf Basis der Staging-Ergebnisse klinische Entscheidung rechtfertigen zu können. In einer zusammenfassenden Darstellung der Staging-Genauigkeit von CT und MRT für den Lokalbefund, Lymphknoten und Lebermetastasen wird die CT zwar als gering der MRT überlegen angegeben, die entsprechenden Werte von 74%, 62% und 85% für CT und 58%, 64% und 85% für MRT zeigen jedoch, dass eine zuverlässige Aussage über das Tumorstadium mit beiden Modalität noch nicht gelungen ist [225]. Insbesondere die Detektion befallener Lymphknoten bereitet CT und MRT Schwierigkeiten, die Sensitivität wird mit 48% (CT) und 22% (MRT) angegeben [225], bei 180 Patienten lag die Sensitivität in der Unterscheidung N0/N1-2 bei 19% [223]. Zum anderen – und dieser Grund erscheint relevanter – fehlt es für Kolonkarzinome an einer klinischen Relevanz des präoperativen Stagings, wenn aus dem diagnostizierten Stadium keine Modifikation der Therapie resultiert.

Eine besondere Stellung nimmt das Rektumkarzinom ein [226]. Im Rahmen differenzierter Behandlungsstrategien wird heute ein lokales T3- und T4-Stadium durch neoadjuvante Therapie „down-gestaged“ [225,227]. Für das Rektumkarzinom spielt eine präoperative Diagnostik somit eine entscheidende Rolle, nicht jedoch für das Kolonkarzinom. Ein fehlendes oder unzuverlässiges prätherapeutisches Staging hat allerdings Nachteile bei der Entwicklung und Prüfung neuer therapeutischer Ansätze oder Therapieverfahren, insbesondere von nicht-chirurgischen Verfahren [228].

Die technische Weiterentwicklung in der Computertomographie mit Einführung der Mehrzeilentechnologie [229,230] hat neue Hoffnungen auf eine Verbesserung der Staging-Genauigkeit aufkommen lassen; begründet wird dies mit der Möglichkeit, in einem Atemstillstand das gesamte Abdomen in weniger als 10 Sekunden bei einer Schichtdicke von 1 mm oder dünner untersuchen und somit sowohl Bewegungsartefakte als auch Partialvolumeneffekte drastisch reduzieren zu können. Betrachtet man in unserer Studie nur die Fähigkeit der CT-Koloskopie, einen auf die Wand des Darmes beschränkten Tumor von einem Tumor mit Infiltration über die Darmwand hinaus unterscheiden zu können (Tis-T2 versus T3-T4), dann konnte in 33 von 38 Fällen das Stadium mittels CT richtig eingeordnet werden, entsprechend einer Sensitivität von 87% und einer Spezifität von 78%. Für die Lymphknoten ergab sich ein anderes Bild: offenbar wurden vergrößerte Lymphknoten zu häufig als maligne befallen diagnostiziert: 23 von 24 Patienten mit Stadien N1-2 wurden im CT korrekt erkannt, entsprechend einer Sensitivität von 95,8%, die Spezifität erreicht bei dieser Trennung der Daten aber nur 43,8%. Auch der McNemar-Test bestätigt die Tendenz zum Overstaging des Lymphknotenstatus. Offensichtlich ist es durch Anwendung der Dünnschichttechnik im CT gelungen, die Staging-Genauigkeit des Primärtumors zu verbessern, das Lymphknotenstaging bleibt weiterhin unzureichend.