

nung, zu erwartende Folgen und Risiken der Maßnahme sowie ihre Notwendigkeit, Dringlichkeit, Eignung und Erfolgsaussichten im Hinblick auf die Diagnose oder die Therapie.“

In § 124 (Informationspflichten) der Strahlenschutzverordnung ist geregelt, dass der Strahlenschutzverantwortliche dafür zu sorgen hat, dass eine Person, an der ionisierende Strahlung oder radioaktive Stoffe angewendet werden, vor der Umsetzung über das Risiko der Strahlenanwendung informiert wird.

Optimierung technischer Parameter:

- **Optimale Strahlenqualität** (hart oder weich) durch entsprechende Filter
- Verringerung der Feldgröße durch **Einblendung**
- je größer der Abstand zwischen Strahlenquelle und Haut (**Fokus-Haut-Abstand**), umso geringer die Strahlenbelastung
- Verminderung der Bewegungsunschärfe und Verkürzung der **Expositionszeit** (Durchleuchtungszeit) durch exakte Lagerung und Aufklärung des Patienten
- **Verstärkerfolien** (S.51) vor der Filmkassette bei Röntgenaufnahmen vermindern die erforderliche Strahlendosis
- Einsatz digitaler Bildaufnahme und -verarbeitungssysteme
- regelmäßige Wartung und Überprüfung der Geräte hinsichtlich ihrer Leistung
- Radionuklide mit **kurzer Halbwertszeit** verkürzen die Strahlenexposition in der Nuklearmedizin.

Dokumentation: Jede Verabreichung radioaktiver Substanzen muss schriftlich dokumentiert werden und die Dokumentation mindestens 10 Jahre aufbewahrt werden. Protokolle von Strahlentherapien müssen mindestens 30 Jahre aufbewahrt werden. Im Falle eines erneuten Kontakts mit radioaktiver Strahlung sind dem behandelnden Arzt sämtliche Unterlagen auszuhändigen.

IMPP-Fakten



! Die **Indikationsstellung** für eine Röntgenuntersuchung darf nur durch einen **fachkundigen Arzt** erfolgen.

! Personen, an denen ionisierende Strahlung angewendet wird, müssen vor der Umsetzung über das Risiko der **Strahlenanwendung informiert** werden.

6 Bildgebende Verfahren

6.1 Röntgenuntersuchungen

6.1.1 Aufbau und Prinzip einer Röntgenanlage

Eine Röntgenanlage besteht aus einem **Röntgenstrahler**, einem **Generator** und weiterem Zubehör (S.51). Im Röntgenstrahler werden die eigentlichen Röntgenstrahlen erzeugt. Er besteht aus einer Röntgenröhre (Kathode und Anode) und einer Schutzummantelung. Diese ist notwendig, um austretende Durchlassstrahlung möglichst gering zu halten. Die eigentliche Nutzstrahlung wird durch ein Blendensystem ausgeleitet.

Definition: **Nutzstrahlung** ist jede Strahlung, die die zur Strahlenanwendung vorgesehene Öffnung (Blende) des Röntgenstrahlers verlässt.

Definition: **Durchlassstrahlung** ist die den Schutzmantel durchtretende Strahlung, die sich ungewollt frei im Raum verteilt.

Definition: **Streustrahlung** ist die aus der Streuung von Photonen (S. 42) resultierende Strahlung.

Definition: Als **Halbwertsschichtdicke** bezeichnet man die Dicke eines durchstrahlten Materials oder Gewebes, die nötig ist, um die Strahlung um die Hälfte zu reduzieren.

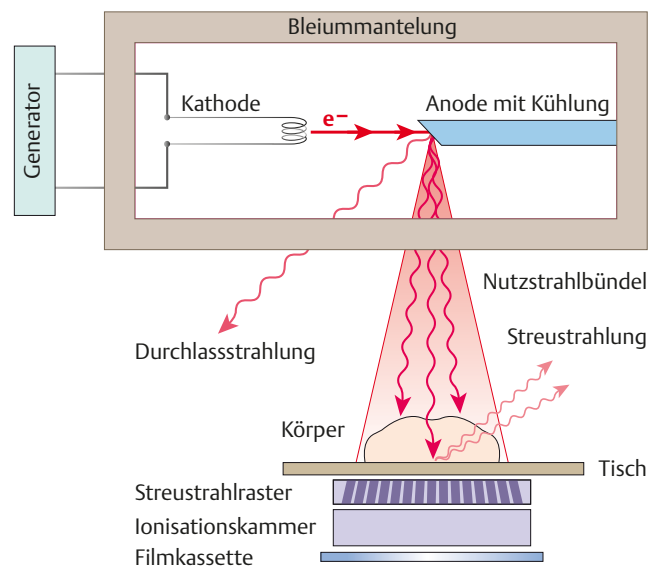


Abb. 6.1 Aufbau einer Röntgenanlage. Dargestellt sind der Generator, der den Heizstrom für die Kathode liefert; die Röntgenröhre mit Kathode und Anode, umgeben von einer Bleiummantelung mit Blendensystem, durch das die Nutzstrahlung geleitet wird; das Streustrahlraster; die Ionisationskammer, die die Strahlendosis misst; und der Strahlenempfänger (hier eine Filmkassette). [Quelle: AllEx – Alles fürs Examen, Thieme, 2014]

Die korrekte **Lagerung des Patienten** ist besonders wichtig, um **Bewegungsunschärfe** zu vermeiden. Die Filmkassette befindet sich so nah wie möglich am Patienten (geringer **Objekt-Film-Abstand**), um eine **Unschärfe durch Streuung** zu vermeiden. Auf der anderen Seite sollte der Patient so weit wie möglich von der Röntgenröhre entfernt sein (großer **Fokus-Objekt-Abstand**), um die Randunschärfe gering zu halten. Weiterhin sollte die Gewebefolie minimiert werden, um Strahlendosis zu sparen.

Kathode und Anode: Innerhalb der Röntgenröhre befindet sich die **Kathode** mit einem Glühdraht aus Wolfram, der durch die Kathodenheizung (Niederspannung) mittels Generator zum Glühen gebracht wird. Bei hohen Temperaturen treten Elektronen aus dem Draht aus (= **Röhrenstrom**), die im elektrischen Hochspannungsfeld zwischen Kathode und Anode (= **Röhrenspannung**) beschleunigt werden. Beim Auftreffen der Elektronen auf die **Anode** wird ihre kinetische Energie zu etwa 1% in elektromagnetische **Röntgenbremsstrahlung** (S.42) umgewandelt. Aus dem Rest entsteht thermische Energie, weshalb die Anode einer ständigen Kühlung bedarf.

Röhrenstrom und Röhrenspannung: Röhrenstrom und Röhrenspannung können unterschiedlich reguliert werden und ermöglichen somit eine individuelle Anpassung an die jeweiligen Anforderungen. Mit dem **Röhrenstrom** wird die **Anzahl der emittierten Elektronen** und damit die Strahlenintensität reguliert. Wird die Stromstärke erhöht, steigt die Zahl der beschleunigten Elektronen und Strukturen können mit höherer Auflösung dargestellt werden. Allerdings steigt direkt proportional die **Dosisleistung** (S.48). Hier kann durch eine entsprechende Filterung eine Dosisreduktion für den Patienten erreicht werden. Eine Erhöhung der **Röhrenspannung** führt zu einer höheren **Beschleunigung der Elektronen** in Richtung Anode, die entstehende Röntgenstrahlung wird energiereicher und kann tiefer in Materie eindringen. Über eine **Belichtungsautomatik** kann die für den gewünschten Kontrast notwendige Belichtungszeit gesteuert werden. Durch eine dem Röntgenfilm aufgelegte Ionisationskammer (S.48) wird sofort nach Erreichen der nötigen Dosis die Strahlenquelle abgeschaltet.

Arten der entstehenden Röntgenstrahlung:

Bremsstrahlung: Die Bremsstrahlung, die beim Auftreffen der Elektronen auf die Anode entsteht, ist die eigentliche **Röntgenstrahlung**. Es ist eine Photonenstrahlung (S.42), die im Gewebe exponentiell geschwächt wird. Beim Auftreffen geben die Elektronen unterschiedliche Anteile ihrer Energie an das Anodenmaterial ab, wodurch ein **kontinuierliches Bremsspektrum** entsteht.

- **Weiche Strahlung** (< 100 keV) eignet sich für die Darstellung annähernd gleicher Strukturen mit schwachem Kontrast (z. B. Weichteilgewebe der Mamma, knöcherner Thorax).
- **Harte Strahlung** (100 keV bis 1 MeV) hingegen macht Dichteunterschiede verschiedener Gewebe sichtbar (z. B. Lungenvolumen luftgefüllt und Gefäße flüssigkeitsgefüllt).
- **Ultraharte Strahlung** (> 1 MeV) wird in der Strahlentherapie eingesetzt.

Charakteristische Strahlung: Bei der Wechselwirkung der Elektronen mit der Anode werden auch die Atome des Anodenmaterials angeregt. Bei der Rückkehr in den Grundzustand emittieren sie die sog. charakteristische Strahlung, die sich als diskrete Spektrallinien darstellt.

Weiteres Zubehör:

Strahlungsempfänger:

- **Konventionelle Röntgenfilme:** bestehen aus einer Folie, die auf beiden Seiten mit Silberbromidkristallen beschichtet ist. Trifft nun Röntgenstrahlung auf den Film, zerfällt das Silberbromid in elementares Silber und Bromid. Bei der Filmentwicklung werden die Silberatome auf dem Film fixiert und durch weitere Reduktion sichtbar gemacht.
- **Film-Folien-Kombination:** Um Strahlendosis zu sparen und damit den Patienten weniger zu belasten, werden die Röntgenfilme mit **Verstärkerfolien** kombiniert. Diese bestehen aus seltenen Erden, die bei Einfall von Strahlung Licht aussenden. Dadurch macht die Röntgenstrahlung nur 5% der Filmschwärzung aus. Nachteil der Verstärkerfolien ist die Verringerung der Ortsschärfe.
- **Speicherfolien (Leuchtstofffolien):** Große Vorteile bietet das mittlerweile etablierte **digitale Röntgen**. Hierbei werden Leuchtstoff- oder Speicherfolien belichtet, die anschließend von einem Laser ausgelesen und digitalisiert werden. Die so entstandenen Bilder besitzen eine hohe Empfindlichkeit, Fehlbelichtungen sind seltener und die Strahlendosis ist geringer. Außerdem können die Bilder digital nachbearbeitet werden (Verbesserung des Kontrasts, Aufhellung des Bildes, Kantennachschärfung). Nachteil ist die etwas geringere Auflösung.

Streustrahlenraster: Die beim Durchtritt durch den menschlichen Körper entstehende Streustrahlung (S.50) verschlechtert die Bildqualität des Röntgenbildes. Um dieses Rauschen zu minimieren, verwendet man **Streustrahlenraster**. Diese befinden sich zwischen Patient und Röntgenfilm und bestehen aus Bleilamellen, die in Richtung des Strahlenbündels ausgerichtet sind und der jeweiligen Aufnahme angepasst werden. Da dabei aber auch ein Teil der Nutzstrahlung absorbiert wird, muss die Belichtungsdauer oder die Empfindlichkeit der Film-Folien-Kombination entsprechend erhöht werden.

Blendensysteme: bündeln und richten die Strahlung genau auf die zu untersuchende Region aus.

Filtersysteme: reduzieren niederenergetische Strahlung, die nicht zur Bildentstehung beiträgt.

Optische Dichte und Kontrast: Jeder Film hat seine eigenen Dichteigenschaften (**optische Dichte D**). Nur im Optimumbereich findet eine genaue Schwärzung des Films durch Röntgenstrahlung statt. Der **Kontrast** einer Aufnahme wird bestimmt von den Dichteunterschieden der durchstrahlten Gewebe und der Strahlenqualität.

Dort wo die Strahlen die geringste Schwächung erfahren, können sie den Röntgenfilm am meisten schwärzen. **Dichtere Strukturen** lassen weniger Strahlung durch. Es entsteht eine **geringere Schwärzung** oder der Film bleibt an dieser Stelle weiß.

Praxistipp: Gern spricht man bei **hellen Strukturen** auf dem Röntgenbild von **Verschattungen**. Man bezieht sich hierbei auf den Positivabzug, das eigentliche Röntgenbild ist das Negativ. Korrekter ist es, von **Verdichtungen** zu sprechen.

6.1.2 Das Röntgenbild

Lerntipp

Nicht selten werden im Examen Röntgenbilder gezeigt, anhand derer du bestimmte Strukturen benennen musst. Mach dir klar, welche Strukturen du siehst und welche nicht. In einer Röntgen-Thorax-Aufnahme sieht man z. B. den Ösophagus nicht, da dieser als Hohlorgan nicht mit Luft gefüllt ist. Hierzu ist eine Kontrastmitteluntersuchung erforderlich.



Abb. 6.2 Röntgen-Thorax (Normalbefund). Röntgen-Thorax p.-a.-Aufnahme eines 19-jährigen Mannes. [Quelle: Kahn, Gaskin, Sharp et al., Normalbefunde in der Skelettreifung, Thieme, 2012]

Strahlenbelastung: Je nach Aufnahme variiert die Strahlendosis, der der Körper ausgesetzt wird. Die typischen effektiven Dosen in der **Röntgendiagnostik** liegen zwischen **<0,01–0,4 mSv**.

Stellenwert: Haupteinsatzgebiete konventioneller Röntgenaufnahmen liegen in der **Traumatologie/Orthopädie** und **Rheumatologie**. Weitere häufig zur Anwendung kommende Basisdiagnostik ist die **Thoraxaufnahme** in 2 Ebenen sowie die **Abdomenübersichtsaufnahme** in Rücken- und Linksseitenlage.

6.1.3 Durchleuchtung

Wird die Röntgenstrahlung über einen Bildverstärker an ein Aufnahmeggerät weitergeleitet, kann die ankommende Strahlung dort registriert und z. B. über eine Videokamera auf einem Monitor sichtbar werden. Somit ist eine direkte Beobachtung der gefertigten Bilder möglich (**simultane Strahlung und Strahlenregistrierung**). Diese Technik ist v. a. für das Anfertigen von **Funktionsaufnahmen** geeignet (z. B. Ösophagusbreischluck, Kolonkontrasteinlauf). Aber auch für **Kathetereinführungen** oder **Punktionen** ist die Sichtkontrolle von größter Bedeutung. Auch ist es möglich, die gewünschte Zielstruktur durch Injektion von Kontrastmitteln exakt darzustellen.

Die **Strahlenbelastung** liegt bei der Durchleuchtung deutlich höher als bei „normalen“ Röntgenaufnahmen.

6.1.4 Mammografie

Für die Durchführung sind spezielle technische Voraussetzungen der Röntgeneinrichtung unter Verwendung entsprechender Röntgenröhren notwendig. Bei der Mammografie handelt es sich um ein Röntgenverfahren in **Weichstrahltechnik** (S.51). Um die Dicke der zu durchstrahlenden Brust und damit die Strahlendosis (S.44) wie auch die Streustrahlung (S.50) zu minimieren, wird die Brust bei der sitzenden oder stehenden Patientin komprimiert. Es erfolgen pro Brust 2 Aufnahmen, eine im **kranio-kaudalen** und eine im **schrägen** Strahlengang.



Abb. 6.3 Mammografie (Normalbefund). Schräger Strahlengang. Das Brustdrüsengewebe („weiß“) ist weitgehend involutioniert, d. h. zurückgebildet. [Quelle: Reiser, Kuhn, Debus, Duale Reihe Radiologie, Thieme, 2017]

IMPP-Fakten



! Die Durchführung einer Mammografie erfordert die technische Voraussetzungen einer **speziellen Röntgeneinrichtung** mit entsprechenden **Röntgenröhren**.

6.2 Computertomografie (CT)

6.2.1 Prinzip der Computertomografie

Bei der Computertomografie wird **Röntgenstrahlung** (S.42) eingesetzt, um Schnittbilder zu erstellen. Dazu werden der Generator, der eigentliche Röntgenstrahler und die Detektoren in der sog. **Gantry** („Röhre“) untergebracht. Diese bewegt sich beim **Spiral-CT** kreisend um den Patienten, wobei der Tisch kontinuierlich vorgeschoben wird. So entsteht ein Volumendatensatz, aus dem der Computer beliebige Schichtdicken wie auch 3D-Rekonstruktionen berechnen kann. Um bei einer Umrundung des Patienten mehrere Schichtaufnahmen zu erstellen, verfügen moderne Geräte über mehrere Detektorenzeilen hintereinander (MDCT, Multidetektor-CT).

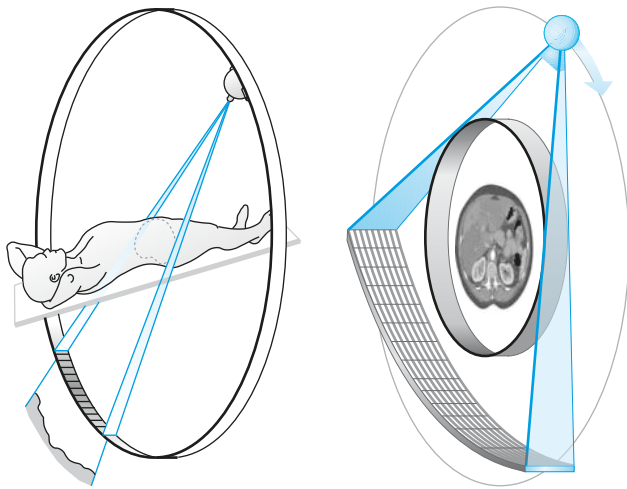


Abb. 6.4 Prinzipien der Computertomografie. Schematische Darstellung der Bildgewinnung in einem CT (**links**) und das Prinzip der Multidetektor-CT (**rechts**). [Quelle: Prokop, Galanski, Schaefer-Prokop et al. Ganzkörper-Computertomographie: Spiral- und Multislice-CT, Thieme, 2006]

Vorteil ist die **kurze Aufnahmezeit**, sodass ein komplettes CT in nur einer Atempause von wenigen Sekunden gefahren werden kann. So können auch bei **intravenöser Kontrastmittelanwendung** verschiedene Durchblutungsphasen (arteriell, portalvenös, venös) differenziert untersucht werden.

Wünscht man besonders hochauflösende Aufnahmen, führt man ein **HR-CT** (high resolution CT) durch. Dabei werden Aufnahmen von geringerer Schichtdicke (1–2 mm) erzeugt.

Der Computer ermittelt aus der Differenz der eingehenden Strahlung und der Strahlung, die von den Detektoren nach Austritt aus dem Körper gemessen wird, die **Dichte** des durchstrahlten Gewebes. Diese Dichtewerte werden in Graustufen dargestellt und werden nach ihrem Entwickler in **Hounsfield-Einheiten (HE, Tab. 6.1)** unterteilt. Als festgelegte Größen dienen dabei Wasser (0 HE) und **Luft (-1000 HE)**. Fett liegt bei ungefähr -60 HE. Da das menschliche Auge nur etwa 20 Graustufen unterscheiden kann, wählt man für einzelne Untersuchungen ein geeignetes Fenster von Dichtewerten (Graustufen) aus, in denen die zu betrachtenden Gewebe gut zu unterscheiden sind. Man nennt diese Technik **Fenster-technik**, die wichtigsten Fenstereinstellungen sind das Lungenfenster, das Weichteilfenster und das Knochenfenster.

Die Dichtewerte der einzelnen Strukturen werden immer vergleichend zu einer Referenzstruktur (meist Wasser) beschrieben. Man spricht also von **hyperdensen** (heller als das Bezugsgewebe), **hypodensen** (dunkler als das Bezugsgewebe) oder **isodensen** Strukturen (gleicher Grauwert wie das Bezugsgewebe).

Tab. 6.1 Typische Dichtewerte in der CT in Hounsfield-Einheiten

Gewebe bzw. Befund	Hounsfield-Einheit (HE)
Lunge	-500 HE
Fett	-100 bis 0 HE
Wasser	0 HE
Leber (nativ)	40–60 HE
frische Blutung	70–90 HE
Leber (nach Kontrastmittelgabe)	ca. 150 HE
Spongiosa	300 HE
Kompakta	> 1000 HE

(Quelle: Reiser, Kuhn, Debus, Duale Reihe Radiologie, Thieme, 2017)

6.2.2 Bildrekonstruktions- und -nachverarbeitungstechniken

Um aus den bei der Untersuchung gewonnenen Dichtemesswerten Bilder entstehen zu lassen, gibt es verschiedene mathematische Algorithmen und Methoden, mithilfe derer diese Daten in Bilder umgewandelt werden.

Bildrekonstruktionsverfahren:

Gefilterte Rückprojektion (FBP [filtered backprojection]): Die detektierten eindimensionalen Dichtemesswerte werden auf den Ausgangskörper zurückprojiziert und als **zweidimensionales Bild** dargestellt. Um eine scharfe Abbildung zu erhalten, müssen die Abbilddaten zuvor mit speziellen Filtersystemen gefiltert werden.

Iterative Rekonstruktion: schafft es, das **Bildrauschen** durch immense Rechenleistung deutlich zu **reduzieren**, dabei aber die weiteren Bildqualitätskriterien zu verbessern. Aus den gemessenen Rohdaten der einzelnen Projektionsebenen wird ein erstes Rohbild mithilfe der gefilterten Rückprojektion erstellt. Dieses wird mit den gemessenen Rohdaten abgeglichen und mittels computerbasiertem Korrekturalgorithmus verbessert. Dieser Vorgang wiederholt sich so oft, bis die Bilddaten mit den Rohdaten übereinstimmen. Durch diese intensive Rechenleistung ist es möglich, mit deutlich geringerem Strahleneinsatz deutlich bessere Bilder zu erreichen.

Bildnachbehandlungsverfahren:

Multiplanare Reformation (MPR): kommt bei allen Schichtbildverfahren zum Einsatz. Sie ermöglicht es, die in einer Ebene detektierten Daten in eine beliebige andere Ebene zu transferieren. Mittels **gekrümmter Rekonstruktionen** ist es dabei auch möglich, Strukturen (z.B. Gefäße → Vessel Tracking) im Körper zu verfolgen und in ihrem Verlauf **zweidimensional** abzubilden. Zur Anwendung kommt die MPR, wenn **Strukturen über mehrere Schichten verfolgt** werden sollen (z.B. Skelettdiagnostik, CT-Angiografie, Tumordarstellung).

- **Average-/Mittelwert-Rekonstruktionstechnik:** Basistechnik. Hier werden die **Dichtewerte** der Pixel, die innerhalb einer Schicht hintereinander liegen, **gemittelt**. Je dünner die Schicht gewählt wird, umso kontrastreicher können die Strukturen dargestellt werden.
- **Maximum-Intensitäts-Projektion (MIP):** Hohe Kontraste werden betont, indem die **Dichtewerte** der Pixel **mit der höchsten Dichte**, die innerhalb einer Schicht hintereinander liegen, **betont** dargestellt werden. Hauptsächlich eingesetzt bei der Suche nach **Erkrankungen des Lungenparenchyms** (z.B. Rundherde) sowie zur **Darstellung von Gefäßverläufen und -pathologien**.
- **Minimum-Intensitäts-Projektion (MinIP):** Im Gegensatz zur Maximum-Intensitäts-Projektion werden niedrige Kontraste betont. Die in einer Schichtdicke hintereinander liegenden **Pixel mit der niedrigsten Dichte** werden **betont** dargestellt. Anwendung v.a. bei der **Darstellung des Tracheobronchialsystems** oder **luftgefüllter Innenohrstrukturen**.



Abb. 6.5 Maximum-Intensitäts-Projektion (MIP) im Bereich von Thorax und Oberbauch. [Quelle: Riemer, Computertomografie für MTRA/RT, Thieme, 2022]

Volumen-Rendering-Technik (VRT): dreidimensionales Rekonstruktionsverfahren. Komplexe Strukturen und anatomische Gegebenheiten können anschaulich dargestellt werden. Daher findet diese Technik v. a. Einsatz bei der **Darstellung von Frakturen** (→ Operationsplanung) und von **Gefäßen**.

6.2.3 Strahlenbelastung

Computertomografien machen weniger als 10% der radiologischen Untersuchungen aus, bedingen aber knapp 55% der medizinischen Strahlenexposition.

Die **effektiven Strahlendosen** sind um ein **Vielfaches höher** als bei der konventionellen Röntgendiagnostik. Während z. B. eine Röntgen-Thorax-Untersuchung in 2 Ebenen eine typische effektive Dosis von 0,07 mSv bedeutet, hat eine Computertomografie des Thorax eine typische effektive Dosis von 5,1 mSv und liegt damit knapp 100-fach höher.

Merke: Die Strahlenbelastung der Computertomografie ist relativ hoch. Jede Indikation sollte kritisch gestellt werden.

6.2.4 Stellenwert

Die Computertomografie ist das Verfahren der Wahl zur **überlagerungsfreien Darstellung innerer Organe**, in der **Basisdiagnostik eines Schlaganfalls** (Blutungsausschluss) und **Schädel-Hirn-Traumas** und zur genauen Beurteilung von **Lungenparenchym und Mediastinum**. Auch **Knochen** lassen sich exzellent beurteilen, v. a. auch, wenn die konventionelle Röntgendiagnostik nicht ausreicht.

Die Computertomografie eignet sich außerdem hervorragend für eine schnelle Darstellung des ganzen Körpers bei polytraumatisierten Patienten (sog. **Traumaspirale**). Eine differenzierte Beurteilung der Weichteile ist aber mit der Magnetresonanztomografie (MRT) (S. 54) besser möglich (z. B. Myelonkompression, kleine zerebrale Läsionen, sehr frische Hirninfarkte).

IMPP-Fakten



- ! Festgelegte Größen der Hounsfield-Einheiten sind Wasser (0 HE) und **Luft** (–1000 HE).
- ! Mithilfe der **Maximum-Intensitäts-Projektion** können im CT vor allem **Gefäßverläufe** und **-pathologien** gut dargestellt werden.
- ! Die **Strahlenbelastung** einer **CT-Thorax-Untersuchung** ist in etwa hundert mal so hoch wie bei einer Röntgen-Thorax-Untersuchung in 2 Ebenen.

6.3 Magnetresonanztomografie (MRT)

Synonym: Kernspintomografie

6.3.1 Prinzip der Magnetresonanztomografie

Jeder Atomkern besitzt einen Eigendrehimpuls (**Kernspin**). In Berechnungen besteht eine Ähnlichkeit zu einem mechanischen Drehimpuls, wodurch der Name zustande kommt. Der Drehimpuls manifestiert sich allerdings nicht in einer wirklichen Bewegung. Da der Atomkern eine positive Ladung hat, induziert diese bewegte Ladung ein **magnetisches Dipolmoment**. Jedes Atom besitzt also ein kleines Magnetfeld. Im Körper liegen diese Magnetfelder ungeordnet vor – sie kompensieren sich gegenseitig.

Legt man nun ein starkes statisches Magnetfeld an, zwingt man die Atomkerne, sich entlang der Feldlinien des Magnetfeldes parallel oder antiparallel auszurichten. Dabei beginnt der Atomkern wie ein Kreisel um seine magnetische Achse zu „torkeln“. Diese kreiselförmige Drehung um seine magnetische Achse nennt man **Präzession**. Sie erfolgt mit einer bestimmten Frequenz, der sog. **Lamorffrequenz**. Diese ist abhängig vom betrachteten Atomkern und von der Stärke des äußeren Magnetfeldes.

Bilderzeugung: Die Ausrichtung der Atomkerne parallel zu den Feldlinien des äußeren Magnetfeldes nennt man **Längsmagnetisierung**. Wird zusätzlich zum äußeren Magnetfeld ein Hochfrequenzimpuls (**HF-Impuls**) mit der Lamorffrequenz angelegt, werden die Kerne angeregt und es kommt zu **Resonanz**. Dabei werden die Kerne aus ihrer Parallelausrichtung „herausgekippt“ (**Quermagnetisierung**) und gleichzeitig synchronisiert sich die Präzession der Kerne. Nach Abschalten des HF-Impulses gehen die Kerne unter Aussendung eines magnetischen Impulses wieder in die ursprüngliche Längsmagnetisierung zurück. Die magnetischen Impulse aller Kerne werden von den HF-Spulensystemen registriert und zur Berechnung an den Computer übertragen. Dieser Vorgang wird mehrmals wiederholt und die gemessenen Signale elektronisch gemittelt (**Averaging**).

Um die magnetischen Impulse der Kerne genau zu lokalisieren, arbeitet man in der MR-Technik mit der **Ortskodierung**. Dazu werden in allen 3 Raumebenen **Gradientenspulen** angebracht, die je nach gewünschter Untersuchung nur die Protonen in einem Teil der Atomkerne anregen. Die Impulse aller Protonen werden vom Computer erfasst und entsprechend ihrer Lokalisation ausgewertet. Bei der MRT nutzt man dieses Phänomen bei der Bestimmung der Verteilung der Wassermoleküle bzw. der **Wasserstoffprotonen** (H^+), da diese in jedem menschlichen Gewebe vorhanden sind. Es handelt sich um ein dreidimensionales Aufnahmeverfahren.

Die Rückkehr zur Längsmagnetisierung nennt man **Längsrelaxation**, sie erfolgt unter Energieabgabe an die Umgebung („Gitter“) in der **Spin-Gitter-Relaxationszeit** (**T1**) von 300–2000 ms. Bereits 30–150 ms nach Abschalten des HF-Impulses desynchronisieren sich die Präzessionen der Kerne. Diese Zeitspanne be-

zeichnet man als **Spin-Spin-Relaxationszeit (T2)**. Die **TR** (time of repetition) gibt die Zeit zwischen 2 HF-Impulsen an, die Zeit zwischen einem Impuls und der Registrierung des Impulses wird als **TE** (time of echo) bezeichnet.

Da die MRT auf den Intensitäten der Signale basiert, spricht man von **hyperintens** (hellen), **hypointens** (dunklen) oder **isointens** (gleich hellen) Strukturen.

Bildkontrast: Je nachdem, welches Gewebe man darstellen möchte, macht man Aufnahmen unterschiedlicher Wichtungen:

- In einem **T1-gewichteten (T1w)** Bild sind TR und TE kurz. Weiße Hirnsubstanz und Fett erscheinen hell, Flüssigkeiten wie Liquor, Ödeme oder Zysten sind in der T1-Wichtung dunkel. In der T1-Wichtung kann außerdem ein gadoliniumhaltiges Kontrastmittel verabreicht werden: KM-aufnehmende Strukturen können so identifiziert werden.
- Ein **T2-gewichtetes (T2w)** Bild wird mit einer längeren TR und TE aufgenommen, Muskulatur erscheint dunkel, Flüssigkeiten (z. B. Ödeme, Liquor, Zysten) hell. Gadoliniumhaltige Kontrastmittel sind in der T2-Wichtung ohne Effekt.

Lerntipp

Blutungen im MRT

Du solltest anhand der Beschreibung einer Raumforderung im Wirbelkanal eine akute Blutung diagnostizieren können:

- hyperakute Blutungen sind T1w isointens zum Myelon, in T2w hyperintens
- akute Blutungen (Tag 1–3) sind in T1w isointens zum Myelon, in T2w hypointens
- subakute Blutungen (Tag 4–7) sind in T1w hyperintens, in T2w hypointens
- im späten subakuten Stadium werden die Blutungen in T2w hyperintens
- im chronischen Stadium ist in T2w nur noch das Zentrum hyperintens, die Peripherie ist hypointens.

Mehr Informationen dazu findest Du bei der bildgebenden Diagnostik des ZNS in der Neurologie.

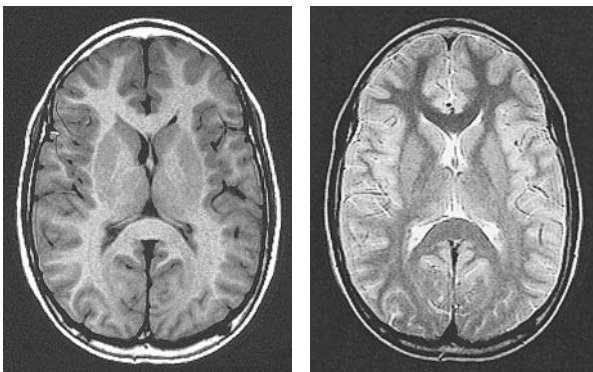


Abb. 6.6 MRT des Gehirns (Normalbefund). Links in T1-Gewichtung: Fett und weiße Hirnsubstanz erscheinen hell (hyperintens); rechts in T2-Gewichtung: Liquor erscheint hell. [Quelle: Reiser, Kuhn, Debus, Duale Reihe Radiologie, Thieme, 2017]

6.3.2 Risiken

Moderne MRT-Geräte erzeugen Magnetfelder mit einer Stärke von 1,5–3 Tesla (Magnetfeld der Erde: 30–60 μ Tesla). Sie verfügen somit über eine enorme Anziehungskraft auf metallische Gegenstände und können elektronische Geräte in ihrer Funktion

beeinträchtigen oder gar funktionslos machen. Außerdem liegt der Patient zur Untersuchung in der Regel in einer langen, relativ engen Röhre. Daraus ergeben sich:

- **absolute Kontraindikationen:** elektronische Implantate (z. B. Nicht MRT-fähige Herzschrittmacher und Cochleaimplantate) oder frisch eingesetzte metallische Implantate (z. B. nicht-MRT-fähige orthopädische Implantate) sowie ferromagnetisches Material, wie z. B. große Granatsplitter.
- **relative Kontraindikationen:** ältere metallische Implantate oder Fremdkörper (z. B. Klammern, Schrauben, kleine Granatsplitter), starke Klaustrophobie.

Titanklammern stellen keine Kontraindikation für eine MRT dar, da sie nur leicht magnetisch sind und sich daher kaum erwärmen oder translozieren. Dies trifft auch auf die meisten heute eingesetzten Implantate (z. B. Hüft-TEPs) zu.

Durch das starke Magnetfeld werden die Protonen im Körper in Schwingung versetzt, was Wärme produziert. Eine **Erhöhung der Körpertemperatur** um bis zu 3 °C kann vorkommen. Bei Schwangerschaften im ersten Trimenon besteht aufgrund der Erhitzung und der Geräuschkulisse ebenfalls eine relative Kontraindikation.

Da das MRT-Gerät keine ionisierende Strahlung nutzt, ist es grundsätzlich möglich, während der Bildaufzeichnung anwesend zu sein. Da es im MRT sehr laut ist (die Gradientenspulen bewegen sich sehr schnell hin und her), sollten alle anwesenden Personen einen Gehörschutz tragen.

Vorsicht: Ein MRT ist **immer magnetisch**, auch wenn gerade keine Untersuchung erfolgt. Man sollte niemals ohne Erlaubnis und ohne die Taschen zu leeren in den Untersuchungsraum gehen – schon gar nicht mit Bett oder Liege.

6.3.3 Stellenwert

Die MRT ist in der Beurteilung des **Gehirns** und des **Myelons** am besten geeignet. Des Weiteren lassen sich **Tumoren** (z. B. lipomatöser Tumor), **entzündliche Veränderungen**, **Muskeln**, **Band- und Knorpelstrukturen** sowie die **Beckenorgane** mittels MRT am besten beurteilen. Da das Verfahren keine Strahlenbelastung erzeugt, sollte es bei **Kindern** gegenüber der Computertomografie bevorzugt eingesetzt werden.

In der Akutdiagnostik ist es wegen der verhältnismäßig langen Untersuchungsdauer und der Kontraindikationen nur eingeschränkt einsetzbar.

IMPP-Fakten



- !! Im **T1-gewichteten** Bild erscheinen weiße Hirnsubstanz und Fett hell, Flüssigkeiten wie Liquor, Ödeme oder Zysten dunkel.
- ! Im **T2-gewichteten** Bild erscheint Muskulatur dunkel.
- ! **Akute Blutungen** (Tag 1–3) sind in **T1w isointens** zum Myelon, in **T2w hypointens**. Eine Kontrastmittelaufnahme fehlt.
- ! **Titanklammern** stellen **keine Kontraindikation** für eine MRT dar, da sie nur leicht magnetisch sind und sich daher kaum erwärmen oder translozieren.
- ! Die MRT eignet sich u. a. zur **Beurteilung von Tumoren** (z. B. lipomatöser Tumor).
- ! **Kontraindikationen** für eine MR-Untersuchung sind u. a. **Herzschrittmacher**.

6.4 Sonografie

6.4.1 Prinzip der Sonografie

Bei der Sonografie in der medizinischen Bildgebung verwendet man akustische Wellen mit einer Frequenz von 1–30 MHz. Diese liegen oberhalb des menschlichen Hörvermögens und werden Ultraschallwellen genannt.

Bilderzeugung: Die Ultraschallwellen werden mithilfe von **piezoelektrischen Kristallen** erzeugt. Diese Kristalle dienen sowohl als Sender wie auch als Empfänger und sind in den Schallkopf eingebaut. Abhängig von den akustischen Eigenschaften des durchschallten Gewebes werden unterschiedliche Phänomene beobachtet:

- **Brechung:** ändert die Richtung der Schallwellen
- **Reflexion:** Die Schallwellen werden vom Gewebe zurückgeworfen. Reflexion tritt v.a. an kalkdichten Konkrementen (Gallensteine, Knochen) mit dorsaler Schallauslöschung auf.
- **Streuung:** Die Schallwellen werden in alle Raumrichtungen abgelenkt. Streuung ist vor allem kontrastmindernd, z.B. durch Fettpartikel bei Leberverfettung.
- **Absorption:** Die Schallwellen werden gedämpft. Absorption findet v.a. an den Knochen statt.

Ausschlaggebend für die Bildgebung ist die **Reflexion**. Die Laufzeitdifferenz zwischen den ausgehenden und ankommenden Schallwellen ist je nach reflektierendem Gewebe unterschiedlich. Daraus errechnet sich die Tiefe der reflektierenden Struktur, also die Lage der Organe. Die Reflexionseigenschaften von Organen beruhen v.a. auf der biologischen Zusammensetzung (fettreich, wässrig, kalkig). Deshalb eignet sich die Sonografie sehr gut zur **Beurteilung von Weichgewebe** wie Organparenchym, Muskel und Bindegewebe. Das Bild ist **zweidimensional**.

Werden die Wellen stark reflektiert, erscheint das Bild weiß, man spricht von **hyperreflexiven** oder **echoreichen** Strukturen. Analog dazu werden dunklere Bildbereiche als **hyporeflexiv** oder **echoarm** bezeichnet. Strukturen gleicher Bildschwärzung sind **isoreflexiv** bzw. **echogleich**.

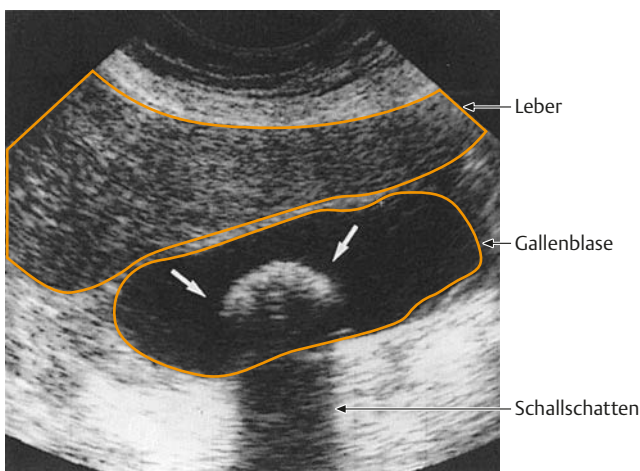


Abb. 6.7 Sonografie eines Gallensteins. Typischer Sonografiebefund mit rund-ovalem Konkrement (Pfeile) und Schallschatten. [Quelle: Battagay, Differenzialdiagnose Innerer Krankheiten, Thieme, 2017]

Ultraschallverfahren: Moderne Geräte produzieren etwa 20 Bilder pro Sekunde, man spricht hierbei auch von Real-time- oder Echtzeitsonografie. Je nach Auswertung, können mehrere Arten der Ultraschalldarstellung unterschieden werden:

A-Mode (Amplitude-Mode): Durch die Darstellung der Amplitude der Echowellens kann die Intensität von Signal und Echo untersucht werden. Die eindimensionalen Bilder finden heute sehr selten Verwendung (z. B. zur Diagnostik einer Sinusitis).

B-Mode (Brightness-Mode): Jede Amplitude wird in einen Grauwert umgerechnet (Grauwertsonografie) und ein entsprechender Bildpunkt zugewiesen. Durch die Dichteunterschiede der Gewebe ergibt sich ein kontrastreiches zweidimensionales Graustufenbild. Diese Darstellung wird am häufigsten verwendet.

M-Mode (Motion-Mode): Die Amplituden werden hier ebenfalls in Grauwerte umgewandelt, allerdings wird die Echogenität eines Gewebepunktes im zeitlichen Verlauf dargestellt, so können dynamische Prozesse dargestellt werden (z. B. Herzklappen-diagnostik).

Dopplerverfahren: Die **Dopplersonografie** erlaubt eine Differenzierung zwischen bewegten und unbewegten Strukturen. Dabei nutzt man den **Dopplereffekt**: Die Frequenz einer Schallwelle, die von einem bewegten Objekt reflektiert wird, ändert sich je nach dessen Bewegungsrichtung relativ zum Schallkopf. Diese Frequenzverschiebung kann farbkodiert werden. Kombiniert mit einem Graustufenbild kann eine Zuordnung zu anatomischen Strukturen erfolgen. Diese Kombination aus einem Grauwertbild (B-Mode) und der farblich kodierten Dopplersonografie nennt man **farbkodierte Duplexsonografie (FKDS)**, sie dient v.a. der Gefäßdiagnostik.

6.4.2 Stellenwert der Sonografie

Die Sonografie bietet viele Vorteile. Sie ist **ubiquitär verfügbar**, **kostengünstig**, hat **keine nachgewiesenen schädigenden Einflüsse** auf den Organismus und ist sehr aussagekräftig.

An ihre Grenzen stößt die Sonografie bei schlechten Schallbedingungen (ausgeprägte Adipositas, Meteorismus) und der Unterscheidung verschiedener Flüssigkeiten.

6.5 Kontrastmittel

6.5.1 Röntgenkontrastmittel

Röntgendichte Kontrastmittel sind Substanzen, die entweder Röntgenstrahlen absorbieren (**röntgenpositiv**) oder die nahezu die gesamte Strahlung passieren lassen (**röntgennegativ**). Eine Kombination aus beiden wird in der Bildgebung der Magen-Darm-Passage verwendet.

Iod: **röntgenpositives** Kontrastmittel, welches sowohl fett- als auch wasserlöslich bei vielen Untersuchungen zum Einsatz kommt. Wasserlöslich ist es sowohl oral als auch i.v. applizierbar und dient der Kontrastgebung in der **Angiografie**, der **Computertomografie**, der **Darstellung der Gallenblase und -gänge**, der **Uro- und Myelografie** und bei einigen Indikationen auch der **Darstellung des Magen-Darm-Traktes**.

Praxistipp: Ein harmloses, aber oft eindrückliches Phänomen ist, dass die Injektion des iodhaltigen Kontrastmittels häufig mit einem **schwallartigen Wärmegefühl** einhergeht. Auch das Gefühl, „**sofort Wasser lassen zu müssen**“, ist typisch.

Iodverbindungen werden renal eliminiert und können eine Reihe ernsthafter **unerwünschter Wirkungen** hervorrufen:

- Jede Hyperthyreose kann nach i. v.-Applikation in eine **thyreotoxische Krise** übergehen! Deshalb vor jeder Untersuchung nach Schilddrüsenerkrankungen fragen, im Zweifelsfall **TSH bestimmen**! Besteht trotzdem eine dringende Indikation zur Kontrastmittelgabe, kann die **Iodaufnahme der Schilddrüse durch die Gabe von Natriumperchlorat (Irenat) vor und nach der Untersuchung blockiert werden**. Da Iod in der Schilddrüse gespeichert wird, ist nach Gabe eines iodhaltigen Kontrastmittels für die folgenden Monate eine evtl. geplante Radioiodtherapie unmöglich, da die Schilddrüse dann kein weiteres Iod mehr aufnimmt.
- Iod ist tubulotoxisch und kann bei einer vorbestehenden Niereninsuffizienz zu einer **akuten Niereninsuffizienz** führen. Daher sollte vor der Gabe eines iodhaltigen Kontrastmittels immer der **Kreatininwert bestimmt werden (Ausnahme: Notfallindikation)**. Lässt sich eine Kontrastmittelgabe bei eingeschränkter Nierenfunktion nicht vermeiden, sollte prophylaktisch oral und i. v. reichlich Flüssigkeit gegeben werden. Die Kontrastmitteldosis sollte so gering wie möglich gehalten werden.
- Iodhaltige Kontrastmittel können **allergische und allergoide Reaktionen** hervorrufen. Die Beschwerden reichen von Schwindel über Erythem, Übelkeit, Erbrechen bis hin zu Krämpfen und zum anaphylaktischen Schock. Im Notfall sind Antihistaminika und Glukokortikoide i. v. Mittel der Wahl, bei Anaphylaxie Adrenalin i. v. sowie ggf. eine intensivmedizinische Überwachung!

Praxistipp: Jeder Patient muss vor einer kontrastmittelhaltigen Untersuchung über mögliche Risiken und Nebenwirkungen **aufgeklärt** werden! Wichtig ist eine **genaue Anamnese** hinsichtlich der Schilddrüsenfunktion, der Nierenfunktion und einer eventuell stattgefundenen allergischen Reaktion bei früheren Untersuchungen. Kreatinin- und TSH-Wert, sollten vor KM-Gabe vorliegen (Ausnahme: Notfallindikation). Außerdem sollte jeder Patient nach der Untersuchung **mindestens 15 min überwacht** werden, da in dieser Zeit die meisten Kontrastmittelreaktionen auftreten.

Lerntipp

Bei einer sekundären, mit Levothyroxin substituierten Hypothyreose liegt eine euthyreote Stoffwechsellage vor, wenn TSH ↓ und fT_3/fT_4 normwertig sind. Ein Thorax-CT mit Kontrastmittel dürfte dann durchgeführt werden.

Barium: röntgenpositives Kontrastmittel. Es wird zur Kontrastierung des Magen-Darm-Traktes als wasserunlösliche Suspension oral oder rektal verabreicht und bleibt während der Passage an der Wand des Verdauungstraktes haften. In der sog. **Doppelkontrasttechnik** wird der Magen-Darm-Trakt erst mit Barium und dann mit einem röntgennegativen Kontrastmittel (z. B. Luft oder CO_2) gefüllt. So können sowohl Darmwand als auch Darmlumen untersucht werden. Die Untersuchung wurde weitgehend durch die Endoskopie und CT ersetzt.

Vorsicht: Barium ist absolut kontraindiziert bei Verdacht auf eine gastrointestinale Perforation (z. B. bei einem tiefen Ulkus), einen Ileus oder bei Gefahr einer Aspiration. Barium in der Bauchhöhle oder der Lunge verursacht eine Peritonitis bzw. Pneumonitis und kann schwerwiegende Folgen haben. Alternativ kommen wasserlösliche iodhaltige Kontrastmittel zum Einsatz.

6.5.2 Kontrastmittel im MRT

Ziel ist es, die **Relaxationszeit zu verkürzen** und damit ein verstärktes Signal zu erhalten. Standardkontrastmittel ist **Gadolinium**, ein paramagnetisches Element, welches die T1 von Wasser verkürzt. Es ist hochtoxisch und wird deshalb zur i. v.-Anwendung im menschlichen Körper an Chelatbildner, z. B. DTPA (= Diethylen-triamin-pentaessigsäure), gebunden.

Da es die Blut-Hirn-Schranke nicht passiert, eignet es sich, um Läsionen mit Kontrastmittelübertritt im Gehirn abzubilden. Für die Bildgebung der Leber werden hingegen leberspezifische Kontrastmittel eingesetzt.

MR-Kontrastmittel besitzen eine weitaus niedrigere allergene Potenz und eine geringere Nephrotoxizität als röntgendichte Kontrastmittel. Allerdings sind gehäuft Fälle einer **nephrogenen systemischen Fibrose** bei niereninsuffizienten Patienten nach wiederholter Gadoliniumgabe beobachtet worden; diese Komplikation kann letal verlaufen. Aufgrund von **Akkumulation und Ablagerung von linearen Gadolinium-haltigen Kontrastmitteln** im Gehirn wurden diese in der Nutzung durch das Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte (BfArM) eingeschränkt. Gadolinium-haltige Kontrastmittel sollten daher insgesamt sehr zurückhaltend eingesetzt werden.

6.5.3 Kontrastmittel in der Sonografie

Hierbei handelt es sich um Emulsionen mit feinsten **Mikroluftbläschen**. Diese führen zu einer stärkeren Reflexion und Streuung der Schallwellen und somit zu einem **hyperreflexiven Kontrast**. Sie werden i. v. verabreicht und verbleiben im Intravasalarium. Sie finden Anwendung in der **Abdomensonografie** bei der **Beurteilung von Gefäßläsionen oder Veränderungen in parenchymatösen Organen**, z. B. Tumoren oder Infarkten in Leber und Niere. Außerdem verbessern Ultraschallkontrastmittel den Kontrast bei **transösophagealen Echokardiografien** zur Beurteilung von kardialen Shunts und persistierendem Foramen ovale.

IMPP-Fakten



- ! Gabe von **Perchlorat** vor und nach Exposition gegenüber iodhaltigem Kontrastmittel zur Prophylaxe einer Hyperthyreose.
- !!! Vor Untersuchungen, bei denen iodhaltiges Kontrastmittel verabreicht wird, müssen eine (latente) **Hyperthyreose** (TSH bestimmen) und eine **Niereninsuffizienz** (Kreatinin bestimmen) ausgeschlossen werden (Ausnahme: Notfallindikation).
- ! Bei einer **sekundären, mit Levothyroxin substituierten Hypothyreose** liegt eine **euthyreote Stoffwechsellage** vor, wenn TSH ↓ und fT_3/fT_4 normwertig sind. Ein Thorax-CT mit **Kontrastmittel** dürfte durchgeführt werden.
- ! Bei Kontrastmittelgabe bei Patienten mit eingeschränkter Nierenfunktion **reichliche Flüssigkeitszufuhr** oral bzw. i. v.
- ! Bei Verdacht auf eine gastrointestinale Perforation (z. B. bei einem tiefen Ulkus) ist Barium als Kontrastmittel streng **kontra-indiziert**.