



## **Basisdokument**

# **Theoretische Grundlagen der Forensischen Bildgebung**

Alexander Bornik      Sarah Heinze      Lorenzo Campana  
Thomas Rost      Holger Wittig      Dirk Labudde  
Pia Genet      Silke Grabherr

3. Februar 2018

Deutsche Gesellschaft für Rechtsmedizin (DGRM)  
Arbeitsgemeinschaft Forensische Bildgebung (AGFB)

Unter Mitwirkung von:

Joel Aissa, Jessica Katharina Baltés, Christoph Birngruber, Herwig Brandtner, Dirk Breitmeier, Gina Bruch, Andreas Bucher, Ursula Buck, Kirsten Buße, Fabrice Dedouit, Florian Fischer, Hartmut Fischer, Pia Genet, Tanja Germerott, Philip Glemser, Jochen Grimm, Claus Grundmann, Benno Hartung, Sara Heinbuch, Axel Heinemann, Janine Helmus, Johannes Höller, Sandra Jaschinski, Thomas Kamphausen, Manuel Kellinghaus, Sophie Kerbacher, Mattias Kettner, Sarah Kölzer, Astrid Krauskopf, Anja Leipner, Rüdiger Lessig, Constantin Lux, Bernhard Neumayer, Stefanie Plenzig, Reingard Riener-Hofer, Uwe Schmidt, Andreas Schuff, Christian Schyma, Hanna Sprenger, Ines Steinhagen, Dankwart Stiller, Christian Stumm, Michael Thali, Iliana Tzimas, Harry van Venrooij, Marcel Verhoff, Bridgette Webb, Ulrike Weinberger

# 1 Einführung

Bildgebende Methoden haben in der Rechtsmedizin in den vergangenen Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Die Technologien werden kontinuierlich weiterentwickelt und die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten erweitern sich ständig.

Dieses Dokument verfolgt das Ziel, Rechtsmedizinern einen aktuellen Überblick über verfügbare Technologien und deren grundsätzliche Funktionsweise zu vermitteln. Diese grundlegende Darstellung der Funktionen, Möglichkeiten und Grenzen der Aufnahmeverfahren soll die Auswahl der geeignetsten Modalität(en) zur Beantwortung rechtsmedizinischer Fragestellungen erleichtern.

## 2 Methodenübersicht

### 2.1 Röntgenbildgebung

Unter Röntgenbildgebung versteht man allgemein das nach dem Physiker Wilhelm Röntgen benannte Aufnahmeverfahren. Dabei wird eine Person oder ein Objekt mit Röntgenstrahlung durchstrahlt. Die Strahlung wird auf ihrem Weg durch den Körper vom Gewebe teilweise absorbiert. Der Grad der Abschwächung hängt hauptsächlich von der Wellenlänge, der Dichte des durchstrahlten Gewebes und der Weglänge ab. Röntgenaufnahmen entstehen, wenn das Absorptionsmuster auf Filmmaterial (*analoges Röntgen*) oder elektronischen Sensoren (*digitales Röntgen*) bildlich aufgezeichnet wird.

### 2.2 Computertomographie

Die Computertomographie (CT) ist ein Schnittbildverfahren auf Basis der Röntgenstrahlung. Im Gegensatz zur klassischen Röntgenbildgebung ist die überlagerungsfreie Darstellung von Körperstrukturen möglich. Im CT-Scanner wird die Abschwächung eines Röntgenstrahls durch das zu scannende Objekt für eine große Zahl von Richtungen gemessen. Im Gegensatz zur Röntgen-Bildgebung wird das dabei entstehende Absorptionsprofil nicht direkt dargestellt, sondern computergestützt mittels der Radon-Transformation weiterverarbeitet. So ist es im Gegensatz zur klassischen Röntgen-Bildgebung, die nur zweidimensionale Abbildungen liefert, möglich, Dichtewerte für jeden Punkt im aufgenommenen Volumen (bzw. Schicht) zu berechnen.

Ein CT-Scanner besteht typischerweise aus einer Gantry (Ringtunnel) mit rotierender Strahlungsquellen/Detektoren Konfiguration sowie einem Tisch, auf dem der Patient/das Untersuchungsobjekt durch die Gantry befördert wird.

Bei den ersten CT-Scannern wurden einzelne Schichten mit einem einzelnen Röntgen Detektor aufgenommen. Moderne CT-Scanner arbeiten mit Fächerstrahlen und Ringdetektoren, die aus

mehreren röntgensensitiven Einzeldetektoren aufgebaut sind, sodass viele Messpunkte gleichzeitig aufgenommen werden können. Kontinuierlicher Tischvorschub (Spiral-CT) sowie mehrzeilige Detektoren (multi-slice) sind die Grundlage für kurze Scanzeiten bei niedriger Strahlenbelastung sowie hochauflösende volumetrische (3D) Aufnahmen.

## 2.3 Magnetresonanztomographie

Die Magnetresonanztomographie basiert auf der Kernspinresonanz oder Nuclear Magnetic Resonance (NMR), einem Effekt, demzufolge Atomkerne in einem konstanten Magnetfeld elektromagnetische Wechselfelder absorbieren und emittieren. Im Kernspintomographen (MRT) wird dieser Effekt auf Basis eines sehr starken Magnetfelds sowie magnetischen Wechselfeldern (1.5 bis 7 Tesla) im Radiofrequenzbereich (MHz) genutzt, um Wasserstoffkerne (Protonen) zur Resonanz anzuregen. In der Folge wird in Empfängerspulen das beim Verlassen des angeregten Zustands induzierte Signal gemessen. Daraus lassen sich und z. B. die Relaxationszeiten bestimmen. Diese unterscheiden sich je nach Gewebeart und liefern Bildinformation. Auch der unterschiedliche Gehalt an Wasserstoffatomen trägt zum Bildkontrast bei.

Im MRT erfolgt die Ortskodierung durch ein rotierendes Gradientenfeld (*Projektionen*). Die Berechnung des Bildes ist in Analogie zur Computertomographie (z. B. gefilterte Rückprojektion) möglich.

Die Magnetresonanztomographie ist frei von ionisierender Strahlung. Wirkungen starker magnetischer (Wechsel-)Felder sind bekannt – z. B. Wirbelströme, die zu Übelkeit bzw. Schwindelgefühl führen – jedoch nicht ausreichend erforscht. An dieser Stelle soll auf die gängigen Sicherheitsmaßnahmen hingewiesen werden, insbesondere in Bezug auf metallische Fremdkörper.

## 2.4 3D-Oberflächenerfassung

Darunter versteht man eine dreidimensionale Erfassung der Oberflächengeometrie von Objekten oder Personen mit einem technischen Aufnahmesystem. Neben der Geometrie wird häufig auch die Farbinformation der Oberflächen, die sogenannte Textur, miterfasst und in Form von digitalen 3D-Modellen, punkt- oder flächenbasierten Oberflächenrepräsentationen, gespeichert. Im Gegensatz zu tomographischen Verfahren wie CT oder MRT liefern Oberflächenscans keine Information aus dem Inneren der aufgenommenen Objekte. Die Verfahren zur Aufnahme von Oberflächenscans sind ebenso vielfältig, wie die Unterschiede hinsichtlich der erzielbaren Qualität.

## 2.5 Erweiterungen

### 2.5.1 Angiographie

Unter dem Begriff *Postmortale Angiographie* versteht man die Darstellung der Blutgefäße an Verstorbenen im Rahmen der Bildgebung. Sie wird durch Injektion eines Kontrastmittels während oder vor der Durchführung von Aufnahmen erlangt. In der Rechtsmedizin wird die postmortale Angiographie zumeist auf Basis der CT-Bildgebung durchgeführt, weshalb sich der Begriff *Postmortale Angio-CT* etabliert hat.

### 2.5.2 Bildgestützte Postmortale Probenentnahme

Die minimal invasive Probenentnahme vor der Obduktion/Angiographie verringert das Kontaminationsrisiko. Bildgebung kann unterstützend bei Gewinnung von Gewebeprobe, Flüssigkeiten und Gasen für weiterführende Untersuchungen eingesetzt werden.

Bildgebung kann sowohl bei der Planung, als auch bei der Durchführung (bis hin zur automatisierten Probenentnahme mit einem Roboterarm) eingesetzt werden.

Grundsätzlich kann jede Modalität eingesetzt werden. Dreidimensionale wie CT und MRT, aber auch Ultraschall, Röntgen (C-Bogen).

## 3 Röntgen

### 3.1 Stand der Technik

Die Anwendung von Röntgenstrahlung ist durch ihre ionisierende Wirkung mit potentiellen Risiken für den Anwender sowie für die zu untersuchende lebende Personen verbunden. Die Strahlenbelastung ist beim klassischen Röntgen meist geringer als bei CT-Aufnahmen.

Da die Strahlenbelastung im postmortalen Bereich irrelevant ist und CT-Bildgebung eine wesentlich umfassendere Dokumentation (dreidimensional) der Morphologie ermöglicht, sollte dieser Methode der Vorzug gegeben werden.

### 3.2 Indikationen

Neben der postmortalen Anwendung ist ein Einsatz der Röntgenuntersuchung auch im klinisch-forensischen Bereich möglich. Eine exemplarische Anwendung für Röntgenbildgebung in der Rechtsmedizin ist die klinisch-forensische Altersschätzung, bei der durch Vergleich mit einem Bildatlas/Referenzdaten das biologische Alter abgeschätzt werden kann.

## 3.3 Möglichkeiten und Grenzen in der Rechtsmedizin

Röntgenbildgebung erlaubt es, innere Sachverhalte (z. B. Projektile) und Befunde (z. B. Frakturen, Gasansammlungen etc.) schon vor einer Obduktion in Form einer zweidimensionalen Projektion sichtbar zu machen. Eine räumliche (3D) Zuordnung anhand eines einzigen Röntgenbildes ist schwierig. In der Praxis werden daher meist orthogonale Ansichten angefertigt. Eine genaue dreidimensionale Vermessung in Analogie zu Tomographiedaten ist nicht möglich. Aufnahmegeräte wie der C-Bogen mit frei drehbarer Röntgenquell-Detektorkonfiguration lassen die Grenzen zwischen Röntgen-Bildgebung und Computertomographie verschwimmen. Mit ihnen können dreidimensionale Bilder rekonstruiert werden.

## 3.4 Datenauswertung & Softwareaspekte

Digitale Röntgenaufnahmen sind digitale Rasterbilder, d.h. für jedes Element einer zweidimensionalen Matrix von Pixeln ist ein skalarer Wert (Graustufe) verfügbar.

Die geometrische Auflösung (Anzahl von Pixeln) ist geräteabhängig – in der Praxis ähnlich den Auflösungen von Digitalkameras. Die radiometrische Auflösung (Anzahl der möglichen Farben/Graustufen, Farbtiefe) ist mit 4096 bis 65536 (12 bis 16 Bit) meist höher als die in der digitalen Fotografie üblichen 256 (8 Bit). Deshalb werden digitale Röntgenbilder meist im DICOM-Format gespeichert. Das menschliche Auge kann ca. 30 Graustufen gleichzeitig wahrnehmen. Bei der Betrachtung von digitalen Röntgenbildern sollte die Auswahl dieser Graustufen, von Radiologen als *Fensterung* bezeichnet, optimal unterstützt werden, um alle Details in den Bildern wahrnehmen zu können. Es empfiehlt sich daher, eine spezielle Radiologiesoftware, wie sie auf Befundungskonsolen zu finden ist, zu verwenden. Eine Betrachtung am PC ist mit einer Reihe von Softwarewerkzeugen möglich (RadiAnt, MicroDicom, KPacs etc.). Derartige Werkzeuge sind einer Umwandlung in ein Standardbildformat (z. B. JPEG, PNG, ...) und der Betrachtung mit Fotobearbeitungssoftware unbedingt vorzuziehen, da bei der Konversion die höhere radiometrische Auflösung der Bilder verloren geht.

## 3.5 Infrastruktur für Datenauswertung

Zur Betrachtung von analogen Röntgenaufnahmen ist ein Sichtgerät notwendig. Zur Auswertung von digitalem Röntgen empfiehlt sich eine Befundungskonsole mit entsprechender Software. Alternativ kann ein PC mit qualitativ hochwertigem Bildschirm eingesetzt werden. Für den regelmäßigen Einsatz empfiehlt sich die Einrichtung eines PACS-Archivs bzw. die Anbindung an ein solches.

# 4 Computertomographie

## 4.1 Stand der Technik und Indikationen

Computertomographie ist besonders gut geeignet, knöcherne Strukturen darzustellen. Die Anwendung bei Knochenverletzungen sowie Fremdkörpern wie Projektilen ist daher naheliegend.

Darüber hinaus können auch Strukturen, die eine von ihrer Umgebung deutlich abweichende (Röntgen-) Dichte haben, gut detektiert werden, z. B. Verletzungen der Haut, Lufteinschlüsse (Stichkanäle, leere Blutgefäße) und Blutansammlungen. Moderne CT-Scanner sind geeignet, Ganzkörperaufnahmen durchzuführen, welche insbesondere bei der Ereignisrekonstruktion nützlich sind.

## 4.2 Protokolle

Grundsätzlich sollte in der Rechtsmedizin ein möglichst moderner Multi-Slice Spiral CT-Scanner verwendet werden, wobei alle verfügbaren Einstellungen in Richtung Maximierung der Bildqualität vorgenommen werden sollten - ältere Scanner sollten nicht verwendet werden, da die Bildqualität deutlich schlechter im Sinne von niedrigerer Auflösung bei gleichzeitig stärkerem Rauschen ist. Es empfiehlt sich grundsätzlich eine Ganzkörperaufnahme mit möglichst hoher Auflösung. Ein Scanner, der dies ohne Umlagerung ermöglicht, ist von Vorteil. Folgende wesentlichen Parameter beeinflussen die Aufnahme bzw. die für die Bildrekonstruktion notwendigen Rohmessdaten direkt:

**Field of View:** Dieses sollte so klein wie möglich aber so groß wie nötig gewählt werden, um die geometrische Auflösung innerhalb einer Schicht zu maximieren und die zu scannende Region trotzdem vollständig zu erfassen.

**Kollimationswinkel:** Dieser beschreibt die Aufweitung des Scanstrahls. Für einen geringen Schichtabstand und damit eine hohe Auflösung in der dritten Dimension ist der kleinstmögliche Wert zu wählen.

**Generatorleistung/Röhrenstrom:** Diese sollten in der Regel möglichst hoch gewählt werden, um das Bildrauschen zu minimieren. Die dadurch höhere Strahlendosis ist im postmortalen Bereich irrelevant.

**Generatorspannung:** Sie bestimmt die Härte der verwendeten Röntgenstrahlung und beeinflusst somit den Bildeindruck.

Die Qualität der im Rahmen der Rekonstruktion erhaltenen Bilder hängt noch von einer Reihe von Rekonstruktionsparametern ab, u. a. der gewünschten Bildgröße/Auflösung, den verwendeten Filtern und deren Parametereinstellungen. Da CT-Scanner die Rohdaten meist nur für kurze Zeit speichern, sollten Bilder/Volumina rekonstruiert werden, die sowohl für die Befundung durch Radiologen, als auch für die 3D-Visualisierung und Fallanalyse gut geeignet sind. Dünnschichtige Rekonstruktionen eignen sich am besten.

## 4.3 Möglichkeiten und Grenzen der Methoden in der Rechtsmedizin

### 4.3.1 Neue Protokolle und Techniken

**Mehrspektren CT:** Klassische CT-Scanner arbeiten mit nur einer Röhren-Spannung und messen die kumulierte Abschwächung über das gesamte dabei entstehende Spektrum. Die Unterschiede in der Absorptionscharakteristik bleiben unberücksichtigt – Kontrastmittel absorbiert z. B. weichere Röntgenstrahlung stärker als harte. Durch die Verwendung mehrerer Spannungen (Dual-Energy) kann auf Basis der unterschiedlichen Absorptionscharakteristika zwischen Kontrastmittel und Knochen unterschieden werden, die im klassischen CT idente Dichtewerte liefern. Auch andere Gewebetypen können so besser unterschieden und Metallartefakte reduziert werden. In der Rechtsmedizin ist die verbesserte Darstellung und Spezifizierbarkeit von metallischen Gegenständen von Vorteil. Geräte mit multispektralen Detektoren (Photon CT) erlauben eine noch bessere Unterscheidung unterschiedlicher Gewebetypen gleicher Dichte.

**Iterative Bildrekonstruktion:** Gängige CT-Scanner berechnen Schnittbilder mittels gefilterter Rückprojektion. Seit einigen Jahren kommen vermehrt iterative und damit rechenintensivere Verfahren zum Einsatz, die bei identischen Rohdaten eine qualitativ hochwertigere Rekonstruktion ermöglichen. Im klinischen Einsatz kann so bei geringerer Strahlendosis für Patienten eine für die Diagnostik ausreichende Bildqualität erzielt werden. In der Rechtsmedizin ist mit iterativer Rekonstruktion eine deutlich höhere Bildqualität erzielbar.

### 4.3.2 Auflösungsgrenzen (Postmortem Bezug)

Moderne Multi-Slice CT-Scanner sind in der Lage, Schichtbilder mit 512x512 Pixeln aufzunehmen, bei einigen neuen Geräten sind auch 1024x1024 Pixel möglich. Diese werden auf das eingestellte *field of view* aufgeteilt. Je nach Einstellung ergeben sich damit geometrische Auflösungen von etwa 0,5 bis 1 mm.

Die Auflösung in der dritten Dimension ist vom Detektor abhängig. Die neueste Scannergeneration erlaubt Schichtdicken von unter 0,3 mm.

### 4.3.3 Schichtdicken für die Befundung und Rekonstruktion

Für die Befundung bevorzugen viele Radiologen Schichtdicken und Abstände zwischen 1 und 3 mm. Für die 3D-Visualisierung im Rahmen der computerunterstützten Fallaufbereitung und Analyse sind annähernd isotrope Volumina (Schichtdicken ähnlich der Auflösung innerhalb der Schicht: meist unter 1 mm) und weichere Filterkerne vorteilhaft.

Für rechtsmedizinische Fragestellungen sollten CT Scans grundsätzlich mit der höchstmöglichen Auflösung durchgeführt werden. Diese setzt neben einem Scanner mit entsprechend fein auflösendem Detektor auch die Wahl der niedrigsten Kollimationseinstellung voraus.

### 4.3.4 Bildqualität, Artefakte und deren Beseitigung

Bei postmortalen CT Scans sind **metallische Gegenstände** die häufigste Quelle von Artefakten. Es empfiehlt sich daher, diese zu entfernen, sofern dadurch keine fallrelevanten Informationen verloren gehen. Die aktuellsten Modelle einiger Hersteller sind mit Funktionalität zur Reduktion von Metallartefakten ausgestattet, meist im Zusammenhang mit iterativen Rekonstruktionsalgorithmen und/oder multispektralen Rohdaten.

**Aufhärungsartefakte** können durch die Wahl einer höheren Spannung reduziert werden.

Der Signal/Rauschabstand als Maß für das **Bildrauschen** wird durch die Steigerung der Dosis (Spannung, Strom) erhöht. Das Bildrauschen kann auch durch iterative Rekonstruktionsverfahren reduziert werden. Im Zuge der Nachverarbeitung können Glättungsalgorithmen (Filter) eingesetzt werden.

### 4.3.5 Empfehlungen für Rekonstruktion

In der Praxis sollte **je eine dünn-schichtige Rekonstruktion mit sehr weichem** und **eine mit einem regulären Weichteilfilter** berechnet und dauerhaft abgespeichert werden. Die von manchen Radiologen bevorzugten **dickschichtigen Rekonstruktionen** sind **optional** und sollten niemals ausschließlich verwendet werden. Moderne Befundungskonsolen mit der sogenannten *sliding thin slab* (STS) Funktionalität berechnen sie bei Bedarf automatisch aus hochauflösenden Bildern.

**Achtung:** Während aus hochauflösenden Rekonstruktionen jederzeit niedrigere Auflösungsstufen berechnet werden können, ist das umgekehrt nicht möglich. Mit der meist automatisch erfolgenden Löschung der Scan-Rohdaten gehen durch dickschichtige Rekonstruktionen unter Umständen forensisch wertvolle Detailinformation unwiederbringlich verloren.



### 4.3.6 Anforderungen und typische Gerätekonfigurationen für die Rechtsmedizin

Die Anforderungen an CT-Scanner in der Rechtsmedizin unterscheiden sich deutlich von jenen für die klinische Anwendung. Während in der klinischen Praxis stets die Strahlenexposition des Patienten berücksichtigt und minimiert werden muss, sind in der Rechtsmedizin ausschließlich eine **möglichst hohe Bildqualität** und ein **hoher Detailgrad** von Interesse.

Für die Praxis bedeutet dies, dass man ein Gerät mit möglichst hoher erzielbarer Auflösung sucht. Dies erfordert einen fein auflösenden Detektor, jedoch nicht notwendigerweise sehr vielen Scanzeilen (Moderne 16-Zeiler erlauben 0,5 mm Schichtabstand). Daneben ist eine hohe Generatorleistung generell ebenso von Vorteil wie iterative Rekonstruktion sowie Artefaktreduktion. Technologien zur Dosisreduktion sind dagegen irrelevant.

Um Ganzkörperaufnahmen auch von größeren Personen durchführen zu können, sollte der Tisch möglichst weit durch den Scanner bewegt werden können. Bei neuen Scannern sind  $\geq 170$  cm üblich, 200 cm meist optional verfügbar. Bei älteren Scannern mit meist  $< 150$  cm ist eine Umlagerung erforderlich. Die computerunterstützte Fallanalyse wird erschwert. Ein großer Gantry-Durchmesser ist von Vorteil, wenn z. B. während der Leichenstarre gescannt werden soll.

Aktuelle Geräte der *Einstiegsklasse* ( $< \text{€ } 200.000,-$ ) erfüllen die meisten dieser Anforderungen. Bei älteren Scannern muss man meist größere Kompromisse eingehen, insbesondere bei Tischbeweglichkeit und der Qualität der Rekonstruktion. Geräte mit weniger als 16 Zeilen sind generell nicht mehr sinnvoll, da ältere Detektoren und Rekonstruktionsalgorithmen wesentlich schlechtere, verrauschte Bilder mit deutlich reduziertem Nutzen für rechtsmedizinische Fragestellungen liefern. Von einer Anschaffung solcher Geräte wird abgeraten.

Bei der Anschaffung eines CT-Scanners sind unbedingt auch die Anforderungen an den Aufstellungsort zu berücksichtigen: Strahlenschutz, Stromanschluss, Kühlung.

## 4.4 Datenauswertung & Softwareaspekte

Zur Auswertung von CT-Bildern empfiehlt sich eine moderne Befundungskonsole mit entsprechender Software. Die Software sollte neben der Begutachtung einzelner Schichten auch multiplanare Darstellungen (MPR) mit Sliding-Thin-Slab Technologie (STS) unterstützen. Ein wichtiges Kriterium ist auch die Möglichkeit von dreidimensionalen Darstellungen der Daten durch *direct volume rendering* (DVR), was häufig auch als VRT bezeichnet wird. Diese sollte auch bei größeren Datensätzen möglich sein. IntelliSpace, Syngo Via, Vitrea und viele andere Softwarepakete erfüllen diesen Anforderungen. Für eine flüssige VRT ist auf eine Workstation mit großzügiger Speicherausstattung (mindestens 32 GB RAM) und hoher Rechenleistung zu achten. Eine Hochleistungsgrafikkarte mit mindestens 4GB Speicher ist vorteilhaft, wenn Ganzkörper CTs dreidimensional dargestellt werden sollen. Neben den Workstations der Scannerhersteller kann die Datenauswertung auch auf PCs oder Apple-Rechnern erfolgen. Ein qualitativ hochwertiger, möglichst großer und hochauflösender Bildschirm ist zu

empfehlen. Auf Apple-Systemen ist die Software Osirix(Pro) unter Radiologen sehr beliebt. Für die schnelle Sichtung von Datensätzen gibt es weniger umfangreiche Softwarewerkzeuge wie etwa KPacs.

## 4.5 Infrastruktur für Datenauswertung

Für den regelmäßigen Einsatz empfiehlt sich die Einrichtung eines PACS-Archivs bzw. die Anbindung an ein solches, da sich die Verwendung von Datenträgern, externen Festplatten sowie das Kopieren von tausenden Schichtbildern damit erübrigt.

[1]

## 5 Magnetresonanztomographie

### 5.1 Stand der Technik und Indikationen

MRT-Bildgebung ist besonders bei Fragestellungen im Weichteilgewebe von Vorteil. Darüber hinaus kann in der klinischen Rechtsmedizin (bei lebenden Opfern) die MRT-Bildgebung dann eine Alternative sein, wenn die Verwendung von CT-Bildgebung aufgrund der Strahlenbelastung rechtlich nicht möglich ist. Das ist der Fall, wenn die CT-Aufnahme klinisch nicht notwendig ist, sondern ausschließlich der Beantwortung einer rechtsmedizinischen Fragestellung dienen würde.

Typische MRT-Indikationen sind:

- Weichteilverletzungen allgemein
- Hirnverletzungen
- Subkutane Hämatome bei stumpfer Gewalteinwirkung
- Strangulation: post mortem und bei Überlebenden

### 5.2 Sequenzen und Protokolle

Im klinisch-forensischen Bereich können klinische Sequenzen verwendet werden. Aufgrund der Vielzahl von möglichen **Sequenzen** sollte bei der **Auswahl** auf jeden Fall ein **erfahrener Radiologe** hinzugezogen werden, um die für die Fragestellung optimale Sequenz zu wählen. Es ist darüber hinaus sinnvoll, **mehrere Sequenzen** aufzunehmen, sofern dies zeitlich möglich ist. So hat sich für einen ersten Überblick eine koronare T2-TIRM-Wichtung etabliert.

Post mortem MRT-Aufnahmen sind insofern schwieriger durchzuführen, als dass sich das aufgenommene Signal **mit sinkender Leichtemperatur ändert**. Klinische Sequenzen müssen entsprechend angepasst und evtl. gänzlich andere (zeitaufwendigere) verwendet werden.

Zum jetzigen Zeitpunkt existiert noch keine Publikation, die Einzelheiten bzw. Anleitungen zu postmortalen MRT-Protokollen enthält.

## 5.3 Möglichkeiten und Grenzen in der Rechtsmedizin

### 5.3.1 Aufnahmezeiten – klinisch-forensischer Bezug

Die Aufnahmezeiten bei der MRT sind u. a. stark von der verwendeten Sequenz, der Größe des Aufnahmevolumens (FOV) und der Auflösung abhängig. Trotz verschiedener Möglichkeiten, die Messzeit zu verkürzen (Parallel Imaging, mehrfaches Auslesen des Messsignals), reicht die Schwankungsbreite von wenigen Minuten bis zu mehreren Stunden. Der zeitliche Aufwand ist damit erheblich höher als bei Computertomographie. In der Praxis empfiehlt sich wieder die Konsultation von MRT-Experten/Radiologen, um Aufwand und forensischen Nutzen gegenüberstellen zu können.

### 5.3.2 Grenzen der Bildqualität

In der MRT-Bildgebung ergibt sich die Qualität eines Bildes aus einer Vielzahl von Einflüssen und Parametern.

**Räumliche Auflösung:** Gängige MRTs unterstützen verschiedene Auflösungsstufen. In der Praxis werden oft nur 256x256 Pixel gemessen und *höherauflösende* Bilder durch Interpolation berechnet. Höhere Auflösungen gehen immer mit einer längeren Aufnahmedauer einher. Eine höhere Auflösung führt zugleich zu einer Verschlechterung des Signal/Rauschverhältnisses (3D-Aufnahmen: Verdopplung der Auflösung = 1/8 Signalamplitude). 3D-Sequenzen haben gegenüber 2D-Sequenzen allgemein mehr Signal und weniger Rauschen, jedoch eine längere Aufnahmezeit.

**Scanvolumen:** Im MRT werden 3D-Aufnahmen typischerweise durch 3D-Sequenzen realisiert. Dabei wird das Scanobjekt während des Scans nicht bewegt, sondern gezielt räumlich angeregt. Ganzkörperscans werden meist aus überlappenden 2D-Sequenz-Aufnahmen mit schrittweisem Tischvorschub zusammengefügt. Es gibt teilweise auch Sequenzen mit kontinuierlichem Tischvorschub in Analogie zum CT. Ferner wird das Scanvolumen durch die im Tisch integrierten und zusätzlich auf den Körper gelegten Spulen bestimmt.

**Artefakte** In der MRT-Bildgebung gibt es sehr viele Einflüsse, die sich in Form von Artefakten negativ auswirken:

**Signalinhomogenitäten:** Sie sind ein wesentlicher Nachteil von MRT-Bildgebung und treten praktisch in allen Aufnahmen auf. Inhomogenitäten führen dazu, dass ein und dasselbe Gewebe je nach Lage in der Röhre ein unterschiedliches Signal liefert. Eine Zuordnung zu anatomischen Strukturen anhand des Bildwertes wie im CT auf Basis der Hounsfield-Einheiten ist daher nicht möglich. Signalinhomogenitäten können teilweise durch *Shimming* kompensiert werden, wobei das statische Magnetfeld  $B_0$  durch Zusatzspulen oder das Einbringen von ferromagnetischen Pellets beeinflusst wird.

Signalinhomogenitäten werden ferner durch die Spulensensitivitäten und ihre bauformspezifischen örtlichen Schwankungen verursacht.

**Bewegungsartefakte:** Sie treten bei Lebenden durch Prozesse wie Atmung, Herzschlag aber auch Blutfluss und natürlich einer Bewegung des Körpers auf.

**Suszeptibilitätsartefakte:** Speziell an Grenzflächen zu Luft treten Artefakte in Form von Signalverlust auf. Zunehmender Einfluss bei stärkerem Magnetfeld  $B_0$ .

**Geometrische Verzerrungen:** Der sogenannte *Chemical-Shift* bei sog. Gradienten-Echo-Sequenzen führt dazu, dass das Signal bestimmter Gewebe räumlich versetzt aufgenommen wird.

**Backfolding:** In *Phasenkodierrichtung* sollte sich außerhalb des Aufnahmevolumens möglichst nur Luft befinden. Ist dies nicht der Fall, wird dieser Bereich mit aufgenommen und im Bild untrennbar überlagert. Abhilfe kann durch eine Änderung der Phasenkodierrichtung bzw. zusätzliche Sättiger geschaffen werden.

**Blurring:** Beschleunigte Bildgebung kann zu verschwommenen Bildern führen, wenn der Faktor für die Beschleunigung zu hoch gewählt wird. Dies gilt nicht nur für Parallel Imaging, sondern auch für Sequenzen, die das Messsignal mehrfach auslesen (z. B. TIRM). Bei zu hoch gewähltem Faktor für die Beschleunigung können Bereiche mit sehr kurzem  $T_2$  für die Bildgebung verloren gehen.

**Postprocessing zur Reduktion:** Artefakte können teilweise nachträglich reduziert werden. Inhomogenitäten des statischen Feldes  $B_0$  bzw. des anregenden Feldes  $B_1$  können durch spezielle Algorithmen korrigiert werden, was aber auch zusätzliche Messungen benötigen kann. Die  $B_0$  Inhomogenitäten spielen insbesondere in der postmortalen Bildgebung und bei zunehmender Tesla-Stärke eine Rolle und führen zu einer deutlichen Verschlechterung der Qualität. Eine Anpassung bzw. Änderung der Sequenzen kann hier Abhilfe schaffen. Überlagerungen durch Chemical Shift oder Backfolding sowie Bewegungsartefakte können dagegen nicht mehr nachträglich korrigiert werden.

### 5.4 Anforderungen und typische Gerätekonfigurationen für die Rechtsmedizin

**Scanner:** Aufgrund des meist stärkeren Signals ist gerade im postmortalen Bereich eine möglichst hohe Feldstärke wünschenswert. Gegen hohe Feldstärken spricht teilweise die stärkere Neigung zu Artefakten (Inhomogenitäten, Suszeptibilität, Chemical Shift).

Der *Röhrendurchmesser* sollte möglichst groß sein, um Leichen auch während der Leichenstarre problemlos in die Röhre einbringen zu können. Der Röhrendurchmesser von Hochfeldgeräten ist allerdings meist geringer als jener von Geräten niedrigerer Feldstärke.

**Spulen:** Neben der integrierten Körperspule gibt es eine Vielzahl von Spulen für unterschiedliche Körperregionen. Das Signal ist bei Verwendung solcher Spulen aufgrund des geringeren Abstands zur Körperoberfläche oft besser als bei Verwendung der Körperspule. Bei postmortalen Scans gewinnt dieser Aspekt durch die allgemeine Verschlechterung des Signals mit fallender Leichentemperatur an Bedeutung (z. B. sog. Body-Spulen und Flex-Spulen zur besseren Darstellung kleiner Bereiche).

### 5.5 Datenauswertung & Softwareaspekte

Für die Befundung und Auswertung von MRT-Daten können meist dieselben Softwarewerkzeuge und die Infrastruktur, die bereits für die CT beschrieben worden ist, verwendet werden. Die *dreidimensionale Visualisierung* von MRT-Daten ist aufgrund der Inhomogenitäten und der *fehlenden Standardisierung* der Sequenzen und damit der Messwerte in den Bildern schwieriger.

[2, 3, 4, 5]

## 6 3D-Oberflächenerfassung

In der Rechtsmedizin ist die Erfassung von 3D-Oberflächen insbesondere sinnvoll, um die Morphologie von Verletzungen sowie die Form von Spuren und Gegenständen zu dokumentieren, um in der Folge Zusammenhänge zwischen Tatort (Spuren, Lage von Opfer, Gegenständen usw.), äußerlichen und inneren Befunden aus CT/MRT sowie Obduktionsbefunden gemeinsam analysieren zu können.

### 6.1 Photogrammetrie

Die Photogrammetrie ist ein Messverfahren, das ursprünglich aus dem Fach der Geodäsie stammt, einem Fachgebiet in dem es hauptsächlich um die Ausmessung und Abbildung der Erde auf Basis von Fotografien geht. Grundsätzlich basiert sie auf der Tatsache, dass aus mehreren überlappenden Fotografien die räumliche Lage von Objekten oder ausgewählten Punkten bestimmt werden kann. So kann zum Beispiel die Form der Erdoberfläche (Luftbildphotogrammetrie) oder die Geometrie von Gebäuden, Gegenständen usw. (Nahbereichsphotogrammetrie) aus Bildern gemessen/rekonstruiert werden.

Durch die zunehmende Automatisierung und Computerunterstützung haben sich viele Anwendungsgebiete ergeben – u. a. auch für die Forensik. Hier wird vor allem die sogenannte Mehrbildphotogrammetrie verwendet.

Eine Struktur von Interesse, wie z. B. eine Verletzung, wird dabei aus verschiedenen Richtungen fotografiert.

In der Regel sind die auszuwählenden Kameraeinstellungen stark abhängig vom Anwendungsszenario, insbesondere den Lichtverhältnissen und der verwendeten Kamera. Theoretisch kann jede beliebige Kamera verwendet werden. Mit einer hochwertigen Spiegelreflexkamera und entsprechender Optik erhält man jedoch detailliertere und genauere 3D-Modelle als mit einer Handykamera. Eine professionelle Kamera bietet außerdem mehr Möglichkeiten, die Parameter an die Ausgangssituation anzupassen.

Während früher zur Bestimmung von Koordinaten einzelner Punkte mühsam korrespondierende Punkte in jedem Bild manuell markiert/angeklickt werden mussten, gibt es heutzutage Software, die diese und andere Schritte bis hin zum 3D-Modell automatisiert durchführt. So werden neben Punktkorrespondenzen auch die relativen Kamerapositionen während der Aufnahmen automatisch berechnet, aus 3D-Punktwolken Polygonnetze generiert und die Farbinformation der Einzelbilder zu Texturen für das Modell fusioniert. Wenn vorhanden werden Marker bzw. Maßstäbe bekannter Dimensionen automatisch erkannt und in die Berechnungen integriert. Das Ergebnis ist ein maßstäbliches farbgetreues 3D-Modell. Ohne bekannte Maßstäbe ist das 3D-Modell dimensionslos!

Bei der Wahl der Software sind datenschutzrechtliche Aspekte wie Datensicherheit und den Rechten am Bild zu beachten. Cloudbasierte Lösungen verlangen teilweise das Abtreten von Bildrechten.

### 6.2 3D-Oberflächenscan

#### 6.2.1 Stand der Technik - Überblick Scannertechnologien

Die Methoden und Technologien dreidimensionaler Aufnahmen der Umgebung sind vielfältig. Dieser Absatz soll ohne Anspruch auf Vollständigkeit einen Überblick vermitteln:

**Passiv Stereo** – der Überbegriff für Verfahren, die die Aufnahme von 3D-Modellen auf Basis mehrerer Bilder realisieren. Wie in der *klassischen Photogrammetrie* wird dabei die 3D-Position von Punkten auf Basis ihrer 2D-Position in zwei oder mehreren überlappenden Abbildungen ermittelt. Dazu müssen außerdem Kameraparameter sowie die relative Lage der Kamerapositionen bekannt sein oder aus einer größeren Anzahl von Aufnahmen berechnet werden.

Die Berechnung von korrespondierenden 2D-Punkten sowie die Berechnung von 3D-Punktwolken erfolgt in 3D-Scannern stets automatisch/computergestützt. Man unterscheidet Scanner mit fixer, bekannter Kamerakonfiguration und Lösungen bei denen die relativen Aufnahmepositionen im Zuge der Modellberechnung ermittelt werden.

**Strukturiertes Licht:** 3D-Scanner auf Basis von strukturiertem Licht projizieren ein Muster oder Bild in die Umgebung. Dieses wird von einer Kamera oder mehreren in bekannter und fixer räumlicher Anordnung zum Projektor aufgenommen. Aus dem Verzerrungsmuster kann mittels Triangulation ein dreidimensionales Tiefenbild berechnet werden. Zusätzlich wird häufig auch Farbinformation mit aufgenommen.

**Laserscan:** Bei diesem Verfahren wird die Distanz zu einer Oberfläche über die gemessene Laufzeit und/oder die Phasenverschiebung eines Laserstrahls ermittelt. Beim Rotationslaserscanner wird der Laserstrahl mit einem rotierenden Spiegel horizontal und vertikal abgelenkt, was eine Erfassung der gesamten Umgebung des meist auf einem Stativ montierten Scanners ermöglicht.

Laserscanner erfassen lediglich die Geometrie, nicht aber Farbinformation. Viele Rotationslaserscanner sind allerdings mit einer entsprechenden Zusatzkamera ausgestattet. Die Farbinformation wird nachträglich mit der Geometrie fusioniert. Der erfassbare Tiefenbereich liegt in der Größenordnung von Metern bis Kilometern.

**Time-of-Flight:** Ein laufzeitbasiertes Verfahren, bei dem die Laufzeit auf Basis eines kurzen Lichtimpulses von einer flächigen Kamera ermittelt wird.

**Shape-from-Focus:** Bei 3D-Sensoren dieser Art wird ein 3D-Modell über die Bildschärfe ermittelt. Bei Kameras mit weit geöffneter Blende und auch Mikroskopen nimmt diese abseits der Fokusebene schnell ab. Durch Variation der SchärfEinstellung und automatisierter Ermittlung der jeweils scharfen Bildregionen kann ein 3D-Tiefenbild errechnet werden.

### 6.3 Typische Indikationen

Photogrammetrie und Oberflächenscans sind besonders dann sinnvoll, wenn der Tathergang bzw. die Entstehung von Verletzungen unklar ist. In diesem Fall ist die dreidimensionale Erfassung des Tatorts, der Oberfläche des Opfers von großem Wert. Darüber hinaus ist die Erfassung von Oberflächen relevanter Gegenstände (Tatwerkzeuge, Fahrzeuge, ...) sinnvoll.

3D-Modelle sind ein geeignetes Mittel, um die Situation am Tatort, Verletzungen bzw. die Obduktion erheblich umfassender, vollständiger und damit nachvollziehbarer zu dokumentieren, als dies mit konventioneller Fotografie möglich ist.

### 6.4 Möglichkeiten und Grenzen der Methoden in der Rechtsmedizin

#### 6.4.1 Technologiegrenzen

Bei Oberflächenrekonstruktionen ist zu beachten, dass sämtliche zu erfassenden Oberflächen sichtbar sein müssen. Das resultierende 3D-Modell beinhaltet nur die für das Aufnahmegerät sichtbaren Bereiche. Nachdem Verdeckungen praktisch immer auftreten, erfordern vollständige 3D-Modelle die Fusion mehrerer Einzelaufnahmen. Daraus ergeben sich praktische Einschränkungen für den Einsatz: großer zeitlicher Aufwand, Unmöglichkeit von bestimmten Aufnahmepositionen, zu großer Berechnungsaufwand, ...

Einige Verfahren haben spezifische Anforderungen an die aufgenommenen Objekte bzw. die Szene. So ist es mit Photogrammetrie und Passiv Stereo Verfahren beispielsweise unmöglich, Objekte ohne genügend charakteristische Farbinformation/Textur zu erfassen – z. B. weiße Wände. Mit strukturiertem Licht dagegen ist das zwar problemlos möglich, es treten jedoch Probleme bei zu hellem Umgebungslicht auf. Shape-from-Focus ist aufgrund konstruktiver Einschränkungen bei der Optik (Größe/Gewicht) nur eingeschränkt einsetzbar.

#### 6.4.2 3D-Rekonstruktion im mikroskopischen Bereich

In der Rechtsmedizin gibt es zuweilen Fragestellungen, bei denen hochauflösende 3D-Rekonstruktionen (Auflösung im  $\mu$  m Bereich) hilfreich sein können – z. B. der Abgleich von Kratz- oder Schnittspuren mit möglichen Tatwerkzeugen. In diesem Fall bieten sich vor allem Shape-from-Focus Aufnahmesysteme an.

#### 6.4.3 Wahl des optimalen Scanners

Die Auswahl des optimalen Scanners ist im Einzelfall zu treffen und hängt von einer Vielzahl von Parametern ab.



Im Innenbereich sowie im Außenbereich bei diffusem Licht bieten sich Scanner auf der Basis von strukturiertem Licht an.

Bei geringeren Genauigkeitsanforderungen können auch 3D-Sensoren aus dem Spielkonsolenbereich verwendet werden.

Bei einem Scanbereich/Arbeitsabstand von mehr als 5 Metern sowie im Außenbereich sind Rotationslaserscanner vorteilhaft.

Die Verwendung von Photogrammetrie ist für viele Szenarien (Dokumentation der Körperoberfläche, Räumlichkeiten, ...) möglich. Oberflächen ohne Textur wie weiße Wände bereiten Probleme. Selbiges gilt auch für Passiv Stereo Systeme.

## 6.5 Datenauswertung & Softwareaspekte

**Datenaufbereitung:** Für gute Photogrammetrieresultate sollte der Anwender zu mehreren Zeitpunkten in den Rekonstruktionsprozess eingreifen. Eine Vorverarbeitung der einzelnen Bilder (Ausmaskieren des Hintergrunds, Helligkeitsanpassung der Bilder, ...) ist oft sinnvoll. Außerdem sollte der Rekonstruktionsbereich sinnvoll angepasst/eingeschränkt werden.

Laserscanner liefern zunächst 3D-Daten in Form von Punktwolken (mit oder ohne Farbinformation). Diese müssen mithilfe von zum Teil mitgelieferter Software zu einem Gesamtmodell fusioniert werden. Häufig muss dieses vor der Weiterverarbeitung bereinigt werden. In der Folge werden aus Punktwolken polygonale 3D-Modelle berechnet, welche sich für die weitere Verarbeitung und Visualisierung im Rahmen der Fallanalyse und Rekonstruktion besser eignen. Bei portablen Scannern erfolgt der Fusionsschritt während der Aufnahme. Man erhält unmittelbar Polygonnetze. Trotzdem sollten auch so erzeugte Modelle bereinigt werden.

**Fallanalyse:** 3D-Modelle können in 3D-Software aus der Filmindustrie importiert und dort weiterverarbeitet werden. Die Funktionalität solcher Softwarepakete ist jedoch nicht für den forensischen Anwendungsfall konzipiert, sodass sich die Bedienung zum Teil umständlich gestaltet. Es gibt einige wenige Softwarepakete speziell für die forensische Fallanalyse, welche den Import von 3D-Scans unterstützen.

[6, 7, 8, 9, 10, 11, 12]

## 7 Erweiterungen

### 7.1 Postmortale Angiographie

Unter postmortaler Angiographie versteht man die Injektion eines röntgendichten Kontrastmittels zur Sichtbarmachung des Blutgefäßsystems eines Leichnams. Dieses Vorgehen ist aus

der klinischen Radiologie bekannt, bei der einer zu untersuchenden Person ein Kontrastmittel über einen Gefäßzugang injiziert wird. Kurz nach der Injektion wird eine radiologische Untersuchung gemacht (zumeist mittels Computertomographie) bei der das Kontrastmittel im Gefäßlumen sichtbar ist. Die Untersuchung dient der Auffindung von Verletzungen, Verschlüssen oder von Anomalien der Blutgefäße.

In der postmortalen Bildgebung ist die Angiographie zumeist mit der postmortalen Computertomographie kombiniert. Da bei einem Leichnam jedoch der aktive Blutfluss nicht mehr gegeben und das Gefäßsystem durch postmortale Veränderungen *porös* geworden ist, können klinische Methoden nicht ohne Weiteres in die postmortale Bildgebung übernommen werden. Aus diesem Grund wurden in den letzten Jahren verschiedene Methoden zur postmortalen Angiographie entwickelt. Generell können diese Techniken in Ganzkörperangiographien und selektive Angiographien unterteilt werden.

### 7.1.1 Ganzkörperangiographien

Die Ganzkörperangiographien sollen alle diagnostisch relevanten Blutgefäße und Organe kontrastieren. Dabei handelt es sich um die Gefäße des Kopfes, Halses und des Rumpfes. Diese Methoden werden zumeist als Postmortale Computertomographie Angiographie (PMCTA) angewandt. Beispiele für die heutzutage meist angewandten Methoden sind die Multi-phasen PMCTA (MPMCTA), die PMCTA mittels wässrigem Kontrastmittelgemisch und die PMCTA mittels Kardio-pulmonaler Reanimation (PMCTA-KPR). Die MPMCTA ist die am weitesten verbreitete und meist publizierte Methode der postmortalen Angiographie, die auch in Deutschland regelmäßig angewandt wird. Die PMCTA mittels wässrigem Kontrastmittelgemisch wird in der Schweiz, in Frankreich und Italien angewandt. Die PMCTA-KPR kommt derzeit ausschließlich in Japan zum Einsatz.

### 7.1.2 Selektive Angiographien

Bei einer selektiven Angiographie wird nicht das gesamte Blutgefäßsystem dargestellt, sondern nur ein kleiner Teil davon. Zumeist handelt es sich um die gezielte, selektive Darstellung der Herzscheidern. Diese werden selektiv katheterisiert, das Kontrastmittel wird nur in die darzustellenden Gefäße injiziert. Die selektive Angiographie der Herzscheidern wird hauptsächlich in England zur Untersuchung natürlicher Todesfälle eingesetzt.

### 7.1.3 Anwendungsbereiche der postmortalen Angiographie

Die Durchführung einer PMCTA des Leichnams (Ganzkörperangiographie) erlaubt neben den bereits in der nativen PMCT sichtbaren Befunden zusätzliche Information zu erhalten. Diese sind im Wesentlichen:

## 7.2 Bildgestützte Postmortale Probenentnahme

---

- die Darstellung des Lumens der Blutgefäße, zur Erkennung von Verschlüssen, Stenosen, Aneurysmen, Dissektionen oder von vaskulären Rupturen (Darstellung einer Blutungsquelle)
- Charakterisierung arterieller und/oder venöser Blutungen
- Parenchymale Analyse von Organen und dem Herzmuskel
- Detaillierte Darstellung der Gefäßanatomie

Die Indikationen für diese Untersuchungen sind somit vielfältig. Hier ein paar Beispiele:

- **Fälle von Trauma:** Untersuchung von Verletzungen durch direkte und indirekte Trauma, (inkl. ballistische Trauma, stumpfes Trauma und Stich- bzw. Schnittverletzungen)
- **Untersuchung des Verdachts auf Behandlungsfehler** (zur Darstellung modifizierter Gefäßanatomie wie z. B. nach Einsatz eines Stents oder Bypasses, zum Ausschluss oder zur Detektion einer Blutungsquelle)
- **Natürlicher Tod mit kardiovaskulärem Ursprung** (Myokardinfarkt, Aortendissektion, Suche nach der Blutungsquelle bei Hämoperikard oder Hämothorax, Varizenblutung etc.)

## 7.2 Bildgestützte Postmortale Probenentnahme

Mithilfe von Bildgebung ist es möglich, Probenentnahmen für weitere Untersuchungen, wie z. B. toxikologische, mikrobiologische, histologische Untersuchungen bereits vor der Obduktion und/oder der Angiographie zu entnehmen.

Bildgebung ermögliche es dabei, anatomische Strukturen auf nicht invasive Art und Weise zu lokalisieren. In dieser Planungsphase sind dreidimensionale Modalitäten von Vorteil, weil die räumliche Situation leichter zu verstehen und zu beurteilen ist. In der Folge ist es dem Untersucher möglich, gezielt auf minimal invasive Art bestimmte Gewebeproben oder Flüssigkeiten sowie Gase zu gewinnen.

Für toxikologische Untersuchungen können so Körperflüssigkeiten, die leicht punktierbar sind, wie z. B. Urin, Gallenflüssigkeit, Herzblut oder Mageninhalt entnommen werden. Durch die Entnahme vor der Obduktion und/oder einer postmortalen Angiographie können Kontaminationsrisiken umgangen werden.

Für mikrobiologische Untersuchungen ist es möglich, Flüssigkeitsansammlungen steril zu punktieren, um vor allem postmortale Kontaminationsrisiken zu umgehen und auch, um sicher zu gehen, dass diese bei der Obduktion nicht übersehen werden (insbesondere kleine Flüssigkeitsansammlungen/Abszesse).

Des Weiteren ist es möglich, Gewebeproben für histologische Untersuchungen zu entnehmen. Dies ist insbesondere wichtig, wenn eine Angiographie mit einem öligen Kontrastmittel durchgeführt wird. Hier ist die Probenentnahme von Lungengewebe vor der Kontrastmittelinjektion

die einzige Möglichkeit, eine Fettembolie zu diagnostizieren. Gewebeproben sind auch insbesondere wichtig, wenn keine Obduktion erfolgt und die Bildgebung die einzige innere Untersuchungsmethode darstellt. Die Entnahme von Gewebebiopsien erlauben es in diesen Fällen, die Bildgebung mit einer histologischen Untersuchung zu kombinieren.

Die CT erlaubt es außerdem, Gasansammlungen präzise zu lokalisieren und zu entnehmen. Dies ist bei der Obduktion hingegen extrem schwierig bis unmöglich. Die CT-gesteuerte Gasentnahme mittels Dreiweghahn ermöglicht es, das Gas zu analysieren und z. B. eine vitale Luftembolie von Fäulnisgas zu unterscheiden. Diese Gasentnahme besitzt außerdem eine zentrale Rolle bei Tauchunfällen.

### 7.2.1 Planung und Durchführung

Grundsätzlich wird die Planung von Probenentnahmen auf Basis von 3D-Modalitäten wie CT oder ggfs. MRT empfohlen. Diese erlauben die exakte räumliche Lokalisierung der Entnahmeregion auf Basis von Schichtbildern. Dreidimensionale Volumensdarstellungen (VRT) sind insbesondere bei der Planung des Zugriffswegs (Einstichstelle, Stichrichtung und -tiefe) hilfreich.

Die Durchführung erfolgt im einfachsten Fall ohne Bildgebung. Der Plan muss in diesem Fall vom durchführenden Arzt manuell und ohne Kontrollmöglichkeit umgesetzt werden. Die Orientierung ist nur anhand von äußerlich sichtbaren oder tastbaren anatomischen Strukturen möglich.

Bildgebung während der Durchführung erleichtert die praktische Umsetzung der Planung. Als Modalitäten bieten sich Ultraschall, Röntgen, eventuell auch Cone-Beam CT an. Es gibt spezielle Ultraschallköpfe mit Führungen für Biopsie-Nadeln die eine genaue Verlaufskontrolle ermöglichen. Mithilfe eines C-Bogens kann ebenfalls die Lage der Nadel im anatomischen Kontext abgebildet werden. Tracking der Leiche und der Nadel erlaubt die Verwendung/Darstellung von CT Daten während des Eingriffs.

Mit speziellen Systemen wie dem Virtobot (2.0) ist eine vollautomatische Durchführung von Probenentnahmen auf Basis von Bildgebung möglich. Ein Roboterarm positioniert die Biopsienadel exakt an einer vorab in den CT Daten markierten Entnahmestelle.

[13, 14, 15]

## 8 Andere Bildgebende Verfahren

### 8.1 Fotografie

Die digitale Fotografie dient der bildlichen Befunddokumentation im Rahmen der rechtsmedizinischen Fallarbeit sowie für Wissenschaft und Lehre.

#### 8.1.1 Grundlegende Anforderungen

In der forensischen Fotografie ist das vorrangige Ziel, Befunde in hoher technischer Qualität exakt und nachvollziehbar zu dokumentieren. Ein qualitativ hochwertiges Bild wird durch Faktoren wie die Wahl des richtigen Bildausschnitts, den Detailreichtum, die Schärfe und die Auflösung definiert.

#### 8.1.2 Kameratechnik, Zubehör und Hilfsmittel

Da die Abbildungsqualität u. a. maßgeblich von der Größe und dem Aufbau des Kamerasensors bestimmt wird, sollten derzeit nur mit entsprechend großen Sensoren (APS-C ca. 22,5 x 15 mm und Kleinbild ca. 36 x 24 mm) ausgestattete Spiegelreflexkameras oder Systemkameras (spiegellose Kameras mit austauschbaren Komponenten) zum Einsatz kommen. Die durch ihre Bauart allein dahingehend begrenzten Kompaktkameras oder in Mobiltelefone integrierte Kameras sollten nur im Ausnahmefall bei erhöhtem Mobilitätsbedarf verwendet werden. Das oder die Objektiv sollten den Weitwinkelbrennweitenbereich für Übersichtsaufnahmen (< 40 mm), den Normalbrennweitenbereich (40 - 60 mm) und den Makrobrennweitenbereich für Nahaufnahmen abdecken. Für die Anwendung unterschiedlicher Blitzmethoden ist ein kompatibles externes Blitzgerät, das über einen dreh- und neigbaren Blitzreflektor verfügen sollte, empfehlenswert. Für Nahaufnahmen kann ein Makroblitzsystem oder ein Ringblitz hilfreich sein.

Es werden ein Maßstab und/oder Fotowinkel am besten in verschiedenen Größen benötigt. Bevorzugt soll ein reflexionsarmes Winkellineal verwendet werden, das über eine weiße Grundfarbe und/oder eine Farbkontrollskala zur Erleichterung der Farbtreueprüfung verfügen sollte.

Ein geeigneter Fotohintergrund (z. B. reflexionsarme Hintergrundfolien in neutralen Farben) ist besonders für die autoptisch erhobene Befunddokumentation sinnvoll.

#### 8.1.3 Abbildungsqualität und Bildgestaltung

Um perspektivische Abbildungsfehler wie stürzende Linien zu vermeiden, ist auf eine senkrechte (orthogonale) Einstellung der Aufnahmeachse zum Objekt zu achten. Um optische Abbildungsfehler wie tonnenförmige Verzeichnungen zu vermeiden, sollten mit einer kurzen Brennweite (Weitwinkel) keine Nahaufnahmen gemacht werden. Portraitaufnahmen sind deshalb mit

einem Mindestabstand von 1,5 m formatfüllend bzw. mit min. 50 mm Objektivbrennweite (bezogen auf Kleinbildformat) anzufertigen. Dabei ist auf die Augenpartie scharf zu stellen. Um die Befunde in möglichst klarer Form aufnehmen zu können, ist auf die Vermeidung von störenden Bildinhalten und auf größtmögliche Sauberkeit zu achten.

### 8.1.4 Aufnahmeabfolge

Es sind nachvollziehbar geordnete zusammenhängende Fotoserien, beginnend mit Übersichtsaufnahmen und nachfolgend zunehmend detaillierten Bildausschnitten anzufertigen, um selbst-erklärend wirken zu können und um die räumliche und/oder anatomische Befundzuordnung zweifelsfrei zu ermöglichen. Nach der Dokumentation des unveränderten Zustandes erfolgt die Aufnahme von Befunden mit Maßstab, der das quantitative Erfassen der Größe von abgebildeten Strukturen ermöglichen soll. Voraussetzung dafür ist, dass sich Maßstab und zu vermessende Strukturen in derselben Bildebene befinden. Des Weiteren sollte der Maßstab korrespondierend zu den Bildrändern angeordnet und in der Körperlängsachse ausgerichtet werden.

### 8.1.5 Bildablage und –Sicherung

Die Bilddokumente sind unverändert und dauerhaft gemäß den jeweiligen institutseigenen Richtlinien zu archivieren. Eine zweifelsfreie Zuordnung der Bilder zum jeweiligen Fall muss jederzeit gewährleistet sein. Bearbeitete Bilddokumente müssen als solche gekennzeichnet und unter Erhalt der originalen Bilddaten archiviert werden.

### 8.1.6 Infrarot, Thermographie

Neben sichtbarem Licht werden in der Forensik häufig Aufnahmegерäte und Lichtquellen außerhalb des sichtbaren Spektrums eingesetzt, um z. B. Spuren besser sichtbar zu machen.

In der Rechtsmedizin ist vor allem die Infrarotfotografie im nahen Infrarotspektrum (NIR, Wellenlängenbereich ca. 700 nm – 1100 nm) sowie die Thermographie von Interesse. Die Infrarotfotografie kann in der Lage sein, trübe Medien, Haut, Farbstoffe bzw. Verfärbungen zu durchdringen und unterschiedlich zusammengesetzte, aber gleichfarbige Stoffe in unterschiedlichen Tonwerten wiederzugeben. Forensische Anwendung findet die Infrarotfotografie deshalb vorwiegend bei der Detektion und Dokumentation von maskierten Blutspuren, Kontakt- und Abdruckspuren auf dunklen Spurenrägern, intra- und subkutanen Hämatomen, Schuss- und Schmauchspuren und Tätowierungen (außer bei roter Tätowierfarbe). Gerade bei einer eingeschränkten Beurteilbarkeit von Körperoberflächen, wie z. B. bei starker Hautpigmentierung, ausgeprägten Totenflecken, Fäulnisveränderungen, Vertrocknungen / Mumifizierung, kann eine fotografische Darstellung im Infrarotspektrum hilfreich sein. Digitalkameras sind für die

## 8.2 Panoramaaufnahmen

---

Infrarotfotografie grundsätzlich geeignet. Vor dem Bildsensor jeder handelsüblichen Digitalkamera ist jedoch ein Filtersystem verbaut, das u. a. die Aufgabe hat, die IR-Strahlung zu sperren. Um die IR-Empfindlichkeit des Bildsensors einer digitalen Kamera nutzen zu können, darf herstellerseitig entweder kein IR-Sperrfilter verbaut, oder er muss wegklappbar sein. Ansonsten muss er fachmännisch entfernt werden. Es kann dann mit Einbau- oder Vorschraubfiltern, die den sichtbaren Teil des Lichts blockieren und nur Licht im infraroten Wellenlängenbereich durchlassen, fotografiert werden.

Sollte die Kamera über einen sogenannten Live-View-Modus verfügen, dann ist eine präfotografische Spuren- und Befunddetektion über die Monitoransicht möglich. Neben Tageslicht und vielen Kunstlichtquellen emittieren derzeit auch technisch unveränderte Blitzgeräte genug Infrarotstrahlung, um Befunde hochauflösend dokumentieren zu können.

Thermographie kann eingesetzt werden, um die Oberflächentemperatur von Gegenständen am Tatort zu bestimmen. Die lässt Rückschlüsse auf den rezenten Gebrauch von Gegenständen zu. Darüber hinaus können Flüssigkeitsspuren sichtbar gemacht werden, auch wenn dies optisch nicht mehr möglich ist. Mögliches Anwendungsszenario: Lokalisation von geeigneten Entnahmestellen für DNA-Proben auf Textilien.

Mittlerweile gibt es einige sehr kostengünstige Thermographie-Kameras für Smartphones (FLIR One, ThermalSeek, ...).

## 8.2 Panoramaaufnahmen

Unter Panoramaaufnahmen versteht man Aufnahmen, welche im Idealfall die gesamte Umgebung um einen Betrachterstandpunkt herum dokumentieren. Sie werden typischerweise aus einer Serie von Einzelbildern rekonstruiert oder mit einer speziellen Panoramakamera (z. B. rotierende Zeilenkamera) aufgenommen. Panoramaaufnahmen eignen sich gut zur Dokumentation von Räumen, wie etwa Tatorten. Mit Spezialsoftware kann jede beliebige Blickrichtung eingestellt werden bzw. kann die Größe des sichtbaren Ausschnitts der Daten festgelegt werden (Zoom-Funktionalität).

In der Rechtsmedizin sind Panoramaaufnahmen vor allen beim für eine virtuellen Form des Lokalaugenscheins sinnvoll.

## 8.3 Video

Die Fotodokumentation erfordert eine zielgerichtete Auswahl der Motive und der Aufnahme-position und eignet sich daher primär zur Dokumentation bekannter Befunde oder Tatsachen. Eine Videodokumentation kann ergänzend eingesetzt werden, um später auf ein vollständigeres Abbild des Geschehens am Tatort oder während der Obduktion zugreifen zu können und allenfalls Fragestellungen auf Basis von zum Zeitpunkt der Aufnahme nicht bewusst erkannten Tatsachen beantworten zu können.

Aus technischer Sicht sollte die Videodokumentation mit digitalen Aufnahmegeräten durchgeführt werden. Außer mit Videokameras können auch mit Digitalkameras, Smartphones, Tablets und vielen anderen elektronischen Geräten Videos aufgenommen werden. Dabei ist zu beachten, dass ältere Kameras oder integrierte Geräte zumeist mit niedrigen Auflösungen arbeiten. In den resultierenden Videos sind Details schwerer oder nicht zu erkennen. Mit der Etablierung von HDTV sind auch Videoaufnahmegeräte leistungsfähiger geworden – sog. Full-HD-Auflösung (1920 x 1080 Pixel) ist mittlerweile Standard. Neue Geräte der Ultra-HD Generationen erlauben Videoaufnahmen mit über 8 Megapixeln (4K-Auflösung, 4096 x 2160 Pixel) pro Bild.

### 8.3.1 Action-Cams

Solche eigentlich für Sportaufnahmen konzipierte Kameras eignen sich zur Videodokumentation von Obduktionen, wobei die Kamera am Kopf des Obduzenten angebracht wird. Durch die hohe Auflösung sind Details gut erkennbar. Die Weitwinkeloptik sorgt dafür, dass der Aktionsradius und das Blickfeld des Ausführenden weitgehend erfasst werden. Das resultierende Videomaterial kann später dazu herangezogen werden, neue Fragestellungen zu beantworten bzw. beantwortete abzusichern. Es ist außerdem technisch möglich, auf Basis von Videoaufnahmen, dreidimensionale Vermessungsfragestellungen zu beantworten.

[16]

## 9 Kombination verschiedener Modalitäten

Tomographische Daten wie CT- und MRT-Daten beschreiben das Innere des Scanvolumens und unterscheiden sich grundsätzlich von 3D-Oberflächenscandaten, die sichtbare/oberflächliche Geometrie und Textur der aufgenommenen Gegenstände beschreiben.

Diese Unterschiede spiegeln sich in unterschiedlichen Datenrepräsentationen und Dateiformaten wider, die eine integrierte Analyse der Daten erschweren. Im Sinne eines maximalen Erkenntnisgewinns sollten die Daten jedoch gemeinsam analysiert werden, da sie sich gegenseitig ergänzen und ein Synergieeffekt möglich ist. So können in Oberflächendaten sichtbare äußere Verletzungen, zusammen mit inneren CT oder MRT Befunden betrachtet, neue Erkenntnisse in Richtung Verletzungsgeschehen oder Tathergang liefern.

Um Daten gemeinsam analysieren zu können, müssen sie vereinheitlicht werden. Aus CT Daten können Oberflächendaten extrahiert werden - zum Beispiel die Oberfläche von Knochen oder die Körperoberfläche. In der Folge können diese als Oberflächenmodelle miteinander dargestellt und verglichen werden. Die Anwendung von Software zur Registrierung der einzelnen 3D-Modelle erleichtert dies.

Die Konvertierung von Oberflächendaten in Volumsdaten ist mittels Voxelisierungsalgorithmen möglich. In der Praxis ist dies jedoch kaum sinnvoll. Mehrere unabhängig voneinander



aufgenommene CT und/oder MRT Datensätze können durch Überlagerung der Schichtbilder oder auf Basis einer gemeinsamen 3D-Darstellung analysiert werden. In beiden Fällen ist die Registrierung der Datensätze sinnvoll. Nicht-rigide Registrierungsalgorithmen können dabei leichte Gewebeerformungen kompensieren.

Da bei der Konvertierung von CT- und MRT Daten in Oberflächendaten stets Information verloren geht, wäre grundsätzlich eine gemeinsame überlagerte Darstellung mit Oberflächendaten ohne vorherige Konvertierung anzustreben. Mittels spezieller Software ist dies bereits möglich.

[17, 18]

## Literatur

- [1] J L Prince and J M Links. *Medical Imaging Signals and Systems*. Pearson, 2015.
- [2] Kathrin Yen, Peter Vock, Barbara Tiefenthaler, Gerhard Ranner, Eva Scheurer, Michael J. Thali, Karin Zwygart, Martin Sonnenschein, Marco Wiltgen, and Richard Dirnhofer. Virtopsy: Forensic Traumatology of the Subcutaneous Fatty Tissue; Multislice Computed Tomography (MSCT) and Magnetic Resonance Imaging (MRI) as Diagnostic Tools. *Journal of Forensic Sciences*, 49(4):1–8, 2004.
- [3] Kathrin Yen, Michael J. Thali, Emin Aghayev, Christian Jackowski, Wolf Schweitzer, Chris Boesch, Peter Vock, Richard Dirnhofer, and Martin Sonnenschein. Strangulation signs: Initial correlation of MRI, MSCT, and forensic neck findings. *Journal of Magnetic Resonance Imaging*, 22(4):501–510, oct 2005.
- [4] Eva Scheurer, K. O. Lovblad, R. Kreis, S. E. Maier, C. Boesch, R. Dirnhofer, and K. Yen. Forensic application of postmortem diffusion-weighted and diffusion tensor MR imaging of the human brain in situ. *American Journal of Neuroradiology*, 2011.
- [5] Christian Jackowski, Marcel J B Warntjes, Johan Kihlberg, Johan Berge, Michael J Thali, and Anders Persson. Quantitative MRI in Isotropic Spatial Resolution for Forensic Soft Tissue Documentation. Why and How?\*. *Journal of Forensic Sciences*, 56(1):208–215, 2011.
- [6] W. Brüsweiler, M. Braun, R. Dirnhofer, and M. J. Thali. Analysis of patterned injuries and injury-causing instruments with forensic 3D/CAD supported photogrammetry (FPHG): An instruction manual for the documentation process. *Forensic Science International*, 132(2):130–138, 2003.
- [7] Jörg Subke, Heinz Dieter Wehner, Frank Wehner, and Stanislaw Szczepaniak. Streifenlichttopometrie (SLT). A new method for the three-dimensional photorealistic forensic documentation in colour. *Forensic Science International*, 113(1-3):289–295, 2000.
- [8] Michael J. Thali, Marcel Braun, and Richard Dirnhofer. Optical 3D surface digitizing in forensic medicine: 3D documentation of skin and bone injuries. *Forensic Science International*, 137(2-3):203–208, 2003.
- [9] Michael J. Thali, Marcel Braun, Joachim Wirth, Peter Vock, and Richard Dirnhofer. 3D Surface and Body Documentation in Forensic Medicine: 3-D/CAD Photogrammetry Merged with 3D Radiological Scanning. *Journal of Forensic Sciences*, 48(6), 2003.
- [10] Michael J. Thali, Marcel Braun, Walter Brueschweiler, and Richard Dirnhofer. 'Morphological imprint': Determination of the injury-causing weapon from the wound morphology using forensic 3D/CAD-supported photogrammetry. *Forensic Science International*, 2003.

- [11] Ursula Buck, Silvio Naether, Marcel Braun, Stephan Bolliger, Hans Friederich, Christian Jackowski, Emin Aghayev, Andreas Christe, Peter Vock, Richard Dirnhofer, and Michael J. Thali. 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 Science International*, 170(1):20–28, 2007.
- [12] Ursula Buck, Silvio Naether, Beat Räss, Christian Jackowski, and Michael J Thali. Accident or homicide - Virtual crime scene reconstruction using 3D methods. *Forensic Science International*, 225(1-3):75–84, 2013.
- [13] C. Palmiere, S. Binaghi, F. Doenz, P. Bize, C. Chevallier, P. Mangin, and S. Grabherr. Detection of hemorrhage source: The diagnostic value of post-mortem CT-angiography. *Forensic Science International*, 222(1-3):33–39, 2012.
- [14] S. Grabherr, J. Grimm, A. Dominguez, J. Vanhaebost, and P. Mangin. Advances in post-mortem CT-angiography, 2014.
- [15] Lars Christian Ebert, Wolfgang Ptacek, Robert Breitbeck, Martin Fürst, Gernot Kronreif, Rosa Maria Martinez, Michael Thali, and Patricia M. Flach. Virtobot 2.0: The future of automated surface documentation and CT-guided needle placement in forensic medicine. *Forensic Science, Medicine, and Pathology*, 10(2):179–186, 2014.
- [16] L M Al-Alousi, R a Anderson, D M Worster, and D V Land. Multiple-probe thermography for estimating the postmortem interval: I. Continuous monitoring and data analysis of brain, liver, rectal and environmental temperatures in 117 forensic cases. *Journal of forensic sciences*, 46(2):317–22, 2001.
- [17] Alexander Bornik, Martin Urschler, Dieter Schmalstieg, Horst Bischof, Astrid Krauskopf, Thorsten Schwark, Eva Scheurer, and Kathrin Yen. Integrated computer-aided forensic case analysis, presentation, and documentation based on multimodal 3D data. *Forensic Science International*, 287:12–24, jun 2018.
- [18] Martin Urschler, Alexander Bornik, Eva Scheurer, Kathrin Yen, Horst Bischof, and Dieter Schmalstieg. Forensic-case analysis: From 3D imaging to interactive visualization. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 32(4):79–87, 2012.