

Aus der Klinik und Poliklinik für Radiologie
der Ludwig-Maximilians-Universität München



DISSERTATION

Ganzkörper-CT Untersuchungen bei
Patienten nach Polytrauma –
Untersuchungen zur Strahlendosis
und Potentiale zur Dosisreduktion

ANDREAS
HARRIEDER

2022

Aus der Klinik und Poliklinik für Radiologie

Klinik der Universität München

Direktor: Prof. Dr. med. Jens Ricke

**Ganzkörper-CT Untersuchungen bei Patienten nach Polytrauma –
Untersuchungen zur Strahlendosis und Potentiale zur
Dosisreduktion**

Dissertation

zum Erwerb des Doktorgrades der Medizin

an der Medizinischen Fakultät der

Ludwig-Maximilians-Universität zu München

vorgelegt von

Andreas Johannes Harrieder

aus

Landshut

2022

Mit Genehmigung der Medizinischen Fakultät
der Ludwig-Maximilians-Universität München

Berichterstatter: Prof. Dr. med. Ulrich Linsenmaier

Mitberichterstatter: PD Dr. med. Tobias Helfen

Mitbetreuung durch den
promovierten Mitarbeiter: Priv.-Doz. Dr. med. Markus Körner

Dekan: Prof. Dr. med. Thomas Gudermann

Tag der mündlichen Prüfung: 21.07.2022

Kumulative Dissertation gemäß § 4a der Promotionsordnung

Affidavit



Eidesstattliche Versicherung

Harrieder, Andreas Johannes

Name, Vorname

Ich erkläre hiermit an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertation mit dem Titel:

**„Ganzkörper-CT Untersuchungen bei Patienten nach Polytrauma –
Untersuchungen zur Strahlendosis und Potentiale zur Dosisreduktion“**

selbständig verfasst, mich außer der angegebenen keiner weiteren Hilfsmittel bedient und alle Erkenntnisse, die aus dem Schrifttum ganz oder annähernd übernommen sind, als solche kenntlich gemacht und nach ihrer Herkunft unter Bezeichnung der Fundstelle einzeln nachgewiesen habe.

Ich erkläre des Weiteren, dass die hier vorgelegte Dissertation nicht in gleicher oder in ähnlicher Form bei einer anderen Stelle zur Erlangung eines akademischen Grades eingereicht wurde.

Mainburg, 01.09.2022

Ort, Datum

Andreas Harrieder

Unterschrift Doktorandin bzw. Doktorand

Inhaltsverzeichnis

Affidavit	4
Inhaltsverzeichnis	5
Abkürzungsverzeichnis	6
Publikationsliste	7
1. Eigenanteil an den Arbeiten	8
1.1 Eigenanteil an Publikation 1	8
1.2 Eigenanteil an Publikation 2	9
2. Einleitung	11
2.1 Hintergrund	11
2.2 Zielsetzungen des Promotionsprojekts	14
2.3 Vorstellung der Einzelprojekte	14
2.3.1 Publikation 1	15
2.3.2 Publikation 2	17
3. Zusammenfassung	19
4. Summary	21
5. Publikation 1: Evaluation der Strahlendosis bei Polytrauma-CT-Untersuchungen eines 64-Zeilen-CT im Vergleich zur 4-Zeilen-CT	23
6. Publikation 2: Dose reduction in 64-row whole-body CT in multiple trauma: an optimized CT protocol with iterative image reconstruction on a gemstone-based scintillator	31
7. Literaturverzeichnis	37
Danksagung	39

Abkürzungsverzeichnis

ALARA-Prinzip	“as low as reasonably achievable”-Prinzip (<i>Grundprinzip die Strahlendosis so gering wie möglich und zur Diagnostik notwendig zu halten</i>)
ASiR	Adaptive Statistische Iterative Rekonstruktion, englisch “Adaptive Statistical Iterative Reconstruction” (<i>Produktname eines iterativen CT-Rekonstruktionsalgorithmus der Firma GE Healthcare</i>)
CT	Computertomographie
CTDI	CT Dosis Index, englisch „Computed Tomography Dose Index“
DLP	Dosis-Längen-Produkt, englisch „Dose Length Product“
FBP	Gefilterte Rückprojektion, englisch „Filtered Back Projection“ (<i>langjähriger Standardalgorithmus zur CT-Bildrekonstruktion</i>)
GKCT bzw. WBCT	Ganzkörper-Computertomographie, englisch “Whole-Body Computed Tomography”
ISS	Injury Severity Score
MDCT bzw. MSCT	Multidetektor- bzw. Mehrschicht-Computertomographie
mSv	Millisievert
mGy	Milligray
NI	Rauschindex, englisch “noise index”
PACS	Picture Archiving and Communication System
SPSS	Statistical Package for the Social Sciences

Publikationsliste

1. **Harrieder, A.**, Geyer, L. L., Körner, M., Deak, Z., Wirth, S., Reiser, M., Linsenmaier, U., Evaluation der Strahlendosis bei Polytrauma-CT Untersuchungen eines 64-Zeilen-CT im Vergleich zur 4-Zeilen-CT. *Rofo*, 2012. **184**(5): p. 443-9.
2. Geyer, L. L., Körner, M., **Harrieder, A.**, Mueck, F. G., Deak, Z., Wirth, S., Linsenmaier, U., Dose reduction in 64-row whole-body CT in multiple trauma: an optimized CT protocol with iterative image reconstruction on a gemstone-based scintillator. *Br J Radiol*, 2016. 89(1061): p. 20160003.

1. Eigenanteil an den Arbeiten

Beide Einzelprojekte wurden mir von der wissenschaftlichen Arbeitsgruppe Notfalldiagnostik des Instituts für klinische Radiologie des LMU Klinikums, Standort Innenstadt, unter Leitung von Prof. Dr. Linsenmaier ermöglicht. Die Ergebnisse der Studien konnten durch Mithilfe der Mitglieder der Arbeitsgruppe erfolgreich als Originalarbeiten veröffentlicht werden. Der von mir eigenständig geleistete Anteil an den Arbeiten dieser retrospektiven Studien setzt sich neben der Ausarbeitung des Themas und der Zielsetzung, Mithilfe bei der Planung der Studie, Durchführung der Datenauswertung und Verfassung des ersten Manuskripts und der Hauptanteile des zweiten Manuskripts wie folgt zusammen.

1.1 Eigenanteil an Publikation 1

Als Grundlage diente eine systematische Datenbankanalyse des Radiologischen Informationssystems (RIS) und des internen Polytraumaregisters. Im Zuge der Datenerfassung erstellte ich zunächst Patientenlisten aller Polytrauma-CT-Untersuchungen, welche in den Jahren 2003-2005 und 2008-2010 am Institut für Klinische Radiologie, Campus Innenstadt, der LMU München durchgeführt worden waren. Eine erste Strukturierung erfolgte durch Zuordnung der Daten zu dem jeweils eingesetzten CT-Gerät. Es wurden die Daten aus ca. 100 Untersuchungen eines 4-Zeilen-CT-Geräts (Volume Zoom, Siemens Healthcare) und ca. 230 Untersuchungen eines ersten 64-Zeilen-CT-Systems (Lightspeed VCT XT, GE Healthcare) systematisch erfasst, auf Vollständigkeit geprüft und eine Excel Tabelle übertragen. Haupteinschlusskriterium zur weiteren Analyse war ein kompletter Dosisbericht. Alle vollständigen Dosisberichte wurden aus dem PACS (Picture Archiving and Communication System) exportiert und in einer Bilddatenbank gespeichert. Gleichzeitig diente die von mir erstellte Patientendatenbank als Grundlage zur Analyse der biometrischen Daten der Patienten (zur Vergleichbarkeit der Studiengruppen) und Auswertung der CT-Bilder hinsichtlich Bildqualität und Verletzungsmuster durch die Kollegen der Arbeitsgruppe Notfallradiologie. Aus den Dosisberichten wurden für jede einzelne Untersuchung die Scanlänge für Schädel, Hals/Thorax und Abdomen/Becken ermittelt und mit den anderen relevanten Dosisindikatoren (CT Dosis Index, CTDI, und Dosis-Längen-Produkt, DLP) in die Patientenlisten übertragen. Anschließend nahm ich eine Abschätzung der effektiven

Dosis durch Umrechnung des DLP mit dem Normalisierungskoeffizienten entsprechend der Europäischen Leitlinien zur Qualitätssicherung in der Computertomographie vor [1]. Die statistische Auswertung führte ich mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS Version 18 nach Einweisung durch Priv.-Doz. Dr. Körner durch. Bei der statistischen Auswertung wurde auf signifikante Unterschiede mit dem Mann-Whitney-U-Test untersucht. Das Signifikanzniveau lag bei $p < 0,05$. Erste Ergebnisse meiner Studie präsentierte ich in Form eines Vortrags auf einem CT-Symposium am 25.06.2010 in München. Nach ausgiebiger Literaturrecherche wurde zunächst der erste Artikel eigenständig von mir in deutscher Sprache verfasst. Nach Überarbeitung und Korrektur wurde dieser Artikel, unter Anleitung von Priv.-Doz. Dr. Körner und Prof. Dr. Linsenmaier, von mir in der deutschsprachigen Fachzeitschrift „RöFo: Fortschritte auf dem Gebiet der Röntgenstrahlen und bildgebenden Verfahren“ im Jahr 2012 eingereicht und zur Publikation angenommen.

1.2 Eigenanteil an Publikation 2

Basis für das zweite Einzelprojekt bildete wiederum die von mir durchgeführte systematische Datenbankanalyse zur Erfassung der Studiendaten sowie die anschließende Strukturierung der Daten. Als Referenzgruppe wurden die ca. 230 Untersuchungen des ersten 64-Zeilen-CT-Systems (Lightspeed VCT XT, GE Healthcare) definiert; als Studiengruppe wurden zusätzlich ca. 60 Datensätze eines zweiten 64-Zeilen-CT-Systems (Discovery CT 750HD, GE Healthcare) erhoben. Die Ein- und Ausschlusskriterien wurden analog zum ersten Einzelprojekt definiert. Mein Eigenanteil bei der Datenerhebung, -strukturierung und -auswertung von Projekt 2 entspricht dem von Projekt 1. Zur Veröffentlichung der Ergebnisse des zweiten Einzelprojekts verfasste ich eigenständig nach Auswertung der Daten bei einer Gruppengröße von jeweils 55 GKCT-Untersuchungen ein vorläufiges, grundsätzlich vollständiges Manuskript in deutscher Sprache. Diese Arbeit diente als Grundlage zur erfolgreichen Publikation der Studienergebnisse. Um die statistische Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen, wurden durch Priv.-Doz. Dr. Geyer die Studiendaten noch weitere 21 GKCT-Untersuchungen von Polytrauma-Patienten eingeschlossen und ausgewertet. Die vollständigen Ergebnisse wurden abschließend statistisch ausgewertet und das Manuskript entsprechend aktualisiert. Nach Übersetzung meiner Vorlage ins Englische konnten die Ergebnisse des zweiten

Einzelprojekts erfolgreich durch Priv.-Doz. Dr. Geyer als Erst-, Prof. Dr. Linsemaier als Letzt- und mich als Ko-Autor im Jahr 2016 in der wissenschaftlichen Fachzeitschrift „BJR – The British Journal of Radiology“ veröffentlicht werden. Der von mir verfasste, vorläufige Artikel diente dabei als Basis für diese Originalarbeit.

Die oben genannten Tätigkeiten wurden von mir eigenverantwortlich durchgeführt, wobei regelmäßig Kontakt (arbeitstäglich telefonisch oder per Email, zudem regelmäßige Meetings der gesamten Arbeitsgruppe) zu den promovierten Mitarbeitern sowie dem Doktorvater bestand. Darüber hinaus unterstützten mich die anderen Ko-Autoren bei der Literaturrecherche, bei speziellen Fragen oder der Überarbeitung des Manuskriptes.

Die beiden genannten Originalpublikationen mit einer Erst- und einer Ko-Autorenschaft in wissenschaftlich anerkannten, PubMed-gelisteten Fachzeitschriften sind das Ergebnis dieser eigenverantwortlichen Arbeit.

2. Einleitung

2.1 Hintergrund

Unfälle, besonders stumpfe Traumata und Verletzungen stellen in der Bevölkerungsgruppe bis zum 45. Lebensjahr eine der Haupttodesursachen und bezogen auf alle Altersgruppen die fünfthäufigste Todesursache dar [2-4]. In der Bundesrepublik Deutschland ereignen sich jährlich etwa 7-8 Millionen Unfälle. Nach Angaben des statistischen Bundesamtes ereignen sich pro Jahr mehr als 2.500.000 Straßenverkehrsunfälle. In mehr als 300.000 Fällen kommt es dabei zu Personenschäden [5]. Meist treten hierbei nur leichte Verletzungen auf; ca. 10-12% (ca. 35.300 Fälle) gelten jedoch als Schwerverletzte, insbesondere in Form eines Polytraumas [6, 7].

Bei einem Polytrauma handelt es sich um die Verletzung mehrerer Körperregionen oder Organsysteme, von denen mindestens eine oder die Kombination mehrerer Verletzungen lebensbedrohlich ist [8]. Neben dieser deskriptiven Definition können diese Patienten anhand des objektiven Summenscores „Injury Severity Score“ (ISS) klassifiziert werden. Ein Polytrauma-Patient weist per definitionem einen ISS von ≥ 16 auf [9].

Aus radiologischer Sicht stellt die Diagnostik mehrfachverletzter Patienten eine der anspruchsvollsten und herausforderndsten Aufgaben in der Notfalldiagnostik dar. Der Faktor Zeit, sinnbildlich in der sogenannten „golden hour of shock“ widergespiegelt, spielt eine herausragende Rolle für den klinischen Verlauf und die Prognose des Patienten [8, 10].

Um schwerwiegende Verletzungen unverzüglich und exakt diagnostizieren zu können und dem Patienten die richtige Therapie zukommen zu lassen, hat sich die Ganzkörper-CT (GKCT) bei der Initialversorgung polytraumatisierter Patienten als konkurrenzloses Standardverfahren etabliert [11-14]. Auf Grund des enormen Zeitvorteils und der detaillierten Erfassung aller akut lebensbedrohlichen Verletzungen hat die Mehrschicht-Computertomographie (MSCT) bei der apparativen Untersuchung von Schwerverletzten andere bildgebende Verfahren, wie die konventionelle Röntgendiagnostik und die Abdomensonographie, in der Akutphase nahezu vollständig ersetzt [15]. Da die MSCT zudem nachweisbar zu einem signifikanten Rückgang der Mortalität beiträgt [16], wird sie konsequenterweise als zentrale Diagnostikmethode in der initialen Schockraumversorgung bei

mehrfachverletzten Patienten empfohlen. Abgesehen von den unbestreitbaren klinischen Vorteilen, die diese Untersuchungsmethode mit sich bringt, gilt die MSCT als strahlenintensives Diagnostikverfahren und wird vor diesem Hintergrund immer wieder kritisch diskutiert [17-19].

Laut Bundesamt für Strahlenschutz beläuft sich die durchschnittliche jährliche Strahlenbelastung durch medizinische Untersuchungen, für das Jahr 2016 auf ca. 1,6 mSv pro Person. CT-Untersuchungen sind jedoch für ca. 67% der verabreichten effektiven Gesamtdosis verantwortlich, obwohl sie nur ca. 9% aller durchgeführten medizinischen Untersuchungen mit Röntgenstrahlung ausmachen [20]. Zudem belegen internationale Studien, dass sich die Gesamtstrahlenbelastung durch CT-Untersuchungen innerhalb von fünf Jahren fast verdoppelt hat; was im Rahmen der Notfalldiagnostik unter anderem auf eine deutlich gestiegene Anzahl der CT-Untersuchungen zurückgeführt werden kann [21].

Zurückzuführen ist diese Entwicklung vor allem auf die rasanten Fortschritte auf dem Gebiet der Computertomographie (CT). Die frühen Meilensteine der CT Forschung umfassten im Wesentlichen technische Aspekte der CT Hardware mit Einführung der Spiral-CT (im Gegensatz zur ursprünglichen rein sequentiellen CT) [22], die Etablierung der Mehrschicht-CT (MSCT) [23], die Implementierung von Zwei-Röhren-CT-Systemen, sogenannte Dual-Source-CT [24] und die darauf folgende Fortentwicklung zu CT-Systemen mit stetig zunehmender Detektorbreite mit 320 Zeilen [25] bis hin zu 640 Zeilen Systemen [26]. In der klinischen Anwendung waren durch diese technischen Entwicklungen meist eine erhöhte diagnostische Präzision und zunehmende klinische Vielseitigkeit festzustellen. Folglich konnten die klinischen Einsatzbereiche der CT flächendeckend stets gefestigt und stellenweise sogar erweitert werden, was sich am Beispiel der erwähnten Zunahme der CT Notfalluntersuchungen eindrücklich nachvollziehen lässt.

Es wird jedoch vermutet, dass die immer häufiger angewandten radiologischen Untersuchungen und die dadurch erhöhte Strahlenbelastung zu einem gesteigerten Lebenszeit-Risiko der Bevölkerung an Krebs zu erkranken beitragen könnten [27, 28]. Da – wie bereits eingangs erwähnt – gerade junge Patienten von Verletzungen und Unfällen gehäuft betroffen sind, kommt der Risiko-Nutzen-Abwägung zwischen Strahlenbelastung und Auswirkung auf Morbidität bzw. Mortalität eine besondere Bedeutung in der Polytraumaversorgung zu. Schätzungen früherer Studien gehen

davon aus, dass die effektive Strahlendosis für den einzelnen Patienten bei ca. 10-20 mSv liegt [16] und auch Spitzenwerte von über 30 mSv pro GKCT regelmäßig erreicht werden können [18]. Meist handelt es sich bei einem Polytrauma zwar um ein einmaliges, aber lebensbedrohliches Ereignis, so dass sich die Strahlenexposition durch die anzunehmende Steigerung der Überlebenschance rechtfertigen lässt [11, 16, 29]. Dennoch gebietet es das ALARA-Grundprinzip („as low as reasonably achievable“), die Dosis jeder einzelnen Untersuchung mit Röntgenstrahlung so gering wie möglich zu halten.

Ergebnisse von Kahn et al. zeigen, dass durch die iterative Rekonstruktion und Anpassung der Röhrenspannung bei der GKCT polytraumatisierter Patienten eine Dosisreduktion zwischen 23% und 40% möglich ist [30, 31].

Nicht nur in der Polytraumadiagnostik spielt das Thema der Dosisreduktion eine große Rolle. Gerade Mehrfach- und Kontrolluntersuchungen bei onkologischen Patienten tragen erheblich zur Strahlenbelastung bei. Studien auf diesem Gebiet der radiologischen Diagnostik, zeigen eine mögliche Dosisersparung bei Thorax-CT-Untersuchungen um 47% durch Senkung der Röhrenspannung von 120 KV auf 80 KV [32].

Abgesehen von der unabdingbaren Überprüfung der rechtfertigenden Indikation stellt die wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den technischen Möglichkeiten zur Dosisreduktion, z.B. durch Optimierung der Untersuchungsparameter oder Implementierung von Softwarealgorithmen, weiterhin ein Kernthema der aktuellen CT Forschung dar [33-35].

2.2 Zielsetzungen des Promotionsprojekts

Ziel dieses Promotionsprojektes ist es technische Einflussfaktoren und Möglichkeiten zur Reduktion der Strahlendosis zu untersuchen, die im Rahmen der GKCT von schwer- und mehrfachverletzten Patienten auftritt. Es wurden folgende zwei Fragestellungen im Rahmen zweier Einzelprojekte bearbeitet:

1. Hat die Weiterentwicklung der CT-Hardware vom 4-Zeilen-CT zum 64-Zeilen-CT einen nachweisbaren Einfluss auf die applizierte Strahlendosis im Rahmen der GKCT von Polytrauma-Patienten?
2. Kann durch Einsatz eines 64-Zeilen CT-Systems mit der Möglichkeit zur iterativen Bildrekonstruktion eine Reduktion der Strahlendosis bei Polytrauma-Patienten erzielt werden?

2.3 Vorstellung der Einzelprojekte

Im ersten Einzelprojekt soll die oben skizzierte Entwicklung der CT-Hardware mit dem Fokus auf die damit verbundene Strahlenexposition dargestellt werden. Hierzu erfolgt die Analyse von Datensätzen eines 4-Zeilen CT-Systems mit denen eines 64-Zeilen CT-Systems. Im zweiten Einzelprojekt soll durch den Vergleich zweier 64-Zeilen CT-Plattformen untersucht werden, welche Möglichkeiten zur Dosisreduktion der routinemäßige Einsatz der iterativen Bildrekonstruktion bietet.

Beide Studien sind retrospektiv konzipiert. Die Auswertung konzentriert sich methodisch in beiden Studie auf den Vergleich der geschätzten mittleren effektiven Dosis bei Ganzkörper-CT-Untersuchungen von polytraumatisierten Patienten. Als Grundlage dienen die archivierten Dosisberichte der jeweiligen GKCT-Untersuchungen, die in den Jahren 2003 bis 2010 am Institut für Klinische Radiologie der LMU, Standort Innenstadt, im Rahmen der Polytraumaversorgung durchgeführt wurden. Die Einhaltung einer diagnostischen Bildqualität ist Voraussetzung für alle CT-Untersuchungen. Die Einstellungen der angewandten CT-Protokolle sind jeweils an die klinischen Erfordernisse und den technischen Möglichkeiten des jeweiligen CT-Geräts angepasst. Im ersten Einzelprojekt ist der Hauptunterschied der beiden eingesetzten CT-Systeme die Anzahl der Detektorzeilen (4-Zeilen MSCT bzw. 64-Zeilen MSCT). Im zweiten Einzelprojekt unterscheiden sich die beiden evaluierten

CT-Systeme hauptsächlich in der eingesetzten Softwarelösung zur Bildrekonstruktion (gefilterte Rückprojektion, FBP, bzw. iterative Rekonstruktion, IR). Beide Projekte zusammen ermöglichen einen repräsentativen Überblick über die technische Entwicklung der MSCT und erlauben Rückschlüsse, inwieweit der Einsatz moderner Technologien zur Reduktion der Strahlendosis von GKCT-Untersuchungen im Rahmen der Polytraumdiagnostik beiträgt.

2.3.1 Publikation 1 „Evaluation der Strahlendosis bei Polytrauma-CT-Untersuchungen eines 64-Zeilen-CT im Vergleich zur 4-Zeilen-CT“

Die erste Studie dieser Promotion mit dem Titel „Evaluation der Strahlendosis bei Polytrauma-CT-Untersuchungen eines 64-Zeilen-CT im Vergleich zur 4-Zeilen-CT“ wird anhand der Daten von zwei CT-Systemen mit unterschiedlicher Detektorausstattung durchgeführt. Als Kernthema der Studie wird die Strahlendosis eines 4-Zeilen-CT (Volume Zoom, Siemens Healthcare) mit der eines 64-Zeilen-CT (LightSpeed VCT XT, GE Healthcare) unter Berücksichtigung der jeweils unterschiedlichen technischen Voraussetzungen miteinander verglichen. Die durchgeführten Ganzkörper-CT-Untersuchungen werden nach dem jeweils gültigen klinischen Standardprotokoll des Institutes durchgeführt. Die Scanparameter und Untersuchungsbedingungen sind im Einzelnen jedoch bei unterschiedlichen technischen Voraussetzungen der verwendeten CT-Systeme anhand klinischer Erfahrungswerte an die jeweilige Ausstattung angepasst. Unterschiede ergeben sich bei der Durchführung der CT des Schädels (4-Zeilen-CT: Sequenzmodus mit Gantry-Kippung mit Aussparung des Mittelgesichts; 64-Zeilen-CT: Spiralmodus ohne Gantry-Kippung inklusive Mittelgesicht). Die Lagerung der Patienten auf dem Untersuchungstisch unterscheidet sich ebenfalls: bei dem 64-Zeilen-CT werden die Arme des Patienten vor dem Abdomen über Kreuz gelegt, um die Artefakte zu reduzieren; beim 4-Zeilen-CT werden die Arme seitlich an den Körper angelegt. Aus Studien anderer Arbeitsgruppen ist jedoch bekannt, dass zwischen diesen beiden Arten der Armlagerung kein signifikanter Unterschied im Hinblick auf die Strahlendosis besteht [36]. Die Thorax- und Abdomen-Spirale werden bei beiden Geräten separat voneinander gefahren. Die CT von Hals und Thorax werden jeweils in arterieller Phase, die CT von Abdomen einschließlich Becken jeweils in porto-venöser Phase untersucht. Es werden nur Untersuchungen von Patienten

ausgewertet, die durch die Rettungsleitstelle präklinisch als Polytrauma-Patient klassifiziert sind, im Rahmen der initialen klinischen Einschätzung im Schockraum ein GKCT indiziert und die GKCT-Untersuchung mittels instituts-spezifischem Standardprotokoll durchgeführt wird und der Dosisbericht (zum Zeitpunkt der Datenauswertung) vollständig vorliegt. Zunächst soll im Rahmen dieser Studie untersucht werden, ob es durch die Verwendung eines CT Gerätes neuerer Generation und anderer Technik zu einer Reduktion oder zu einem Anstieg der effektiven Dosis und damit zum Anstieg der Strahlenbelastung für den Patienten kommt. Nach Auswertung der Daten der Dosisberichte und Berechnung der geschätzten effektiven Dosis anhand des Dosis-Längen-Produkts (DLP) kann gezeigt werden, dass es bei dem moderneren 64-Zeilen-CT auf Grund eines Anstiegs der Scanlänge um 13 Prozent zu einer Dosissteigerung um 8 Prozent kommt. Wird jedoch allein der CT Dosis Index (CTDI) als Maß für die normalisierte Dosisleistung betrachtet, kann festgestellt werden, dass bei gleicher Scanlänge eine Reduktion der Strahlendosis im Bereich des Thorax und Abdomen um bis zu 12 Prozent möglich ist. Abschließend lässt sich also feststellen, dass der Einsatz eines 64-Zeilen CT-Geräts im Vergleich zu einem 4-Zeilen-CT prinzipiell den Vorteil einer substantiellen Dosisersparnis im Rahmen der Polytraumadiagnostik mit sich bringt. Gleichzeitig erlaubt der Einsatz der 64-Zeilen-CT durch eine erhöhte Untersuchungsgeschwindigkeit und verbesserte Volumenabdeckung das GKCT-Protokoll flexibel an das individuelle Verletzungsmuster des Patienten anzupassen. Dies birgt die Gefahr einer systematischen Vergrößerung des Scanvolumens und einer damit verbundenen Erhöhung der Gesamtdosis. Abgesehen von diesem möglichen Fallstrick erweisen sich die technischen Fortschritte der 64-Zeilen-CT jedoch im Rahmen der radiologischen Polytraumadiagnostik vor allem unter Dosisaspekten als vorteilhaft im Vergleich zur 4-Zeilen-CT.

2.3.2 Publikation 2 „Dose reduction in 64-row whole-body CT in multiple trauma: an optimized CT protocol with iterative image reconstruction on a gemstone-based scintillator“

Aufbauend auf die Erkenntnisse des ersten Einzelprojekts soll nun in einem zweiten Einzelprojekt untersucht werden, wie sich die Implementierung eines spezifischen iterativen Rekonstruktionsalgorithmus in ein 64-Zeilen CT-System auf die applizierte Strahlendosis bei GKCT-Untersuchungen von Polytrauma-Patienten auswirkt (Titel: „Dose reduction in 64-row whole-body CT in multiple trauma: an optimized CT protocol with iterative image reconstruction on a gemstone-based scintillator“). Während im ersten Projekt zwei CT-Geräte unterschiedlicher Hardware Generationen (4-Zeilen-CT vs. 64-Zeilen-CT) miteinander verglichen wurden, werden im Rahmen des zweiten Projekts zwei CT-Geräte derselben Hardware Generation mit jeweils 64-Zeilen Detektorgröße (Scanner A: LightSpeed VCT XT, Scanner B: Discovery 750HD) gegenüber gestellt. Der Unterschied der CT Geräte desselben Herstellers besteht darin, dass das zweite CT-System mit einem (zum Zeitpunkt der Datenerhebung) neuartigen Software-Algorithmus zur iterativen Bildrekonstruktion (Produktname: ASiR, adaptive statistical iterative reconstruction, GE Healthcare), ausgestattet ist, der speziell zur Reduktion der Strahlendosis durch Verminderung des Bildrauschens entwickelt wurde, und auch andere Systemkomponenten (u.a. der Detektor) auf diesen Software-Algorithmus abgestimmt sind. Auch in dieser Studie liegt der Fokus auf der Analyse der applizierten Strahlendosis durch die beiden verwendeten 64-Zeilen CT-Systeme im Rahmen der Polytrauma-Versorgung. Die Aspekte der Bildqualität der GKCT Untersuchungen werden berücksichtigt, spielen jedoch nur eine untergeordnete Rolle. Da es sich bei Scanner B um eine Weiterentwicklung auf Basis des Scanners A handelte, sind sie technisch gut vergleichbar. Der wichtigste Unterschied liegt in der Bildverarbeitungssoftware: in Scanner A werden alle CT-Bilder mittels gefilterter Rückprojektion (FBP, englisch „filtered back projection“) erstellt; in Scanner B erfolgt die Bildrekonstruktion mittels iterativer Rekonstruktion (ASiR, englisch „adaptive statistical iterative reconstruction“). Während die gefilterte Rückprojektion das langjährig etablierte, klinische Standardverfahren zur Bildrekonstruktion darstellt, findet die iterative Bildrekonstruktion erstmals mit Scanner B ihren klinisch praktikablen Einsatz in dem

Gebiet der Computertomographie. Auf Basis initialer Erfahrungswerte mit dem klinischen Einsatz der iterativen Bildrekonstruktion werden bei Scanner B die Werte des sogenannten Rauschindex (NI, englisch „noise index“) für die zu untersuchenden Körperregionen so angepasst, so dass letztlich eine subjektiv vergleichbare und gewohnte Bildqualität erzielt wird: Schädel – NI 6.0 und ASiR Level 30 (Scanner A: NI 5.2, kein ASiR); Hals/Thorax und Abdomen/Becken – NI 46.0 und ASiR level 50 (Scanner A: NI 29.0, kein ASiR). Weitere Scanparameter sind für beide Geräte identisch und werden während der Studie konstant gehalten. Der Schädel, welcher das Mittelgesicht beinhaltet, wird jeweils im Spiralmodus ohne Gantry-Kippung gescannt. Die Thorax- und Abdomen-Spirale werden separat voneinander gefahren: CT Hals und Thorax in arterieller Phase, CT Abdomen und Becken in porto-venöser Phase. Die Arme werden während der CT-Untersuchung vor dem Abdomen gekreuzt, um neben einer Protokollstandardisierung eine Reduktion der Aufhärtungsartefakte zu erreichen. Die Einschlusskriterien der Patienten entsprechen denen der ersten Studie; die Datenauswertung erfolgt ebenfalls analog der ersten Studie. Nach Erfassung aller relevanten Daten (Scanlänge, CTDI, DLP) und Abschätzung der effektiven Dosis kann festgestellt werden, dass sich keine Unterschiede bezüglich der Scanlänge der untersuchten Körperregionen ergeben. Außerdem kann gezeigt werden, dass eine Reduktion der Strahlenbelastung, bezogen auf die einzelnen Körperregionen, zwischen 9 Prozent und 34 Prozent möglich ist. Betrachtet man die Gesamtdosis der GKCT-Untersuchung kann unter Verwendung eines MSCT-Systems, welches die Möglichkeit der iterativen Bildrekonstruktion bietet und die übrigen technischen Komponenten entsprechend abgestimmt sind, die Strahlendosis um etwa 30 Prozent reduziert werden. Gerade im Hinblick auf das durchschnittlich junge Patientenalter von Schwer- und Mehrfachverletzten bieten derartige Entwicklungen die Basis, die Akzeptanz der GKCT bei Polytrauma-Patienten weiter zu fördern.

3. Zusammenfassung

Die hier vorliegende kumulative Dissertation beinhaltet zwei Originalarbeiten, die sich beide auf die Aspekte der applizierten Strahlendosis bei GKCT-Untersuchungen von Polytrauma-Patienten befassen. Ziele des Promotionsprojektes sind die Evaluation von Hardware- und Software-Entwicklungen auf dem Gebiet der CT und die Untersuchung von deren Einfluss auf die Strahlenexposition von Schwer- oder Mehrfachverletzten durch GKCT.

Das wissenschaftliche Interesse an dieser Arbeit ist durch die Tatsache begründet, dass die GKCT sich als Goldstandard zur schnellen Diagnosestellung bei der Initialversorgung Schwerstverletzter etabliert hat und durch kein anderes diagnostisches Verfahren in der Akutphase austauschbar ist [11-13]. Jedoch hat die Zahl der Multidetektor-CT-Untersuchungen als Erstlinien Bildgebung in der Notfallradiologie, hauptsächlich aufgrund seiner breiten Verfügbarkeit und kurzen Scandauer, in den letzten Jahren drastisch zugenommen. Allein in den USA wurden in den letzten Jahren mehr als 70 Millionen CT-Scans pro Jahr durchgeführt [37]. Obwohl das Patientenaufkommen in der Notaufnahme in den USA zwischen den Jahren 2000 und 2005 nur um etwa 13% gestiegen ist, war die Anzahl der CT-Untersuchungen je nach Einrichtung und relevanter Körperregion zwischen 51% und 463% angestiegen [21]. Deshalb ist es umso wichtiger die Strahlendosis für medizinische Untersuchungen und die damit verbundene potentiell krebserzeugende Wirkung so gering wie möglich zu halten, da es sich bei Polytrauma-Patienten oft um sehr junge Patienten unter 45 Jahren handelt.

In der ersten Arbeit *„Evaluation der Strahlendosis bei Polytrauma-CT-Untersuchungen eines 64-Zeilen-CT im Vergleich zur 4-Zeilen-CT“* werden die mittleren effektiven Dosiswerte eines 4-Zeilen-CT mit denen eines 64-Zeilen CT miteinander verglichen. Bereits hier kann gezeigt werden, dass durch den Einsatz eines 64-Zeilen-CT in der Polytraumaversorgung, die normalisierte Strahlendosis, repräsentiert durch den sogenannten CT Dosis Index, für die Körperstammuntersuchung deutlich gesenkt werden kann. Die schnellere Untersuchungsgeschwindigkeit und die Anpassung des Scanprotokolls bieten gegenüber der 4-Zeilen-CT praktische Vorteile, sind jedoch gleichzeitig mutmaßlich für einen teilweisen Anstieg der Scanlänge verantwortlich.

In der zweiten Studie „*Dose reduction in 64-row whole-body CT in multiple trauma: an optimized CT protocol with iterative image reconstruction on a gemstone-based scintillator*“, welche folgerichtig die Weiterführung dieser Gesamtarbeit darstellt, werden analog zur ersten Studie die Werte der mittleren effektiven Dosis von zwei 64-Zeilen CT-Systemen berechnet und miteinander verglichen. Auch hier kann nachgewiesen werden, dass es durch das Zusammenspiel mehrerer technischer Neuerungen unter Einhaltung einer vergleichbaren Bildqualität, zu einer signifikanten Reduktion der Strahlendosis bei Ganzkörper-CT-Untersuchungen kommen kann. Der Einsatz der iterativen Bildrekonstruktion an einem CT-System mit darauf abgestimmten technischen Komponenten spielt hierbei eine wesentliche Rolle.

Beide Studien können den Erfolg im Hinblick auf die Dosisersparung durch Implementierung technischer Fortentwicklungen in die GKCT-Protokolle von Polytrauma-Patienten zeigen. Welche technischen Möglichkeiten es noch gibt um Dosis einzusparen, z.B. Dosisüberwachungsprogramme, gilt es in weiteren Studien herauszufinden.

4. Summary

This cumulative dissertation contains two original papers which both deal with the applied radiation dose in MSCT studies of polytrauma patients. The goals of this doctorate are the evaluation of hardware- as well as software developments in the CT area and the study of the impact of the radiation exposure on seriously injured or multi-traumatized patients through MSCT.

The scientific interest in this paper is based on the fact that the MSCT has been established as the gold standard for a fast diagnosis within the initial treatment of severely injured persons and cannot be replaced by another diagnostic procedure during the acute phase [11-13]. However, the number of multidetector CT use has risen dramatically over the last years as the first-line imaging tool in emergency radiology, mostly because of its wide availability and short scan time duration. In the USA alone, the number of CT scans has exceeded 70 million per year in recent years [36]. Although the emergency department patient volumes grew at about 13% between 2000 and 2005 in the USA, the number of CT examinations had increased between 51% and 463%, depending on the institution and the relevant body region [21]. That is why it is even more important to keep the exposure to radiation and the related potential carcinogenic impact as low as possible since polytrauma patients mostly are younger than 45 years.

In the first paper "*Evaluation of Radiation Dose in 64-Row Whole-Body CT of Multiple Injured Patients Compared to 4-Row CT*", the middle effective dose values of a 4-row CT are compared with those of a 64-row CT. It already can be shown that through the usage of a 64-row CT in the polytrauma treatment, the normalized radiation dose, represented by the so called CT dose index, can clearly be reduced for the trunk examination. The higher examination speed and the adjustment of the scan protocol offer practical benefits compared to the 4-row CT, but at the same time they are responsible for a suspected rise of the length of the scan.

In the second paper, "*Dose reduction in 64-row whole-body CT in multiple trauma: an optimized CT protocol with iterative image reconstruction on a gemstone-based scintillator*", which consequently represents the continuation of this comprehensive paper, the middle effective dose values of two 64-row CT are calculated and compared with each other, likewise as in the first study. It can also be shown that the combination of technical developments in compliance with a comparable picture

quality can lead to a significant reduction of the radiation dose in MSCT examinations. The application of iterative image reconstruction in a CT-system with accordingly adjusted technical components plays a significant role.

Both studies can show the succes in regard to a dosis reduction with the implementation of technical development in the MSCT-protocolls of polytrauma patients. What other technical possibilities we have to reduce the dosis, e.g. dose monitoring programms, needs to be clarified in further studies.

5. Publikation 1: Evaluation der Strahlendosis bei Polytrauma-CT-Untersuchungen eines 64-Zeilen-CT im Vergleich zur 4-Zeilen CT

RöFo

Herausgeber

B. Hamm, Berlin
G. Adam, Hamburg
W. Heindel, Münster
H. Schild, Bonn

C. D. Claussen, Tübingen (Bildessay,
Brennpunkt)
M. Forsting, Essen (Neuroradiologie)
T. Helbich, Wien (Der interessante Fall)
J. Lammer, Wien (Interventionelle
Radiologie)
G. Staatz, Mainz (Pädiatrische
Radiologie)
M. Wucherer, Nürnberg (Technik und
Medizinphysik)

Unter Mitwirkung von

H. P. Busch, Trier
F. Diekmann, Berlin
J. Fiehler, Hamburg
R. W. Günther, Aachen
M. Gutberlet, Leipzig
D. Hahn, Würzburg
K. Hausegger, Klagenfurt
M. Heller, Kiel
C. J. Herold, Wien
N. Hosten, Greifswald
W. Hruby, Wien
W. Jaschke, Innsbruck
H.-U. Kauczor, Heidelberg
K.-J. Klose, Marburg
K.-J. Lackner, Köln
M. Langer, Freiburg
U. Mödder, Düsseldorf
E. Rummeny, München
K. Schwaiger, München
W. Steinbrich, Basel
T. J. Vogl, Frankfurt
K.-J. Wolf, Berlin

Redaktionskomitee

T. Albrecht, Berlin
P. Begemann, Düsseldorf
J. Biederer, Kiel
W. Buchberger, Innsbruck
A. Bücker, Homburg/Saar
G. Fürst, Düsseldorf
R. Fischbach, Hamburg
J. Grimm, New York
P. Haage, Wuppertal
C. R. Habermann, Hamburg
A. Heuck, München
M. Horger, Tübingen
T. Jahnke, Kiel
O. Jansen, Kiel
C. Kuhl, Aachen
V. Nicolas, Bochum
C. Nolte-Ernsting, Mülheim/Ruhr
G. Richter, Heidelberg
S. G. Rühm, San Francisco
O. Schäfer, Freiburg
W. Schima, Wien
T. Schmitz-Rode, Aachen
W. Schreiber, Mainz
H. Strunk, Bonn
M. Taupitz, Berlin
M. Uder, Erlangen
M.-M. Uggowitzer, Graz
D. Vorwerk, Ingolstadt
C. Weber, Hamburg
F. Wacker, Hannover
H.-J. Wagner, Berlin
U. Wedegärtner, Hamburg
J. Wildberger, Maastricht

Organ der Deutschen Röntgengesellschaft

Organ der Österreichischen Röntgengesellschaft

Sonderdruck für private Zwecke des Autors

Verlag

Georg Thieme Verlag KG
Rüdigerstraße 14
70469 Stuttgart
www.thieme.de/roefo
www.thieme-connect.de

Evaluation der Strahlendosis bei Polytrauma-CT-Untersuchungen eines 64-Zeilen-CT im Vergleich zur 4-Zeilen-CT

Evaluation of Radiation Dose in 64-Row Whole-Body CT of Multiple Injured Patients Compared to 4-Row CT

Autoren

A. Harrieder, L. L. Geyer, M. Körner, Z. Deak, S. Wirth, M. Reiser, U. Linsenmaier

Institut

Institut für klinische Radiologie, Ludwig-Maximilians-Universität München

Key words

- trauma
- CT spiral
- radiation safety
- head/neck
- thorax
- abdomen

Zusammenfassung

Ziel: Abschätzung der Dosisexposition bei der Ganzkörper-CT-Untersuchung von Polytraumapatienten mittels 4-Zeilen-CT im Vergleich zur 64-Zeilen-CT.

Material und Methoden: Die Dosisberichte von 200 Mehrschicht-CT (MSCT)-Untersuchungen im Rahmen der Polytraumadiagnostik wurden retrospektiv ausgewertet: 92 am 4-Zeilen-MSCT und 108 am 64-Zeilen-MSCT. Die Scanprotokolle waren jeweils für den verwendeten Scanner optimiert. Zur Dosisabschätzung anhand des Dosisberichts wurden der CT-Dosis-Index ($CTDI_{vol}$), die Scanlänge und das Dosis-Längen-Produkt (DLP) analysiert. Die mittleren effektiven Dosiswerte wurden mittels Konversionsfaktoren geschätzt. Die statistische Auswertung erfolgte mittels t-Test.

Ergebnisse: Der mittlere $CTDI_{vol}$ (mGy) für Thorax und Abdomen waren am 64-Zeiler signifikant geringer ($10,2 \pm 2,5$ vs. $11,4 \pm 1,4$, $p < 0,001$; $14,2 \pm 3,7$ vs. $16,1 \pm 1,7$, $p < 0,001$). Das DLP ($mGy \times cm$) des Schädels und Thorax waren am 64-Zeilen-CT signifikant erhöht ($1305,9 \pm 201,1$ vs. $849,8 \pm 90,9$, $p < 0,001$; $504,4 \pm 134,4$ vs. $471,5 \pm 74,1$, $p = 0,030$). Gleichzeitig waren die Scanlängen (mm) am 64-Zeilen-CT signifikant verlängert: Schädel $223,6 \pm 35,8$ vs. $155,5 \pm 12,3$ ($p < 0,001$), Thorax $427,4 \pm 44,5$ vs. $388,3 \pm 57,5$ ($p < 0,001$), Abdomen $520,3 \pm 50,2$ vs. $490,8 \pm 51,6$ ($p < 0,001$). Die mittlere geschätzte effektive Gesamtdosis (mSv) betrug $22,4 \pm 2,6$ (4-Zeilen-CT) bzw. $24,1 \pm 4,6$ (64-Zeilen-CT; $p = 0,001$). Die Erhöhung der Strahlenexposition betrug 8%.

Schlussfolgerung: Mit der Verwendung der 64-Zeilen-CT kann die applizierte Strahlendosis pro Schicht für Thorax und Abdomen signifikant erniedrigt werden. Die gesteigerte Leistungsfähigkeit moderner 64-Zeilen CT-Geräte und die dadurch ohne Zeitverlust ermöglichte Erweiterung des Untersuchungsgebiets können jedoch zu einer Erhöhung der mittleren geschätzten effektiven Gesamtdosis führen.

Abstract

Purpose: To evaluate radiation exposure in whole-body CT (WBCT) of multiple injured patients comparing 4-row multidetector computed tomography (MDCT) to 64-row MDCT.

Materials and Methods: 200 WBCT studies were retrospectively evaluated: 92 4-row MDCT scans and 108 64-row MDCT scans. Each CT protocol was optimized for the particular CT system. The scan length, CT dose index (CTDI), and dose length product (DLP) were recorded and analyzed for radiation exposure. The mean effective dose was estimated based on conversion factors. Student's t-test was used for statistical analysis.

Results: The mean $CTDI_{vol}$ values (mGy) of the thorax and abdomen were significantly reduced with 64-row MDCT ($10,2 \pm 2,5$ vs. $11,4 \pm 1,4$, $p < 0,001$; $14,2 \pm 3,7$ vs. $16,1 \pm 1,7$, $p < 0,001$). The DLP values ($mGy \times cm$) of the head and thorax were significantly increased with 64-row MDCT ($1305,9 \pm 201,1$ vs. $849,8 \pm 90,9$, $p < 0,001$; $504,4 \pm 134,4$ vs. $471,5 \pm 74,1$, $p = 0,030$). The scan lengths (mm) were significantly increased with 64-row MDCT: head $223,6 \pm 35,8$ vs. $155,5 \pm 12,3$ ($p < 0,001$), thorax $427,4 \pm 44,5$ vs. $388,3 \pm 57,5$ ($p < 0,001$), abdomen $520,3 \pm 50,2$ vs. $490,8 \pm 51,6$ ($p < 0,001$). The estimated mean effective doses (mSv) were $22,4 \pm 2,6$ (4-row MDCT) and $24,1 \pm 4,6$ (64-row MDCT; $p = 0,001$), resulting in a percentage increase of 8%.

Conclusion: The radiation dose per slice of the thorax and abdomen can be significantly decreased by using 64-row MDCT. Due to the technical advances of modern 64-row MDCT systems, the scan field can be adapted to the clinical demands and, if necessary, enlarged without time loss. As a result, the estimated mean effective dose might be increased in WBCT.

eingereicht 8.9.2011
akzeptiert 19.12.2011

Bibliografie

DOI <http://dx.doi.org/10.1055/s-0031-1299099>
Online-Publikation: 1.2.2012
Fortschr Röntgenstr 2012; 184: 443–449 © Georg Thieme Verlag KG Stuttgart · New York · ISSN 1438-9029

Korrespondenzadresse

Dr. Lucas L. Geyer
Institut für klinische Radiologie,
Ludwig-Maximilians-Universität
München
Nussbaumstr.20
80336 München
Tel.: ++49/89/51 60 92 10
Fax: ++49/89/51 60 92 12
Lucas.Geyer@med.uni-muenchen.de

Sonderdruck für private Zwecke des Autors

Einleitung

Die Diagnostik mehrfach verletzter Patienten stellt eine der zentralen Aufgaben in der radiologischen Notfalldiagnostik dar. Der Faktor Zeit, der sich in der sogenannten „golden hour of shock“ widerspiegelt, spielt eine wichtige Rolle für den klinischen Verlauf und das Outcome des Patienten [1]. Deshalb ist es von entscheidender Bedeutung, schwerwiegende Verletzungen unverzüglich noch in der Initialphase der Schockraumversorgung zu diagnostizieren, um dem Patienten die adäquate Therapie zukommen zu lassen.

In der diagnostischen Frühphase stehen neben der CT die Abdomensonografie und die konventionelle Röntgenuntersuchung als bildgebende Verfahren zur Verfügung. Die Ganzkörper-CT polytraumatisierter Patienten ist der Thoraxübersichtsaufnahme und der Abdomensonografie jedoch deutlich überlegen, sodass die konventionelle Radiografie nahezu keine Rolle mehr spielt und die Sonografie nur einen untergeordneten Stellenwert besitzt [2]. Die Mehrschicht-CT (MSCT) ermöglicht eine schnelle und umfassende Evaluation aller Organverletzungen von Kopf bis Symphyse [3]. Sie ist daher in der Initialversorgung polytraumatisierter Patienten fest etabliert und kann durch kein anderes Verfahren auch nur annähernd ersetzt werden [4].

Die Grundlage für den herausragenden Stellenwert der CT im Rahmen der Notfalldiagnostik bildet die Einführung der Spiral-CT in die klinische Diagnostik im Jahr 1989 [5] sowie die anschließende rasante Weiterentwicklung der MSCT seit dem Jahr 1998 [6]. Nach den frühen 4-Zeilen-Geräten stehen heute hochleistungsfähige 64- bis 320-Zeilen-Geräte weitverbreitet zur Verfügung. Trotz der überragenden technischen Möglichkeiten wird der zunehmende Einsatz der MSCT aufgrund ihrer vermeintlich relativ hohen Strahlenbelastung stets kritisch diskutiert [7, 8].

Die exakte Dosisexposition einer Ganzkörper-CT für den einzelnen Patienten ist nicht bekannt, Schätzungen gehen in der Regel von mindestens 10–20 mSv aus [9]. Bei mehrphasigen Untersuchungen und Wiederholungsuntersuchungen kann die Strahlenbelastung erheblich kumulieren.

Das durch Strahlenexposition gesteigerte Krebsrisiko erfordert, dass die Dosis für jede einzelne Untersuchung so gering wie möglich gehalten werden muss. Ob der Einsatz der 64-Zeilen-MSCT in der Notfalldiagnostik mit einer gesteigerten Strahlenexposition im Vergleich zur 4-Zeilen-MSCT einhergeht, soll in dieser Studie untersucht werden.

Material und Methode

Patienten

Im Rahmen dieser Studie wurden die Dosisberichte von Polytraumapatienten ausgewertet, die zwischen 2003 und 2009 eine Ganzkörper-CT-Untersuchung erhalten haben.

Eingeschlossen wurden alle Patienten, die bei Verdacht auf Polytrauma eine Ganzkörper-MSCT nach dem jeweils aktuellen Standardprotokoll des Instituts (Tab. 1) erhalten haben. Ausgeschlossen wurden Patienten, bei denen aufgrund einer speziellen Fragestellung grundlegend vom Standardprotokoll abgewichen wurde, z. B. Ganzkörper-CT-Angiografie, oder die Daten, z. B. der Dosisbericht, unvollständig waren.

Die Indikation zur Ganzkörper-CT wurde interdisziplinär (Anästhesie, Radiologie, Unfallchirurgie) auf Basis der Vitalparameter, des Verletzungsmusters und Unfallmechanismus gestellt (Tab. 2).

Tab. 1 Scanprotokolle am 64- und 4-Zeilen-CT.

	64-Zeilen-CT	4-Zeilen-CT
Planungsscans (Scout)		
Anterior – posterior		
Röhrenspannung	120 kV	120 kV
Röhrenstrom	40 mA	40 mAs
lateral		
Röhrenspannung	120 kV	–
Röhrenstrom	80 mA	–
Schädel		
Rotationszeit	0,5 s	sequenziell
Kollimation	64 × 0,625 mm	4 × 1 bzw. 2,5 mm
Schichtdicke	2,5 mm	2 bzw. 5 mm
Kippung	0°	ca. 25°
Röhrenspannung	120 kV	120 kV
Röhrenstrom, mAs-Produkt	100 – 320 mA, moduliert	250 mAs
Tischvorschub/Rotation	19,4 mm	–
Scandauer	ca. 8 s	ca. 25 s
Kontrastmittelinjektion		
Menge	140 ml	140 ml
NaCl-Bolus	40 ml	–
Flussrate	3,5 ml/s	2,5 ml/s
Monitoring Aorta thoracalis	ja	nein
Hals/Thorax		
Rotationszeit	0,5 s	0,5 s
Kollimation	64 × 0,625 mm	4 × 2,5 mm
Schichtdicke	1,25 mm	5 mm
Röhrenspannung	120 kV	120 kV
Röhrenstrom	100 – 700 mA, moduliert	160 mAs effektiv, moduliert
Tischvorschub	55 mm	12,5 mm
Delay nach KM	3 s nach Monitoring	25 s
Scandauer	ca. 5 s	ca. 14 s
Abdomen/Becken		
Rotationszeit	0,5 s	0,5 s
Kollimation	64 × 0,625 mm	4 × 2,5 mm
Schichtdicke	1,25 mm	5 mm
Röhrenspannung	120 kV	120 kV
Röhrenstrom	100 – 700 mA, moduliert	180 mAs effektiv, moduliert
Tischvorschub	55 mm	12,5 mm
Delay nach KM	ca. 50 s nach Thorax	ca. 70 s
Scandauer	ca. 7 s	ca. 21 s

Tab. 2 Indikationen zur Polytrauma-CT.

Störung der Vitalparameter	
Verletzungsmuster	offene Thoraxverletzung
	instabiler Thorax
	instabile Beckenfraktur
Unfallmechanismus	Frakturen von ≥ 2 großen Röhrenknochen
	Makroamputation
Unfallmechanismus	Explosionsverletzung
	Einklemmung oder Verschüttung
	Sturz > 3 m Höhe
	Tod des Beifahrers
	Fahrzeug überschlagen
	Ejektion aus dem Fahrzeug
	Einklemmung im Fahrzeug
	Zweiradfahrer/Fußgänger angefahren
	Unfall mit hoher Geschwindigkeit

CT-Geräte

Die Ganzkörper-CT-Untersuchungen wurden mit zwei unterschiedlichen MSCT-Geräten durchgeführt: im Zeitraum 05/2003 bis 12/2005 wurden die Patienten an einem 4-Zeilen-CT (VolumeZoom, Siemens, Erlangen, Deutschland), zwischen 08/2008 und 11/2009 an einem 64-Zeilen-CT (Lightspeed VCT XT, GE Healthcare, Wisconsin, USA) untersucht.

Für beide CT-Geräte wurde vor Inbetriebnahme durch den Hersteller eine Abnahmeprüfung durchgeführt, durch die nach § 16 der Röntgenverordnung sichergestellt wurde, dass die erforderliche Bildqualität mit möglichst niedriger Strahlenbelastung erzielt wird. Die Erhaltung der Bildqualität und Strahlenexposition wurde durch regelmäßige Konstanzprüfungen erzielt.

Untersuchungsprotokoll

Die Scan-Parameter wurden den technischen Kapazitäten der beiden MSCT-Scanner und dem aktuellen wissenschaftlichen Kenntnisstand angepasst (Tab. 1). Zudem wurde darauf geachtet, dass die Leitlinien der Bundesärztekammer zur Qualitätssicherung in der Computertomografie und die jeweils aktuellen Dosisreferenzwerte des Bundesamts für Strahlenschutz eingehalten wurden.

Beim 4-Zeilen-CT wurde der Schädel im Sequenzmodus mit Gantry-Kippung gescannt, beim 64-Zeilen-CT wurde die Schädeluntersuchung im Spiralmodus ohne Gantry-Kippung durchgeführt. Thorax und Abdomen wurden separat voneinander untersucht. Die HWS wurde zusammen mit dem Thorax in der arteriellen Phase untersucht; das Abdomen, einschließlich des Beckens, in portalvenöser Phase. Die Arme wurden bei der Untersuchung mit dem 64-Zeilen-CT auf dem Abdomen gekreuzt gelagert; beim 4-Zeilen-CT wurden die Arme während der Schädeluntersuchung nach unten und während der Thorax-Abdomen-Untersuchung nach oben gelagert.

In beiden CT-Protokollen wurden Techniken der Dosismodulation angewendet. Während der 4-Zeilen-MDCT den Röhrenstrom lediglich anatomiebasiert und schwächungswertabhängig in der xy-Ebene (Körperquerschnitt) anpasste (CareDose, Siemens, Erlangen, Deutschland), verfügte der 64-Zeilen-MDCT zusätzlich auch über eine Modulation in z-Richtung, d. h. entlang der Körperlängsachse (xy-Ebene: SmartMA, z-Richtung: AutoMA, GE Healthcare, Waukesha, USA). Durch Anwendung der Röhrenstrommodulation in xy-Ebene können Dosisersparungen zwischen 15% und 70% erzielt werden. Die z-Achsenmodulation führt insgesamt zwar auch zu einer Dosisreduktion, verfolgt primär jedoch das Ziel, das Rauschniveau konstant zu halten [10].

Dosisreferenzwerte und Dosisberechnung

Die Dosisberichte wurden im PACS (Picture Archiving and Communication System) gespeichert und beinhalteten sowohl die Scanlänge für Schädel, Thorax und Abdomen als auch den CT-Dosis-Index ($CTDI_{vol}$) und das Dosislängenprodukt (DLP).

DLP und $CTDI_{vol}$ werden als Dosisreferenzwerte verstanden. In der Bundesrepublik Deutschland erfolgte deren Veröffentlichung und Aktualisierung zuletzt im Jahr 2010 durch das Bundesamt für Strahlenschutz. In der Röntgenverordnung sind die Dosisreferenzwerte definiert als „Dosiswerte für typische Untersuchungen mit Röntgenstrahlung, bezogen auf [...] Patientengruppen mit Standardmaßen [...]“. Für CT-Untersuchungen gilt hierbei der $CTDI_{vol}$ als Orientierungswert und das DLP als eigentlicher Referenzwert pro Scanserie. Das DLP errechnet sich durch Multiplikation des $CTDI_{vol}$ mit der Scanlänge.

Tab. 3 Konversionsfaktoren zur Abschätzung der effektiven Dosis [11].

Körperregion	Konversionsfaktor ($mSv \times mGy^{-1} \times cm^{-1}$)
Kopf	0,0023
Thorax	0,017
Abdomen	0,015

Die effektive Dosis gilt als Parameter, zur Beurteilung der Ganzkörperdosisexposition. Grundlage bildet die Summe der Einzeldosen der Organe im Untersuchungsbereich, die entsprechend ihrer Strahlensensibilität gewichtet werden. In dieser Studie erfolgte die Abschätzung der effektiven Dosis (mSv) mittels Multiplikation des DLP mit einem der entsprechenden Organregion zugeordneten Normalisierungskoeffizienten (Tab. 3), die von der Europäischen Kommission veröffentlicht werden [11]. Grundlage dieser orientierenden Berechnungsmöglichkeit bilden sog. Monte-Carlo-Simulationen unter Berücksichtigung spezifischer ICRP-60-Organ-Wichtungsfaktoren, die die unterschiedliche Strahlensensibilität der einzelnen Körpergewebe und -organe repräsentieren. Deren Veröffentlichung erfolgte durch das internationale Strahlenschutzkomitee (ICRP; „international committee on radiation protection“).

Bildqualität

Da Artefakte und Überlagerungen durch diverse Installationen (Rippenspreizer, Thoraxdrainage, EKG-Kabel, Geräte zur kardiopulmonalen Reanimation etc.) in Abhängigkeit von der klinischen Situation verwendet werden und somit die Bildqualität unterschiedlich beeinflussen, wurde auf eine detaillierte Bewertung der Bildqualität verzichtet. Die beschriebenen Untersuchungsprotokolle wurden bei Geräteinstallation zusammen mit den Herstellern optimiert. Als Indikator einer für die klinische Beurteilung nicht ausreichenden Bildqualität wurde eine Wiederholungsuntersuchung aus nicht medizinischen Gründen herangezogen.

Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mittels SPSS (Version 18, SPSS Inc., Chicago, USA). Alle Daten wurden als Mittelwerte mit der entsprechenden Standardabweichung angegeben. Unter der Annahme der Normalverteilung der Daten wurde der t-Test zur statistischen Evaluation verwendet. Das Signifikanzniveau lag bei $p < 0,05$.

Die a priori durchgeführte Fallzahlschätzung mittels dedizierter Statistiksoftware (G*Power, Version 3.1.3, Franz Faul, Universität Kiel, Deutschland) basierte auf Dosisangaben für die Ganzkörper-CT-Exposition aus der Literatur und ergab bei gleicher Gruppengröße $n = 70$ (zweiseitige Analyse; α -Fehler 0,05; Power 0,80). Abschließend wurde die sog. Power mittels Mittelwertvergleich zweier unabhängiger Stichproben berechnet.

Ergebnisse

Retrospektiv wurden die Daten von 92 Patienten (69 Männer, 23 Frauen, mittleres Alter 44 ± 17 Jahre), die am 4-Zeilen-CT untersucht wurden, mit den Daten von 108 Patienten (75 Männer, 33 Frauen, mittleres Alter 44 ± 15 Jahre), die am 64-Zeilen-CT untersucht wurden, miteinander verglichen.

Die Scanlängen für Schädel, Thorax und Abdomen zeigten beim 64-Zeilen-CT einen relevanten Anstieg im Vergleich zum 4-Zei-

	Kopf	Thorax	Abdomen	Summe
Scanlänge (mm)				
4-Zeilen-CT	155,5 ± 12,3	388,4 ± 57,5	490,8 ± 51,6	1034,6 ± 75,2
64-Zeilen-CT	223,6 ± 35,8 ¹	427,4 ± 44,5 ¹	520,3 ± 50,2 ¹	1171,2 ± 69,9 ¹
CTDI _{vol} (mGy)				
4-Zeilen-CT	53,2 ± 3,2	11,4 ± 1,4	16,1 ± 1,7	
64-Zeilen-CT	53,6 ± 2,4	10,2 ± 2,5 ¹	14,2 ± 3,7 ¹	
DLP (mGy × cm)				
4-Zeilen-CT	849,8 ± 90,9	471,5 ± 74,1	826,9 ± 122,3	
64-Zeilen-CT	1305,9 ± 201,1 ¹	504,4 ± 134,4 ²	833,5 ± 246,8	

¹ p < 0,001.² p < 0,05.

Tab. 4 Mittelwerte ± Standardabweichung für Scanlänge, CTDI_{vol} und DLP.

	Kopf	Thorax	Abdomen	Summe
4-Zeilen-CT	2,0 ± 0,2	8,0 ± 1,3	12,4 ± 1,8	22,4 ± 2,6
64-Zeilen-CT	3,0 ± 0,5 ¹	8,6 ± 2,3 ²	12,5 ± 3,7	24,1 ± 4,6 ¹

¹ p < 0,001.² p < 0,05.

Tab. 5 Geschätzte effektive Dosis (mSv).

len-CT. Die gesamte Scanlänge erhöhte sich um 13%. Die Mittelwerte des CTDI_{vol} für Thorax und Abdomen lagen für den 64-Zeilen-CT signifikant niedriger als beim 4-Zeilen-CT; die mittleren CTDI_{vol} für den Schädel waren vergleichbar hoch. Bei den Mittelwerten des DLP zeigte sich ein signifikanter Anstieg der Werte für Schädel und Thorax beim 64-Zeilen-CT; die DLP-Mittelwerte für das Abdomen hingegen unterschieden sich nicht wesentlich (◉ **Tab. 4**).

Die mittlere effektive Dosis zeigte einen Anstieg von 54% beim Schädel, 7% beim Thorax und 1% beim Abdomen. Die mittlere Dosis einer Ganzkörper-CT-Untersuchung betrug 24,1 mSv (64-Zeilen-CT) bzw. 22,4 mSv (4-Zeilen-CT). Das entspricht insgesamt einer Dosissteigerung von 8% (◉ **Tab. 5**).

Betrachtet man den CTDI_{vol}-Wert als Indikator für die applizierte Dosis pro Schicht errechnet sich eine mögliche Dosisreduktion beim Thorax- bzw. Abdomen-Scan von 11 bzw. 12% beim 64-Zeilen-CT (◉ **Tab. 4**).

Eine Wiederholung der CT-Untersuchung aus nicht medizinischen Gründen, d. h. bei nicht diagnostischer Bildqualität, war bei keinem Patienten notwendig. Die Powerkalkulation anhand der mittleren Gesamtdosis ergab 0,89.

Diskussion

Mit Einführung der Mehrzeilencomputertomografen gewann die CT immer größere diagnostische Bedeutung in der Diagnostik des Polytraumas und ist heute im modernen Polytraumamanagement unersetzbar geworden [12]. Im Vergleich zu den früheren 4-Zeilen-Geräten bietet die 64-Zeilen-MSCT neben einer höheren Ortsauflösung auch deutlich kürzere Untersuchungszeiten [13]. Dies ist entscheidend, da der Faktor Zeit in der diagnostischen Frühphase oberste Priorität hat. Gleichzeitig wird jedoch kontrovers diskutiert, ob die 64-Zeilen-MSCT mit einer erhöhten Strahlenexposition einhergeht.

In der vorliegenden Studie ergab die geschätzte effektive Dosis am 4-Zeilen-Gerät 22,4 ± 2,6 mSv bzw. 24,1 ± 4,6 mSv am 64-Zeilen-Gerät. In der Literatur zeigt sich eine breite Streuung der Dosiswerte für eine Ganzkörper-CT-Untersuchung. Heyer et al. [14] errechnen eine mittlere effektive Dosis unter Anwendung

zwei verschiedener Protokolle an einem 4-Zeilen-CT-Gerät von 10,2 – 12,7 mSv. Ruchholtz et al. [8] hingegen schätzen die mittlere effektive Dosis eines Ganzkörperscans auf 30,05 mSv. Die unterschiedlichen Dosiswerte resultieren am ehesten aus der Verwendung unterschiedlicher Scanparameter und erschweren somit den Vergleich. Im Allgemeinen schätzen Huber-Wagner et al. [9] die mittlere effektive Dosis einer Polytrauma-CT-Untersuchung auf 10 – 20 mSv. Aktuelle Studien mit zu dieser Studie ähnlichem Untersuchungsprotokoll resultieren in effektiven Dosiswerten zwischen 21,2 und 24,69 mSv und sind somit vergleichbar zu den eigenen Ergebnissen [15, 16].

Der Einsatz der 64-Zeilen-CT ergab bei einer Steigerung der gesamten Scanlänge von ca. 13% lediglich einen Anstieg der Gesamtdosis von ca. 8%. Bereits mit der Einführung der Mehrschicht-CT wurde eine Steigerung der applizierten Strahlendosis im Vergleich zur Spiral-CT diskutiert [17], innerhalb der Mehrschicht-CT konnte jedoch sowohl unter experimentellen als auch klinischen Bedingungen keine generelle Dosissteigerung nachgewiesen werden [18]. So wurden in einer experimentellen Thorax-/Abdomen-Phantomstudie von Fujii et al. [19] an verschiedenen 64-Zeilen-CT-Geräten effektive Dosiswerte gemessen, die mit den errechneten Werten aus Phantomstudien an 4-, 8- und 16-Zeilen-Geräten vergleichbar waren [20 – 22]. In der 64-Zeilen-CT stehen vor allem die Strahlengeometrie und die im Randbereich des Untersuchungsgebiets erhöhte applizierte Organdosis zur Diskussion. Dies ist jedoch nur insofern richtig, dass der Anteil der Streustrahlung mit zunehmender Kollimierung bei der 64-Zeilen-CT steigt. Da die Untersuchung am 4-Zeilen-CT für den gleichen Untersuchungsabschnitt mehr Rotationen benötigt, resultiert hieraus in der Summe jedoch keine erhöhte Patientendosis. Zwischenzeitlich konnte sogar bezüglich der kornealen Dosis gezeigt werden, dass die 64-Zeilen-CT im Vergleich zur 16-Zeilen-CT eine signifikante Dosisreduktion zulässt [23]. Die Möglichkeit der Dosismodulation und verbesserte Strahlenfilterung spielen hierbei eine zentrale Rolle [24]. Sowohl im experimentellen als auch im klinischen Setting spielen jedoch die der Fragestellung optimal angepassten Scanprotokolle die letztlich entscheidende Rolle [18]. Unterschiedliche Scanprotokolle sind dennoch zu finden, da sowohl die diagnostische Bildqualität von Institut zu Institut unterschiedlich definiert wird als auch die Patientencharakteristika nicht immer vergleich-

bar sind. So ist z. B. ein japanischer Durchschnittspatient in der Regel kleiner und leichter als ein durchschnittlicher Europäer. Ein internationaler Vergleich der Dosiswerte wird dadurch weiter erschwert.

Die Anpassung der Untersuchungsprotokolle zur Dosisersparnis beim Polytraumapatienten wurde in der Vergangenheit bereits diskutiert. Ptak et al. [25] und Fanucci et al. [26] haben gezeigt, dass eine einphasige Untersuchung (Kopf bis Becken) aufgrund der fehlenden Überlappungen sowohl zu einer signifikanten Dosisersparnis als auch Verkürzung der Untersuchungszeit im Vergleich zu einem segmentalen Untersuchungsprotokoll (Kopf, Hals, Thorax, Abdomen/Becken) führt. Beide Studien waren jedoch vor Einführung der 64-Zeilen-CT durchgeführt worden. Die Weiterentwicklung führt die Umlagerung der Arme während der Körperstammuntersuchung nach oben zu einer signifikanten Dosisreduktion. Aufgrund eines möglichen Zeitverlusts und der Gefahr einer Verletzung der Schulter oder des Plexus brachialis wurde das Institutprotokoll jedoch am 64-Zeilen-CT angepasst. Die Anwendung der 64-Zeilen-CT bei Polytraumapatienten bietet gegenüber früheren CT-Geräten deutliche Vorteile: Zum einen spielt die reine Scanzeit mittlerweile nur noch eine untergeordnete Rolle, da mithilfe der 64-Zeilen-CT eine deutliche Steigerung des Arbeitsflusses erreicht wird [13]. Zum anderen ist die getrennte Nativuntersuchung des Schädels beim Polytrauma unerlässlich. Das weitere Untersuchungsprotokoll kann und sollte bei Bedarf dem Patienten angepasst und ggf. erweitert werden. So kann z. B. eine CT-angiografische Darstellung der Thorax-, Abdomen- oder Extremitätengefäße ohne zusätzliche Kontrastmittelgabe in einer und auch mehreren Phasen erfolgen [27]. Multiplanare Reformationen oder dreidimensionale Visualisierungen erleichtern die Orientierung bzw. erhöhen die diagnostische Sicherheit. Ein Direktzugriff auf den Volumendatensatz beschleunigt zudem den radiologischen Arbeitsablauf, indem unabhängig von der Geschwindigkeit des Krankenhausnetzwerks die strukturierte Bildanalyse erfolgen kann [13].

Die erweiterten diagnostischen Möglichkeiten erklären auch die in der eigenen Studie beobachtete Zunahme der Scanlänge. Der Einschluss des Mittelgesichts im 64-Zeilen-CT-Protokoll erklärt so z. B. das vergrößerte Untersuchungsgebiet in der Schädeluntersuchung. Nachteil ist hierbei jedoch die erhöhte Strahlenexposition der Augenlinsen. Diese wird jedoch auf Kosten des Zeitgewinns durch fehlende Gantrykippen in Kauf genommen. Zudem ist die Kippung der Gantry im Rahmen des Protokolls, bei dem die Füße voran positioniert werden (sog. „feet first“) gerätetechnisch nicht möglich. Ein vereinfachtes visuelles Monitoring des Patienten und die Erleichterung der Durchführung notwendiger Maßnahmen, z. B. Überwachung des Pupillenreflexes oder Intubation, begründen diese Lagerung. Da im Rahmen der Hals/Thorax-Untersuchung die arteriellen Gefäße einschließlich des Circulus arteriosus Willisii beurteilt werden sollen, erklärt sich auch hier die geringe Zunahme dieses Untersuchungsfelds. Da die Scanlänge über die Anzahl der Rotationen in die Berechnung des DLP einfließt, erklärt sich letztlich auch die geringe Dosissteigerung.

Eine Verlängerung der Scanlänge ist zudem auf die Tatsache des Overranging zurückzuführen. Diese zusätzliche Rotation über den eigentlichen Scanbereich hinaus, ist zur Dateninterpolation der ersten und der letzten Schicht notwendig. Die resultierende Dosissteigerung ist umso höher, je kürzer der Untersuchungsabschnitt ist und je mehr Schichten das CT-Gerät aufweist. In der grundsätzlichen Bewertung der Dosisexposition in der Mehrschicht-CT ist ebenso das sog. Overbeaming zu erwähnen. Hierunter versteht man die anteilmäßige Dosissteigerung pro Rotation,

die durch die nicht zur Bilderzeugung verwendbare Penumbra (Halbschatten) des Strahlenfelds außerhalb der aktiven Detektorelemente verursacht wird. Dies spielt vor allem bei dünner Kollimation am 4-Zeilen-CT eine Rolle. Ab der 16-Zeilen-CT ist dieser Effekt jedoch als weniger relevant zu bewerten. In der vorliegenden Studie wurden jedoch nicht nur 2 Systeme mit unterschiedlicher Zeilenanzahl, sondern auch verschiedener Hersteller verglichen. Genauso wie die Hersteller differente Verfahren z. B. zur Dosismodulation anwenden, müssen theoretisch Unterschiede in den Dosiswerten diskutiert werden. Verdun et al. [18] konnten jedoch eine gute Korrelation zwischen den von Herstellern angegebenen, an Phantomen gemessenen und in der Literatur angegebenen $CTDI_{vol}$ -Werten bestätigen.

Der CTDI gilt als ein allgemein anerkannter Indikator der Strahlenexposition und ermöglicht die Vergleichbarkeit verschiedener Scanprotokolle und sogar unterschiedlicher CT-Geräte [28]. Es muss jedoch an dieser Stelle betont werden, dass die Messung des CTDI normalerweise an 2 homogenen, zylindrischen Plexiglasphantomen mit unterschiedlichem Durchmesser (16 cm, 32 cm) vorgenommen wird. Die biometrischen Eigenschaften, wie z. B. Körpergröße, Gewicht, Alter, Geschlecht, des individuellen Patienten werden somit nicht berücksichtigt. Auch technische Faktoren wie die erwähnte Dosismodulation können an einem zylindrischen Phantom nicht nachgeahmt werden. Dennoch ist davon auszugehen, dass die Dosismodulation oder auch zusätzliche Filterungen den CTDI einer Untersuchung beeinflusst, da die im Dosisbericht angezeigten Werte einer Streuung unterliegen; die bei sonst konstanten Untersuchungsparametern nicht zu erwarten wären. Die exakten technischen und mathematischen Hintergründe werden jedoch in der Regel von den Herstellern nicht veröffentlicht und entziehen sich somit einer detaillierten Analyse.

Betrachtet man vor diesem Hintergrund die angegebenen $CTDI_{vol}$ -Werte, so zeigt sich eine signifikante Reduktion in der Thorax- und Abdomenuntersuchung unter Verwendung der 64-Zeilen-Technologie. Hieraus lässt sich schließen, dass die technischen Fortschritte die applizierte Strahlendosis pro standardisierter Untersuchungsschicht im Vergleich zur 4-Zeilen-CT signifikant reduzieren. Zudem konnte trotz Anwendung der Spiraltechnik im Vergleich zu Sequenztechnik und einer dadurch vermehrten Überlappung eine signifikante Steigerung des $CTDI_{vol}$ der Schädeluntersuchung vermieden werden.

Die errechnete Dosis ist insgesamt nur eine Abschätzung und keine genaue Messung der Strahlenbelastung. Der Konversionsfaktor berücksichtigt zwar im Gegensatz zu den technischen Dosisparametern $CTDI_{vol}$ und DLP die im Untersuchungsgebiet bestrahlten Organe entsprechend ihrer Strahlensensibilität, jedoch liegen allen diesen Parametern Phantommessungen bzw. Softwareberechnungen zugrunde, die bestimmte Standardbedingungen voraussetzen. Biometrische, interindividuelle Schwankungen werden nicht berücksichtigt. Es ist jedoch anzunehmen, dass in einem entsprechend großen Patientenkollektiv statistische Abweichungen bis zu einem gewissen Maße ausgeglichen werden.

In der vorliegenden Studie wurde bewusst auf eine weitere rechnerische Unterteilung der Untersuchungsvolumina, z. B. in Hals und Thorax, verzichtet und dementsprechend zur Dosisabschätzung das thorakale bzw. abdominale DLP mit nur jeweils einem Konversionsfaktor verrechnet. Dies ist, nach Meinung der Autoren, insbesondere deshalb vertretbar, weil dadurch die Dosis tendenziell überschätzt (Konversionsfaktor Thorax $0,017 \text{ mSv} \times \text{mGy}^{-1} \times \text{cm}^{-1}$ gegenüber Konversionsfaktor Hals $0,0054 \text{ mSv} \times \text{mGy}^{-1} \times \text{cm}^{-1}$) und zudem die Vergleichbarkeit erleichtert wird.

Daneben sind das retrospektive Studiendesign und eine fehlende Randomisierung der Patienten zu diskutieren. Die Anzahl der Patienten, die Geschlechts- und Altersverteilung sind in beiden Gruppen jedoch vergleichbar groß. Im Vergleich zu epidemiologischen Daten aus der Literatur können beide Gruppen als repräsentativ angesehen werden [29]. Ein prospektiv-randomisiertes Studiendesign wäre darüber hinaus unter dem Gesichtspunkt der Patientensicherheit ethisch nicht zu vertreten. Da Artefakte und Überlagerungen durch diverse Installationen (Rippenspreizer, Thoraxdrainage, EKG-Kabel, Geräte zur kardio-pulmonalen Reanimation etc.) in Abhängigkeit von der klinischen Situation verwendet werden und somit die Bildqualität unterschiedlich beeinflussen, wurde auf eine dedizierte Bewertung der Bildqualität verzichtet. Eine Wiederholung der Untersuchung infolge einer nicht diagnostischen Bildqualität war jedoch bei keinem Patienten notwendig. Zudem sind die durch Akquisition isotroper Voxel verbesserten dreidimensionalen Darstellungsmöglichkeiten am 64-Zeilen-CT evident. Die stetig wachsende Rechenleistung moderner CT-Geräte erlaubt mittlerweile zudem die Anwendung iterativer Bildrekonstruktionsalgorithmen, wie z. B. ASiR (adaptiver statistischer iterativer Rekonstruktion), die eine Reduktion der Strahlendosis ohne Verlust in der Bildqualität zulassen [30]. Das Einsparpotenzial im Rahmen der Polytraumadiagnostik wird derzeit evaluiert.

Schlussfolgerung

Der Einsatz eines 64-Zeilen-CT-Systems in der Polytraumadiagnostik führte in dieser Studie zu einer deutlichen Erniedrigung des CTDI der Körperstammuntersuchung. Gleichzeitig erlaubt die erhöhte Scangeschwindigkeit eine Optimierung der Untersuchungsprotokolle, wie z. B. der routinemäßigen Untersuchung des Mittelgesichts. Eine Erweiterung der Scanlänge kann dann jedoch in einer Erhöhung der Gesamtstrahlenbelastung des Patienten resultieren. Obwohl die relativ hohe Strahlenbelastung durch den nachgewiesenen Nutzen der Ganzkörper-CT beim Polytrauma im Sinne eines positiven Einflusses auf das Überleben begründet werden kann, empfiehlt sich neben der rechtfertigenden Indikation die Ausschöpfung der technischen Möglichkeiten moderner CT-Geräte, wie z. B. die Anwendung einer automatischen dreidimensionalen (xyz-Richtung) Röhrenstrommodulation oder iterativer Rekonstruktionsalgorithmen.

Literatur

- 1 Tscherne H, Regel G. Tscherne Unfallchirurgie: Trauma Management. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag 1997
- 2 Geyer LL, Körner M, Reiser M et al. Aktueller Stellenwert der konventionellen Radiographie und Sonographie in der frühen Versorgung traumatisierter Patienten. Notfall + Rettungsmedizin 2010; 13: 428–435. DOI: 10.1007/s10049-010-1298-7
- 3 Körner M, Reiser M, Linsenmaier U. Multidetektor-CT zur Diagnostik traumatologischer Notfälle. Radiologe 2009; 49: 510–515. DOI: 10.1007/s00117-008-1807-6
- 4 Linsenmaier U, Krötz M, Häuser H et al. Whole-body computed tomography in polytrauma: techniques and management. European radiology 2002; 12: 1728–1740
- 5 Kalender WA. Grundlagen und Technik der Spiral-CT. Radiologe 1999; 39: 809–819
- 6 Ohnesorge B, Flohr T, Schaller S et al. Technische Grundlagen und Anwendungen der Mehrschicht-CT. Radiologe 1999; 39: 923–931
- 7 Wedegartner U, Lorenzen M, Nagel HD et al. Radiologische Bildgebung beim Polytrauma: Dosisvergleich von Ganzkörper-MSCT und konventionellem Röntgen mit organspezifischer CT. Fortschr Röntgenstr 2004; 176: 1039–1044
- 8 Ruchholtz S, Waydhas C, Schroeder T et al. Stellenwert der Computertomographie in der frühen klinischen Behandlung schwer verletzter Patienten. Chirurg 2002; 73: 1005–1012
- 9 Huber-Wagner S, Lefering R, Qvick LM et al. Effect of whole-body CT during trauma resuscitation on survival: a retrospective, multicentre study. Lancet 2009; 373: 1455–1461. DOI: 10.1016/S0140-6736(09)60232-4
- 10 Kalender W. Computertomographie: Grundlagen, Gerätetechnologie, Bildqualität, Anwendungen. 2. überarb. und erw. Auflage. Erlangen: Publicis Corporate Pub 2006, 324
- 11 European Commission. European Guidelines on Quality Criteria for Computed Tomography. Report EUR 16262. In. Brussels, Belgium: 1999
- 12 Kanz KG, Körner M, Linsenmaier U et al. Prioritätenorientiertes Schockraummanagement unter Integration des Mehrschicht-Spiral-Computertomographen. Der Unfallchirurg 2004; 107: 937–944
- 13 Körner M, Geyer LL, Wirth S et al. 64-MDCT in Mass Casualty Incidents: Volume Image Reading Boosts Radiological Workflow. Am J Roentgenol 2011; 197: W399–W404. DOI: 10.2214/AJR.10.5716
- 14 Heyer CM, Rduch G, Kagel T et al. Prospektive, randomisierte Evaluation eines modifizierten Mehrdetektor-CT-Protokolls in der Initialdiagnostik beim Polytrauma. Fortschr Röntgenstr 2005; 177: 242–249. DOI: 10.1055/s-2004-813872
- 15 Bayer J, Pache G, Strohm PC et al. Influence of arm positioning on radiation dose for whole body computed tomography in trauma patients. The Journal of trauma 2011; 70: 900–905. DOI: 10.1097/TA.0b013e3181edc80e
- 16 Karlo C, Gnannt R, Frauenfelder T et al. Whole-body CT in polytrauma patients: effect of arm positioning on thoracic and abdominal image quality. Emergency radiology 2011. DOI: 10.1007/s10140-011-0948-5
- 17 Huda W, Vance A. Patient radiation doses from adult and pediatric CT. Am J Roentgenol 2007; 188: 540–546. DOI: 10.2214/AJR.06.0101
- 18 Verdun FR, Theumann N, Poletti PA et al. Impact of the introduction of 16-row MDCT on image quality and patient dose: Phantom study and multi-centre survey. European radiology 2006; 16: 2866–2874. DOI: 10.1007/s00330-006-0396-x
- 19 Fujii K, Aoyama T, Yamauchi-Kawaura C et al. Radiation dose evaluation in 64-slice CT examinations with adult and paediatric anthropomorphic phantoms. Br J Radiol 2009; 82: 1010–1018. DOI: 10.1259/bjr/13320880
- 20 Van der Molen AJ, Veldkamp WJ, Geleijns J. 16-slice CT: achievable effective doses of common protocols in comparison with recent CT dose surveys. Br J Radiol 2007; 80: 248–255. DOI: 10.1259/bjr/52356535
- 21 Nishizawa K, Mori S, Ohno M et al. Patient dose estimation for multi-detector-row CT examinations. Radiat Prot Dosimetry 2008; 128: 98–105. DOI: 10.1093/rpd/nmc244
- 22 Fujii K, Aoyama T, Koyama S et al. Comparative evaluation of organ and effective doses for paediatric patients with those for adults in chest and abdominal CT examinations. Br J Radiol 2007; 80: 657–667. DOI: 10.1259/bjr/97260522
- 23 Tan JS, Tan KL, Lee JC et al. Comparison of eye lens dose on neuroimaging protocols between 16- and 64-section multidetector CT: achieving the lowest possible dose. Am J Neuroradiol 2009; 30: 373–377. DOI: 10.3174/ajnr.A1327
- 24 Hamberg LM, Rhea JT, Hunter GJ et al. Multi-detector row CT: radiation dose characteristics. Radiology 2003; 226: 762–772. DOI: 10.1148/radiol.2263020205
- 25 Ptak T, Rhea JT, Novelline RA. Radiation dose is reduced with a single-pass whole-body multi-detector row CT trauma protocol compared with a conventional segmented method: initial experience. Radiology 2003; 229: 902–905. DOI: 10.1148/radiol.2293021651
- 26 Fanucci E, Fiaschetti V, Rotili A et al. Whole body 16-row multislice CT in emergency room: effects of different protocols on scanning time, image quality and radiation exposure. Emergency radiology 2007; 13: 251–257
- 27 Anderson SW, Lucey BC, Varghese JC et al. Sixty-four multi-detector row computed tomography in multitrauma patient imaging: early experience. Curr Probl Diagn Radiol 2006; 35: 188–198. DOI: 10.1067/j.cpradiol.2006.06.004
- 28 Shope TB, Gagne RM, Johnson GC. A method for describing the doses delivered by transmission x-ray computed tomography. Med Phys 1981; 8: 488–495

29 *Mutschler W, Kanz KG.* Interdisziplinäre Schockraumversorgung: Die Aufgaben der Radiologie aus unfallchirurgischer Sicht. *Radiologe* 2002; 42: 506–514

30 *Silva AC, Lawder HJ, Hara A et al.* Innovations in CT dose reduction strategy: application of the adaptive statistical iterative reconstruction algorithm. *Am J Roentgenol* 2010; 194: 191–199. DOI: 10.2214/AJR.09.2953



Sonderdruck für private Zwecke des Autors

6. Publikation 2: Dose reduction in 64-row whole-body CT in multiple trauma: an optimized CT protocol with iterative image reconstruction on a gemstone-based scintillator

BJR

© 2016 The Authors. Published by the British Institute of Radiology

Received:
27 December 2015

Revised:
2 February 2016

Accepted:
4 February 2016

<http://dx.doi.org/10.1259/bjr.20160003>

Cite this article as:

Geyer LL, Körner M, Harrieder A, Mueck FG, Deak Z, Wirth S, et al. Dose reduction in 64-row whole-body CT in multiple trauma: an optimized CT protocol with iterative image reconstruction on a gemstone-based scintillator. *Br J Radiol* 2016; **89**: 20160003.

EMERGENCY RADIOLOGY SPECIAL FEATURE: FULL PAPER

Dose reduction in 64-row whole-body CT in multiple trauma: an optimized CT protocol with iterative image reconstruction on a gemstone-based scintillator

¹LUCAS L GEYER, MD, ²MARKUS KÖRNER, MD, ¹ANDREAS HARRIEDER, ¹FABIAN G MUECK, MD, ¹ZSUZSANNA DEAK, MD, ¹STEFAN WIRTH, MD, PhD and ³ULRICH LINSENMAIER, MD

¹Institute for Clinical Radiology, Ludwig-Maximilians-University Hospital Munich, Munich, Germany

²Radiologie Muehleninsel, Landshut, Germany

³Institute for Diagnostic and Interventional Radiology, HELIOS Klinikum Munich West and Munich Perlach, Munich, Germany

Address correspondence to: Dr Lucas L Geyer
E-mail: lucas.geyer@med.uni-muenchen.de

Objective: Evaluation of potential dose savings by implementing adaptive statistical iterative reconstruction (ASiR) on a gemstone-based scintillator in a clinical 64-row whole-body CT (WBCT) protocol after multiple trauma.

Methods: Dose reports of 152 WBCT scans were analysed for two 64-row multidetector CT scanners (Scanners A and B); the main scanning parameters were kept constant. ASiR and a gemstone-based scintillator were used in Scanner B, and the noise index was adjusted (head: 5.2 vs 6.0; thorax/abdomen: 29.0 vs 46.0). The scan length, CT dose index (CTDI) and dose-length product (DLP) were analysed. The estimated mean effective dose was calculated using normalized conversion factors. Student's *t*-test was used for statistics.

Results: Both the mean CTDI (mGy) (Scanner A: 53.8 ± 2.0, 10.3 ± 2.5, 14.4 ± 3.7; Scanner B: 48.7 ± 2.2, 7.1 ± 2.3,

9.1 ± 3.6; *p* < 0.001, respectively) and the mean DLP (mGy cm) (Scanner A: 1318.9 ± 167.8, 509.3 ± 134.7, 848.8 ± 254.0; Scanner B: 1190.6 ± 172.6, 354.6 ± 128.3, 561.0 ± 246.7; *p* < 0.001, respectively) for the head, thorax and abdomen were significantly reduced with Scanner B. There was no relevant difference in scan length. The total mean effective dose (mSv) was significantly decreased with Scanner B (24.4 ± 6.0, 17.2 ± 5.8; *p* < 0.001).

Conclusion: The implementation of ASiR and a gemstone-based scintillator allows for significant dose savings in a clinical WBCT protocol.

Advances in knowledge: Recent technical developments can significantly reduce radiation dose of WBCT in multiple trauma. Dose reductions of 10–34% can be achieved.

INTRODUCTION

Since its introduction, multidetector CT (MDCT) use has dramatically risen as the first-line imaging tool in emergency radiology, mostly because of its wide availability, short scan time, duration, robust technique, and high spatial and temporal resolution due to isotropic voxels. The number of CT scans has exceeded 70 million per year in the USA in recent years.¹ Although the emergency department patient volumes grew in the USA at about 13% between 2000 and 2005, the number of CT examinations had increased from 51% to 463%, depending on the institution and the relevant body region.² MDCT is widely accepted as the whole-body imaging procedure in multiple trauma and is indisputably the imaging modality of choice.^{3,4} A detailed analysis in a clinical outcome study has proven that standardized whole-body CT (WBCT) clearly improves the survival rate after severe trauma.⁵ Despite this strong benefit, the trauma patient is still exposed to a considerable

radiation dose of about 10–20 mSv, with some published reports of >30 mSv for a single WBCT scan.⁵

Concerns about radiation dose and its potentially harmful and carcinogenic effects are being widely discussed.^{6–8} There is evidence that cumulative doses to an organ of 30–90 mSv or more can increase the risk of developing cancer.⁹ Consequently, several technical approaches to dose reduction have already been established and implemented successfully in clinical practice, such as tube current modulation and automatic exposure control.^{10–12}

High computational power now also offers improved techniques of image reconstruction. Filtered back projection (FBP) has been the standard mathematical reconstruction algorithm since the beginning of CT. Its main advantage is the fast calculation, even of CT images, which is essential for routine CT scanning; the main disadvantage

is a limited potential of dose reduction. There is a well-known trade-off between radiation dose and image noise: the lower the dose, the higher the image noise, which is considered as deterioration of image quality. This was an indisputable fact in clinical practice for a long time.

Recently, iterative image reconstructions have become available, such as adaptive statistical iterative reconstruction (ASiR). The main advantage of these algorithms is that they assume a far more realistic data model than conventional FBP to reduce radiation dose by decreasing image noise.¹³ Despite its higher mathematical complexity, the use of ASiR does not result in longer reconstruction times than FBP.¹⁴ Therefore, it is also suited for emergency conditions when time is of the essence.

The purpose of this retrospective controlled and blinded clinical study was to evaluate the potential dose savings by combining ASiR and a new gemstone-based scintillator, in a clinical 64-row WBCT protocol of patients sustaining major and multiple trauma.

METHODS AND MATERIALS

Patients

The institutional review board has waived the need for informed consent due to the retrospective nature of the study. All patients who fulfilled the clinical criteria of multiple trauma and underwent a WBCT examination according to an advanced routine CT protocol between December 2008 and October 2010 were included. The indication of WBCT is based on widely accepted modified Advanced Trauma Life Support® criteria referring to vital signs, injury pattern and mechanism of trauma (Table 1).³ Patients who underwent a different CT protocol based on specific clinical indication or had an incomplete dose report were excluded.

Table 1. Established clinical indication rule for whole-body CT

Impaired vital signs
Pattern of injury
Open thoracic injury
Unstable thorax
Unstable pelvic fracture
Fractures of at least two major long bones
Major amputation
Mechanism of trauma
Explosion
Entrapment or entombment
Fall >3 m height
Death of the codriver
Rollover of the vehicle
Ejection out of the vehicle
Accident with (motor-)cyclist, pedestrian
High-velocity accident

CT technique

The WBCT examinations were performed on two different 64-row MDCT scanners from one manufacturer. Scanner A (LightSpeed® VCT® XT; GE Healthcare, Waukesha, WI) was replaced by Scanner B (Discovery® CT750 HD; GE Healthcare) in November 2009. Scanner A was only capable of FBP, whereas Scanner B was capable of ASiR for image reconstruction also using a new CT detector. Both scanners were otherwise technically comparable, and the use of Scanner B was an upgrade on the platform of Scanner A using the same technique of tube current modulation in both *xy*-plane (Auto mA) and the *z*-direction (Smart mA). However, there was also a different detector in Scanner B; the gemstone-based scintillator has a low afterglow and a primary decay of about 0.03 μ s, which is reported to be 100 times faster than conventional scintillator material.¹⁵ The newly introduced dedicated high-definition mode on Scanner B with 2.5 more projections per rotation was not used for this study to keep further parameters constant.

Whole-body CT protocol

Both protocols used have been the routine examination standard for each particular CT device at our emergency radiology department and have not been altered for study purposes.

The main scanning parameters were kept constant for all CT examinations (Table 2). The head, which also includes the mid-face, was scanned in helical mode without gantry tilt (Phase 1, non-contrast). The helical MDCT scans of the thorax and abdomen were conducted separately from each other. The cervical spine was included in the chest volume during the arterial contrast medium phase (Phase 2, arterial); the abdomen, including the pelvis, was examined during the portovenous phase (Phase 3, portovenous). The arms were placed crosswise on the trunk during the examination in order to reduce artefacts, following a long-established institutional protocol. Prior to this study, in order to make the results of both scanners comparable, the protocol for the CT scanner replacing the first one was modified with the help of the manufacturer to preserve the same constant clinical image quality and allow for an objective comparison: based on prior experience, noise index was adapted and increased from 5.2 to 6.0 (head) and from 29.0 to 46.0 (thorax and abdomen). The ASiR level was set at 30% (head) and 50% (thorax and abdomen).

Image reconstruction

FBP has been used as a standard reconstruction method for almost 30 years. Owing to the limited processing capabilities, CT images were reconstructed from measured attenuation profiles by using the analytic Radon transformation. By contrast, modern CT systems provide an impressive improved processing power for statistical reconstruction algorithms. The ASiR generates CT images by taking photon statistics into account in addition to measured attenuation data. Consecutively, the mean image noise decreases correlating to the applied ASiR level from 0% to 100%. Two strategies could now be used: improving image quality or, as desired by our study concept, reducing the radiation dose by maintaining the accustomed image quality at the same time. We refer to previous publications for a detailed description of the ASiR algorithm.^{16,17}

Table 2. CT scan parameters for two whole-body CT scan protocols each of 64-row multidetector CT (VCT 64 and HD 750; GE Healthcare, Waukesha, WI)

CT parameters	
Two plane scout	
Tube voltage	120 kV
Tube current	40 mA (anteroposterior), 80 mA (lateral)
Head	
Time of rotation	0.5 s
Collimation	64 × 0.625 mm
Slice thickness	2.5 mm
Tilt	0°
Tube voltage	120 kV
Tube current, mAs product	100–320 mA, modulated
Table feed/rotation	19.4 mm
Contrast medium injection	
Volume	140 ml
Saline chaser	40 ml
Flow rate	3.5 ml s ⁻¹
Bolus tracking (monitoring)	Thoracic aorta
Cervical spine/thorax	
Rotation time	0.5 s
Collimation	64 × 0.625 mm
Slice thickness	1.25 mm
Tube voltage	120 kV
Tube current	100–700 mA, modulated
Table feed	55 mm
Delay	3 s, after monitoring
Abdomen/pelvis	
Rotation time	0.5 s
Collimation	64 × 0.625 mm
Slice thickness	1.25 mm
Tube voltage	120 kV
Tube current	100–700 mA, modulated
Table feed	55 mm
Delay	ca. 50 s after thorax

Radiation dose

The scan length (mm), CT dose index (CTDI, mGy) and dose-length product (DLP, mGy cm) of the head, thorax and abdomen were retrieved and calculated on the basis of the dose reports. The calculation of the mean effective dose (mSv) was carried out by conversion of the DLP with the normalization

coefficient corresponding to the European guidelines on quality criteria for CT (Table 3).¹⁹ As radiation dose is dependent on the patient's constitution among other things, the coronal and sagittal diameters were measured at the level of the first vertebral body of the lumbar spine.

Image quality

As various instruments, for example, rib spreaders, chest tubes, electrocardiography and monitoring cables, are present depending on the clinical situation, the occurrence of artefacts is very variable during an emergency CT examination. Therefore, we did not perform a detailed assessment of image quality. However, we distinguished between diagnostic and non-diagnostic overall image quality, the latter of which was defined indication for a repeat CT scan without specific medical indication.

Statistical analysis

Statistical analysis was performed using SPSS® v. 18 (IBM Corp., New York, NY; formerly SPSS Inc., Chicago, IL). An *a priori* estimation of the sample size was conducted resulting in a minimum need of 38 patients (one-sided, alpha error 0.025, power 0.95). Significant differences in age distribution, patients' diameters, dose parameters and mean effective dose were tested by the student's *t*-test. The gender distribution was analyzed by the χ^2 test. The significance level was $p < 0.05$.

RESULTS

The data from 76 patients (54 males, 22 females; mean age 44 ± 19 years) who were examined on Scanner A were compared with the data of 76 patients (49 males, 27 females; mean age 46 ± 19 years) who were examined on Scanner B. There was no significant difference between both the groups in terms of gender ($p = 0.386$), age distribution ($p = 0.510$), sagittal diameter (23.2 ± 4.6 vs 23.6 ± 3.8 cm; $p = 0.580$) and coronal diameter (32.4 ± 4.3 vs 32.7 ± 3.4 cm; $p = 0.580$).

There was no significant difference in scan length in all examined body regions, comparing Scanners A and B, which would have had influence on the following results.

Table 4 gives an overview of the dose characteristics. The mean CTDI and mean DLP for the head, thorax and abdomen were statistically significantly lower for all regions using Scanner B including ASiR than using Scanner A without ASiR. The largest differences in CTDI (mGy) were for the thorax (reduction of 31.1%; 10.3 ± 2.5 vs 7.1 ± 2.3) and abdomen (reduction of 36.8%; 14.4 ± 3.7 vs 9.1 ± 3.6), whereas in the head section

Table 3. Effective dose per dose-length product (DLP); normalized values of over various body regions¹⁹

Body region	Normalized effective dose, E_{DLP} (mSv mGy ⁻¹ cm ⁻¹)
Head	0.0023
Thorax	0.017
Abdomen	0.015

(reduction of 9.5%; 53.8 ± 2.0 vs 48.7 ± 2.2), dose reduction effects were only minor. Considering the CTDI as an indicator for the radiation dose applied per slice, without taking into account the scan length, there were dose savings of 9.5–36.8%, depending on the anatomical region (Table 4).

Again, the largest differences with DLP (mGy cm) were found in the thorax (reduction of 30.0%; 509.3 ± 134.7 vs 354.6 ± 128.3) and abdomen (reduction of 33.8%; 848.8 ± 254.0 vs 561.0 ± 246.7); however, the differences in the head section were only small (reduction of 9.7%; 1318.9 ± 167.8 vs 1190.6 ± 172.6).

The resulting estimated effective dose was reduced by about 10% in the head, 30% in the thorax and 34% in the abdomen. The mean effective dose calculated for the entire WBCT examination was reduced by about 30% from 24.4 mSv with Scanner A down to 17.2 mSv with Scanner B (Table 5).

DISCUSSION

MDCT is considered as the modality of choice in the imaging of patients with polytrauma.²⁰ Despite its proven effect on survival rate,⁵ the radiation dose applied is not only a major concern only for radiologists but also widely discussed with many alert clinical partners. The popular media in many countries is also focusing on radiation dose issues and the possible medical risks for the patients.

As the use of MDCT has also risen in other radiological sub-specialties such as cardiac imaging, recent developments have focused on strategies of dose reduction, including tube current modulation and automatic exposure control.^{10,11,18} The main limitation of dose reduction so far has been that by lowering the dose, the resulting higher noise level has impaired the image quality. Modern highly capable CT systems offer dose savings using iterative image reconstructions, such as ASiR™ (GE Healthcare), iDose⁴ (Philips Healthcare) and IRIS (Siemens Healthcare). According to Silva et al,¹⁷ ASiR allows for a significant reduction in radiation dose without losing image quality compared with FBP. The study by Hara et al¹⁶ showed a significant reduction in the CTDI of 32–65% by using ASiR in 12

abdominal CT scans. Two studies by Prakash et al^{21,22} showed a significant dose reduction of 27.6% for thorax scan and about 25.1% for the abdomen scan. In our study, the dose reduction has been evaluated for a dedicated WBCT protocol in patients with multiple injuries.

Using a trauma protocol with ASiR, the radiation dose decreased significantly from 24.4 to 17.2 mSv, which means a dose reduction of 30% for the entire CT examination. The mean effective dose of WBCT in the literature is estimated between 10 and 30 mSv.^{5,23} The different scan parameters and different patient positions applied make an important contribution. Ptak et al²⁴ and Fanucci et al²⁵ have shown that a monophasic examination provides a significant dose reduction and shorter duration of the scan than a segmented scan protocol owing to missing overlap. Neither of these studies were conducted with 64-row MDCT scanners. Moreover, 64-row MDCT has markedly reduced the duration of the scan compared with former MDCT scanners.²⁶ The scan protocols published have been heterogeneous in terms of scan parameters, which have been adjusted to the institutional needs of image quality and patients' characteristics. However, comparable scan protocols resulted in a drop of the mean effective dose of 21.2–24.69 mSv,^{27,28} which is similar to our result of 24.4 mSv with FBP.

Our results could show in detail that there was a decrease for each anatomical body region. Although the dose reduction of the head CT was only 10%, there was a marked decrease of about 30–34% for the chest and abdominal CT, respectively. The different ASiR levels of 30% for head CT and 50% for thorax and abdomen CT, respectively, might explain these different capabilities of dose reduction. Moreover, the potential dose savings are limited by the higher noise caused by the skull, which has to be penetrated by photons in head CT. Although the scan length influences the DLP with the number of rotations, the CTDI is considered a more accurate parameter correlating with the applied radiation dose per standardized slice thickness. A detailed analysis showed that the dose reduction per slice was at a maximum of 36.8% for the abdomen and 31.1% for the thorax, and lower dose savings of 9.5% in the head CT section.

Table 4. Results concerning radiation dose parameters: scan length, CT dose index (CTDI) and dose-length product (DLP); mean values \pm standard deviation

CT parameters	Head	Thorax	Abdomen
Scan length (mm)			
Scanner A	225.3 ± 30.8	430.1 ± 40.7	520.5 ± 51.2
Scanner B	221.6 ± 33.3	434.1 ± 52.0	540.6 ± 87.0
CTDI (mGy)			
Scanner A	53.8 ± 2.0	10.3 ± 2.5	14.4 ± 3.7
Scanner B	48.7 ± 2.2^a	7.1 ± 2.3^a	9.1 ± 3.6^a
DLP (mGy cm)			
Scanner A	1318.9 ± 167.8	509.3 ± 134.7	848.8 ± 254.0
Scanner B	1190.6 ± 172.6^a	354.6 ± 128.3^a	561.0 ± 246.7^a

^a $p < 0.001$.

Table 5. Mean estimated effective dose \pm standard deviation (mSv)

Radiation dose	Head	Thorax	Abdomen	Total
Scanner A	3.0 \pm 0.4	8.7 \pm 2.3	12.7 \pm 3.8	24.4 \pm 6.0
Scanner B	2.7 \pm 0.4 ^a	6.0 \pm 2.2 ^a	8.4 \pm 3.7 ^a	17.2 \pm 5.8 ^a

^a $p < 0.001$.

In addition to the patients' dose exposure, there are medicolegal aspects that have to be taken into account. The European Guidelines, as well as national agencies such as the Federal Office of Radiation Protection in Germany, regulate the application of radiation by publishing dose reference levels.¹⁹ In view of this background, all radiological institutions aim to stay within these reference values, based on the analysis of an average European patient of about 70 kg weight. In particular in this context, the dose indicators (CTDI and DLP) that are displayed on the CT workstation are regarded as reference values. As the European Guidelines also state a good correspondence between the displayed and measured dose values,²⁹ we did not perform further analysis of radiation exposure by CT dosimetry software. However, the authors would like to communicate that the CTDI and DLP in this study (as in others) do not represent the exact radiation dose of an individual patient but serve as a valid and reliable reference point of a clinical CT protocol for estimation.

The retrospective study design has to be put into context. However, even without randomization, the biometric characteristics (mean age and gender distribution) were comparable in both study groups and match epidemiological data. Owing to normal distribution, it can be assumed that the patients' size and height did not affect the considerations about radiation exposure in both cohorts. Moreover, a prospective study design should be well considered in terms of ethical aspects, in particular with respect to possible non-diagnosed injuries using a low-dose CT protocol without adjusting the scanner's capabilities.

As both scan protocols were established as routine WBCT protocols in a large Level 1 trauma centre, there were no non-diagnostic CT examinations, and none of the CT examinations had to be repeated because of insufficient image quality. In general, the evaluation of image quality using a multiple trauma CT protocol differs from dose studies, which focus on a single body region. Besides artefacts that can be caused by technical applications, such as electrocardiography cables, the arm positioning influences the image quality.²⁸ With respect to the factor time, patient's safety and standardization of procedures, the

arms were positioned in front of the trunk according to our institutional WBCT protocol for trauma patients.

We cannot clearly separate the single effects of ASiR from other technical components, such as the scintillator, as we used two different CT scanners in this study; both scanners were otherwise widely comparable as Scanner B was an upgrade on the platform of Scanner A.

The potential dose savings by the use of ASiR is supported by recent studies, which have shown similar results: dose reduction of about 30% in chest CT²² and about 33% in abdominal CT.³⁰ On the other hand, Jiang et al¹⁵ also state that the gemstone-based detector allows for dose savings. However, a recent study by Yanagawa et al³¹ did not confirm a significant influence of the gemstone-based detector using a standard dose and a very low dose protocol (10 mA, 120 kVp), particularly if the high-definition mode was not enabled. They hypothesize that the detector characteristics could contribute more effectively in a moderate to low dose protocol. Further analysis is needed to clarify this topic. Apart from that, the aim of this study was not to evaluate a single parameter but the capability of the complete CT system for a clinical purpose. Namely, to introduce the new technique safely into clinical practice and make it available for patients with complex WBCT scans that benefit best from this new dose-reduced scan technique.

CONCLUSION

In conclusion, it is essential to keep the dose of the examination as low as reasonably achievable. In routine WBCT of patients with multiple injuries, it is possible to reduce the radiation dose by a combination of recent technical developments, such as ASiR, tube current modulation and a gemstone-based scintillator.

CONFLICTS OF INTEREST

LLG was on the speaker's bureau for GE Healthcare from 2010 to 2012.

FUNDING

ZD received a research grant from GE Healthcare.

REFERENCES

- Larson DB, Johnson LW, Schnell BM, Salisbury SR, Forman HP. National trends in CT use in the emergency department: 1995–2007. *Radiology* 2011; **258**: 164–73. doi: <http://dx.doi.org/10.1148/radiol.10100640>
- Broder J, Warshauer DM. Increasing utilization of computed tomography in the adult emergency department, 2000–2005. *Emerg Radiol* 2006; **13**: 25–30. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10140-006-0493-9>
- Linsenmaier U, Krötz M, Häuser H, Rock C, Rieger J, Bohndorf K, et al. Whole-body computed tomography in polytrauma: techniques and management. *Eur Radiol* 2002; **12**: 1728–40. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00330-001-1225-x>

4. Körner M, Reiser M, Linsenmaier U. Imaging of trauma with multi-detector computed tomography [in German.] *Radiologe* 2009; **49**: 510–15. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00117-008-1807-6>
5. Huber-Wagner S, Lefering R, Qvick LM, Körner M, Kay MV, Pfeifer KJ, et al. Effect of whole-body CT during trauma resuscitation on survival: a retrospective, multi-centre study. *Lancet* 2009; **373**: 1455–61. doi: [http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736\(09\)60232-4](http://dx.doi.org/10.1016/S0140-6736(09)60232-4)
6. Brenner DJ, Elliston CD. Estimated radiation risks potentially associated with full-body CT screening. *Radiology* 2004; **232**: 735–8. doi: <http://dx.doi.org/10.1148/radiol.2323031095>
7. Hall EJ, Brenner DJ. Cancer risks from diagnostic radiology. *Br J Radiol* 2008; **81**: 362–78. doi: <http://dx.doi.org/10.1259/bjr/01948454>
8. McCollough CH, Guimaraes L, Fletcher JG. In defense of body CT. *AJR Am J Roentgenol* 2009; **193**: 28–39. doi: <http://dx.doi.org/10.2214/AJR.09.2754>
9. Brenner DJ, Hall EJ. Computed tomography—an increasing source of radiation exposure. *N Engl J Med* 2007; **357**: 2277–84. doi: <http://dx.doi.org/10.1056/NEJMra072149>
10. Gunn ML, Kohr JR. State of the art: technologies for computed tomography dose reduction. *Emerg Radiol* 2010; **17**: 209–18. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10140-009-0850-6>
11. Hamberg LM, Rhea JT, Hunter GJ, Thrall JH. Multi-detector row CT: radiation dose characteristics. *Radiology* 2003; **226**: 762–72. doi: <http://dx.doi.org/10.1148/radiol.2263020205>
12. Kalra MK, Maher MM, Toth TL, Hamberg LM, Blake MA, Shepard JA, et al. Strategies for CT radiation dose optimization. *Radiology* 2004; **230**: 619–28. doi: <http://dx.doi.org/10.1148/radiol.2303021726>
13. Geyer LL, Schoepf UJ, Meinel FG, Nance JW Jr, Bastarriga G, Leipsic JA, et al. State of the art: iterative CT reconstruction techniques. *Radiology* 2015; **276**: 339–57. doi: <http://dx.doi.org/10.1148/radiol.2015132766>
14. Mueck FG, Korner M, Scherr MK, Geyer LL, Deak Z, Linsenmaier U, et al. Upgrade to iterative image reconstruction (IR) in abdominal MDCT imaging: a clinical study for detailed parameter optimization beyond vendor recommendations using the adaptive statistical iterative reconstruction environment (ASIR). *Rofo* 2012; **184**: 229–38. doi: <http://dx.doi.org/10.1055/s-0031-1282032>
15. Jiang H, Vartuli J, Vess C. Gemstone—the ultimate scintillator for computed tomography: GE white paper. Waukesha, WI: GE Healthcare; 2008.
16. Hara AK, Paden RG, Silva AC, Kujak JL, Lawder HJ, Pavlicek W. Iterative reconstruction technique for reducing body radiation dose at CT: feasibility study. *AJR Am J Roentgenol* 2009; **193**: 764–71. doi: <http://dx.doi.org/10.2214/AJR.09.2397>
17. Silva AC, Lawder HJ, Hara A, Kujak J, Pavlicek W. Innovations in CT dose reduction strategy: application of the adaptive statistical iterative reconstruction algorithm. *AJR Am J Roentgenol* 2010; **194**: 191–9. doi: <http://dx.doi.org/10.2214/AJR.09.2953>
18. McCollough CH, Bruesewitz MR, Kofler JM Jr. CT dose reduction and dose management tools: overview of available options. *Radiographics* 2006; **26**: 503–12. doi: <http://dx.doi.org/10.1148/rg.262055138>
19. European Commission. European guidelines on quality criteria for computed tomography. Report EUR 16262. Brussels, Belgium; 1999. [Cited 17 February 2016.] Available from: <http://www.dr.dk/guidelines/ct/quality/mainindex.htm>
20. Kanz KG, Korner M, Linsenmaier U, Kay MV, Huber-Wagner SM, Kreimeier U, et al. Priority-oriented shock trauma room management with the integration of multiple-view spiral computed tomography [in German.] *Unfallchirurg* 2004; **107**: 937–44. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00113-004-0845-4>
21. Prakash P, Kalra MK, Kambadakone AK, Pien H, Hsieh J, Blake MA, et al. Reducing abdominal CT radiation dose with adaptive statistical iterative reconstruction technique. *Invest Radiol* 2010; **45**: 202–10. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/RLL.ob013e3181dzfeec>
22. Prakash P, Kalra MK, Digumarthy SR, Hsieh J, Pien H, Singh S, et al. Radiation dose reduction with chest computed tomography using adaptive statistical iterative reconstruction technique: initial experience. *J Comput Assist Tomogr* 2010; **34**: 40–5. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/RCT.ob013e3181b26c67>
23. Ruchholtz S, Waydhas C, Schroeder T, Piepenbrink K, Kuhl H, Nast-Kolb D. The value of computed tomography in the early treatment of seriously injured patients [in German.] *Chirurg* 2002; **73**: 1005–12. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s00104-002-0429-1>
24. Ptak T, Rhea JT, Novelline RA. Radiation dose is reduced with a single-pass whole-body multi-detector row CT trauma protocol compared with a conventional segmented method: initial experience. *Radiology* 2003; **229**: 902–5. doi: <http://dx.doi.org/10.1148/radiol.2293021651>
25. Fanucci E, Fiaschetti V, Rotili A, Floris R, Simonetti G. Whole body 16-row multislice CT in emergency room: effects of different protocols on scanning time, image quality and radiation exposure. *Emerg Radiol* 2007; **13**: 251–7. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10140-006-0554-0>
26. Körner M, Geyer LL, Wirth S, Reiser MF, Linsenmaier U. 64-MDCT in mass casualty incidents: volume image reading boosts radiological workflow. *AJR Am J Roentgenol* 2011; **197**: W399–404. doi: <http://dx.doi.org/10.2214/AJR.10.5716>
27. Bayer J, Pache G, Strohm PC, Zwingmann J, Blanke P, Baumann T, et al. Influence of arm positioning on radiation dose for whole body computed tomography in trauma patients. *J Trauma* 2011; **70**: 900–5. doi: <http://dx.doi.org/10.1097/TA.0b013e3181edc80e>
28. Karlo C, Gnannt R, Frauenfelder T, Leschka S, Brüesch M, Wanner GA, et al. Whole-body CT in polytrauma patients: effect of arm positioning on thoracic and abdominal image quality. *Emerg Radiol* 2011; **18**: 285–93. doi: <http://dx.doi.org/10.1007/s10140-011-0948-5>
29. Bongartz G, Golding SJ, Jurik AG, et al. European guidelines for multislice computed tomography, funded by the European Commission, contract number FIGM-CT2000-20078-CT-TIP March 2004. [Cited 17 February 2016.] Available from: http://www.msct.eu/CT_Quality_Criteria.htm
30. Sagara Y, Hara AK, Pavlicek W, Silva AC, Paden RG, Wu Q. Abdominal CT: comparison of low-dose CT with adaptive statistical iterative reconstruction and routine-dose CT with filtered back projection in 53 patients. *AJR Am J Roentgenol* 2010; **195**: 713–19. doi: <http://dx.doi.org/10.2214/AJR.09.2989>
31. Yanagawa M, Tomiyama N, Honda O, Kikuyama A, Sumikawa H, Inoue A, et al. Multidetector CT of the lung: image quality with garnet-based detectors. *Radiology* 2010; **255**: 944–54. doi: <http://dx.doi.org/10.1148/radiol.10091010>

7. Literaturverzeichnis

1. EUR-16262-EN, *European Guidelines on Quality Criteria for Computed Tomography*. Available at: <http://www.dr.dk/guidelines/ct/quality/htmlindex.htm>, 2008.
2. Mutschler, W. and K.-G. Kanz, *Interdisziplinäre Schockraumversorgung: Die Aufgaben der Radiologie aus unfallchirurgischer Sicht*. Radiologe, 2002. **42**(7): p. 506-14.
3. Rhee, P., et al., *Increasing Trauma Deaths in the United States*. Annals of Surgery, 2014. **260**(1): p. 13-21.
4. Debus, F., et al., *Association of an In-House Blood Bank with Therapy and Outcome in Severely Injured Patients: An Analysis of 18,573 Patients from the TraumaRegister DGU®*. PLoS One, 2016. **11**(11): p. e0148736.
5. Bundesamt, S. Verkehrsunfälle. 2020; Available from: https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Verkehrsunfaelle/Publikationen/Downloads-Verkehrsunfaelle/verkehrsunfaelle-monat-2080700201094.pdf?_blob=publicationFile.
6. Kühne, C.A., et al., *Polytraumaversorgung in Deutschland*. Unfallchirurg, 2006. **109**(10): p. 913-913.
7. Lendrum, R.A. and D.J. Lockey, *Trauma system development*. Anaesthesia, 2013. **68**(s1): p. 30-39.
8. Tscherne, H. and G. Regel, *Tscherne Unfallchirurgie: Trauma Management*. Springer Verlag, 1997: p. Berlin, Heidelberg, New York.
9. Kanz, K.G., et al., *[Standardized evaluation of trauma patients: requirements for diagnostic imaging]*. Radiologe, 2002. **42**(7): p. 515-21.
10. Mutschler, W. and N. Haas, *Praxis der Unfallchirurgie*. Thieme,, 1998: p. Stuttgart, New York.
11. Korner, M., M. Reiser, and U. Linsenmaier, *[Imaging of trauma with multi-detector computed tomography]*. Radiologe, 2009. **49**(6): p. 510-5.
12. Linsenmaier, U., et al., *Whole-body computed tomography in polytrauma: techniques and management*. Eur Radiol, 2002. **12**: p. 1728-1740.
13. Prokop, A., et al., *[Multislice CT in diagnostic work-up of polytrauma]*. Unfallchirurg, 2006. **109**(7): p. 545-50.
14. Kashani, P. and A. Saberinia, *Management of multiple traumas in emergency medicine department: A review*. Journal of family medicine and primary care, 2019. **8**(12): p. 3789-3797.
15. Albrecht, T., et al., *[The role of whole body spiral CT in the primary work-up of polytrauma patients--comparison with conventional radiography and abdominal sonography]*. Rofo, 2004. **176**(8): p. 1142-50.
16. Huber-Wagner, S., et al., *Effect of whole-body CT during trauma resuscitation on survival: a retrospective, multicentre study*. Lancet, 2009. **373**(9673): p. 1455-61.
17. Wedegartner, U., et al., *[Diagnostic imaging in polytrauma: comparison of radiation exposure from whole-body MSCT and conventional radiography with organ-specific CT]*. Rofo, 2004. **176**(7): p. 1039-44.
18. Ruchholtz, S., et al., *[The value of computed tomography in the early treatment of seriously injured patients]*. Chirurg, 2002. **73**(10): p. 1005-12.
19. Deák, Z., et al., *Filtered Back Projection, Adaptive Statistical Iterative Reconstruction, and a Model-based Iterative Reconstruction in Abdominal CT: An Experimental Clinical Study*. Radiology, 2013. **266**(1): p. 197-206.
20. Strahlenschutz, B.f. 2016; Available from: <https://www.bfs.de/DE/themen/ion/anwendung-medizin/diagnostik/roentgen/haeufigkeit-exposition.html>.
21. Broder, J. and D.M. Warshauer, *Increasing utilization of computed tomography in the adult emergency department, 2000-2005*. Emerg Radiol, 2006. **13**(1): p. 25-30.
22. Kalender, W.A., et al., *Spiral volumetric CT with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation*. Radiology, 1990. **176**(1): p. 181-183.

23. Hu, H., *Multi-slice helical CT: scan and reconstruction*. Medical physics, 1999. **26** 1: p. 5-18.
24. Flohr, T.G., et al., *First performance evaluation of a dual-source CT (DSCT) system*. Eur Radiol, 2006. **16**(2): p. 256-268.
25. Rybicki, F.J., et al., *Initial evaluation of coronary images from 320-detector row computed tomography*. The International Journal of Cardiovascular Imaging, 2008. **24**(5): p. 535-546.
26. Tan, Z., et al., *The primary study of low-dose pancreas perfusion by 640- slice helical CT: a whole-organ perfusion*. SpringerPlus, 2015. **4**(1): p. 192.
27. Brenner, D.J. and C.D. Elliston, *Estimated radiation risks potentially associated with full-body CT screening*. Radiology, 2004. **232**(3): p. 735-8.
28. Brenner, D.J. and E.J. Hall, *Computed tomography--an increasing source of radiation exposure*. N Engl J Med, 2007. **357**(22): p. 2277-84.
29. Kimura, A. and N. Tanaka, *Whole-body computed tomography is associated with decreased mortality in blunt trauma patients with moderate-to-severe consciousness disturbance: A multicenter, retrospective study*. Journal of Trauma and Acute Care Surgery, 2013. **75**(2): p. 202-206.
30. Kahn, J., et al., *Quality and Dose Optimized CT Trauma Protocol – Recommendation from a University Level-I Trauma Center*. Rofo, 2017. **189**(09): p. 844-854.
31. Kahn, J., et al., *Computed tomography in trauma patients using iterative reconstruction: reducing radiation exposure without loss of image quality*. Acta Radiologica, 2016. **57**(3): p. 362-369.
32. Eller, A., et al., *Extent of simultaneous radiation dose and iodine reduction at stable image quality in computed tomography of the chest: A systematic approach using automated tube voltage adaption and iterative reconstructions*. Medicine, 2018. **97**(15): p. e0388.
33. Zinsser, D., et al., *Dosisreduktion und Dosismanagement in der Computertomografie – Aktueller Stand*. Rofo, 2018. **190**(06): p. 531-541.
34. Lell, M., M. Wucherer, and M. Kachelrieß, *Dosis und Dosisreduktion in der Computertomografie*. Radiologie up2date, 2017. **17**(02): p. 163-178.
35. Gäble, A., et al., *Update Polytrauma und Computertomographie unter Reanimationsbedingungen*. Der Radiologe, 2020. **60**(3): p. 247-257.
36. Karlo, C., et al., *Whole-body CT in polytrauma patients: effect of arm positioning on thoracic and abdominal image quality*. Emerg Radiol, 2011. **18**(4): p. 285-293.
37. Larson, D.B., et al., *National trends in CT use in the emergency department: 1995-2007*. Radiology, 2011. **258**(1): p. 164-73.

Danksagung

Vielen Dank an Herrn Prof. Dr. med. Dr. h. c. Maximilian Reiser und Herrn Prof. Dr. habil. Jens Ricke für die Möglichkeit der Promotion an der Klinik und Poliklinik für Radiologie.

Ein herzlicher Dank an das komplette Team der Arbeitsgruppe Notfallradiologie und allen Ko-Autoren der beiden Publikationen für Ihre Mithilfe und dafür, dass mir immer alle mit Rat und Tat zur Seite standen.

Besonderer Dank gilt hier PD Dr. med. Lucas Geyer und PD Dr.med. Markus Körner für die kompetente und freundschaftliche Mitbetreuung. Beide haben maßgeblich zum Gelingen des Projektes beigetragen. Vielen Dank für alles was Ihr geleistet habt!

Mein ganz besonderer Dank gilt meinem Doktorvater Prof. Dr. med. Ulrich Linsenmeier für die Überlassung des Themas, für die sehr gute, umfangreiche und unkomplizierte Betreuung, die vielen Ratschläge und nicht zuletzt für seine unermüdliche Unterstützung, vor allem bei der Wiederaufnahme des Projektes nach mehreren Jahren Unterbrechung. Danke, dass ich meine Arbeit fertigstellen durfte!

Zum Schluss geht mein innigster Dank an meine Familie! Danke an meine Eltern, dass Ihr es mir ermöglicht habt, diesen Weg einzuschlagen. Danke an meine Frau Claudia und meine beiden Jungs Emmeran und Ferdinand. Danke für euer Verständnis, euren Rückhalt und eure immerwährende Geduld.

Danke, dass es euch gibt!