

Aus dem Institut für Diagnostische und  
Interventionelle Radiologie  
der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf  
Direktor: Univ.-Prof. Dr. med. G. Antoch

**Diagnostischer Mehrwert und forensischer  
Nutzen einer neuen, fotorealistischen 3D-  
Rekonstruktionsmethode in der postmortalen  
Computertomographie**

Dissertation

zur Erlangung des Grades eines Doktors der Medizin  
der Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität  
Düsseldorf

vorgelegt von  
Judith Böven

2021

Als Inauguraldissertation gedruckt mit der Genehmigung der  
Medizinischen Fakultät der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf.

gez.:

Dekan/in: Prof. Dr. med. Nikolaj Klöcker

Erstgutachter/in: PD Dr. Joel Aissa

Zweitgutachter/in: Prof. Benno Hartung

Für mich. Halt' die Ohren steif.

Teile dieser Arbeit wurden veröffentlicht:

**Böven J**, Boos J, Steuwe A, Morawitz J, Sawicki LM, Caspers J, Küppers L, Hartung B, Thomas, Antoch G, Aissa J, 2020, Diagnostic value and forensic relevance of a novel 3D reconstruction technique in postmortem CT. *British Journal of Radiology*, 93: 20200204 (1)

# Zusammenfassung

Ziel dieser Studie war es, den diagnostischen Mehrwert und den forensischen Nutzen einer neuartigen, fotorealistischen 3D-Rekonstruktionsmethode (*Cinematic Rendering*, CR) im Vergleich zur konventionellen Postmortalen Computertomographie (PMCT) und zur Methode *Volume Rendering* (VR) zu bestimmen. Vorangegangene Studien haben gezeigt, dass CR Rekonstruktionen aussagekräftiger als klassische VR Rekonstruktionen sind und natürlicher wirken. Die vorliegende Studie betrachtet die Eignung von CR im Vergleich zu VR und klassischen PMCT Bildern bei Frakturen, Weichteilverletzungen an der Körperoberfläche sowie bei im Körper verbliebenen Fremdmaterialien. Von 43 menschlichen Leichen, die im Rahmen einer rechtsmedizinischen Anordnung mittels Ganzkörper-PMCT untersucht wurden, wurden 7 aufgrund eines nicht traumatischen Todes und 3 aufgrund technischer Schwierigkeiten aus der retrospektiven Studie ausgeschlossen. 112 Pathologien der 33 inkludierten Leichen wurden mit CR und VR Technik rekonstruiert. Frakturen wurden anhand ihrer Dislokation eingeteilt. Zwei Rechtsmediziner bewerteten die konventionellen PMCT Bilder, die CR und die VR Bilder entsprechend ihrer Ausdruckskraft anhand einer fünfstufigen Likert-Skala (1: hohe Ausdruckskraft bis 5: niedrige Ausdruckskraft). Zudem prüften sie die Eignung von CR Rekonstruktionen für forensische Gutachten. Zwei Radiologen bestimmten die Detektionsrate der Befunde in PMCT und CR Bildern. CR Bilder waren ausdrucksstärker als VR Bilder ( $p < 0,01$ ) und konventionelle CT Bilder bei Frakturen mit Dislokation ( $p < 0,001$ ), Verletzungen der ventralen Körperoberfläche ( $p < 0,001$ ) und Fremdkörpern ( $p = 0,033$ ). CR und VR Bilder wurden mit einem höheren Grad an Frakturdislokation ausdrucksstärker ( $p < 0,001$ ). 20% aller Pathologien bei den CR- und VR-Rekonstruktionen waren für die Radiologen nicht diagnostizierbar.

Zusammenfassend konnte gezeigt werden, dass die CR der VR Technik hinsichtlich der Ausdruckskraft der Bilder überlegen ist. Bei Frakturen mit wesentlicher Dislokation, Weichteilverletzungen und Fremdkörpern im Gewebe zeigte CR eine signifikant bessere Ausdruckskraft als PMCT Bilder. Bei Frakturen mit fehlender oder nur geringer Dislokation sowie bei überlagerten Weichteilverletzungen weisen CR und VR erhebliche Einschränkungen auf. Die Nutzung von CR ist hilfreich, um Ergebnisse der PMCT für gerichtliche Gutachten anschaulich darzustellen.

## Summary

The aim of this study was to evaluate the diagnostic value and the forensic impact of a novel, photorealistic 3D reconstruction method (Cinematic Rendering, CR) compared to conventional postmortem computed tomography (PMCT) and Volume rendering (VR). Previous studies have shown that CR reconstructions are more expressive and more natural than VR reconstructions. The present study examines the suitability of CR in comparison to VR and classic PMCT images for fractures, soft tissue injuries on the body surface and foreign material in the body of the corpse. 43 human cadavers were examined using full-body PMCT ordered by the department of forensic medicine. 7 cadavers had to be excluded from the retrospective study due to a non-traumatic death and 3 due to technical difficulties. 112 pathologies of the 33 included cadavers were reconstructed using CR and VR technology. Fractures were classified according to their dislocation (no dislocation, minor dislocation and substantial dislocation). Images were evaluated according to their expressiveness by two forensic pathologists using a five-level Likert-scale (1: high expressiveness, 5: low expressiveness). In addition, the forensic pathologists decided whether cinematic reconstructions are suitable for judicial reviews. The detection rate of pathologies in PMCT and CR was determined by two radiologists. CR technique was more expressive than VR for all three trauma categories ( $p < 0.01$ ), more expressive than conventional CT for fractures with dislocation ( $p < 0.001$ ), injuries to the ventral body surface ( $p < 0.001$ ) and for demonstration of foreign bodies ( $p = 0.033$ ). CR and VR images became more expressive with a higher degree of fracture dislocation ( $p < 0.001$ ). 20% of all pathologies in the CR and VR reconstructions were not detectable by radiologists.

CR technique is superior to VR technique regarding the expressiveness. For fractures with substantial dislocation, soft tissue injuries and foreign bodies embedded in tissue, CR showed a significantly better expressiveness than conventional PMCT.

CR and VR have significant limitations in cases of fractures with minor dislocation and covered soft tissue injuries, as well as soft tissue injuries superimposed by the CT table or other body parts. However, the use of CR is helpful to present PMCT results for forensic reports.

# Abkürzungsverzeichnis

2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
bzw.	beziehungsweise
CR	<i>Cinematic Rendering</i>
CT	Computertomographie
DGRM	Deutsche Gesellschaft für Rechtsmedizin
MIP	Maximumintensitätsprojektion
MPR	Multiplanare Reformation
MRT	Magnetresonanztomographie
PACS	<i>Picture Archiving and Communication System</i>
PMCT	Postmortale Computertomographie
SSD	<i>surface-shaded display</i>
VR	<i>Volume Rendering</i>

# Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung.....	1
1.1 Postmortale Computertomographie.....	1
1.1.1 Grundlagen und Anwendung .....	1
1.1.2 Aktuelle Leitlinien und Verfügbarkeit.....	2
1.1.3 Durchführung der PMCT .....	3
1.1.4 Technischer Hintergrund der Computertomographie.....	3
1.2 Ergänzende Methoden forensischer Bildgebung.....	5
1.2.1 Überblick .....	5
1.2.2 Röntgen.....	5
1.2.3 Magnetresonanztomographie .....	6
1.2.4 Sonstige bildgebende Verfahren.....	6
1.3 Erweiterungen zur postmortalen Bildgebung.....	7
1.3.1 Angiographie .....	7
1.3.2 Bildgestützte postmortale Probeentnahme .....	8
1.4 Nachverarbeitung von Datensätzen postmortaler Bildgebung .....	8
1.4.1 Ziele der Nachverarbeitung.....	8
1.4.2 Iterative Rekonstruktionstechnik .....	9
1.4.3 Multiplanare Reformation .....	9
1.4.4 Maximumintensitätsprojektion.....	10
1.4.5 Volume Rendering Technik.....	10
1.4.6 Cinematic Rendering Technik.....	11
1.5 Zielsetzung der Arbeit.....	12
1.6 Ethikvotum .....	13
2 Diagnostic value and forensic relevance of a novel photorealistic 3D reconstruction technique in postmortem computed tomography, Böven J, Boos J, Steuwe A, Morawitz J, Sawicki LM, Caspers J, Küppers L, Hartung B, Thomas C, Antoch G, Aissa J, British Journal of Radiology. 93, 20200204, (2020) .....	14

3 Diskussion .....	15
3.1. Interpretation und Einordnung der Studie.....	15
3.2 Limitationen .....	18
3.3 Schlussfolgerungen .....	19
4 Literaturverzeichnis .....	20
5 Danksagung .....	24

# 1 Einleitung

## 1.1 Postmortale Computertomographie

### 1.1.1 Grundlagen und Anwendung

Die postmortale Computertomographie (PMCT) wurde in den vergangenen Jahren insbesondere aufgrund von technologischen Weiterentwicklungen eine zunehmend bedeutsame Ergänzung zur konventionellen Obduktion in der Rechtsmedizin (2,3).

Ein genereller Vorteil postmortaler forensischer Bildgebung ist unter anderem die Möglichkeit der digitalen Archivierung der erhobenen Befunde vor einer im Anschluss durchgeführten Autopsie, bei der durch traumatische Eröffnung der Leiche der ursprüngliche Zustand verändert wird. Auch Jahre nach der Durchführung der Bildgebung wäre beispielweise ein Abgleich von Verletzungen mit Tatwerkzeugen möglich.

Die Computertomographie ist nicht nur aufgrund einer relativ kurzen Untersuchungszeit, hoher Verfügbarkeit und hoher Ortsauflösung mit der Möglichkeit der Erstellung dreidimensionaler Rekonstruktionen eine geeignete bildgebende Methode für viele verschiedene Anwendungsbereiche. Dazu gehören prä-, aber auch postmortale Traumata mit Skelettverletzungen, Stich- und Schussverletzungen, Kindesmisshandlung oder die Darstellung von Fremdkörpern (4–7).

Die Sensitivität der Detektion von Skelettveränderungen mittels Computertomographie ist dank der guten Visualisierbarkeit von Knochenstrukturen höher als im Vergleich zur konventionellen Obduktion (3). Teilweise sind bestimmte Bereiche des Skeletts erst nach speziellen Sektionstechniken, wie einzelner Präparation oder Mazeration des Weichgewebes, in der Autopsie zugänglich (8).

Einer von Grabherr et al. veröffentlichten Studie nach ist die PMCT Angiographie, also eine Untersuchung mit der Gabe von Kontrastmittel, der klassischen Autopsie in der Detektion von Knochenläsionen überlegen, jedoch bei Befunden in Weichgewebe, Gefäßen und Parenchymstrukturen unterlegen (9).

Insbesondere bei Brandleichen, durch Fäulnis stark zersetzten Leichen oder Unfallopfern ist eine Identifikation oft erschwert. Mit Hilfe des dentalen Profils oder bekannten skelettalen Merkmalen wie älteren Frakturen oder Osteosynthesematerialien können durch den Vergleich prä- und postmortaler Röntgen- bzw. Computertomographieaufnahmen Patienten identifiziert werden (10).

Datensätze der forensischen Bildgebung ermöglichen nicht nur vielfältige und nachträgliche Weiterverarbeitungsmöglichkeiten, sondern auch eine teleradiologische Weiterleitung an Zweitgutachter oder andere ärztliche Kollegen (11,12).

Polizisten, Anwälte, Richter und andere an der Forensik beteiligte Personen sind in der Regel nicht vertraut mit medizinischen Terminologien, Anatomie, Pathophysiologie oder radiologischer Bildgebung. Daher ist neben der Durchführung der Autopsie sowie der dazugehörigen forensischen Bildgebung eine verständliche, detailgetreue Zusammenfassung der daraus erhobenen Befunde ohne Informationsverlust von großer Bedeutung. In Ergänzung zu den schriftlichen Befunden werden den Gutachten zur Veranschaulichung oftmals Skizzen oder Fotos beigelegt (13).

Eine optimale Visualisierung der Ergebnisse der Bildgebung sollte dazu beitragen, das Verständnis zu verbessern und die Zusammenhänge zwischen den erhobenen Befunden aus Autopsie, Bildgebung und eventuell damit verbundenen Tathergängen oder Traumamechanismen zu verdeutlichen.

### 1.1.2 Aktuelle Leitlinien und Verfügbarkeit

In einer aktuellen Leitlinie der Arbeitsgemeinschaft für Forensische Bildgebung der deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin (DGRM) wird bei der Indikationsstellung zur Durchführung einer PMCT zwischen Einzelfallentscheidungen und Regelfall differenziert. So soll bei (mutmaßlichen) Tötungsdelikten, Verdacht auf Luft- oder Gasembolie, Verdacht auf Kindesmisshandlung, unerwarteten Todesfällen bis zu einem Alter von 6 Jahren, sowie bei der Suche nach röntgendichten Fremdkörpern, die in potentielltem Zusammenhang mit der Todesursache stehen, im Regelfall eine PMCT zeitnah durchgeführt werden (12).

Eine Einzelfallentscheidung zur Durchführung einer PMCT soll gemäß der Leitlinie unter anderem bei den Kategorien Unfalltod, Verdacht auf Behandlungsfehler, nicht identifizierbaren Leichen bzw. Körperteilen oder unerwarteten Todesfällen bis zu einem Alter von 17 Jahren erfolgen (12).

Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es im deutschsprachigen Raum zwei Modelle, um postmortale Computertomographie zu implementieren. Die Durchführung der PMCT wird durch radiologische Institutionen übernommen oder erfolgt in den jeweiligen Obduktionseinheiten (14).

### 1.1.3 Durchführung der PMCT

Gemäß den Empfehlungen der Arbeitsgemeinschaft für Forensische Bildgebung der DGRM sollte die Leiche in einem geeigneten Leichensack und vollständig entkleidet untersucht werden, um Artefakte zu vermeiden (12). Die Leiche wird auf dem CT Tisch nach Möglichkeit anatomisch korrekt, überlagerungsfrei, orthograd und üblicherweise in Rückenlage untersucht. Eine vollständige Erfassung des Körpers einschließlich Extremitäten ist anzustreben. Eine hohe Auflösung, geringes Bildrauschen und eine Vermeidung von Artefakten sollten Ziel des Untersuchungsprotokolls mittels Spiral-CT-Technik sein. Aus den so entstandenen Rohdaten werden Rekonstruktionen erstellt, die jeweils auf Weichteil-, Lungen- und Knochengewebe angepasst sind und in einem Bildarchivierungssystem, einem sogenannten *Picture Archiving and Communication System* (PACS), digital gespeichert werden. Je nach Verfügbarkeit können zusätzlich spezielle Nachbearbeitungsverfahren angewendet werden.

Im Idealfall werden die Ergebnisse der PMCT gemeinsam zwischen Radiologen und Rechtsmedizinern besprochen, um die anschließende Obduktion gegebenenfalls gezielter oder mit speziellen Präparationstechniken durchzuführen (12).

### 1.1.4 Technischer Hintergrund

Die Computertomographie als Weiterentwicklung auf der Grundlage von Röntgenstrahlung ermöglicht eine überlagerungsfreie, volumetrische Darstellung von Körperstrukturen.

Zum Aufbau eines Computertomographen der Computertomographie gehören unter anderem ein Patiententisch und ein Ringtunnel, auch *Gantry* genannt. Zur *Gantry* gehören die Röntgenstrahler sowie Detektoren zur Registrierung der Röntgenstrahlung nach Durchtritt durch den Körper des Patienten. Daneben werden Stromversorgungseinheiten zur Erzeugung der Hochspannung, Röntgengenerator sowie ein Rechnersystem mit Bedieneinheit benötigt (15).

Die Röntgenröhre rotiert um die Längsachse des Patienten und bestrahlt dabei in vorgegebener Röntgenstrahlendosis. Ein sich mitrotierendes Detektorsystem misst auf der gegenüberliegenden Seite die Strahlendosis, die nach Absorption und Streuung durch den Körper verbleibt. Durch die Erstellung dieser Absorptionsprofile aus verschiedenen Richtungen kann eine Volumenstruktur rekonstruiert werden. Für jedes Volumenelement, welches auch als Voxel bezeichnet werden kann, wird der Absorptionsgrad bestimmt und das Bild computergestützt berechnet. Nach mehreren Röhrenumläufen um verschiedene Körperschichten entstehen mehrere, primär transversale Schnittbilder, aus denen sich wiederum Volumengrafiken zusammensetzen (15).

Durch die Einführung der Spiral-Computertomographie 1989 durch W.A. Kalender kann der Patient bzw. das Objekt in höherer Geschwindigkeit durch kontinuierlichen Tischvorschub und entlang der Längsachse innerhalb der Strahlenebene bewegt werden, während das Röhren-Detektor-System kontinuierlich weiterrotiert.

In der sogenannten Mehrschicht- oder Mehrzeilenspiralcomputertomographie werden mehrere axiale Schichtebenen gleichzeitig eingelesen (16). Vorteile dieses Verfahrens sind eine reduzierte Scanzeit, eine verringerte Schichtdicke und eine erhöhte Scanlänge. Über die Jahre konnten Hersteller immer wieder die Schichtzahl klinisch genutzter Computertomographen erhöhen. Da jedoch bei der postmortalen Computertomographie die Strahlenbelastung für die Leichen außer Acht gelassen werden kann, können auch ältere Computertomographen mit weniger Zeilen eingesetzt werden.

Beim lebenden Patienten wird für eine Untersuchung im Computertomographen oftmals jodhaltiges Kontrastmittel intravenös oder oral gegeben. Im Vergleich zu Wasser schwächt Kontrastmittel die Röntgenstrahlung stärker. Befindet sich zusätzlich Kontrastmittel im Blut, so erscheinen besonders gut durchblutete Areale heller (17).

## 1.2 Ergänzende Methoden forensischer Bildgebung

### 1.2.1 Überblick

Neben der oben beschriebenen postmortalen Computertomographie gibt es eine Vielzahl an weiteren Modalitäten zur postmortalen Bildgebung mit verschiedenen Funktionsweisen, die zur Beantwortung rechtsmedizinischer Fragestellungen zur Hilfe genommen werden können. Dabei ist die Auswahl der geeigneten bildgebenden Modalität und die Kenntnis der jeweiligen Vor- und Nachteile für verschiedene Fragestellungen von großer Bedeutung (8).

### 1.2.2 Röntgen

Seit der Entdeckung der Röntgenstrahlung im Jahre 1895 durch W.C. Röntgen ist die Röntgendiagnostik in der Medizin ein nahezu unverzichtbares Instrument geworden (18). Durch unterschiedliche Absorption der Röntgenstrahlung durch den Körper bzw. ein Objekt entsteht auf Filmmaterial (analoges Röntgen) oder elektronischen Sensoren (digitales Röntgen) eine Röntgenaufnahme, die auch in der Rechtsmedizin von großem Nutzen sein kann. Befunde wie Frakturen, Gasansammlungen oder die Lokalisation von Fremdmaterial wie beispielsweise Projektilen können durch Röntgenbildgebung visualisiert werden. Zur Bestimmung des Skeletalters ist die konventionelle Röntgenaufnahme der Hand ein fester Bestandteil geworden (19).

Vorteile des konventionellen Röntgens in der forensischen Bildgebung sind unter anderem eine rasche Durchführbarkeit, niedrige Kosten, ein guter Knochenkontrast, eine hohe Ortsauflösung sowie eine relativ gute Detektion von Fremdkörpern (14,20).

Ein wesentlicher Nachteil des konventionellen Röntgenverfahrens ist die Überlagerung verschiedener Strukturen, sodass eine Schwächung, die als heller Bereich im Bild dargestellt wird, nicht nur durch ein Material mit höherer Absorption, sondern auch durch eine größere Schichtdicke hervorgerufen werden kann.

### 1.2.3 Magnetresonanztomographie

Bei der Magnetresonanztomographie (MRT) können auf Grundlage von Kernspinresonanz ebenfalls Schnittbilder von Körpern erzeugt werden. Durch resonante Anregung von bestimmten Atomkernen im Gewebe durch sehr starke Magnetfelder und magnetische Wechselfelder wird in einem Empfängerstromkreis ein elektrisches Signal induziert. Für den Bildkontrast sind hierbei Protonendichte, unterschiedliche Relaxationszeiten sowie der Gehalt an Wasserstoff-Atomen in verschiedenen Geweben von Bedeutung. Bei der Magnetresonanztomographie wird vollständig auf ionisierende Strahlung verzichtet (21). Insbesondere für die Darstellung Weichteilgewebe ist die MRT eine geeignete Methode, jedoch in der postmortalen Bildgebung auf Grund von höherer Zeit- und Kostenintensität, einer Vielzahl von möglichen Artefakten und schlechterer Verfügbarkeit im Vergleich zu anderen Verfahren wie der Computertomographie weniger verbreitet (22). Da sich das aufgenommene Signal mit sinkender Körpertemperatur der Leiche verändert, ist die Durchführung postmortaler MRT Aufnahmen erschwert (14).

### 1.2.4 Sonstige bildgebende Verfahren

Neben der klassischen Fotodokumentation gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Erfassung von Oberflächen. Dreidimensionale Oberflächenerfassungsmethoden ermöglichen eine berührungslose Messmethode und die geometrische Rekonstruktion eines Objektes. In der Rechtsmedizin können durch Erfassung von beispielsweise Tatwerkzeugen oder Fahrzeugen wichtige Zusammenhänge zwischen Tatort und Verletzungen veranschaulicht werden, die sich in Zusammenschau mit den Befunden von Obduktion und CT oder MRT ergeben (23).

Die Fotogrammetrie beschreibt eine Gruppe von Messmethoden, die vor allem durch die Möglichkeit der Erdbildmessung, Vermessung von Kunstwerken und Architektur sowie ingenieurtechnischen Anwendungen bekannt wurde. In der Forensik können mittels Fotogrammetrie sowohl kleinere Läsionen wie beispielsweise Hautverletzungen als auch größere Objekte wie Fahrzeuge oder Ganzkörperaufnahmen dokumentiert werden (24–26).

Eine weitere Methode der Oberflächenerfassung ist die Laserabtastung, auch *Laserscanning* genannt. Durch zeilen- bzw. rasterartiges Überstreichen von Oberflächen mit einem Laserstrahl wird ein Abbild der Objektgeometrie erzeugt. In Kombination mit Zusatzkameras ist es möglich, ergänzende Farbinformationen zu erhalten (27,28).

## 1.3 Erweiterungen zur postmortalen Bildgebung

### 1.3.1 Angiographie

In der postmortalen Angiographie wird durch intravasale Injektion von Kontrastmittel insbesondere die Darstellung von Blutgefäßen und Organläsionen verbessert (9,29). Die Angiographie wird in der forensischen Bildgebung meist mit der postmortalen Computertomographie kombiniert. Aufgrund fehlender aktiver Blutzirkulation und postmortal poröser Gefäße wurden verschiedene Techniken entwickelt, die generell in Ganzkörperangiographien und selektive Angiographien unterteilt werden. Bei den selektiven Angiographien werden zumeist die Herzgefäße katheterisiert und gezielt darstellt (14).

Bei der Ganzkörperangiographie kann das zumeist wässrige Kontrastmittelgemisch unter kardiopulmonaler Reanimation appliziert werden. In einem von Grabherr et al. beschriebenen, standardisierten Untersuchungsprotokoll für die Multi-Phasen postmortale Computertomographie Angiographie wird ein ölbasiertes Kontrastmittelgemisch mit Hilfe eines speziellen Injektors über Gefäßzugänge in der Leiste injiziert. Anschließend werden in verschiedenen Kontrastmittelphasen mittels Multidetektor-Computertomographie Schnittbilder erstellt. Im Vergleich zur PMCT ohne Kontrastmittel ergibt sich eine Vielzahl von Vorteilen, insbesondere in der Darstellung von Blutgefäßen sowie assoziierten Stenosen, Aneurysmen, Gefäßanomalien oder Gefäßrupturen als Quelle einer Blutung (9,29–32).

## 1.3.2 Bildgestützte postmortale Probeentnahme

Neben der Probeentnahme im Rahmen der klassischen Obduktion bietet die bildgesteuerte Probeentnahme eine gezielte, teilweise weniger invasive Möglichkeit Proben wie Flüssigkeiten, Gewebe oder auch Gas für weitere Untersuchungen zu gewinnen (33,34).

Insbesondere kleinere Flüssigkeitsansammlungen, die bei der klassischen Obduktion übersehen werden könnten, sind im Rahmen mikrobiologischer oder toxikologischer Untersuchungen bildgesteuert mit geringem postmortalem Kontaminationsrisiko punktierbar. Ebenso ist die Entnahme Gewebeproben zur Durchführung histologischer Untersuchungen mittels bildgebender Verfahren wie der Computertomographie zugänglich. Durch gezielte Lokalisation und Probegewinnung von Gasansammlungen, die oft in einer Obduktion nicht zugänglich sind oder sogar durch die invasive Eröffnung zerstört werden, ist eine Differenzierung zwischen postmortalem Fäulnisgas und einer vitalen Luftembolie möglich (14,35).

## 1.4 Nachverarbeitung von Datensätzen postmortaler Bildgebung

### 1.4.1 Ziele der Nachverarbeitung

Mit der Weiterentwicklung der CT-Technologie wurde stetig die Diagnostik verbessert, jedoch gleichzeitig das Volumen an Informationen erhöht. Eine postmortale Computertomographie kann eine Vielzahl axialer Schichtbilder umfassen, die nicht nur als Serie von Bildern betrachtet werden sollten. Durch den Fortschritt in der Computertechnologie ermöglichen verschiedenste Nachverarbeitungsmethoden 2D und 3D Visualisierungen, um die Auswertung der CT-Datensätze zu erleichtern. Eine besondere Herausforderung in der forensischen Bildgebung ist eine Weiterverarbeitung der erstellten Datensätze der verschiedenen bildgebenden Modalitäten hin zur anschaulichen, interdisziplinären Bilddemonstration (36).

## 1.4.2 Iterative Rekonstruktionstechnik

Dank moderner Bildverarbeitungstechniken wie der iterativen Rekonstruktionstechnik kann die Strahlenbelastung für Patienten durch gesteigerte Rechenleistung bei gleichbleibender Bildqualität deutlich reduziert werden. Zwar ist dieser Vorteil in der postmortalen Computertomographie zu vernachlässigen, doch aufgrund höherer Bildqualität und weniger Bildrauschen ist die iterative Rekonstruktion auch hier ein gängiges Verfahren (37).

## 1.4.3 Multiplanare Reformation

Neben der bereits beschriebenen Bildverarbeitung mittels iterativer Rekonstruktionstechnik besteht durch Nutzung moderner Mehrzeilen-Computertomographen die Möglichkeit, zweidimensionale, multiplanare Rekonstruktionen zu erstellen. Bei dieser Technik der multiplanaren Reformation (MPR), die auch bei der Magnetresonanztomographie genutzt werden kann, können aus transversalen Schnittbildern auch sogenannte *sagittale*, *coronale* oder schräge Schnittbilder erzeugt werden. Ziel ist eine vereinfachte anatomische Orientierung und detaillierte Visualisierung, beispielsweise um im Rahmen der Herzbildgebung einen Blick in alle vier Herzkammern in einem Schnittbild zu ermöglichen oder einen Gefäßverlauf langstreckig abzubilden (38).

Voraussetzung für die Erstellung von MPR Rekonstruktionen hoher Bildqualität sind unter anderem eine ausreichende Strahlendosis, geringe Schichtdicke und die Vermeidung von Bildartefakten. Um Verzerrungen in MPR Rekonstruktionen zu vermeiden, wird die Verwendung isotroper Voxel empfohlen. Isotrope Voxel weisen in alle drei Raumebenen dieselbe räumliche Auflösung auf (39). Da bei der MRT spezielle 3D Aufnahmesequenzen notwendig sind um isotropen Voxel zu erstellen, erfolgt oftmals die Erstellung von Sagittal- und Coronalschnitten bereits mit Anfertigung der Originaldaten (40).

#### 1.4.4 Maximumintensitätsprojektion

Bei dem Bildverarbeitungsverfahren der Maximumintensitätsprojektion (MIP) werden Datensätze in Projektionsbilder umgerechnet. Dabei wird entlang der Blickrichtung jeweils der Datenpunkt mit der maximalen Intensität ausgewählt. Das Verfahren kann sowohl bei Datensätzen der Computertomographie als auch bei Datensätzen der Magnetresonanztomographie verwendet werden, beispielweise zur Darstellung von Lungenparenchym oder Gefäßen (41).

#### 1.4.5 *Volume Rendering* Technik

Bereits 1988 wurde die sogenannten *Volume Rendering* (VR) Technik von R.A. Drebin et al. zur Erstellung von 3D-Rekonstruktionen aus Bilddatensätzen beschrieben (42).

Mit Hilfe einer Gruppe von 2D-Datensätzen, die mittels CT oder MRT generiert werden, werden jedem Dichtebereich bestimmte Werte für Transparenz, Helligkeit und Farbe zugeordnet. Die unterschiedlichen Transparenzwerte der Voxel ergeben ein Projektionsbild, welches für jeden Blickwinkel neu berechnet werden muss. Weitere Techniken wie beispielsweise *Ray Tracing* beziehen bei ihrer Berechnung eine virtuelle Reflektion des Lichtes mit ein, sodass das entstandene Bild eine Oberfläche zeigt.

Als ein Vorläufer der VR Technik zur Bildverarbeitung gilt *surface-shaded display* (SSD), bei der Oberflächen nach einer Segmentierung aufgrund bestimmter Dichtewerte dargestellt werden.

Durch die Abbildung selektiver Teile des Objektes, abhängig von Faktoren wie Dichte und Betrachtungswinkel, kann es bei der Nachverarbeitung zu einem Verlust von Bildinformationen kommen. Dennoch ist die VR Technik ein vielseitiges Hilfsmittel zur Darstellung verschiedener Befunde in der postmortalen Bildgebung, insbesondere für komplexe Frakturen, Gefäßdarstellungen oder auch Fremdkörperlokalisation (43). Im klinischen Alltag hat sich die Nutzung von VR Rekonstruktionen in verschiedenen Fachbereichen der Medizin insbesondere im Rahmen Fallvorstellungen und zur Therapieplanung vor und nach operativen Eingriffen bewährt (44).

Während die radiologische Auswertung und Diagnose vor allem anhand der multiplanaren Rekonstruktionen erfolgt, werden errechnete 3D Modelle aufgrund ihrer Anschaulichkeit oftmals zur Befunddemonstration genutzt.

#### 1.4.6 *Cinematic Rendering* Technik

Eine neuartige Bildverarbeitungsmethode namens *Cinematic Rendering* (CR), erstmals durch K. Engel und G. Paladini im Jahre 2015/2016 eingeführt, verwendet einen auf einer *Monte-Carlo-Integration* basierenden Algorithmus für CT- und MRT-Datensätze. Im Vergleich zum diffusen *Raytracing* verwendet der auch als *Monte-Carlo-Raytracing* bezeichnete Algorithmus zufällig generierte Lichtstrahlen auf allen Oberflächen, sodass eine globale Beleuchtung des Bildes simuliert werden kann.

Bei der CR Technik fallen mehrere Millionen Lichtstrahlen durch ein Voxel, während bei der VR Technik ein Lichtstrahl generiert wird. Dadurch werden mit CR auch Lichteffekte benachbarter Voxel berücksichtigt und Effekte wie Reflexionen oder Schatten erzeugt, die einer natürlichen Lichtquelle nachgeahmt sind. Die räumliche Auflösung wird zwar beim CR nicht geändert, jedoch die Wahrnehmung der räumlichen Beziehungen verändert (45).

Das Ergebnis sind nahezu fotorealistische 3D-Rekonstruktionen, die das konkrete Erfassen individueller Anatomie erleichtern sollen. Integriert wird diese Bildverarbeitungstechnik derzeit in das Anwendungsprogramm *syngo.via* (*Siemens Healthineers*, Forchheim, Germany), welche auch die Möglichkeit der Bildverarbeitung mittels Vergrößerung, Ausschneiden und Rotation bietet. Verschiedene Voreinstellungen, auch *gallery settings* genannt, erlauben die Fokussierung auf ossäre Strukturen, Organe, Körperoberflächen oder auch Fremdmaterial im Gewebe. Über Filterfunktionen ist es möglich, Knochen, Gefäße oder Gewebe gezielt ein- und auszublenden. Sowohl für prä-, als auch für postmortale Bildgebung ergeben sich vielfältige Anwendungsbeispiele, beispielsweise die Darstellung des Herzens, der Gefäße oder Traumafolgen (43,46,47).

## 1.5 Zielsetzung der Arbeit

Vorangegangene Studien haben aufgezeigt, dass mit CR angefertigte 3D Rekonstruktionen im Vergleich zu klassischen VR Rekonstruktionen aussagekräftiger und natürlicher wirken (36,48). Einer Studie von G. Ampanozi et al. zu Folge sind CR Rekonstruktionen im Vergleich zu konventionellen PMCT Bildern hinsichtlich ihrer Verständlichkeit, Kosteneffizienz und auch Eignung für Gerichtsgutachten überlegen (13).

Eine genauere Betrachtung der Eignung von CR im Vergleich zu VR und klassischen PMCT Schnittbildern bei Frakturen, Weichteilverletzungen an der Körperoberfläche sowie bei im Körper der Leiche verbliebenen Fremdmaterialien nach traumatischer Todesursache ist bisher noch nicht erfolgt. Der Einfluss des Grades der Dislokation von Frakturen sowie der Lokalisation von Weichteilverletzungen auf die Aussagekraft der Rekonstruktionen ist von Bedeutung, um den Einsatz verschiedener Bildverarbeitungsmethoden zu optimieren. Dabei sind als Adressaten Rechtsmediziner als Nicht-Radiologen ausgewählt worden, die mit den Erwartungen an verständliche Gutachten mit aussagekräftigen Informationen vertraut sind.

Zusätzlich soll in der vorliegenden Studie die diagnostische Wertigkeit von CR Rekonstruktionen im Vergleich zu konventionellen PMCT Bildern für Radiologen verglichen werden. Inwieweit durch Radiologen ein Befund anhand einer 3D Rekonstruktion mittels CR erhoben werden kann, ist nicht nur für die Primärdiagnostik in der postmortalen Bildgebung von Interesse.

## 1.6 Ethikvotum

Ein Ethikvotum mit der Studiennummer 6108R und der Registrierungsnummer 2017084415 liegt vor und wurde von der Ethikkommission der Heinrich-Heine-Universität genehmigt.

## 2 Publierte Originalarbeit

Die Dissertation wurde kumulativ mit Bezug zur folgenden Veröffentlichung verfasst:

**Diagnostic value and forensic relevance of a novel photorealistic 3D reconstruction technique in postmortem computed tomography.**

**Böven J**, Boos J, Steuwe A, Morawitz J, Sawicki LM, Caspers J, Küppers L, Hartung B, Thomas, Antoch G, Aissa J, 2020, Diagnostic value and forensic relevance of a novel 3D reconstruction technique in postmortem CT. *British Journal of Radiology*, 93: 20200204

## 3 Diskussion

### 3.1. Interpretation und Einordnung der Studie

Die vorliegende Studie zeigt auf, dass CR Rekonstruktionen nicht nur hilfreich für medizinische Gutachten sind, sondern auch hinsichtlich ihrer Aussagekraft den Rekonstruktionen der etablierten VR Technik und den konventionellen PMCT Bildern überlegen sind. Eine genauere Betrachtung der Stärken und Schwächen der neuartigen Rekonstruktionsmethode CR soll helfen, eine interdisziplinär verständliche und intuitive Befund- bzw. Beweisdokumentation zu ermöglichen.

Auch medizinische Laien wie beispielweise Polizisten, Richter oder Anwälte sollen als Adressaten die Ergebnisse der PMCT verstehen. Hierbei sind insbesondere fehlende anatomische Kenntnisse und untrainierter räumlicher Orientierungssinn in CT Bildern zu beachten. Gleichzeitig soll die Gefahr des Informationsverlust bei der Übermittlung der Befunde minimiert werden.

In einer von Borowska-Solonyko et al. durchgeführten Studie wurden 3D Rekonstruktion traumatischer Verletzungen von lebenden Patienten evaluiert (49). Hier zeigte sich die Gefahr, wichtige Befunde in 3D Rekonstruktionen zu übersehen. Als potentielle Gründe wurden Artefakte, niedrigere Ortsauflösung oder auch diskrete Veränderungen genannt. Daher ist eine möglichst detailgenaue, befundadaptierte Erstellung der Rekonstruktionen zur Vermeidung von Informationsverlusten und Fehlinterpretationen von großer Bedeutung.

In Gutachten, beispielweise zur Nutzung vor Gericht, ist neben einer möglichst objektiven Darstellung eine eindrucksvolle, verständliche Illustration der Befunde von großer Bedeutung. Die Nutzung von 3D Rekonstruktionen als Alternative zu 2D PMCT Bildern in medizinischen Gutachten vor Gericht wurde bereits in der Literatur beschrieben (13). Hier zeigte sich auch die Überlegenheit von neuartigen 3D Rekonstruktionsmethoden wie CR gegenüber konventionellen PMCT Bildern, VR oder lediglich schriftlichen Befunden hinsichtlich der Verständlichkeit.

Verschiedene Studien zeigten bereits, dass 3D Rekonstruktionen, die mit CR angefertigt wurden, einen größeren fotorealistischen Eindruck erzeugen, als 3D Rekonstruktionen mit älteren Techniken wie VR (43,48).

Unsere Studie zeigt unter anderem auf, dass der Informationswert und die Aussagekraft von CR Rekonstruktionen auf seine Betrachter von verschiedenen Faktoren abhängen, beispielweise von der Art der Pathologie oder vom Grad der Dislokation einer Fraktur. Nachdem die Untersuchungsbefunde der PMCT weiter differenziert wurden, konnte ein Vorteil der CR Rekonstruktionen gegenüber konventionellen CT Bildern bei Frakturen mit großer Dislokation, Fremdkörpern im Gewebe und Weichteilverletzungen auf der ventralen, bzw. nicht vom CT-Tisch oder anderen Körperteilen überlagerten Körperoberfläche, aufgezeigt werden.

Während bei PMCT Bildern für jeden Dislokationsgrad dieselbe Aussagekraft evaluiert wurde, konnte sowohl bei CR Bildern als auch bei VR Bildern eine starke Korrelation zwischen dem Grad der Dislokation und der Aussagekraft bestimmt werden. Je höher der Grad der Dislokation, desto besser wurde von den Rechtsmedizinern die Ausdruckskraft bewertet.

Vor allem Frakturen mit großer Dislokation wurden in CR Rekonstruktionen von den Rechtsmedizinern in 84% der Fälle als hilfreich für Gutachten bezeichnet. CR Rekonstruktionen von Frakturen kleinerer Knochen im Mittelgesicht bzw. im Bereich der Orbita wurden oftmals als nicht hilfreich für Gutachten erachtet. Eine mögliche Erklärung hierfür könnte die niedrigere digitale Auflösung von kleineren Knochen in Weichgewebe sein. In solchen Fällen könnten Rechtsmediziner die Möglichkeit vorziehen, kleinere Knochen im Rahmen der Autopsie gezielt freizulegen und anschließend zu analysieren.

Während 3D Rekonstruktionen hauptsächlich die Oberfläche der Strukturen darstellen, können Frakturen ohne Dislokation oder mit nur geringer Beteiligung der Korticalis übersehen werden. In diesen Fällen wurden die konventionellen PMCT Bilder den 3D Rekonstruktionen vorgezogen.

Die Detektionsrate der Radiologen für alle Pathologien, die in dieser Studie gefunden wurde, lag bei 100% für PMCT und bei 80% für CR und VR Rekonstruktionen. Bei Frakturen lag die Detektionsrate bei 78% für CR und VR Rekonstruktionen. Frakturen mit fehlender oder geringer Dislokation sowie Frakturen der Orbita wurden in den CR, als auch in VR Rekonstruktionen in unsere Studie nicht detektiert. 97% der grob dislozierten Frakturen hingegen wurden in den CR und VR Rekonstruktionen entdeckt. Daraus schließen wir, dass CR und VR Rekonstruktionen den diagnostischen

Standard zur Detektion von Pathologien nicht erfüllen und die konventionellen CT Bilder hier vorzuziehen sind. Auch Ebert et al. beschreiben in einer Studie CR und VR Rekonstruktionen als hilfreich, jedoch als nicht geeignet zur primären Diagnostik (43).

Die PMCT gilt als hervorragend geeignete Methode, um Fremdkörper im Gewebe darzustellen. Auch die Arbeitsgemeinschaft für forensische Bildgebung der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin betont in ihrem Indikationskatalog den großen Nutzen der PMCT zum Fremdkörpernachweis und zur -lokalisierung in der Forensik (14). In den von uns untersuchten Leichen wurden Messer, ein Projektil, Osteosynthesematerial sowie ein intraossärer Zugang gefunden. Die von den Radiologen durchgeführte Analyse konnte alle Fremdmaterialien in den CR Rekonstruktionen entdecken. Die Befragung der Rechtsmediziner ergab, dass die Aussagekraft der Bilder im Hinblick auf diese Fremdmaterialien in den CR Rekonstruktionen größer war als die der CT und VR Bilder. Hieraus schließen wir, dass die Lokalisation von Fremdkörpern in menschlichen Körpern in CR Rekonstruktionen für Nicht-Radiologen einfacher ist.

Für die Darstellung und Analyse von Stichverletzungen wurde die PMCT bereits in anderen Studien als hilfreich bezeichnet (7). Trotz Nutzung von *software tools*, die in der Nachverarbeitung eine virtuelle Entfernung des Tisches oder das virtuelle Ausschneiden von angrenzenden Körperteilen ermöglichen, wurden in unserer Studie einige Einschränkungen bei der Visualisierung von Weichteilverletzungen mittels CR und VR gefunden. 100% der Weichteilverletzungen, die nicht vom CT-Tisch oder anderen Körperteilen bedeckt wurden, konnten durch die Radiologen mit Hilfe von CR und VR Bildern detektiert werden. Befand sich die Verletzung jedoch auf der Rückseite des Patienten bzw. überlagert vom Tisch oder von anderen Körperteilen, so konnten lediglich 33% der Weichteilverletzungen entdeckt werden. Eine mögliche Verbesserung wäre durch eine ergänzende CT-Untersuchung denkbar, bei der die Leiche vom Rücken auf den Bauch gelegt wird bzw. umgekehrt.

Eine weitere bedeutende Schlussfolgerung dieser Studie ist, dass eine optimale Positionierung der Leiche auf dem CT-Tisch und eine eventuell erforderliche Lagekorrektur während der Untersuchung zu einer besseren Verwendbarkeit der 3D Rekonstruktionen und somit zu einer größeren Aussagekraft führt. Zwar wird eine möglichst anatomisch korrekte, überlagerungsfreie und vollständige Lagerung auch in der aktuellen Leitlinie der Arbeitsgemeinschaft für Forensische Bildgebung der deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin empfohlen, jedoch wird die Möglichkeit

einer optimalen Lagerung oftmals durch Hygienevorschriften, die wie auch in unserem radiologischen Institut beispielsweise das Eröffnen des Leichensacks untersagen, eingeschränkt (12,50).

Obwohl die Rechtsmediziner in dieser Studie lediglich 57% der 112 CR Rekonstruktionen als geeignet für Gutachten vor Gericht ansahen, konnte unsere Studie verdeutlichen, dass CR Rekonstruktionen hilfreich in der Forensik sind. Weiterhin wurde der Vorteil der neuartigen CR Technik gegenüber der VR Technik hinsichtlich der Aussagekraft in jeder der von uns untersuchten Traumakategorien deutlich.

Andere Studien belegen ebenfalls eine Überlegenheit der CR Technik gegenüber seinem Vorgänger, der VR Technik. Wollschläger et al. publizierten eine Studie, in der Frakturen der unteren Extremität untersucht wurden (48). Auch hier führten CR Rekonstruktionen zu einer detaillierteren, hilfreicheren Darstellung der Verletzungen im Vergleich zu VR Rekonstruktionen.

### 3.2 Limitationen

Neben der Untersuchung von Leichen in einer nicht nachträglich korrigierten Lage weist unsere Studien weitere Einschränkungen auf. Eine wichtige Limitation besteht trotz 43 untersuchter Leichen, von denen 33 Leichen in der Studie inkludiert wurden, in der geringen Größe der Stichprobe. Die Durchführung anschließender Studien mit einer höheren Stichprobenzahl und dementsprechend einer größeren Vielfalt von Pathologien wäre von Interesse, um weitere Untersuchungsergebnisse festzustellen und die Übertragbarkeit zu überprüfen.

In unserem Institut wird aus logistischen Gründen die PMCT ohne Kontrastmittel durchgeführt, was zu einer geringeren Sensitivität führt. Insbesondere Organverletzungen und Gefäßläsionen, die in dieser Studie nicht untersucht wurden, können mit Hilfe einer aufwendigeren PMCT Angiographie besser detektiert werden (9,32).

Als Nicht-Radiologen wurden Rechtsmediziner gebeten, die Bilder zu betrachten und zu evaluieren. Im Vergleich zu medizinischen Laien wie Polizisten, Anwälten oder

Richtern, an die forensischen Gutachten meist gerichtet sind, haben Rechtsmediziner oftmals Erfahrung mit der Begutachtung von CT Schnittbildern und weitreichendere anatomische Vorkenntnisse. Hieraus könnte eine bessere Bewertung der CT Schnittbilder im Vergleich zu den 3D Rekonstruktionen entstanden sein.

In dieser Studie wurden *screenshots* der 3D Rekonstruktionen bewertet, die vom Radiologen vorselektierte Darstellungen der Pathologie aus dem subjektiv besten Winkel und der subjektiv besten Einstellung bezüglich Helligkeit und Farbschema enthielten. Außerdem fehlt den Betrachtern die Möglichkeit, Vorteile der *software* wie Vergrößerung oder Rotation bei der Betrachtung zu nutzen, was vor allem eine anatomische Einordnung erleichtert.

### 3.3 Schlussfolgerungen

Unsere Studie zeigt, dass die Bildverarbeitungstechnik CR der älteren VR Technik in allen drei von uns untersuchten Traumakategorien hinsichtlich ihrer Ausdruckskraft überlegen ist. CR war hilfreicher als konventionelle PMCT Bilder bei Frakturen mit großer Dislokation, zur Demonstration von Fremdkörpern im Gewebe und bei Weichgewebsverletzungen wie Stichverletzungen, die nicht vom CT-Tisch oder anderen Körperteilen überlagert wurden. Insbesondere bei überlagerten Weichgewebsverletzungen und Frakturen ohne wesentliche Dislokation können CR Rekonstruktionen nicht ohne die zugrunde liegenden PMCT Bilder zur Diagnostik verwendet werden. Beachtet man die Limitationen, kann CR das Verständnis und den interdisziplinären Informationsaustausch von forensischen Befunden erheblich verbessern.

## 4 Literaturverzeichnis

1. Böven J, Boos J, Steuwe A, Morawitz J, Sawicki LM, Caspers J, u. a. Diagnostic value and forensic relevance of a novel photorealistic 3d reconstruction technique in postmortem computed tomography. *Br J Radiol.* 11. Juni 2020;20200204.
2. Vester MEM, van Rijn RR, Duijst WLJM, Beenen LFM, Clerkx M, Oostra RJ. Added value of post-mortem computed tomography (PMCT) to clinical findings for cause of death determination in adult “natural deaths”. *Int J Legal Med.* 1. Juli 2020;134(4):1457–63.
3. Roberts IS, Benamore RE, Benbow EW, Lee SH, Harris JN, Jackson A, u. a. Post-mortem imaging as an alternative to autopsy in the diagnosis of adult deaths: a validation study. *The Lancet.* Januar 2012;379(9811):136–42.
4. von Stillfried S, Isfort P, Knüchel-Clarke R. Postmortale bildgebende Verfahren: Erfahrungen und Ausblicke. *Pathol.* September 2017;38(5):412–5.
5. Erfurt C, Hahn G, Roesner D, Schmidt U. Kinderradiologische Diagnostik bei Verdacht auf Kindesmisshandlung. *Radiol.* Oktober 2009;49(10):932–41.
6. Sano R, Takahashi Y, Hayakawa A, Murayama M, Kubo R, Hirasawa S, u. a. Use of postmortem computed tomography to retrieve small metal fragments derived from a weapon in the bodies of victims in two homicide cases. *Leg Med.* 1. Mai 2018;32:87–9.
7. Schnider J, Thali MJ, Ross S, Oesterhelweg L, Spendlove D, Bolliger SA. Injuries due to sharp trauma detected by post-mortem multislice computed tomography (MSCT): A feasibility study. *Leg Med.* 1. Januar 2009;11(1):4–9.
8. Grabherr S, Baumann P, Fahrni S, Mangin P, Grimm J. Virtuelle vs. reale forensische bildgebende Verfahren: Einsatzgebiete, Vorteile und Limits. *Rechtsmedizin.* Oktober 2015;25(5):493–509.
9. Grabherr S, Heinemann A, Vogel H, Ruttly G, Morgan B, Woźniak K, u. a. Postmortem CT Angiography Compared with Autopsy: A Forensic Multicenter Study. *Radiology.* 1. Mai 2018;170:559.
10. Ciaffi R, Gibelli D, Cattaneo C. Forensic radiology and personal identification of unidentified bodies: a review. *Radiol Med (Torino).* September 2011;116(6):960–8.
11. Heinemann A, Vogel H, Heller M, Tzikas A, Püschel K. Investigation of medical intervention with fatal outcome: the impact of post-mortem CT and CT angiography. *Radiol Med (Torino).* September 2015;120(9):835–45.
12. Fischer H, Heinemann A, et al. Grundlagen der postmortalen Computertomographie (PMCT) für forensisch- radiologische Anwendungen – Empfehlungen und Indikationskatalog, Version 1, Stand Oktober 2015 [Internet]. [zitiert 20. Juni 2020]. Verfügbar unter: [https://www.dgrm.de/fileadmin/PDF/AGFB/Grundlagen\\_der\\_postmortalen\\_Computertomographie\\_\\_PMCT\\_\\_für\\_forensisch-radiologische\\_Anwendungen.pdf](https://www.dgrm.de/fileadmin/PDF/AGFB/Grundlagen_der_postmortalen_Computertomographie__PMCT__für_forensisch-radiologische_Anwendungen.pdf)
13. Ampanozi G, Zimmermann D, Hatch G. Format preferences of district attorneys for postmortem medical imaging reports: understandability, cost effectiveness, and suitability for the courtroom—a questionnaire based study. *Leg Med Tokyo.* 2012;14:116.
14. Arbeitsgemeinschaft Forensische Bildgebung (AGFB) der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin (DGRM), Bornik A, Heinze S, Campana L, Rost T, Wittig H, u. a. Theoretische Grundlagen der forensischen Bildgebung: Arbeitsgemeinschaft Forensische Bildgebung (AGFB) der Deutschen Gesellschaft für Rechtsmedizin (DGRM). *Rechtsmedizin.* Februar 2019;29(1):1–12.

15. Stiller W. Grundlagen der Mehrzeilendetektor-Computertomographie: Teil 1: Technischer Aufbau und physikalisch-technische Grundlagen. *Radiol.* Juli 2011;51(7):625–40.
16. Kalender WA. X-ray computed tomography. *Phys Med Biol.* 7. Juli 2006;51(13):R29–43.
17. Bockisch A, Forsting M, Freudenberg LS, Loch T, Rübben H, Stattaus J. Moderne Bildgebung. In: Rübben H, Herausgeber. *Uroonkologie* [Internet]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg; 2014. S. 145–73. Verfügbar unter: [https://doi.org/10.1007/978-3-642-35032-0\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-642-35032-0_10)
18. Der bescheidene Mister X: Wilhelm Conrad Röntgen (27.03.1845–10.02.1923). *Klin.* Oktober 2018;47(10):440–440.
19. Martin DD, Wit JM, Hochberg Z, Sävendahl L, Rijn RR van, Fricke O, u. a. The Use of Bone Age in Clinical Practice – Part 1. *Horm Res Paediatr.* 2011;76(1):1–9.
20. Grabherr et al. - 2015 - Virtuelle vs. reale forensische bildgebende Verfah.pdf [Internet]. [zitiert 20. Juni 2020]. Verfügbar unter: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s00194-015-0047-0.pdf>
21. Schick F. Grundlagen der Magnetresonanztomographie. *Radiol.* Mai 2007;47(S1):S7–26.
22. Ruder TD, Thali MJ, Hatch GM. Essentials of forensic post-mortem MR imaging in adults. *Br J Radiol* [Internet]. April 2014 [zitiert 20. Juni 2020];87(1036). Verfügbar unter: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC4067017/>
23. Thali M. Virtuelle Autopsie (Virtopsy) in der Forensik. 1. Januar 2011;
24. Thali M, Braun M, Buck U, Aghayev E, Jackowski C, Vock P, u. a. VIRTOPSY—Scientific Documentation, Reconstruction and Animation in Forensic: Individual and Real 3D Data Based Geo-Metric Approach Including Optical Body/Object Surface and Radiological CT/MRI Scanning. *J Forensic Sci.* 1. April 2005;50:428–42.
25. Buck U, Naether S, Braun M, Bolliger S, Friederich H, Jackowski C, u. a. Application of 3D documentation and geometric reconstruction methods in traffic accident analysis: With high resolution surface scanning, radiological MSCT/MRI scanning and real data based animation. *Forensic Sci Int.* 20. Juli 2007;170(1):20–8.
26. Kottner S, Schaerli S, Fürst M, Ptacek W, Thali M, Gascho D. VirtoScan-on-Rails – an automated 3D imaging system for fast post-mortem whole-body surface documentation at autopsy tables. *Forensic Sci Med Pathol.* Juni 2019;15(2):198–212.
27. Leipner A, Baumeister R, Thali MJ, Braun M, Dobler E, Ebert LC. Multi-camera system for 3D forensic documentation. *Forensic Sci Int.* 1. April 2016;261:123–8.
28. Park C-S, Jeon H-P, Choi K-S, Kim J-P, Park N-K. Application of 3D Laser Scanner to Forensic Engineering. *J Forensic Sci.* 2018;63(3):930–4.
29. Grabherr S, Doenz F, Steger B, Dirnhofner R, Dominguez A, Sollberger B, u. a. Multi-phase post-mortem CT angiography: development of a standardized protocol. *Int J Legal Med.* November 2011;125(6):791–802.
30. Palmiere C, Binaghi S, Doenz F, Bize P, Chevallier C, Mangin P, u. a. Detection of hemorrhage source: The diagnostic value of post-mortem CT-angiography. *Forensic Sci Int.* 10. Oktober 2012;222(1):33–9.
31. Ruddy GN, Morgan B, Robinson C, Raj V, Pakkal M, Amoroso J, u. a. Diagnostic accuracy of post-mortem CT with targeted coronary angiography versus autopsy for coroner-requested post-mortem investigations: a prospective, masked, comparison study. *The Lancet.* Juli 2017;390(10090):145–54.
32. Grabherr S, Grimm J, Dominguez A, Vanhaebost J, Mangin P. Advances in postmortem CT-angiography. *Br J Radiol.* 2014;87:20130488.
33. Ebert LC, Ptacek W, Naether S, Fürst M, Ross S, Buck U, u. a. Virtobot—a

- multi-functional robotic system for 3D surface scanning and automatic post mortem biopsy. *Int J Med Robot.* 2010;6(1):18–27.
34. Aghayev E, Ebert LC, Christe A, Jackowski C, Rudolph T, Kowal J, u. a. CT data-based navigation for post-mortem biopsy – A feasibility study. *J Forensic Leg Med.* 1. August 2008;15(6):382–7.
  35. Grabherr S, Baumann P, Minoiu C, Fahrni S, Mangin P. Post-mortem imaging in forensic investigations: current utility, limitations, and ongoing developments. *Res Rep Forensic Med Sci.* 1. März 2016;6:25.
  36. Dappa E, Higashigaito K, Fornaro J, Leschka S, Wildermuth S, Alkadhi H. Cinematic rendering – an alternative to volume rendering for 3D computed tomography imaging. *Insights Imaging.* Dezember 2016;7(6):849–56.
  37. Stiller W. Grundlagen der Mehrzeilendetektor-Computertomographie: Teil 2: Einflussfaktoren der Strahlenexposition und aktuelle technische Entwicklungen. *Radiol.* Dezember 2011;51(12):1061–78.
  38. von Tengg-Kobligk H, Weber TF, Rengier F, Böckler D, Schumacher H, Kauczor H-U. Aktuelle Bildnachverarbeitung der aortalen CTA und MRA. *Radiol.* November 2007;47(11):1003–11.
  39. Dalrymple NC, Prasad SR, El-Merhi FM, Chintapalli KN. Price of Isotropy in Multidetector CT. *RadioGraphics.* Januar 2007;27(1):49–62.
  40. Edelman RR, Dunkle E, Koktzoglou I, Griffin A, Russell EJ, Ankenbrandt W, u. a. Rapid Whole-Brain Magnetic Resonance Imaging With Isotropic Resolution at 3 Tesla. *Invest Radiol* [Internet]. 2009;44(1). [zitiert 20. Juni 2020]. Verfügbar unter: [https://journals.lww.com/investigativeradiology/Fulltext/2009/01000/Rapid\\_Whole\\_Brain\\_Magnetic\\_Resonance\\_Imaging\\_With.8.aspx](https://journals.lww.com/investigativeradiology/Fulltext/2009/01000/Rapid_Whole_Brain_Magnetic_Resonance_Imaging_With.8.aspx)
  41. Fishman EK, Ney DR, Heath DG, Corl FM, Horton KM, Johnson PT. Volume Rendering versus Maximum Intensity Projection in CT Angiography: What Works Best, When, and Why. *RadioGraphics.* Mai 2006;26(3):905–22.
  42. Drebin RA, Carpenter L, Hanrahan P. Volume rendering. *ACM SIGGRAPH Comput Graph.* 1. August 1988;22(4):65–74.
  43. Ebert LC, Schweitzer W, Gascho D, Ruder TD, Flach PM, Thali MJ, u. a. Forensic 3D Visualization of CT Data Using Cinematic Volume Rendering: A Preliminary Study. *Am J Roentgenol.* Februar 2017;208(2):233–40.
  44. Roll C, Schirmbeck J, Müller F, Neumann C, Kinner B. Value of 3D Reconstructions of CT Scans for Calcaneal Fracture Assessment. *Foot Ankle Int.* 1. November 2016;37(11):1211–7.
  45. Eid M, De Cecco CN, Nance JW, Caruso D, Albrecht MH, Spandorfer AJ, u. a. Cinematic Rendering in CT: A Novel, Lifelike 3D Visualization Technique. *Am J Roentgenol.* 15. Mai 2017;209(2):370–9.
  46. Comaniciu D, Engel K, Georgescu B, Mansi T. Shaping the future through innovations: From medical imaging to precision medicine. *Med Image Anal.* Oktober 2016;33:19–26.
  47. Siemens Healthcare GmbH. syngo.via Cinematic VRT White Paper [Internet]. Cinematic Rendering for Medical Imaging. 2017 [zitiert 28. Juli 2019]. Verfügbar unter: <https://www.siemens-healthineers.com/de/infrastructure-it/medical-imaging-it/advanced-visualization-solutions/syngovia-cinematic>
  48. Wollschlaeger LM, Boos J, Jungbluth P, Grassmann J-P, Schleich C, Latz D, u. a. Is CT-based cinematic rendering superior to volume rendering technique in the preoperative evaluation of multifragmentary intraarticular lower extremity fractures? *Eur J Radiol.* 1. Mai 2020;126:108911.
  49. Borowska-Solonyanko A, Solonyanko B. The use of 3D computed tomography reconstruction in medico-legal testimony regarding injuries in living victims – Risks

and benefits. *J Forensic Leg Med.* 1. Februar 2015;30:9–13.

**50.** de Jong LW, Legrand L, Delabarde T, Hmeydia G, Edjlali M, Hamza L, u. a. Experience with postmortem computed tomography in the forensic analysis of the November 2015 Paris attacks. *Forensic Sci Res.* 2. Juli 2020;5(3):242–7.

## 5 Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei Prof. Dr. med. Thomas und PD Dr. med. Aissa bedanken, die mich beide als Doktorväter und Oberärzte jederzeit bei meiner Forschung und Ausbildung unterstützt und motiviert haben.

Prof. Dr. med. Antoch als Leiter des Institutes für Diagnostische und Interventionelle Radiologie danke ich für die Ermöglichung unserer Ideen und Projekte.

Außerdem gilt mein Dank den vielen Mitarbeitern, die bei der Durchführung der postmortalen Bildgebung beteiligt sind.

Besonderer Dank gilt Dr. med. Küppers und Prof. Dr. med. Hartung aus dem Institut für Rechtsmedizin für eine konstruktive und angenehme interdisziplinäre Zusammenarbeit.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Prof. Dr. med. Scherer bedanken, der mich auf meinen ersten Schritten in der Radiologie begleitet, und mir den Weg nach Düsseldorf gezeigt hat.

Nicht zuletzt danke ich meiner Familie, insbesondere meinem Bruder Jahn, der mir immer ein Vorbild war, und meinen Eltern Elisabeth und Lothar, die mir ein so sorgenfreies Studium in jeder Hinsicht ermöglicht haben!