

6.0 Zusammenfassung

Virtuelle Endoskopien stellen eine neuartige, dreidimensionale Rekonstruktion dar, gekennzeichnet durch eine Kombination aus starker Vergrößerung und perspektivischer Verzerrung. Jeder Raum, welcher sich durch mehr oder weniger homogene Dichtewerte von seiner Umgebung unterscheidet, kann virtuell endoskopiert werden. Als Grundlage eignen sich alle Schnittbildverfahren, die eine ein-eindeutige Ortszuordnung sowie eine gewebetypische Kodierung der resultierenden Bildpunkte gewährleisten. Ultraschall, Kernspintomographie und Computertomographie sind prinzipiell als bildgebende Modalität geeignet. Die Computertomographie bietet zurzeit die besten Voraussetzungen, und mit Einführung der Mehrschicht-Spiral-CT sind Ganzkörper-Aufnahmen mit isotroper Bildpunkte-Geometrie in Atemstillstand möglich geworden. Gewebe-Kontrast ist die Grundlage jeder Bildgebung, für die CT ist der Kontrast zwischen Luft und Weichteilen methodisch bedingt hoch, weshalb für die Nasennebenhöhlen, die Trachea und den Dickdarm nach Luftinsufflation günstige Voraussetzungen für die Erstellung virtuell-endoskopischer Bilder bestehen. Der Dünndarm muss zuvor sowohl distendiert als auch mit Kontrastmittel gefüllt werden, um eine endoluminale Darstellung zu ermöglichen.

Im eigentlichen Sinn versteht man unter virtueller Endoskopie die Simulation einer wahren, optischen Endoskopie mit der Begrenzung der Sicht auf das zu untersuchende Organ. Der klinische Wert einer Schnittbildmodalität besteht hingegen insbesondere in der Sichtbarmachung aller Anteile des Organs ohne Beschränkung auf Lumina oder spezifische Gewebe, so dass mit der Beschränkung dreidimensionaler Rekonstruktionen auf endoluminale Blickwinkel die methodisch bedingten Nachteile der optischen Endoskopie übernommen werden. In der vorliegenden Arbeit werden alternative Visualisierungstechniken, welche auf den gleichen Rekonstruktionsprinzipien wie die virtuelle Endoskopie beruhen, vorgestellt und anhand von Phantomuntersuchungen in ihrer prinzipiellen Bedeutung erklärt. Dazu gehören die Hybriddarstellung, Tissue-Transition-Projection (TTP) und simulierte Hohlorgan-Dissektionen.

Ziel des experimentellen Teils der Arbeit war die Entwicklung und Optimierung sowohl des Untersuchungsprotokolls für Hohlorgane als auch der Betrachtungstechnik unter vorrangiger Berücksichtigung der Verbesserung der zeitbezogenen Effizienz. Zur Protokolloptimierung der Computertomographie für die Erkennung endoluminaler Pathologien – als Schlüssel-Repräsentant werden rundliche Polypen in einem tubulären Organ betrachtet – wurde zu-

nächst an einem Darmphantom der Zusammenhang zwischen Schichtdicke und Rekonstruktionsintervall und Erkennbarkeit polypöser Läsionen verschiedener Größe untersucht. Mit der Theorie übereinstimmend hat die Wahl der primären Schichtdicke den entscheidenden Einfluss auf die minimale, zur Erkennung erforderliche Größe eines Polyps: in etwa gibt die am CT eingestellte Schichtdicke in Millimetern die minimal erkennbare Größe an. In einem zweiten Schritt wurde diese Erkenntnis an 23 Datensätzen mit 51 histologisch gesicherten Darmpolypen verschiedener Größe überprüft. Im Falle der Patientendatensätze wurden die Rohdaten in unterschiedlicher Weise rekonstruiert, weil Doppeluntersuchungen an Patienten nicht möglich sind und zusätzliche Varianzen in den Datensätzen auftreten würden. Der Zusammenhang von Schichtdicke und Erkennbarkeit, in dieser Untersuchung als Sensitivität darstellbar, konnte erneut bestätigt werden. Mit der dünnsten Schichtdicke von 1 mm wurde die höchste Detektionsrate von 96% erreicht. Die Spezifität stieg mit zunehmender Schichtdicke an, was in der abnehmenden Zahl falsch positiver Befunde (Stuhlreste) begründet liegt. Weil klinisch zunächst eine hohe Sensitivität für die gesuchte Pathologie im Vordergrund steht, sollte in der Praxis die dünnst-mögliche Schicht am CT eingestellt werden, welche eine Untersuchung des betreffenden Organs ohne dessen Bewegung gewährleistet. Im Thorax und Abdomen sollte die Aufnahme in Atemstillstand möglich sein.

Die Erstellung und Betrachtung virtuell-endoskopischer Bilder ist zeitaufwendig. Von Interesse war daher, ob technische Hilfsmittel oder kombinierte Darstellungen aus axialer Schicht und endoluminaler Bildinformation (Hybridtechnik) den Zeitaufwand für Radiologen zu reduzieren vermögen. Zunächst wurden Datensätze von 103 Patienten mit 32 gesicherten Polypen sowohl als reine axiale Bilder, als endoluminale Rekonstruktionen und als Hybriddarstellungen zwei Befundern vorgelegt. Es stellte sich heraus, dass die kombinierte Präsentation, welche durch technisches Personal oder vollkommen automatisch berechnet werden kann, zu einer identischen Detektionsrate führte wie die gemeinsame Betrachtung aus axialen Bildern und zeitaufwendig erstellter virtueller Rekonstruktionen. Die Befundungs-Zeit konnte von 34 Minuten für axiale und endoluminale Bilder auf 11 Minuten für Hybriddarstellungen reduziert werden. Parallel zu dieser Untersuchung sollte geprüft werden, ob eine automatische Pfadfindung den Durchsatz und damit die Effizienz bei der Befundung virtueller Endoskopien des Dickdarmes steigern kann. An 29 Datensätzen wurde gemessen, wie hoch der Zeitbedarf zur Erstellung und Überprüfung des Pfades, für technisches Personal und für den Experten zur Befundung in Relation zur manuellen Navigation durch Radiologen selbst ist. Das Ergebnis war eindeutig: durch Verlagerung von repetitiven Aufgaben auf Computer und technisches

Personal lässt sich der Durchsatz und die Effizienz bei der Befundung signifikant steigern. Die Experten-Zeit konnte mit automatischer Pfadfindung auf durchschnittlich 9 Minuten reduziert werden und war damit vergleichbar mit der erforderlichen Befundungs-Zeit für Hybriddarstellungen.

Ziel des klinischen Teils der Arbeit war die Untersuchung des Stellenwertes der virtuellen Endoskopie an den Organsystemen der Nase und Nasennebenhöhlen, des Dünndarms, der Trachea und Dickdarms. In der klinischen Studie zur virtuellen Endoskopie der Nase und Nasennebenhöhlen an 45 Patienten zeigte sich, dass virtuell-endoskopische Rekonstruktionen nicht den diagnostischen Stellenwert der axialen Schichten oder multiplanaren Rekonstruktionen erreichen und somit „nur“ als Visualisierungshilfe fungieren, da eine umfassende Diagnostik nur in Zusammenschau mit multiplanaren Schnittbildern möglich ist. Wesentliche und für die Indikationsstellung zur funktionellen Sinus-Chirurgie entscheidende Befunde konnten in der virtuellen Endoskopie trotz standardisierter Nachverarbeitung nicht erkannt werden. Der Stellenwert der virtuellen Endoskopie liegt vor allem in der Funktion als Lehr- und Lernmittel, als Hilfe zur Planung chirurgischer Eingriffe sowie als Hilfe zur Befundkommunikation und -darstellung in klinischen Konferenzen.

Für die virtuelle Endoskopie des Dünndarms war eine modifizierte Untersuchungstechnik mit Füllung des Lumens mit radiodichtem Kontrastmittel und Methylzellulose erforderlich. Dass in der Pilotstudie eine diagnostische Verbesserung durch Ausschluss oder Nachweis endoluminaler Pathologien erzielt werden konnte, war vor allem der veränderten und auf den Dünndarm fokussierten Untersuchungstechnik zu verdanken, weniger der Erstellung virtuell-endoskopischer Bilder: diese stellen einen Befund nur klarer und verständlicher dar. Hinzu kommt, dass eine durchgehende Navigation durch den Dünndarm nur mit Hilfe einer automatischen Pfadfindung praktikabel erscheint, weil die Übersicht durch die Länge des Darmes schnell verloren geht.

Zur Bestimmung des klinischen Stellenwertes der virtuellen Endoskopie am Tracheobronchialbaum wurde intra-individuell an 50 Risikopatienten die diagnostische Genauigkeit zur Detektion zentraler Lungenkarzinome im Vergleich zur flexiblen Bronchoskopie geprüft. Die Sensitivität der virtuellen Bronchoskopie lag bei 93,8% und die Spezifität bei 64,7%, wenn die flexible Bronchoskopie als diagnostischer Referenzstandard fungierte. Allerdings zeigte die flexible Bronchoskopie selbst in einer Subpopulation von Patienten mit histologisch ge-

sichertem Malignom nur eine Sensitivität von 43,5%, da das Tumorwachstum bei 56,5% der Patienten endoluminal nicht sichtbar war. Mittels ROC-Analyse war nachweisbar, dass nur durch Einschluss aller drei Befundungskriterien (Form der Carinae, Form der Ostien und mukosale Architektur) die höchste Treffsicherheit erreicht werden kann. Mukosale Depositionen gaben keine wegweisenden Hinweise, da ihr Auftreten in keinem pathophysiologischen Zusammenhang zu einem Tumorwachstum steht. Auch in dieser Studie wurde deutlich, dass eine isolierte Betrachtung virtuell-endoskopischer Bilder den diagnostischen Anforderungen nicht gerecht wird; erst in der Zusammenschau aus axialen Bildern und dreidimensionalen Rekonstruktionen kann das diagnostische Potenzial genutzt werden.

Zuletzt sollte in einer intraindividuellen Vergleichsstudie an 117 Patienten zwischen virtueller Endoskopie des Dickdarmes (durchgeführt in optimierter Protokollführung mit teil-automatisierten Rekonstruktionen mittels Pfaddefinition und TTP) und konventioneller Doppelkontrastdarstellung geprüft werden, ob das CT-basierte Verfahren der etablierten Methode präoperativ ebenbürtig ist in Bezug auf Lokalisationsangabe des pathologischen Befundes, Sensitivität und Spezifität, und ob und wie genau ein präoperatives Tumorstaging in der gleichen Untersuchung erfolgen kann. Der Nachweis gelang, dass die CT-Koloskopie basierend auf Mehrschicht-Spiral-CT-Daten bei Patienten mit kolorektalem Karzinom die gleiche diagnostische Aussagekraft hat wie der konventionelle Kontrasteinlauf unter Röntgendurchleuchtung, darüber hinaus aber die zusätzliche Möglichkeit bietet, das Tumorgeschehen zu „stagen“ mit einer bisher mittels CT nicht dokumentierten Genauigkeit. Alle Karzinome wurden in der CT-Koloskopie gesehen, zwei Karzinome im KE auch retrospektiv nicht erkannt. Die Sensitivität zur Bestimmung eines wandüberschreitenden Wachstums des Primärtumors und eines Lymphknotenbefalls lag entsprechend bei 87% und 95%, die Spezifität bei 78% und 43,8%.

Virtuelle Endoskopien setzen eine dünne Schichtführung mit isotroper Bildpunkte-Geometrie voraus, wenn die Erkennung morphologischer Details im Vordergrund steht. Ihr Stellenwert an der Nase und den Nasennebenhöhlen sowie im Dünndarm besteht im Wesentlichen in der Befund-Dokumentation, in der Trachea darüber hinaus als Hilfestellung zur Detektion zentraler Lungenkarzinome. Im Dickdarm kann die virtuelle Endoskopie den konventionellen Doppel-Kontrasteinlauf bei präoperativer Fragestellung ersetzen und hat das Potenzial, sich neben der flexiblen Koloskopie als Referenzstandard zum Ausschluss oder Nachweis kolorektaler Polypen zu etablieren.