

6 Röntgendiagnostik

Literatur zu bildgebenden Verfahren allgemein:

- Bildgebende Verfahren in der Medizin, O. Dössel, Springer-Verlag
- Medizinische Physik, Band 2: Medizinische Strahlenphysik, J. Bille, W. Schlegel (Hrsg.), Springer
- MRI From Picture to Proton, D. W. McRobbie, E. A. Moore, M. J. Graves, M. R. Prince, Cambridge University Press

Literatur zu Energiedeposition durch Strahlung:

- Bildgebende Verfahren in der Medizin, O. Dössel, Springer-Verlag
- Medizinische Physik, Band 2: Medizinische Strahlenphysik, J. Bille, W. Schlegel (Hrsg.), Springer
- Biophysik, W. Hoppe, W. Lohmann, H. Markl, H. Ziegler (Hrsg.), Springer
- Kern- und Teilchenphysik, A. Das, T. Ferbel, Spektrum

Kapitel 6 leitet über zum zweiten Teil der Vorlesung, in dem diagnostische Methoden diskutiert werden. Die medizinische Diagnostik ist ein sehr breites Gebiet, welches neben physikalischen auch chemische und biologische Verfahren umfasst. Wir beschränken uns hier auf die physikalischen und insbesondere auf einige bildgebende Verfahren. Wir beginnen mit einer kurzen Übersicht über die Methoden, welche hier diskutiert werden sollen, aber auch über einige weitere Methoden, für die im Rahmen dieser Vorlesung keine Zeit bleibt.

6.1 Bildgebende Methoden

6.1.1 Kernspintomographie (MRI)

In der Kernspintomographie (MRI = Magnetic Resonance Imaging) verwendet man resonante Anregung

von Kernspin-Übergängen, um die Dichte von bestimmten Atomen (meistens Protonen = Wasserstoffatome) abzubilden. Sie basiert auf der Kernspinresonanz (NMR = Nuclear Magnetic Resonance).

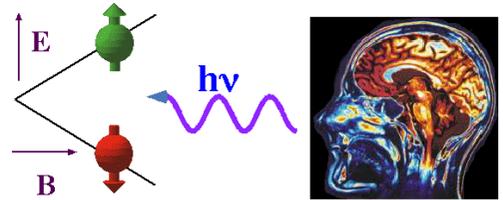


Abbildung 6.1: Links: Prinzip der Kernspinresonanz (NMR). Rechts: Schnittbildaufnahme eines Kopfs mittel Kernspintomographie (MRI).

Figur 6.1 zeigt das Prinzip: In einem Magnetfeld sind die Energien der Zustände eines Kernspins um den Betrag der Larmorfrequenz aufgespalten. Ein resonantes magnetisches Wechselfeld, das senkrecht zum statischen Magnetfeld orientiert ist, kann Übergänge zwischen diesen Zuständen anregen. Die Stärke des Signals ist proportional zur Anzahl der Spins.

Da die Aufspaltung und damit die Resonanzfrequenz proportional zur Stärke des Magnetfeldes ist, kann man die Stärke des Magnetfeldes bestimmen, indem man die Larmorfrequenz der Kerne misst. Verwendet man ein Magnetfeld, dessen Stärke über den Raum variiert, kann man somit die Verteilung der Spindichte im Raum bestimmen. Eine Darstellung dieser Spindichte ergibt damit, je nach Aufnahmeart, ein zwei- oder dreidimensionales Bild des Objektes.

In der Medizin stellt man in erster Linie die Protonen (=Wasserstoff)-Dichte dar. Die wichtigsten Signalbeiträge sind deshalb Wasser und Fett. Figur 6.1 zeigt als Beispiel einen Querschnitt durch einen Kopf: hier wird das Gehirn sehr detailliert dargestellt, während der Schädel nur schwach erscheint. Die größte Bedeutung hat die MRI daher auch im

Bereich der Erkrankungen des Gehirns und bei Tumoren der “weichen” Organe.

Die MRI ist ein quantitatives bildgebendes Verfahren und bietet eine Vielzahl von Parametern, die eine Kontrastverbesserung für die unterschiedlichen Untersuchungen möglich machen. Es ist außerdem möglich, eine Region des Körpers nicht nur dreidimensional abzubilden, sondern auch spektroskopische Information ortsaufgelöst zu messen (MR-Spektroskopie).

6.1.2 Projektionsröntgen



Abbildung 6.2: Röntgenaufnahmen.

Bei dem Projektionsröntgen wird das zu untersuchende Körperteil mit Röntgenstrahlen beschossen und das Linienintegral über den (linearen) Röntgenschwächungskoeffizienten entlang der Strahlbahn gemessen. Diese Abbildungsmethode wurde schon kurz nach der Entdeckung der Röntgenstrahlen durch Wilhelm Conrad Röntgen am 8. November 1895 medizinisch benutzt. Sie ist deshalb die am besten etablierte der hier diskutierten Methoden.

Im Projektionsröntgen werden Objekte dann erkannt, wenn sie Röntgenstrahlung stärker oder weniger stark absorbieren als ihre Umgebung. Da die Absorption von Röntgenstrahlung im Wesentlichen durch die Elektronendichte bestimmt ist, wird sie vor allem durch schwere Atome beeinflusst.

Knochen sind deshalb deutlich vor einem Hintergrund aus Weichteilgewebe zu erkennen. Verschiedene Weichteilgewebe (Fett, Muskeln etc.) können aber erst durch den Einsatz von Kontrastmitteln unterschieden werden. Insgesamt sind die möglichen

Anwendungen sehr zahlreich, zumindest für die Abbildung von Knochen, Organen und Gefäßen. Quantitative Messungen sind auf Grund der Messung nur eines Parameters nur sehr eingeschränkt möglich.

6.1.3 Computer-Tomographie (CT)

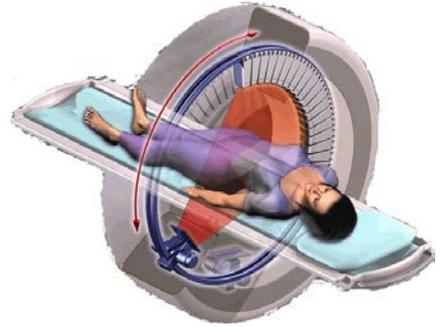


Abbildung 6.3: Computer-Tomographie

Die physikalischen Grundlagen für die CT sind die gleichen wie beim Projektionsröntgen. Bei der CT werden jedoch viele Projektionen gemessen, indem die Röntgenquelle und der Detektor um das Objekt (den Patienten) gedreht werden. Aus dieser Vielzahl von Projektionen berechnet ein Computer durch Rückprojektion die Elektronendichte im Objekt.

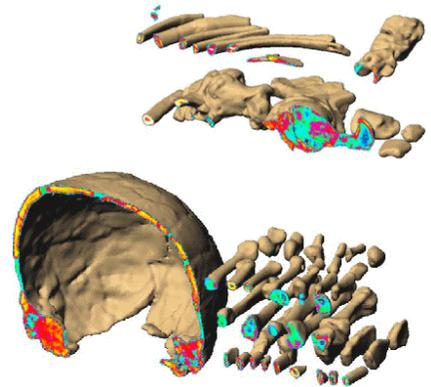


Abbildung 6.4: CT Abbildungen: Knochen eines Neandertalers.

Das Einsatzgebiet umfasst hauptsächlich Unfalldiagnostik und Untersuchungen von Kopf, Lunge und Bewegungsapparat. Die Operationsplanung in der Endoprothetik, zum Beispiel bei der künstlichen

Hüfte, basiert heute auf den dreidimensionalen CT-Datensätzen. Quantitative CT ist wie beim Projektionsröntgen nur eingeschränkt möglich. Ein Einsatzgebiet ist zum Beispiel die Messung des Knochenzustandes im Verlauf einer Therapie oder Erkrankung.

6.1.4 Nuklearmedizin

Nuklearmedizin fasst diejenigen diagnostischen Verfahren zusammen, welche radioaktive Isotope für die Untersuchung verwenden. Bei der Nuklearmedizin ist nicht die Abbildung der Morphologie das Ziel, sondern es sollen funktionelle Abläufe sichtbar gemacht werden. Dafür werden dem Probanden geeignete Moleküle verabreicht, welche die zu untersuchende Funktion markieren. Um diese Testmoleküle anschließend detektieren zu können werden sie mit Radioisotopen markiert, welche mit sehr hoher Nachweiswahrscheinlichkeit detektiert werden können.

Meist wird dem Probanden dafür radioaktiv markiertes Material eingespritzt. Gemessen wird die Aktivität des zuvor eingebrachten radioaktiven Isotops (meist Gammastrahler). Indem man die Quelle dieser Strahlung ermittelt, kann man nicht nur die Anreicherung in einem bestimmten Teil des Körpers verfolgen, sondern auch den Weg durch den menschlichen Organismus.

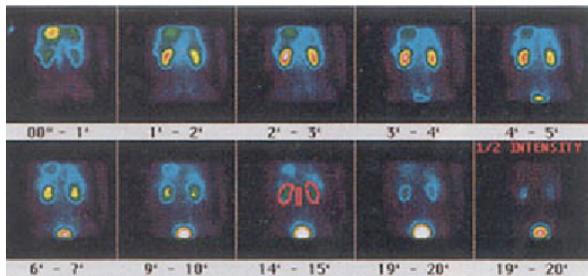


Abbildung 6.5: Beispiel für planare Szintigraphie.

Bei der **Planaren Szintigraphie** wird die Aktivitätsaufnahme an einem Ort direkt nach der Einnahme des Präparats mit einer Gammakamera zeitlich aufgelöst gemessen. Sie entspricht dem Projektionsröntgen. In der Abbildung 6.5 ist eine Nierenfunktionsszintigraphie zu sehen. Das Radiopharmakon fließt normal über die Nieren in die Blase. Die

Durchblutung der Niere kann seitengetreunt beurteilt werden, ebenso wie die Reinigungsfunktion der Niere (*clearance*).

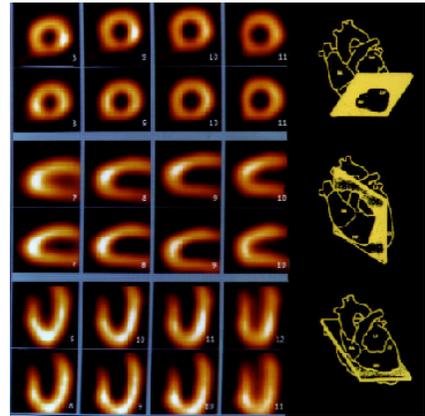


Abbildung 6.6: Myokard-SPECT.

Eine Abbildung wie bei der CT ist ebenfalls möglich: bei der **Single Photon Emission Computer Tomography (SPECT)** wird das Linienintegral der Aktivitätsdichte mit der Gammakamera in verschiedenen Projektionen gemessen. Es können die gleichen mathematischen Rekonstruktionsverfahren angewendet werden wie in der CT. Abbildung 6.6 zeigt das Ergebnis einer Myokardszintigraphie (Myokard-SPECT) zu sehen. Sie liefert exakt reproduzierbare und nachvollziehbare Schnitte durch das Herz und wird zum Beispiel bei Verdacht auf eine koronare Herzkrankheit eingesetzt.

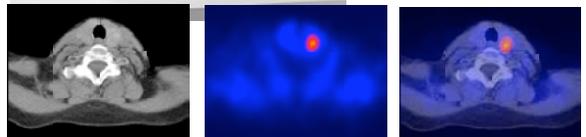


Abbildung 6.7: SPECT/Spiral-CT-Gerät (oben) und Kombination (rechts) zweier Aufnahmen (links: CT, mitte: SPECT).

Es gibt auch Kombinationsgeräte, mit denen SPECT-

und CT-Untersuchungen gleichzeitig durchgeführt werden können. In der Abbildung 6.7 ist ein Gerät von Siemens abgebildet, darunter eine CT- und SPECT-Aufnahme eines Schilddrüsentumors (links, mitte) und das zugehörige Kombinationsbild (rechts). Die Diagnose von Tumor- und Herzerkrankungen wird so genauer und zuverlässiger.

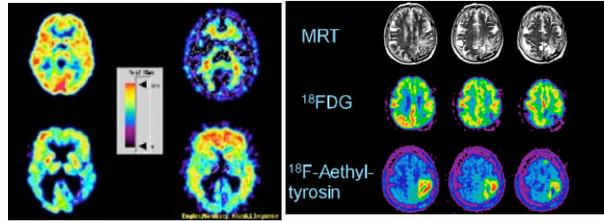


Abbildung 6.8: Links: PET eines gesunden Menschen (oben) und eines Alzheimer-Patienten (unten). Rechts: Übereinanderstellung der Informationen aus MRI und PET.

Bei der **Positronen-Emissions-Tomographie (PET)** wird ein Positronenmarker eingesetzt zur Molekülverfolgung und die Gammaquanten der Annihilationsstrahlung von Positronen mit Elektronen über eine Koinzidenz-Detektion gemessen. PET wird häufig für die Untersuchung von Gehirnfunktionen verwendet.

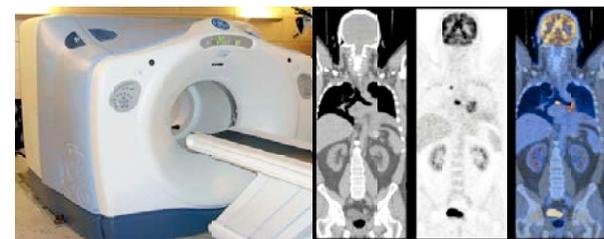


Abbildung 6.9: Kombinationsgerät für PET und CT.

Auch hier gibt es Kombinationsgeräte für PET- und CT-Aufnahmen. Die Verwendung von MRI-Schnittbildern zusammen mit PET-Bildern wird insbesondere bei Untersuchungen am Gehirn benutzt.

6.1.5 Ultraschall

Ein praktisch ebenfalls sehr wichtiges bildgebendes Verfahren ist die Sonographie (Ultraschall-Diagnostik). Dort wird die Reflexion, Streuung und Absorption von Ultraschall in Gewebe ausgenutzt. Ein Ultraschallwandler erzeugt die Ultraschallwelle und detektiert das zurückkommende Schallecho.



Abbildung 6.10: Beispiele für Ultraschallbilder. Links: 3D-Bild, rechts: konventionelles Ultraschallbild eines Babys.

Die Ultraschall-Diagnostik hat ebenfalls ein sehr weites Anwendungsgebiet; es erstreckt sich von der Schwangerschaft über Gynäkologie und Blutgefäße bis hin zur Herzuntersuchung.

6.1.6 Sonstige Verfahren

Weiter gibt es die exotischeren Verfahren Thermographie, Impedanztomographie oder optische Tomographie. Die Endoskopie kann ebenfalls zu den bildgebenden Verfahren gerechnet werden.

Die Abbildung bioelektrischer Quellen des Körpers wird vorwiegend für die Untersuchung von Herz und Hirn benutzt. Die Zielsetzung ist vergleichbar mit der von SPECT oder funktioneller MRI, nämlich die Abbildung funktioneller Abläufe im Körper. Während bei diesen Verfahren Stoffwechsel-Prozesse abgebildet werden, werden electrophysiologische Abläufe durch die Abbildung der elektrischen Potentiale und Magnetfelder gemessen. So kann man am Herzen zusätzliche Leitungsbahnen, die zu Herzrhythmusstörungen führen, lokalisieren. Diese können dann mit einer RF-Ablation unterbrochen und

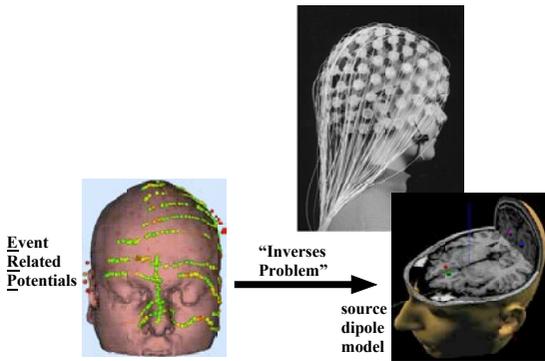


Abbildung 6.11: Messung von Event Related Potentials (ERP) mit Hilfe eines EEG-Geräts und der Rückschluss auf die zugrunde liegenden Stromdipol-Verteilung.

der Patient so vollständig geheilt werden. Seit kurzem können auch die elektrophysiologischen Auswirkungen eines Herzinfarkts abgebildet werden.

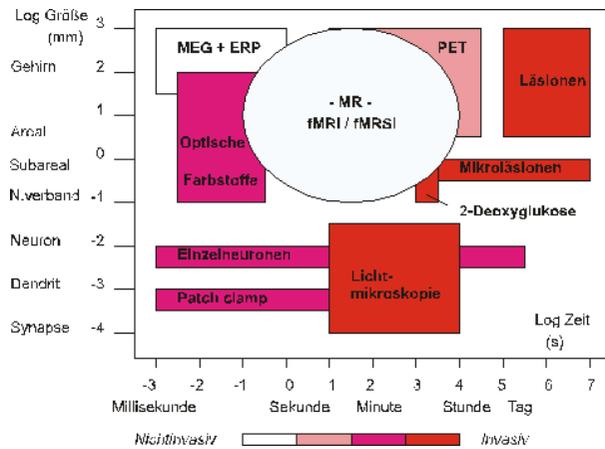


Abbildung 6.12: Vergleich von räumlicher und zeitlicher Auflösung unterschiedlicher Methoden und ihrer Invasivität.

Für die Bewertung und den Vergleich der einzelnen Methoden gibt es eine Reihe von unterschiedlichen Kriterien, wie z.B. räumliche und zeitliche Auflösung oder die Invasivität. Einige davon sind in Figur 6.12 zusammengefasst.

6.2 Grundlagen der Röntgendiagnostik

6.2.1 Historische Entwicklung

Unmittelbar nach der Entdeckung der "neuen Art von Strahlung" durch Wilhelm Conrad Röntgen am 8. November 1895 wurde die Bedeutung der Röntgenstrahlen für die Medizin erkannt. Sehr kurze Zeit nach den ersten Veröffentlichungen setzte die praktische Anwendung der Röntgenstrahlung in der Medizin ein.



Abbildung 6.13: Wilhelm Röntgen

Die technische Entwicklung der Röntgendiagnostik ist durch markante Neuerungen in größeren zeitlichen Abständen gekennzeichnet. 1917 wurde die Hochvakuumröhre mit geheizter Kathode von W.D.Coolidge eingeführt, und um 1925 wurde die benötigte Hochspannung in Röntgeneratoren durch Wechselstromtransformatoren und Gleichrichterröhren erzeugt. Um 1950 wurden elektronenoptische Röntgenbildverstärker in Kombination mit einem Fernsehsystem eingesetzt. Der nächste große Schritt wurde 1973 getan mit der Einführung der Computer-Tomographie von Hounsfield. Um 1980 wurden digitale Techniken eingeführt, die digitale Subtraktions-Angiographie und die digitale Lumineszenzradiographie. Seit 2000 werden zunehmend digitale Festkörper-Flächendetektoren für Röntgenaufnahmen und Röntgendurchleuchtung eingesetzt.

6.2.2 Begriffe

Eine **Röntgeneinrichtung Diagnostik** umfasst die Gesamtheit aller technischen Mittel, die zur Untersuchung eines Patienten mit Röntgenstrahlung eingesetzt werden. Die wesentlichen Komponenten sind

- ein **Röntgeneratore**, der die Hochspannung von etwa 30 bis 150 kV erzeugt, schaltet und regelt, bei bis zu 1.5 A Röhrenstrom;
- der **Röntgenstrahler**, der die Röntgenstrahlung erzeugt und Filter sowie Blenden enthält;
- das **Röntgenanwendungsgerät**, das zur Lagerung des Patienten dient und die Einstellung der Röntgenstrahlung und des Röntgenbildwandler möglich macht;
- der **Röntgenbildwandler**, der die Umwandlung des Strahlungsbildes in ein sichtbares Bild durchführt.

Als **Röntgenbilderzeugungssystem** fasst man alle Komponenten zusammen, die unmittelbar an der Entstehung des sichtbaren Röntgenbildes beteiligt sind. Es gibt zwei Typen von Bilderzeugungssystemen. Der **Projektionsradiographie** liegt die Zentralprojektion zu Grunde, das Bild wird durch direkte Wandlung der Messdaten gewonnen. Der andere Typ sind **rekonstruktive Bilderzeugungssysteme** (siehe CT), in der die Bildinformation verschlüsselt in den Messdaten enthalten ist und deshalb rekonstruiert werden muss.

6.2.3 Projektionsradiographie

Die Projektionsradiographie nutzt die Zentralprojektion als Abbildungsprinzip (Abbildung 6.14).

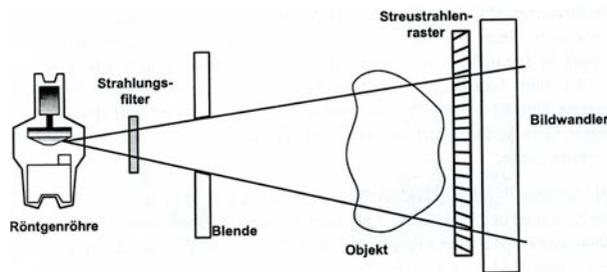


Abbildung 6.14: Röntgenbilderzeugungssystem der Projektionsradiographie.

Dafür benötigt man eine Röntgenquelle, welche im Idealfall eine Punktlichtquelle darstellt. Die davon ausgehende Strahlung durchdringt das abzubildende Objekt und dahinter wird für jeden Strahl die auftretende Intensität gemessen.

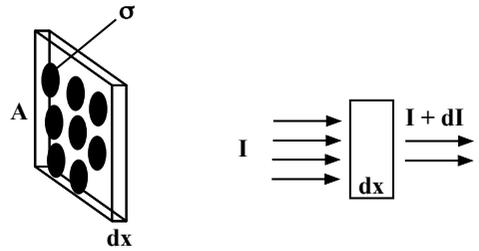


Abbildung 6.15: Zur Ableitung des Schwächungsgesetzes.

Die Abnahme der Intensität I der Strahlung ist $dI = -w \cdot I$, wobei w die Wahrscheinlichkeit für die Absorption eines Photons bei der Teilchendichte n des Absorbers ist. Jedem Absorber wird eine Fläche zugeordnet, der **Wirkungsquerschnitt** σ mit der Einheit **barn**: $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$. Trifft ein einfallendes Photon eine solche Fläche, dann wird es absorbiert, ansonsten dringt es durch das Material der Dicke dx . Diese Dicke sei so gewählt, dass sich die Flächen σ nicht überdecken. Das Plättchen mit Volumen $V = A dx$ enthält $N = nV$ dieser idealen Absorber. Für die Absorptionswahrscheinlichkeit w gilt dann:

$$w = \frac{\text{Fläche der Absorber}}{\text{Gesamtfläche}} = \frac{N \cdot \sigma}{A} = \frac{nV \cdot \sigma}{A} = \frac{nAx \cdot \sigma}{A} = n dx \sigma .$$

Für die Intensitätsabnahme gilt also

$$dI = -wI = - \underbrace{n \sigma}_{\mu} I dx .$$

μ ist der **(lineare) Schwächungskoeffizient**. Die Abnahme der Intensität erfolgt also exponentiell:

$$I = I_0 e^{-\mu d} ,$$

wobei d die Absorberdicke ist. Der Schwächungskoeffizient entspricht der inversen Eindringtiefe:

$$\begin{aligned} \langle x \rangle &= \frac{\int_0^\infty dx x I_0 e^{-\mu x}}{\int_0^\infty dx I_0 e^{-\mu x}} = \frac{-\frac{d}{d\mu} \int_0^\infty dx e^{-\mu x}}{\int_0^\infty dx e^{-\mu x}} \\ &= \frac{1/\mu^2}{1/\mu} = \frac{1}{\mu} . \end{aligned}$$

Die Wechselwirkung der Röntgenstrahlen mit dem Gewebe erfolgt über die Elektronendichte. In erster Näherung ist der Schwächungskoeffizient deshalb proportional zur Dichte ρ des Materials:

$$\mu = n\sigma = \frac{N_A \rho}{m_{mol}} \sigma.$$

Als **Dosis** wird die von der ionisierenden Strahlung pro Masseneinheit deponierte Energie bezeichnet. Die Einheit ist Gray Gy: =J/kg.

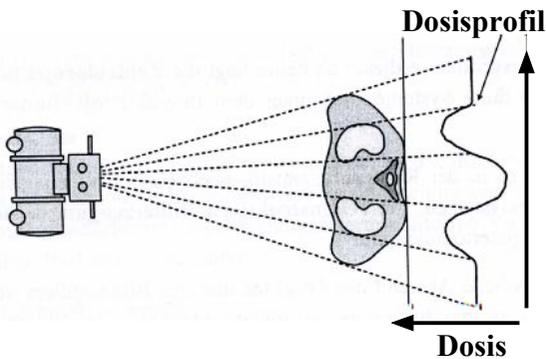


Abbildung 6.16: Entstehung des Dosisprofils.

Die auf dem Röntgendetektor auftreffende Energie ist im Idealfall die Differenz zwischen der abgestrahlten und der im Objekt deponierten Energie. Das Bild stellt somit die zweidimensionale Dosisverteilung dar.

Die mittlere freie Weglänge von 1 MeV-Photonen in Wasser beträgt $\langle x \rangle = 1/\mu = 14,4$ cm. Damit ergibt sich ein Wirkungsquerschnitt

$$\sigma(\text{H}_2\text{O}, 1\text{MeV}) = 2,1 \cdot 10^{-24} \text{cm}^2 = 2,1 \text{b}.$$

Die Energie, die nicht transmittiert wird, wird entweder gestreut oder absorbiert. Damit setzt sich der lineare Abschwächungskoeffizient μ aus dem **Streu- koeffizienten** $\tilde{\sigma}$ (bei Richtungsänderung) und dem **Absorptionskoeffizienten** τ zusammen: $\mu = \tilde{\sigma} + \tau$. Dabei entspricht der Streukoeffizient der Wahrscheinlichkeit für eine Richtungsänderung des Photons, während der Absorptionskoeffizient die Wahrscheinlichkeit beschreibt, dass die Strahlung vom Gewebe absorbiert wird.

6.3 Röntgenquellen

6.3.1 Aufbau einer Röntgenröhre

Der Aufbau einer Röntgenröhre ist in Abbildung (6.17) zu sehen:

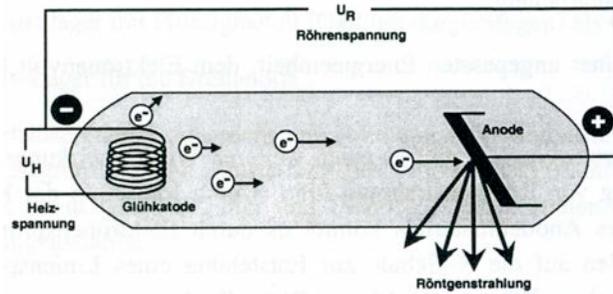


Abbildung 6.17: Schema einer Röntgenröhre.

Sie besteht aus einer Hochvakuumröhre, in der sich eine beheizbare Kathode und eine Anode befinden. Zwischen Kathode und Anode liegt eine Spannung von etwa 10 bis 150 kV an und es fließt ein Strom von 1 bis 2000 mA.

Wenn die Kathode aufgeheizt wird, setzt die thermische Elektronenemission ein. Die dadurch emittierte Stromdichte wird beschrieben durch die **Richardson-Formel**:

$$j_e = A_0 T^2 e^{-W/k_B T}.$$

A_0 ist eine Materialkonstante (Richardson-Konstante), T die Temperatur und W die Austrittsarbeit, die geleistet werden muss. Durch die Hochspannung werden die herausgelösten Elektronen beschleunigt und an der Anode wird die Röntgenstrahlung erzeugt (Bremsstrahlung und charakteristische Strahlung, siehe später).

Die **Strahlungsleistung** einer Röntgenröhre lässt sich aus der spektralen Leistungsdichte $J_v := \frac{dJ}{dv}$ berechnen (siehe Kap. 6.3.4): $J_{ges} = \int_0^\infty dv J_v$. Der **Wirkungsgrad** η einer Röntgenröhre ist definiert als das Verhältnis von ausgehender Röntgenleistung $P_R = J_{ges}$ und aufgewendeter elektrischer Leistung $P_e = I_A U_A$ (I_A : Anodenstrom, U_A : Anodenspannung):

$$\eta = \frac{P_R}{P_e} = \frac{J_{ges}}{I_A U_A}.$$

Experimentell hat sich herausgestellt, dass der Wirkungsgrad einer Röntgenröhre linear mit der Anodenspannung U_A und mit der Ordnungszahl Z des Anodenmaterials zunimmt:

$$\eta = \alpha \cdot U_A Z \quad \text{mit } \alpha \approx 10^{-9} \text{V}^{-1}.$$

Die Strahlungsleistung einer Röntgenröhre ist nach obigen Gleichungen proportional zur Kernladungszahl Z des Anodenmaterials, zum Röhrenstrom I und zum Quadrat der Röhrensannung,

$$J_{ges} = \eta I_A U_A = \alpha \cdot Z I_A U_A^2.$$

6.3.2 Elektrodenmaterial

Bei Wolfram ($Z = 74$) als Anodenmaterial und einer Spannung von 100 kV ist $\eta < 1\%$, mehr als 99% der Energie wird in Wärme umgewandelt. Daher sind die Kriterien für das **Anodenmaterial**:

- hohe Ordnungszahl,
- hohe Schmelztemperatur,
- hohe Wärmeleitfähigkeit.

Für das **Kathodenmaterial** gilt ähnliches, aber hier ist die Ordnungszahl des Materials nicht wichtig, sondern die Austrittsarbeit wegen der Richardson-Formel. Das Kathodenmaterial sollte eine

- kleine Austrittsarbeit,
- hohe Schmelztemperatur,
- hohe Wärmeleitfähigkeit

besitzen. Das bevorzugte Anoden- und Kathodenmaterial ist wegen dieser Kriterien **Wolfram** ($Z = 74$). Es besitzt die höchste Schmelztemperatur aller Metalle (3680 K), eine relativ hohe Wärmeleitfähigkeit von $1.3 \frac{\text{W}}{\text{cmK}}$ und eine relativ geringe Austrittsarbeit von 4.5 eV. Die Materialkonstante A_0 beträgt für Wolfram $60 \frac{\text{A}}{\text{cm}^2 \text{K}^2}$.

6.3.3 Bremsstrahlung

Die Röntgenstrahlung entsteht durch das Auftreffen der beschleunigten Elektronen auf die Anode. Den überwiegenden Teil ihrer kinetischen Energie

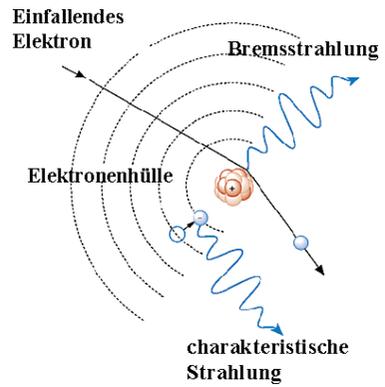


Abbildung 6.18: Entstehung der Röntgenstrahlung

übertragen die Elektronen durch die Wechselwirkung mit den Hüllenelektronen auf das Gitter des Anodenmaterials, das sich dadurch erwärmt. Außerdem werden die Elektronen im Feld der Atomkerne abgelenkt und erzeugen dabei **Bremsstrahlung**. Der Hertz'sche Dipol der abgestrahlten Energie wird durch relativistische Effekte "nach vorne" gebogen (Abbildung 6.19).

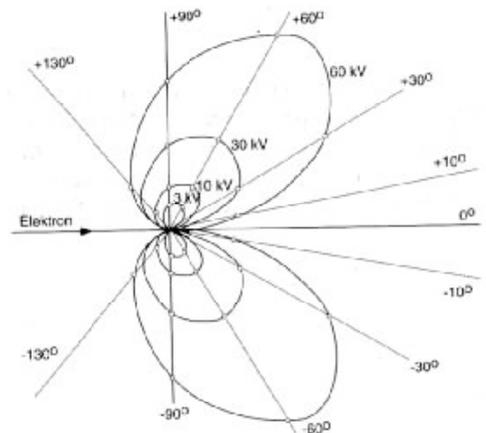


Abbildung 6.19: Winkelabhängigkeit der Bremsstrahlung.

Die Elektronen werden im Kernfeld jedoch abgelenkt, so dass die Flugrichtung von der Einfallsrichtung des Strahls abweicht. Gemittelt über viele verschiedene abgelenkte Flugbahnen ergibt sich so eine weitgehend isotrope Winkelverteilung der Bremsstrahlung (siehe Abb. 6.20).

Nur in demjenigen Winkelbereich, in dem die Strahlung, fast parallel zur Anodenoberfläche austritt,

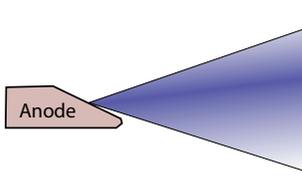


Abbildung 6.20: Winkelverteilung der Röntgenstrahlung.

wird sie durch Selbstabsorption geschwächt (*Heel-Effekt*).

6.3.4 Spektrale Verteilung

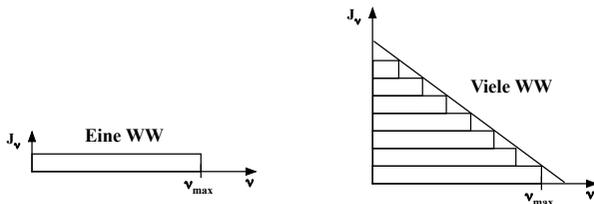


Abbildung 6.21: Bremsstrahlungsspektrum. Links: Eine Wechselwirkung; rechts: viele Wechselwirkungen in Folge.

Die spektrale Verteilung der Bremsstrahlung kann man anhand eines sehr einfachen Modells ableiten. Die größtmögliche Frequenz bei gegebener Anodenspannung U_A erhält man, wenn die gesamte kinetische Energie $E_{kin} = eU_A$ des Elektrons in die Energie eines Photons umgewandelt wird:

$$\nu_{max} = \frac{E_{kin}}{h} = \frac{eU_A}{h}$$

In Wirklichkeit wird nicht die gesamte Energie umgewandelt. Ein gutes Modell ist, dass bei einem einzelnen Wechselwirkungsprozess jeder Energieverlust für das auftreffende Elektron gleich wahrscheinlich ist. Dann erhält man für den einzelnen Streuprozess ein Spektrum, das bis zur maximalen Frequenz ν_{max} konstant ist und oberhalb verschwindet. Die Energie des Elektrons wird dabei um den Betrag der Photonenenergie reduziert. Beim nächsten Streuprozess ist entsprechend die maximale Frequenz geringer. Summiert man über alle aufeinanderfolgenden Streuprozesse, so erhält man ein Spektrum, bei

dem die Leistungsdichte mit zunehmender Frequenz abfällt und bei ν_{max} verschwindet (siehe Abbildung 6.21).

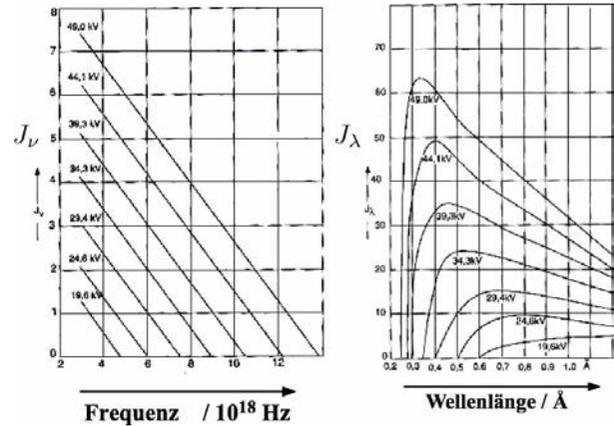


Abbildung 6.22: Spektrale Verteilung der Bremsstrahlung im Frequenzraum (links) und als Funktion der Wellenlänge (rechts).

Daraus folgt, dass die Bremsstrahlung ein kontinuierliches Spektrum besitzt, dessen obere Grenzfrequenz proportional mit der Beschleunigungsspannung ansteigt, wie in Abbildung 6.22 zu sehen ist. Daraus erhält man auch die Spektraldichte als Funktion der Wellenlänge, indem man $d\nu = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$ verwendet.

6.3.5 Charakteristische Strahlung

Es gibt einen weiteren Wechselwirkungsmechanismus, der zur Emission von Röntgenstrahlung führt. Erzeugt das auftreffende Elektron im Anodenmaterial eine Ionisation eines Hüllenelektrons, dann wird die so erzeugte Lücke durch ein Elektron aus einer äußeren Schale gefüllt. Dabei entsteht **charakteristische Röntgenstrahlung**. Wenn ein Elektron aus der K-Schale entfernt wurde, dann wird die nachfolgende charakteristische Strahlung K-Strahlung genannt. Je nach Übergang aus der L-, M- oder N-Schale wird dann noch K_α , K_β , K_γ , ... -Strahlung unterschieden.

Abb. 6.23 zeigt das Energieniveau-Diagramm von Wolfram ($Z = 74$) und die daraus entstehenden Li-

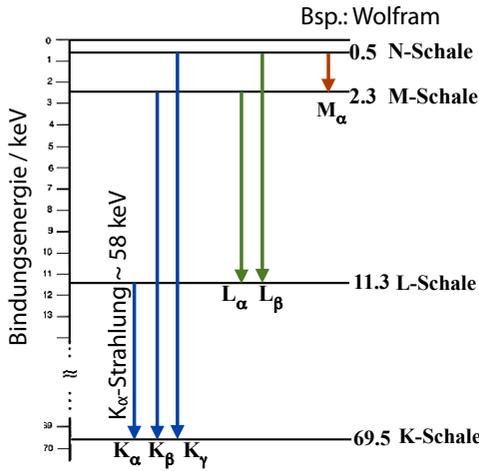


Abbildung 6.23: Charakteristische Strahlung am Beispiel des Energieniveaudiaagramms von Wolfram.

nien. Damit die K_{α} -Strahlung mit etwa 58 keV emittiert werden kann, muss das auftreffende Elektron mindestens eine Energie von ungefähr 70 keV besitzen. Für die Energie der K_{α} -Strahlung gilt in einem weiten Bereich das **Mosleysche Gesetz**

$$\nu_{K_{\alpha}} = \frac{3R_{\infty}}{4} \cdot (Z - 1)^2.$$

Hier ist $R_{\infty} = 3.29 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ die Rydberg-Konstante und Z die Ordnungszahl.

Im Bereich der harten Röntgenstrahlung liegen nur die K_{α} -Linien. Die charakteristische Strahlung spielt in der Röntgendiagnostik eine untergeordnete Rolle. Sie wird eigentlich nur in der Mammographie eingesetzt. Dort wird als Anodenmaterial Molybdän verwendet, da die 20keV – K_{α} -Strahlung einen guten Bildkontrast zeigt für die Mikrokalzifizierungen, die diagnostisch wichtig sind.

Abbildung 6.25 zeigt ein typisches Spektrum einer diagnostischen Röntgenröhre, bestehend aus einem Kontinuum mit zusätzlichen charakteristischen Linien. Der Abfall der Leistungsdichte bei niedrigen Photonenenergien gegenüber dem Bremsstrahlungsspektrum im Vakuum kommt daher, dass in der Röntgendiagnostik immer Aluminiumscheiben als **Filter** vor die Röntgenröhre gestellt werden. Die *weiche* Röntgenstrahlung wird auf diese Weise ab-

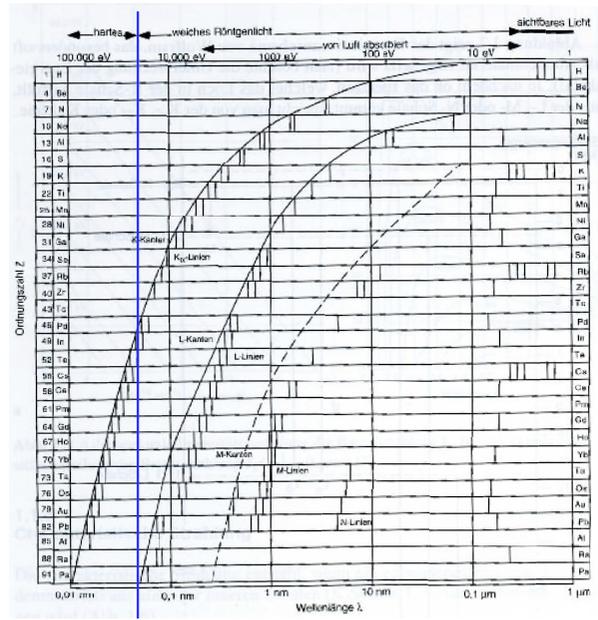


Abbildung 6.24: Übersicht über die Lage der K-, L-, M-Linien und -absorptionskanten.

sorbiert. Sie würde im Körper vollständig absorbiert werden und trüge daher nichts zum Röntgenbild bei, würde aber die Strahlenbelastung des Patienten erhöhen. Als Gesamtfilterung ist gesetzlich vorgeschrieben: bis 60 kV: 2 mm Aluminium; bis 80 kV: 3 mm Aluminium; bis 120 kV: 4 mm Aluminium.

6.3.6 Absorption und Streuung

Da der Schwächungskoeffizient bei Röntgenstrahlen proportional zur Dichte des Materials ist, wird häufig der **Massenschwächungskoeffizient** μ/ρ von Materialien betrachtet. Es können verschiedene Mechanismen unterschieden werden, die zur Abschwächung beitragen, und die von der Photonenenergie und dem Material abhängen.

Im diagnostischen Energiebereich um etwa 0,1 MeV überwiegt bei Blei die Photoabsorption, insbesondere nach Überschreiten der K-Kante. Weitere Beiträge sind bei niedrigen Energien die Rayleigh-Streuung, bei mittleren Energien die Compton-Streuung, und bei hohen Energien Paarbildung.

Bei Wasser sind die Beiträge anders gewichtet.

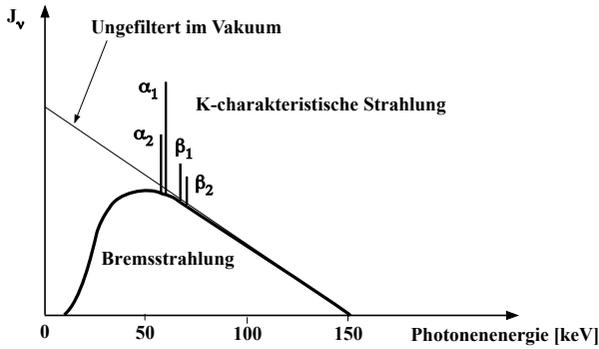


Abbildung 6.25: Typisches Spektrum einer diagnostischen Röntgenröhre.

Im diagnostisch relevanten Bereich überwiegt die Compton-Streuung. Dies ist auch für medizinische Anwendungen relevant, da weiches Körpergewebe in erster Linie aus Wasser besteht. Photonen, die durch Compton-Streuung abgelenkt wurden, ergeben Streustrahlung, welche bei der Bildgebung stört.

6.3.7 Einige Konsequenzen für Bildgebung mit Photonen

Bei der Bildgebung stellt sich die Frage, welche Photonenergien am besten geeignet sind. Folgende Forderungen für eine hohe Qualität eines Transmissionsbildes sind zu berücksichtigen:

- **Signalhöhe.** Betrachtet man die Transmission von Photonen durch eine 10 cm dicke Wasser- und Knochenschicht, dann liegt die Transmission bei Energien bis 25 keV bei unter einem Prozent. Strahlung in diesem Energiebereich trägt somit stark zur Dosisbelastung bei, aber kaum zum Signal. Daher werden nur Energien $E > 25$ keV benutzt, daher sind nur der Photoeffekt und der Compton-Effekt wichtig.
- **Hoher Kontrast.** Der größte Unterschied der Massenschwächungskoeffizienten von Knochen, Fett und Muskeln besteht bei kleinen Energien wegen dem dann dominierenden Photoeffekt auf Grund der stärksten Abhängigkeit des Wirkungsquerschnitts von Z von $\sigma_{ph} \sim Z^3 \dots 5$ (siehe Kapitel "Ionisierende Strahlung").
- **Hohe räumliche Auflösung.** (-> Detektoren)

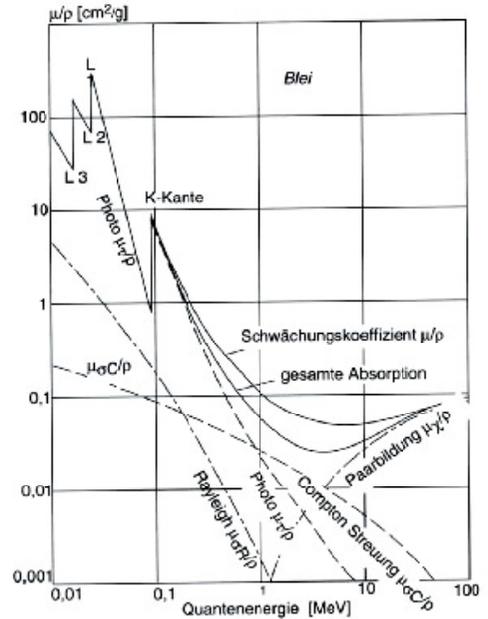


Abbildung 6.26: Massenschwächungskoeffizient von Blei.

- **Möglichst wenig Streustrahlung.** Wie schon erwähnt entsteht diese durch Compton-Streuung.

Im Kapitel 11 "Ionisierende Strahlung" werden noch weitere Konsequenzen diskutiert, die sich aus einer Begrenzung der Strahlenbelastung ergeben.

6.3.8 Drehanode

Im Vergleich zu den klassischen Röntgenröhren sind heutige Röntgenstrahler stark optimiert. Für besonders hohe Strahlungsleistung verwendet man Drehanoden. Abbildung 6.29 vergleicht eine klassische Röntgenröhre mit einer Drehanoden-Röntgenröhre. Zusätzlich ist eine moderne Röntgenstrahlereinheit abgebildet.

Abb. (6.30) zeigt den Aufbau einer solchen Einheit. Die Röntgenröhre ist in ein Röhrenschutzgehäuse eingebaut. Es schirmt die in den Halbraum der Anode austretende Röntgenstrahlung ab und lässt nur das Nutzstrahlungsbündel aus dem Fenster treten. Die Ölfüllung zwischen Schutzgehäuse und Röhre dient dem Hochspannungsschutz und der Wärme-

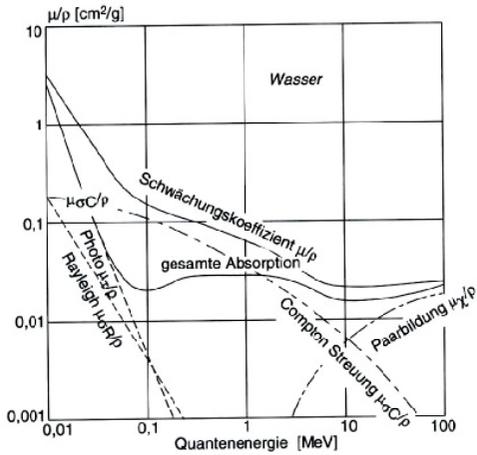


Abbildung 6.27: Massenschwächungskoeffizient von Wasser.

abfuhr. Durch das Drehen der Anode wird die im Röntgenfokus entstehende Wärme auf ein möglichst großes Volumen verteilt. Typische Drehzahlen liegen bei rund 3000 Umdrehungen pro Minute.

6.3.9 Filter und Blenden

Häufig verwendet man ein Strahlungsfilter, das die niederenergetischen Anteile des Bremspektrums schwächt. Damit verschiebt sich das Maximum und die mittlere Energie zu höheren Werten; man sagt die Strahlung wird härter. Das wird gemacht, weil bei dicken Objekten die niederenergetischen Teile des Spektrums so stark geschwächt werden, dass sie praktisch keinen Beitrag zum Strahlungsbild leisten, sondern nur die Strahlenbelastung des Patienten erhöhen.

Um das Nutzstrahlenbündel auf die gewünschte Größe zu begrenzen, sind Blenden im Röntgenstrahler eingebaut. Um die Größe und Lage des Strahlungsfeldes vor der Anwendung erkennen zu können, wird durch einen Spiegel eine virtuelle Lichtquelle in die Position des Röntgenfokus gebracht, die ein Lichtfeld auf dem Objekt erzeugt, welches das Strahlungsfeld markiert (Abbildung 6.31).

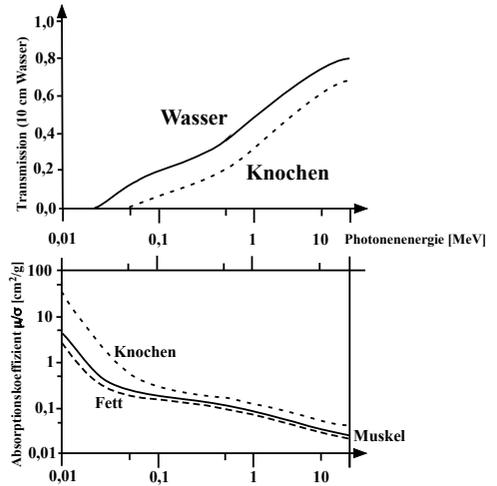


Abbildung 6.28: Oben: Transmission von Röntgenstrahlen durch 10 cm Wasser oder äquivalente Knochenmasse. Unten: Massenschwächungskoeffizient von Knochen, Muskeln und Fett.

6.4 Kontrast und Streustrahlung

6.4.1 Das Problem

Bei der Wechselwirkung der Röntgenstrahlung mit dem Objekt wird die Strahlung nicht nur geschwächt, sondern es entsteht auch eine diffuse Streustrahlung. Bei den üblicherweise verwendeten Röntgenenergien entsteht diese Streustrahlung hauptsächlich durch den Comptoneffekt, also die Streuung eines einfallenden Röntgenphotons an einem freien (schwach gebundenen) Elektron.

Da die Streustrahlung nicht zur Abbildung beiträgt, wird der Kontrast des Bildes reduziert. Das geschieht allerdings *nicht* etwa durch eine Verschmierung der Strukturen, sondern die Gesamtintensität wird angehoben, der Kontrast wird also kleiner. Außerdem steigt das Rauschen des Bildes mit der Wurzel aus der Anzahl der Röntgenquanten pro Bildpunkt an. Daher ist die einzig wirksame Maßnahme eine Reduzierung der Streustrahlung im Bild.

Neben der Reduktion des Kontrastes trägt die Streustrahlung auch zur Strahlenbelastung bei: sie gelangt

Klassische Röntgenröhre:



Drehanoden-Röntgenröhre:



Röntgenstrahler-Einheit (Siemens)



Nennspg.: 150 kV
Leistung: 30/50 kW
Anoden-Neigungsw.: 16°
Eigenfilterung:
2,5 mm Al / 80 kV

Abbildung 6.29: Röntgenröhren.

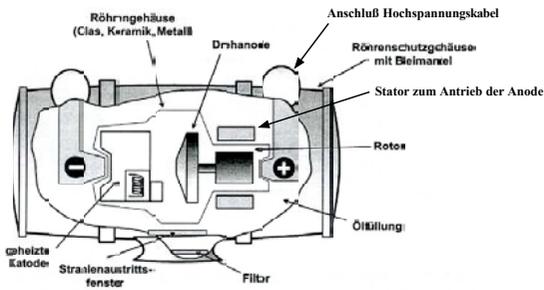


Abbildung 6.30: Bauform eines typischen Röntgenstrahlers.

in andere Bereiche des Patienten, die gar nicht im direkten Röntgenstrahl lagen. Das Personal wird durch Bleifenster und -schürzen vor der Streustrahlung geschützt. Blenden werden in erster Linie verwendet, um die Entstehung der Streustrahlung zu reduzieren. Um die Auswirkung der Streustrahlung auf den Kontrast des Bildes zu reduzieren, werden **Streustrahlennraster** eingesetzt.

6.4.2 Kontrast

Die Charakterisierung der Qualität eines Strahlungsbildes wird im Wesentlichen durch den **Kontrast** durchgeführt. Wenn $D_{1,2}$ zwei benachbarte Dosiswerte im Dosisprofil sind, dann ist der Kontrast

$$K := \frac{|D_1 - D_2|}{D_1 + D_2}.$$

Man kann nun den **Gesamtstrahlungskontrast** K_G ausrechnen, der durch die Nutzstrahlung (Dosis D_N)

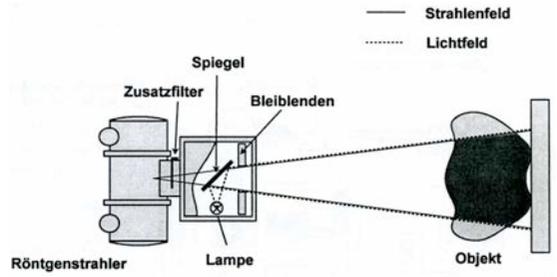


Abbildung 6.31: Lichtvisiertiefenblende.

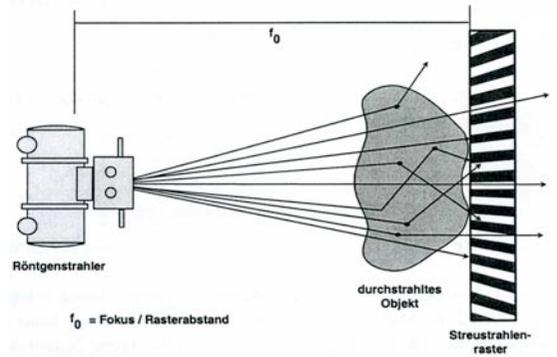


Abbildung 6.32: Wirkungsweise eines Streustrahlennrasters.

und die Streustrahlung (Dosis D_S) entsteht. In guter Näherung ist diese gleichförmig über das gesamte Bild verteilt. Es ergibt sich:

$$K_G = \frac{|(D_{1N} + D_S) - (D_{2N} + D_S)|}{D_{1N} + D_S + D_{2N} + D_S} = \frac{1}{1 + \alpha} K_N,$$

wobei K_N der Kontrast ist, der ohne Streustrahlung, also nur auf Grund von Schwächungsunterschieden, entstehen würde. Der Parameter

$$\alpha := \frac{2D_S}{D_{1,N} + D_{2,N}}$$

quantifiziert das Verhältnis von Streustrahlung zu Nutzstrahlung. Er hat im Thoraxbereich für die üblichen Feldgrößen einen Wert von etwa $\alpha \approx 2$, im Abdomen typischerweise $\alpha \approx 7$. Die Strahlung hinter dem Objekt enthält also wesentlich mehr Streustrahlung als bildwirksame Nutzstrahlung und der Kontrast wird erheblich reduziert. Wegen dieser Kontrastminderung ist der Einsatz eines Streustrahlennrasters unumgänglich.

6.4.3 Streustrahlunterdrückung

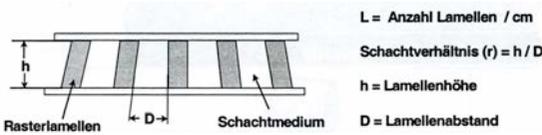


Abbildung 6.33: Form und geometrische Kenngrößen eines Streustrahlennasters.

Ein Streustrahlennaster (Abbildung 6.33) wird durch geometrische Kenngrößen wie den Fokussierungsabstand, die Anzahl der Lamellen pro Längeneinheit und das Schichtverhältnis charakterisiert. Typische Werte für ein Lamellen-Raster: Die Höhe der Bleilamellen ist $h = 1,4\text{ mm}$ bei einer Dicke von $d = 0,07\text{ mm}$. Die Dicke des Schachtmediums zwischen den Lamellen ist $D = 0,18\text{ mm}$ bei einer Anzahl von 4 Bleilinen pro mm . Die weißen Linien auf Grund des Rasters verschlechtern die Ortsauflösung kaum; sie können ganz vermieden werden indem man das Raster während der Aufnahme schnell hin- und herbewegt.

Die wichtigste physikalische Kenngröße ist die **Selektivität** $S := T_N/T_S$, das Verhältnis der **Nutzstrahlungstransparenz** T_N und der **Streustrahlungstransparenz** T_S . Als **Transparenz** wird in diesem Zusammenhang das Verhältnis von Dosis (oder Strahlungsintensität) mit Raster zu der Dosis ohne Raster für die jeweilige Strahlungsart genannt.

Durch den Einsatz eines Streustrahlennasters wird der Parameter α , der das Verhältnis von Streustrahlung zu Nutzstrahlung angibt, um den Faktor $1/S$ reduziert. Für den Gesamtstrahlungscontrast ergibt sich nun

$$K_G = \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{S}} K_N.$$

S kann Werte von 5 bis 15 annehmen, abhängig von der verwendeten Strahlungsenergie.

6.5 Bilderzeugung

6.5.1 Röntgenfilm

Die klassische Methode zum Aufnehmen von Röntgenstrahlung ist der **Röntgenfilm**. Er besteht aus einer Trägerfolie mit Emulsionsschichten vorne und hinten. Eine Emulsionsschicht enthält kleine Silberbromid-Kristalle. Wenn ein Röntgenquant auf den Kristall trifft, dann werden viele Bromionen oxidiert und es entstehen freie Elektronen. Diese Elektronen werden an "Keimen" eingefangen und die benachbarten Silberionen werden angezogen und reduziert. Dadurch entstehen an den belichteten Stellen Silberkeime. An diesen Keimen werden durch das **Entwickeln** Millionen weitere Silberionen reduziert und es entstehen Silberkörner. Das **Fixieren** löst überschüssiges Silberbromid aus der Emulsionsschicht heraus. Dadurch verliert der Film seine Lichtempfindlichkeit.

Der Vorteil von Röntgenfilmen ist die sehr gute Ortsauflösung von etwa $0,025\text{ mm}$ beim Einsatz von Silberbromid, da die Kristalle sehr klein sind. Der Nachteil ist, dass eine hohe Strahlungs-dosis benötigt wird, denn nur 1% aller Röntgenquanten werden durch den Röntgenfilm absorbiert. Das hat zum Einsatz von Verstärkerfolien geführt. Röntgenfilme ohne Verstärkerfolien werden nur noch im Zahnröntgen eingesetzt.

6.5.2 Kontrast und Kennlinie

Die **Schwärzung** B eines Röntgenfilms (oder Film-(Verstärker-)Folien-Systems) ist ein logarithmisches Maß für die **Transparenz** T (= transmittierte geteilt durch auftreffende Lichtintensität), also der relativen Durchlässigkeit des geschwärzten Films für Licht:

$$B = -\log_{10} T.$$

Dieses logarithmische Maß ist dem Helligkeitsempfinden des menschlichen Auges angepasst, das proportional zum Logarithmus der einfallenden Lichtintensität ist. Außerdem ist der Logarithmus der über eine Zeit t belichtenden Dosis ein Maß für den

Schwächungskoeffizienten:

$$\ln\left(\frac{D_0}{D}\right) = \ln\left(\frac{I_{0t}}{I_t}\right) = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = \mu d.$$

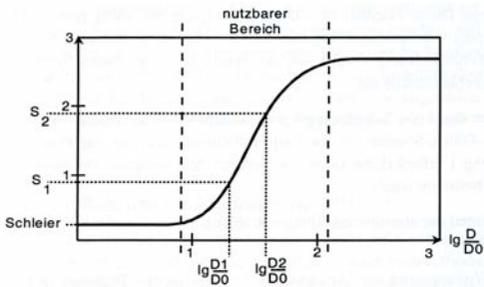


Abbildung 6.34: Kennlinie eines (Film-) Folien-Systems.

Abbildung (6.34) zeigt eine typische Kennlinie eines (Film-) Folien-Systems (Schwärzungskurve). Der mittlere Anstieg der Schwärzungskurve, die **Gradation**

$$G := \frac{S_2 - S_1}{\log_{10}(D_2/D_1)}$$

gibt an, wie kleine Unterschiede in der Dosis in sichtbaren Kontrast umgesetzt werden. Bei Röntgenfilmen liegt G bei 2.4 bis 2.6. Die Filmschwärzung ohne Belichtung wird als **Schleier** bezeichnet.

Der Bildkontrast lässt sich durch die Gradation beeinflussen: eine höhere Gradation ergibt auch einen höheren Kontrast. Da gleichzeitig der Belichtungsumfang (der nutzbare Dosisbereich) verringert wird, steigt die Gefahr von Fehlbelichtungen. Die meisten Objekte in der Röntgendiagnostik schöpfen den verfügbaren Belichtungsumfang wegen ihrer Transparenzunterschiede weitgehend aus. Daher tritt schon bei geringen Über- und Unterbelichtungen ein Informationsverlust ein. Das ist der größte Nachteil dieses Bildwandlersystems.

Im nutzbaren Bereich entsteht ein negatives Bild, das heißt ein großer linearer Schwächungskoeffizient führt zu einer kleinen Schwärzung, Knochen erscheinen daher auf dem Röntgenfilm transparent.

Als **Empfindlichkeit** wird die erforderliche Dosis D_B genannt für eine Schwärzung $S = 1$. Es gibt mehrere Empfindlichkeitsklassen $EK := 1000\mu\text{Gy}/D_B$.

Ein System der Klasse 200 benötigt $5\mu\text{Gy}$ für die Schwärzung $S = 1$. Gebräuchliche Empfindlichkeitsklassen bewegen sich im Bereich $EK = 100..800$.

6.5.3 Film-Folien-System

Bei einem **Film-Folien-System** wird die Emulsion von einer Verstärkerfolie mit Leuchtstoffschicht umgeben.

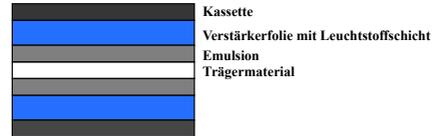


Abbildung 6.35: Film-Folien-System (schematisch).

In dieser Leuchtstoffschicht erzeugt ein einfallendes Röntgenquant eine Vielzahl von freien Elektronen, die wieder eingefangen werden und dann in den Grundzustand relaxieren. Das dabei ausgesandte **Lumineszenzlicht** belichtet den Film.

Der Vorteil dieses Systems ist der größere Röntgen-schwächungskoeffizient, da bei der Lumineszenzschicht Elemente hoher Dichte und mit hohem Z eingesetzt werden können. Weiterhin kann man die Leuchtstoffschicht wesentlich dicker machen, da sie nicht entwickelt werden muss, und so die Ausbeute erhöhen.

Verstärkungsfolien	Röntgenstrahlabsorption in einer -100 µm-Folie bei:			Wirkungsgrad der Lichtemission
	40 keV	60 keV	80 keV	
	%	%	%	%
CaWO ₄	33	13	27	4
LaOBr: Tb	73	33	17	13
Gd ₂ O ₃ : Tb	37	51	28	19

Abbildung 6.36: Wirkungsgrade der Röntgenabsorption und Lichtemission

Da ein Röntgenquant viele sichtbare Photonen erzeugt, ist eine Dosisverstärkung mit einem Faktor von 10 bis 20 möglich. Wie die Tabelle zeigt, hängt der genaue Wert von der Röntgenenergie und dem Leuchtstoff ab. Der Nachteil ist eine schlechtere Bildschärfe, da das Fluoreszenzlicht in alle Richtungen gestreut wird, in der Emulsion also ein Lichtkegel wirksam ist.

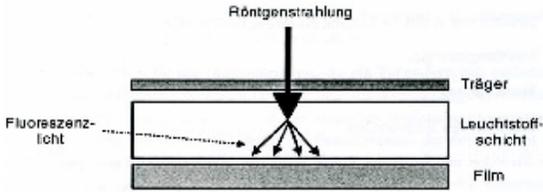


Abbildung 6.37: Bildschärfe bei Film-Folien-Systemen.

6.5.4 Speicherfolien

Speicherfolien haben eine ähnliche Funktionsweise wie Verstärkerfolien. Der Unterschied besteht darin, dass der Übergang vom Leuchtzentrum in den Grundzustand, der das Lumineszenzlicht zur Folge hat, nun optisch verboten ist. Die Leuchtzentren bleiben also angeregt. Um das Bild abzutasten wird ein Laserscanner mit kleinem Fokus benutzt, der das Zurückfallen in den Grundzustand möglich macht. Das dabei entstehende Licht wird mit Photomultipliern registriert und insgesamt das Bild zeilenweise digitalisiert. Nach dem Auslesen muss die Verstärkerfolie gelöscht werden, dann kann sie wieder eingesetzt werden. Abgesehen von dem Vorteil, ein digitales Bild zu erhalten, haben Speicherfolien auch einen großen Dynamikbereich, Fehlbelichtungen sind daher selten.

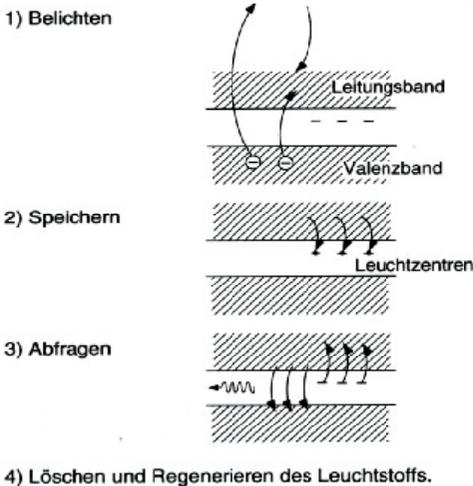


Abbildung 6.38: Prinzip von Speicherfolien.

6.5.5 Selen-Filme

Selen-Filme wurden ursprünglich als Ersatz für Röntgenfilme entwickelt um das Entwickeln und Fixieren zu vermeiden. Neuerdings werden Selen-Filme in der digitalen Radiographie eingesetzt. Das Verfahren ist weitgehend identisch mit der Fotokopier-Technik.

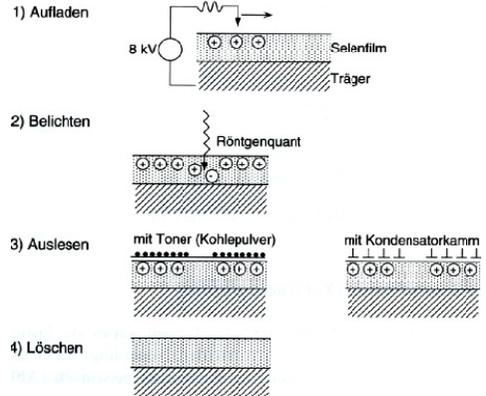


Abbildung 6.39: Selen-Filme (schematisch).

Der Selen-Film ist auf einem Träger aufgebracht und wird positiv aufgeladen. Ein einfallendes Röntgenquant erzeugt freie Elektronen und die positive Raumladung wird abgebaut. Wenn nun eine Aufschlammung mit Toner erfolgt, bleibt dieser überall da haften, wo noch eine positive Raumladung vorhanden ist.

Neuerdings wird die Raumladung als Alternative mit einem Kondensatorkamm abgefragt. Auch hier kann man nach dem Auslesen eine Löschung durchführen, wodurch eine Wiederverwendung möglich ist. Vorteil ist auch hier der große Dynamikbereich.

6.5.6 Festkörperdetektoren

Bei **Festkörperdetektoren** wird die Röntgenstrahlung in einer **Szintillatorschicht** in sichtbares Licht umgewandelt. Übliche Szintillatormaterialien sind Gadoliniumoxysulfid und Thallium-dotiertes Cäsiumiodid (CsI:Tl), das eine hohe Umwandlungseffektivität besitzt. Der größte Vorteil von CsI ist, dass es so hergestellt werden kann, dass sich eine Säulenstruktur auf den Kristallisationskeimen an der Un-

terlage bildet. Auf diese Weise sind relativ dicke Leuchtschichten von ungefähr 0.4 mm möglich, ohne dass die räumliche Auflösung darunter leidet.

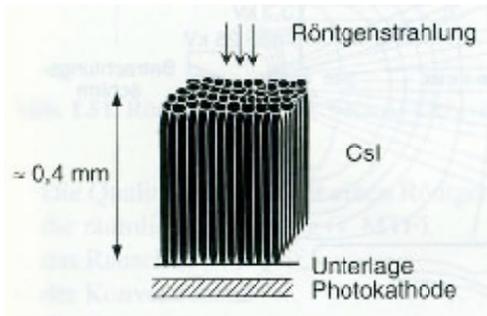


Abbildung 6.40: Nadelförmige CsI-Kristalle.

Das Szintillationslicht, das im CsI gebildet wird, breitet sich entlang dieser Säulen aus, welche als Lichtleiter wirken. Dadurch ist die Auflösung nicht durch die Dicke der Schicht, sondern lediglich durch den Durchmesser der Säulen beschränkt.

Zur Detektion werden Photodioden aus amorphen Selen mit Dünnschicht-Dioden oder Transistoren eingesetzt. Eine andere Möglichkeit ist wieder die Ausnutzung der lokalen Ladungsreduktion einer aufgeladenen Selschicht mit der Speicherung der positiven Ladungen auf Kondensatoren, die zyklisch durch Dünnschichttransistoren ausgelesen werden. Die erhaltenen elektrischen Signale sind direkt proportional zur eingefallenen Dosis. Da kein Streulicht auftritt, ist das Auflösungsvermögen besser als bei der ersten Variante der Festkörperdetektoren.

Eine dritte Bauform verwendet einen CCD (charge coupled device) zum Auslesen des Szintillationslichtes.

6.5.7 Röntgenbildverstärker

Häufig möchte der Arzt Bewegungsabläufe oder die Ausbreitung eines Kontrastmittels im Körper kontinuierlich beobachten. Früher stand der Arzt bei eingeschalteter Röntgenstrahlung vor einem Fluoreszenzschirm, was zu einer extrem großen Strahlenbelastung von Patient und Arzt führte. Heute wandeln Röntgenbildverstärker die einfallende Röntgenstrahlung in sichtbares Licht um.

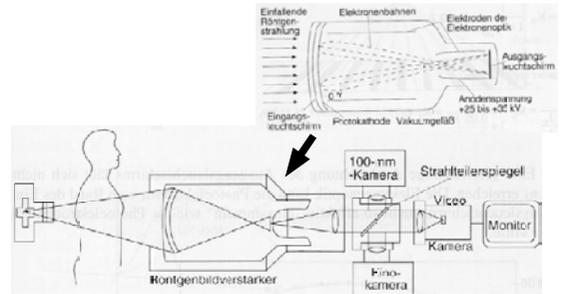


Abbildung 6.41: Schema einer Röntgenbildanlage (unten) und des Röntgenbildverstärkers (oben).

In der Abbildung 6.41 ist eine Röntgenbildanlage zu sehen, bei der zwischen drei Aufnahmearten umgeschaltet werden kann. Stehende Bilder können zum Beispiel mit einer Kamera abfotografiert werden, oder der Leuchtschirm kann mit einer Videokamera aufgenommen und auf einem Monitor wiedergegeben werden.

Das Eingangsfenster des Röntgenbildverstärkers ist typischerweise aus Aluminium. Es besitzt für diagnostische Röntgenstrahlung eine 90%-ige Transmission und hält dem Atmosphärendruck stand. Am Eingang des Röntgenbildwandlers wird die einfallende Röntgenstrahlung in sichtbare Photonen umgewandelt. Dies geschieht mit einem Leuchtschirm aus Na-dotiertem CsI. Diese Photonen treffen auf eine Photokathode, wo Elektronen herausgelöst werden. Diese werden in einem Vakuumgefäß mit 25 – 30kV beschleunigt und auf dem Ausgangsleuchtschirm abgebildet. Dieser wiederum kann direkt beobachtet werden oder wie eben beschrieben abgefilmt werden.

6.6 Abbildungsqualität

6.6.1 Abbildungsgüte

Die **Bildgüte** wird letztendlich gemessen an der Qualität der diagnostischen Aussage. Sie wird beeinflusst von

- Eigenschaften des Bilderzeugungssystems,
- Eigenschaften des abzubildenden Objekts,

- Bedingungen bei der Bildbetrachtung,
- und nicht zu vergessen den Leistungen des Auswerters!

Die physikalische Abbildungsgüte kann quantifiziert werden durch

- Bildschärfe
- Kontrast
- Rauschen
- Artefakte

Eine objektive Beschreibung ist möglich durch die Modulationsübertragungsfunktion (MÜF oder englisch MTF), die Übertragungskennlinie und das Wiener-Spektrum. Trotzdem ist der Einfluss auf diagnostische Aussagen schwer abzuschätzen, und so werden Auswertexperimente gemacht, die die Erfahrung der Auswerter mit berücksichtigt.

6.6.2 Bildschärfe, Modulationsübertragungsfunktion

Die Bildschärfe ist verbunden mit der Wiedergabe von Konturen. Eine scharfe Kante wird nicht zu einem Sprung im Schwärzungsverlauf führen, sondern eine Unschärfe im Übergangsbereich besitzen. Gemessen wird dies durch die Abbildung von Rastern, das visuelle Auflösungsvermögen wird als Anzahl Linienpaare pro Millimeter angegeben (lp/mm).

Um den Begriff der räumlichen Auflösung zu präzisieren, dient die **Modulationsübertragungsfunktion (MÜF, MTF)**. Angenommen wird, dass ein Objekt im Röntgenstrahlengang ist, das am Ausgang zu einer sinusförmig modulierten Intensitätsverteilung führt. Ein ideales Bild (das "Original") hätte einen Grauwert (in einer Dimension) von

$$g(x) = \langle g \rangle + A_0 \sin(2\pi x u),$$

wobei $\langle g \rangle$ der mittlere Grauwert des Originals ist, A_0 die Amplitude der Grauwertmodulation und $u := 1/\lambda$ die **räumliche Frequenz** der Grauwertmodulation darstellt.

Bei einem linearen Übertragungssystem wird das Bild zu

$$b(x') = \langle g \rangle + A_0 \sin(2\pi x' u) \cdot \eta(u),$$

und $\eta(u)$ ist die Modulationsübertragungsfunktion, mit $0 \leq \eta(u) \leq 1$. Die Benutzung der MÜF hat den Vorteil, dass die MÜF eines Gesamtsystems gegeben ist durch das Produkt der MÜFs der Einzelkomponenten.

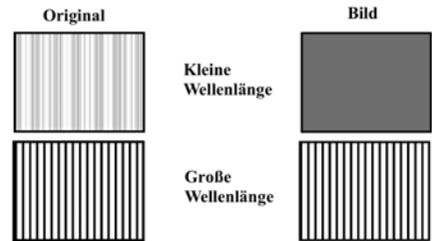


Abbildung 6.42: Abbildung von Rastern mit unterschiedlicher Anzahl von Linien pro mm.

Wenn die Wellenlänge des abzubildenden Rasters zu klein ist, dann geht $\eta \rightarrow 0$, der Bildinhalt geht verloren, da nur noch der Mittelwert des Bildes bleibt. Ist die Wellenlänge der Modulation groß genug, dann ist $\eta \approx 1$ und das Bild entspricht dem Original. Um die MÜF mit vielen Sinus-Rastern unterschiedlicher Frequenz zu messen, wird ein rechteckförmiges Bleistrichraster mit zunehmender Frequenz benutzt.

Formal ist ein lineares Übertragungssystem charakterisiert durch die Impulsantwort (*point spread function*) $h(x, y)$ des Systems. Dessen (zweidimensionale) Fourier-Transformierte nennt man die komplexe Übertragungsfunktion $H(u, v)$. Die Modulationsübertragungsfunktion ist der Betrag der normierten komplexen Übertragungsfunktion:

$$MTF(u, v) = |H(u, v)| / |H(0, 0)|.$$

6.6.3 Bildunschärfe

Ursachen für Bildunschärfen sind:

- Geometrische Unschärfe durch die endliche Größe des Röntgenfokus;
- Bildwandlerunschärfe durch Lichtstreuungseffekte (siehe vorher);
- Bewegungsunschärfe;

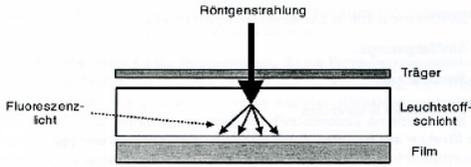


Abbildung 6.43: Bildwandlerunschärfe durch Lichtstreuung.

- Objektschärfe (Absorptionsunschärfe), da sich die Strahlungsschwächung nicht sprunghaft ändern kann wegen der Form der Objektstrukturen.

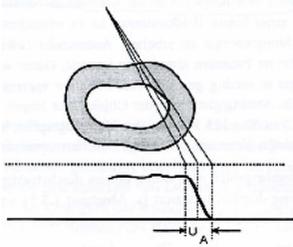


Abbildung 6.44: Objektschärfe.

6.7 Computer-Tomographie

Während normale Röntgenbilder eine zweidimensionale Projektion ergeben, ist es auch möglich, mit Hilfe vieler solcher Aufnahmen ein dreidimensionales Objekt zu rekonstruieren. Da dafür ein Computer benötigt wird bezeichnet man das Verfahren als Computer-Tomographie.

6.7.1 Prinzip

Die Computer Tomographie (CT) verwendet das gleiche physikalische Prinzip wie das Projektionsröntgen. Bei der CT werden jedoch viele einzelne Projektionsbilder aufgenommen, indem die Röntgenquelle und der Detektor um das Objekt (den Patienten) gedreht werden. Aus dieser Vielzahl von Projektionen berechnet ein Computer durch Rückprojektion die dreidimensionale Elektronendichte im Objekt.

Das Einsatzgebiet umfasst hauptsächlich Unfalldiagnostik und Untersuchungen von Kopf, Lunge und Bewegungsapparat. Die Operationsplanung in der Endoprothetik, zum Beispiel bei der künstlichen Hüfte, basiert heute auf den dreidimensionalen CT-Datensätzen. Quantitative CT ist wie beim Projektionsröntgen nur eingeschränkt möglich. Ein Einsatzgebiet ist zum Beispiel die Messung des Knochenzustandes im Verlauf einer Therapie oder Erkrankung.

Transmissionstomographie Emissionstomographie

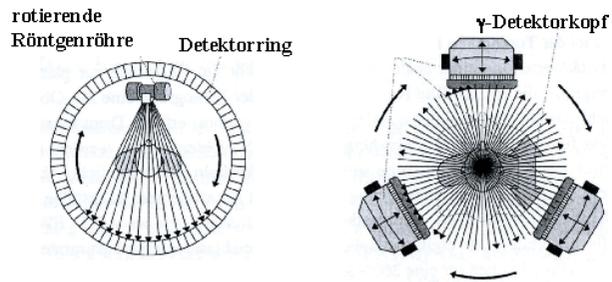


Abbildung 6.45: Vergleich TCT / ECT

Die Computer Tomographie (CT) wird manchmal auch als TCT, als Transmissions-CT bezeichnet, um sie von der Emissions-CT (ECT) zu unterscheiden, die in der Nuklearmedizin behandelt wird. Die CT ist ein rekonstruktives Bilderzeugungssystem, das bedeutet die Bildinformation ist in den Messdaten verschlüsselt. Zusätzlich zu der reinen bildlichen Darstellung ist **quantitative CT** möglich, also zum Beispiel die Knochendichtebestimmung, die Bestimmung von Lungendichte und -struktur sowie Gewebepfusion.

Die grundlegende Idee ist, das Objekt aus unterschiedlichen Projektionswinkeln abzutasten und durch anschließende Rekonstruktion das Bild zu erhalten. Die Methode geht in erster Linie auf G.N. Hounsfield und A.N. Cormack zurück, welche 1979 dafür den Nobelpreis erhielten. Für die Rekonstruktion der 3D Form aus den einzelnen Projektionen gibt es zwei Arten von Konstruktionsverfahren: die iterative Rekonstruktion und die Rekonstruktion basierend auf Integraltransformationen, wie der Radon-Transformation. Die iterative Rekonstruktion war historisch wichtig, sie wurde in den Anfängen der CT benutzt. Heutzutage wird sie nur noch in der Nuklearmedizin verwendet.

6.7.2 Iterative (CT-) Rekonstruktion

Um die iterative Rekonstruktion zu verdeutlichen, wird ein einfaches **Objektmodell** betrachtet (Abbildung 6.46).

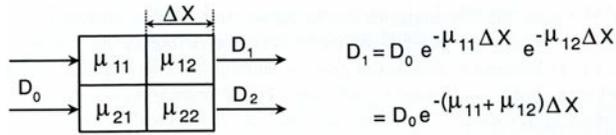


Abbildung 6.46: Einfaches Objektmodell.

Die Schwächung der Röntgenstrahlung erfolgt nach dem Schwächungsgesetz. Für D_1 erhält man

$$D_1 = D_0 e^{-(\mu_{11} + \mu_{12})\Delta x}$$

oder

$$\frac{1}{\Delta x} \cdot \ln(D_0/D_1) = \mu_{11} + \mu_{12}.$$

Die einfallende Dosis D_0 ist bekannt, die Dicke Δx eines Pixels ebenso. Gemessen wird D_1 , also erhält man mit dem Messwert die Summe der auf dem Projektionsstrahl liegenden linearen Schwächungskoeffizienten. Allgemeiner ist der Messwert die Projektion der zweidimensionalen Verteilung der linearen Schwächungskoeffizienten μ_{ij} .

Um ein Bild des Objektes selber zu erhalten, muss diese Projektion invertiert werden: aus den gemessenen Projektionswerten D_i soll die Verteilung der Schwächungskoeffizienten μ_{ij} berechnet werden.

Das prinzipielle Vorgehen ist in der Abb. 6.47 skizziert. Ausgehend von einer beliebigen Anfangsverteilung werden die Pixel in einer Projektionsrichtung so korrigiert, dass die Messwerte herauskommen. Das ganze wird iterativ für alle gemessenen Projektionsrichtungen durchgeführt (Abbildung 6.47).

6.7.3 Radon-Transformation

Die wichtigste Grundlage für die Rekonstruktion über Integraltransformationen ist eine Arbeit von J. Radon mit dem Titel "Über die Bestimmung von Funktionen durch ihre Integrale längs gewisser Mannigfaltigkeiten", welche 1917 veröffentlicht wurde.

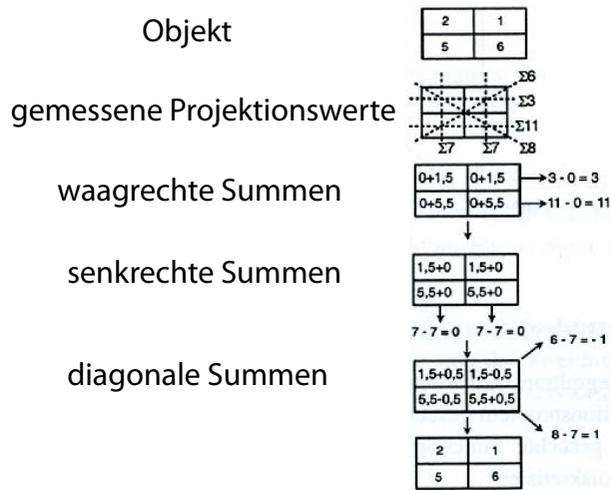


Abbildung 6.47: Schema der iterativen Rekonstruktion.

Die Idee ist, eine beliebig integrierbare Funktion $g(x,y)$ durch Linienintegrale über das Definitionsgebiet von g zu beschreiben.

Die Gesamtheit aller **Projektionen**

$$p_\theta(\xi) := \int_{-\infty}^{\infty} d\eta g(x,y),$$

welche die einzelnen Messungen beschreiben, wird als **Radontransformierte** bezeichnet. Hier bezeichnen η und ξ die Koordinaten des (um θ) gedrehten Systems (siehe Fig. 6.48).

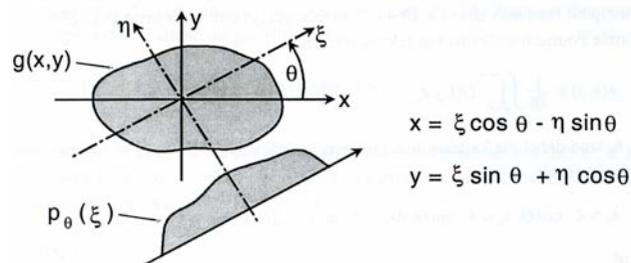


Abbildung 6.48: Projektion einer zweidimensionalen Funktion.

Ein quantitatives Beispiel ist die Projektion der Funktion $f(x,y)$, die in einem kreisförmigen Gebiet (Radius R_0) den Wert a besitzt und ansonsten Null

ist. Die Projektion ergibt

$$p_\theta(x) = \begin{cases} 2a\sqrt{R_0^2 - x^2} & |x| \leq R_0 \\ 0 & \text{sonst.} \end{cases}$$

Die Projektion $p_\theta(x)$ stellt somit eine Ellipsenhälfte dar, unabhängig vom Winkel θ .

6.7.4 Zentralschnitt-Theorem

Um aus den Messdaten das Objekt zu rekonstruieren, kann man das **Zentralschnitt-Theorem** (auch als **Fourier-Scheiben-Theorem** bekannt) verwenden. Es lautet:

Die bei einem Schnitt durch die zweidimensionale Fourier-Transformierte $G(k_x, k_y)$ von $g(x, y)$ unter dem Winkel θ sich ergebende Funktion $G_\theta(k)$ ist gleich der eindimensionalen Fourier-Transformierten der Projektion $p_\theta(\xi)$:

$$P_\theta(k) = \mathcal{F}\{p_\theta(\xi)\} = G_\theta(k).$$

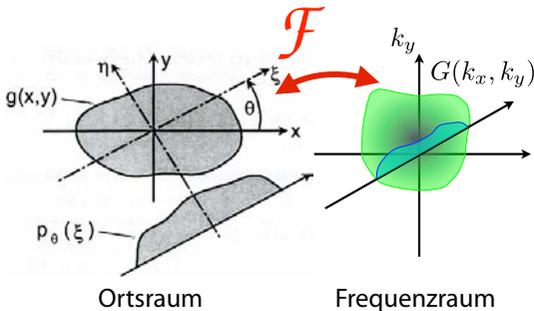


Abbildung 6.49: Veranschaulichung des Zentralschnitt-Theorems.

Die Rekonstruktion des Bildes kann also wie folgt durchgeführt werden: Durch eindimensionale Fourier-Transformation aller gemessenen Projektionen kann die zweidimensionale Fouriertransformierte $G(k_x, k_y)$ von $g(x, y)$ zusammengesetzt werden. Die gesuchte Bildfunktion $g(x, y)$ erhält man durch die inverse Fourier-Transformation von $G(k_x, k_y)$.

6.7.5 Gefilterte Rückprojektion

Die Radontransformation beziehungsweise das Zentralschnitt-Theorem kann auch so gedeutet werden, dass das Spektrum $P(k, \theta)$ mit der **Filterfunktion** $|k|$ gefiltert worden ist. Denn für die Bildfunktion

$$g(x, y) = \frac{1}{2\pi} \int \int_{-\infty}^{+\infty} dk_x dk_y G(k_x, k_y) e^{i2\pi(xk_x + yk_y)}$$

kann man zeigen, dass

$$\begin{aligned} g(x, y) &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi d\theta \int_{-\infty}^\infty dk P_\theta(k) |k| e^{i2\pi k \xi} \\ &= \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi d\theta p_\theta(\xi) * F^{-1}\{|k|\} \end{aligned}$$

gilt. Der **Faltungskern** $F^{-1}\{|k|\}$ ist unabhängig vom Projektionswinkel, das heißt alle Projektionen werden mit dem gleichen Kern gefaltet. Das eröffnet die Möglichkeit, statt des "richtigen" Kerns eine **modifizierte Filterfunktion** zu verwenden, die die hohen und mittleren Ortsfrequenzen unterschiedlich stark anheben. Verwendet werden glättende und hochauflösende Filter beziehungsweise Faltungskerne.

Die gefilterte Rückprojektion muss für die Praxis diskretisiert werden. Ein Vorteil der gefilterten Rückprojektion besteht darin, dass direkt nach dem Erfassen der ersten Projektion schon mit der Faltung und Rückprojektion begonnen werden kann.

Abbildung 6.50 zeigt ein Beispiel für den Einfluss der Filterung auf ein punktförmiges Objekt.

6.7.6 Hounsfield-Einheit

In der CT werden, wie beim Projektionsröntgen, "Schattenbilder" der transmittierten Röntgenintensität $I = I_0 e^{-\int d\mu(l)}$ aufgenommen. Daraus werden Schichtbilder rekonstruiert, die die Verteilung der linearen Schwächungskoeffizienten μ in der Objektschicht darstellen. Für die praktische Darstellung werden statt der Schwächungskoeffizienten **relative Schwächungswerte** benutzt, die in **Hounsfield-Einheiten** HU gemessen werden.

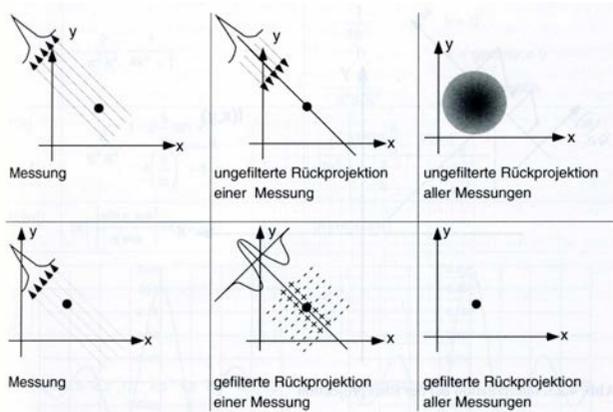


Abbildung 6.50: Vergleich einer gefilterten und einer ungefilterten Rückprojektion.

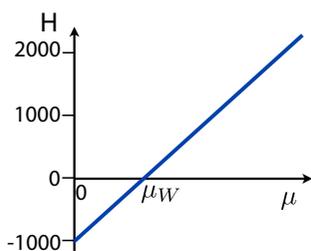


Abbildung 6.51: Schema der Hounsfield-Skala.

Die Hounsfield-Einheit ist definiert relativ zum linearen Schwächungskoeffizienten von Wasser, μ_W :

$$H := 1000 \cdot \frac{\mu - \mu_W}{\mu_W}$$

Die Röntenschwächungskoeffizienten von Körpergewebe in Hounsfield-Einheiten reicht von +3000 für Knochen bis zu -1000 für Luft. Die meisten Weichteilgewebe überlappen in einem Bereich von etwa -200 bis +100. Da dies häufig keinen ausreichenden Kontrast ergibt, werden Kontrastmittel verwendet um den Kontrast zu erhöhen.

6.8 Technik der CT-Scanner

6.8.1 1. Generation

Für die ersten CT-Aufnahmen um 1970 benutzte G.N. Hounsfield als Strahlenquelle (γ -Strahlung)

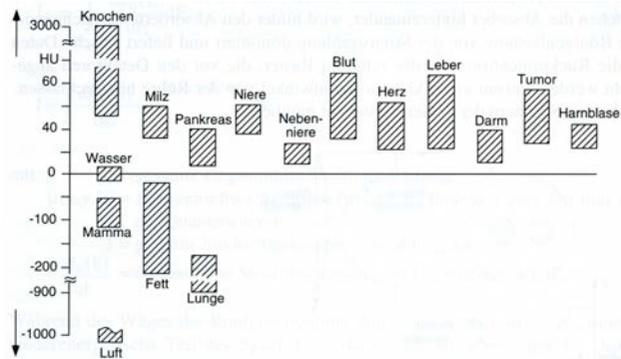


Abbildung 6.52: Röntenschwächungskoeffizienten verschiedener Körpergewebe in Hounsfield-Einheiten.

^{241}Am (Americium). Röntgenröhre und Detektor bewegen sich für jede Projektion am Objekt vorbei. Für die Aufnahme wurden 28000 Einzelpunkte gemessen und die Messdauer betrug 9 Tage.

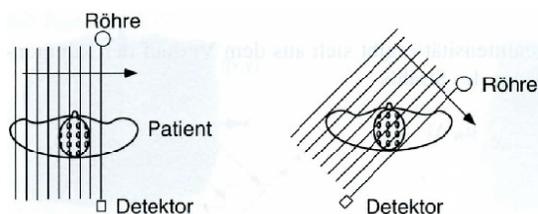


Abbildung 6.53: CT-Scanner der 1. Generation.

Wie in Abb. 6.53 gezeigt, kann man mit jedem einzelnen Positionswert von Quelle und Detektor ein Linienintegral messen, d.h. einen Punkt der Radon-transformierten bestimmen. Um die weiteren Punkte zu messen, werden Quelle und Detektor verschoben und danach um den Körper gedreht. Durch dieses schrittweise Aufnahmeverfahren wurde die Messzeit relativ lang.

Für die iterative Rekonstruktion des ersten Bildes benötigte Hounsfield 2.5 Stunden. Für die ersten Testmessungen wurden Aufnahmen von (toten) Gehirnen gemacht, danach wurden auch Messungen an lebenden Probanden (z.B. Hounsfield) durchgeführt.

Die ersten Erweiterungen betrafen die Quelle: sie wurde durch eine Röntgenröhre ersetzt. Dadurch wurde die Dosis erheblich gesteigert und die Messzeit auf wenige Stunden reduziert. Das System

wurde auch vergrößert, so dass auch Ganzkörper-Messungen möglich wurden.

6.8.2 2. Generation

Beim CT-Scanner der 2. Generation wird durch ein Detektor-Array gleichzeitig ein ganzer flacher Strahlenfächer genutzt.

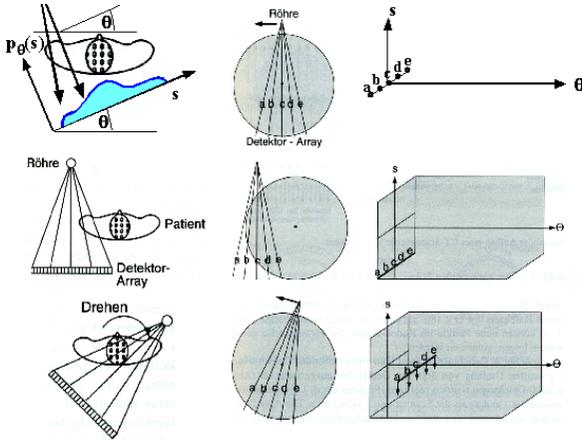


Abbildung 6.54: CT-Scanner der 2. Generation: Funktionsweise (links) und Datenaufnahme im Radon-Raum (rechts).

In der Anfangsphase 1975 betrug der Öffnungswinkel 10° , und es waren etwa 30 Detektoren in Reihe angebracht. Die Aufnahmezeit konnte dadurch, und durch den Einsatz einer Hochleistungs-Röntgenröhre, auf 20 Sekunden reduziert werden.

Wie in Abb. 6.54 gezeigt, muss in diesem System das System aus Quelle und Detektor seitlich verfahren und gedreht werden, um den gesamten Raum abzudecken. Jeder Datenpunkt entspricht einer integrierten Absorption. Für eine gegebene Schnittebene werden die Datenpunkte als Funktion des Winkels θ , unter dem der Röntgenstrahl läuft, und der Position s auf dem Detektor gemessen. Wie aus der Figur hervorgeht, sind die beiden Parameter nicht unabhängig voneinander.

Für die Rücktransformation sollten die Daten in einem gleichmäßigen, rechteckigen Raster angeordnet sein. Da die Daten nicht direkt in dieser Form anfallen, verwendet man ein Interpolationsverfahren.

6.8.3 3. Generation

Wenig später wurden CT-Scanner der 3. Generation eingesetzt, und noch heute sind viele der hergestellten Geräte CT-Scanner der 3. Generation.

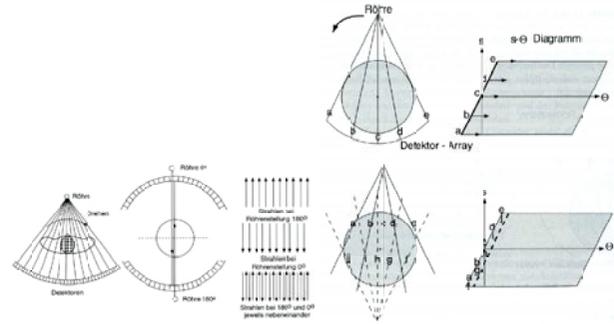


Abbildung 6.55: CT-Scanner der 3. Generation und Datenaufnahme im Radon-Raum (rechts).

Es werden 500 bis 800 Detektoren pro Array benutzt, und pro Sekunde können 1000 Projektionen aufgenommen werden. Wie im $s - \theta$ Diagramm gezeigt, werden hier alle Werte von s gleichzeitig aufgenommen. Die experimentellen Punkte im $s - \theta$ Diagramm liegen auf einer geneigten Geraden. Das System muss jetzt nur noch gedreht werden, d.h. im $s - \theta$ Diagramm wandern die Messpunkte horizontal.

Prinzipiell sind die Messungen unter einer Drehung um π invariant. Es kann sich aber trotzdem lohnen, die Messungen über den ganzen 2π Bereich durchzuführen: indem man in der Röntgenröhre den Brennfleck durch elektrische Felder etwas verschiebt gelingt es einem, zusätzliche Messpunkte aufzunehmen, welche zwischen den Punkten der ersten Halbrunde liegen.

6.8.4 4. Generation

CT-Scanner der 4. Generation benutzen einen stehenden geschlossenen Detektorring mit 5000 Detektoren auf dem Kreis. Auch hier können 1000 Projektionen pro Sekunde aufgenommen werden.

Damit die Detektoren den Röntgenstrahl nicht stören, ist der Detektorring leicht geneigt.

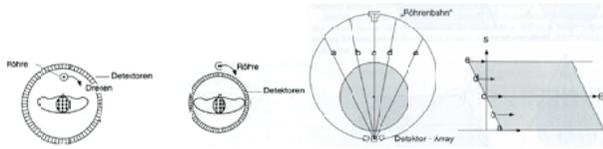


Abbildung 6.56: CT-Scanner der 4. Generation und Datenaufnahme im Radon-Raum (rechts).

Um den Schnittbereich einstellen zu können, werden zum einen Lichtvisiertiefenblenden eingesetzt (siehe vorher), und für die Feineinstellung kann ein Scannogramm des Patienten aufgenommen werden, bei der die Röhre und der Detektor ortsfest bleiben, und der Patient in einem kleinen Bereich durch den CT-Scanner geschoben wird.

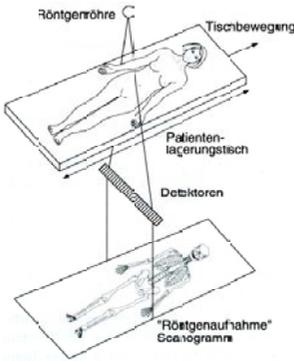


Abbildung 6.57: Scanogramm.

6.8.5 Röntgendetektoren in der CT

Da die Daten für die CT digital weiter verarbeitet werden, müssen sie digital aufgenommen werden. Als Detektoren kommen deshalb nur elektronische Detektoren in Frage, keine Filme. Die Detektoren sollten außerdem möglichst empfindlich sein, um die Messzeit möglichst kurz und die Strahlenbelastung möglichst gering zu halten. Man verwendet deshalb überwiegend zwei Typen von Röntgendetektoren: Xenon-Hochdruckionisationskammern und Szintillationskristalle mit Photodioden.

Die Ionisationskammer ist ein Kreissegment mit einer Länge von typischerweise 10 cm und einigen Millimetern Höhe. Sie ist mit Xenon-Gas bei 20 bar

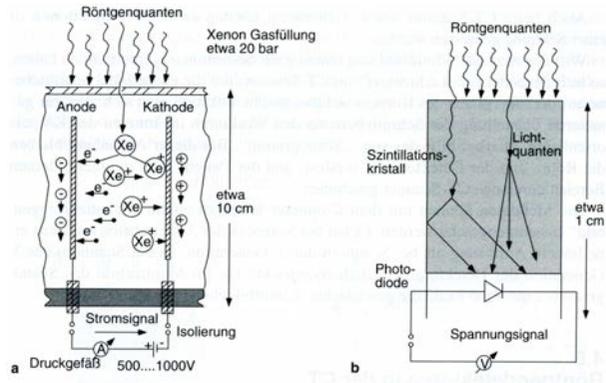


Abbildung 6.58: Schematischer Aufbau von Xenon-Hochdruckionisationskammern (links) und Szintillatorkristallen mit Photodetektoren (rechts).

gefüllt und besitzt eine Quanteneffizienz (DQC: Detective Quantum Efficiency) von bis zu 60%. Gemessen wird der Strom zwischen Anode und Kathode, der proportional zur einfallenden Röntgenleistung ist. Die Abklingzeit beträgt etwa $1 \mu\text{s}$, so dass Messwerte relativ schnell aufgenommen werden können.

Beim Szintillations-Detektor werden, wie schon vorher beschrieben, etwa 10 mm lange nadelförmige CsI-Kristalle verwendet. Im Gegensatz zum Einsatz bei Röntgenbildverstärkern verwendet man völlig transparente Einkristalle, die an den Seiten verspiegelt sind. Auf diese Art und Weise treffen alle entstehenden Lumineszenz-Photonen irgendwann auf der Unterseite auf, wo sie mit Photodioden gemessen werden. Die Lumineszenz-Abklingdauer liegt unter $1 \mu\text{s}$.

6.8.6 Auflösung

Die Auflösung der CT ist (wie beim Projektionsröntgen) durch die endliche Größe der Detektoren und des Fokus auf der Anode der Röntgenröhre bestimmt. Beide liefern jeweils einen Beitrag zur Modulations-Transferfunktion.

Für einen Fokusedurchmesser F beträgt der effektive Fokusedurchmesser in der Probe

$$b_F = F \frac{A-R}{A}$$

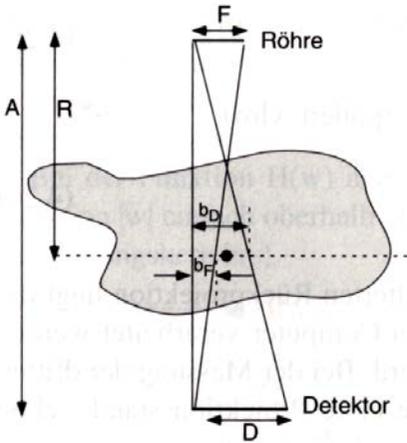


Abbildung 6.59: Auflösungsgrenzen auf Grund endlicher Größe von Detektor und Quelle

und für den Detektor entsprechend

$$b_D = D \frac{R}{A}.$$

Diese Auflösungen beziehen sich zunächst auf einzelne Projektionen. Soll sie auf die gesamte CT-Messung übertragen werden, so benötigt man entsprechend viele Projektionen in unterschiedliche Richtungen.

6.8.7 Artefakte

Die Verletzung der Bedingungen für die Bildrekonstruktion führt zu Artefakten. **Artefakte** sind künstliche Strukturen im Bild, für die es in dem abgebildeten Objekt keine Entsprechung gibt. Mögliche Artefakte sind:

- **Bewegungsartefakte** führen zu Streifenartefakten im Bild.
- **Aufhärtungsartefakte** führen zu sogenannten Hounsfield-Balken. Wegen der spektralen Verteilung der Bremsstrahlung wird die Strahlung mit zunehmender Länge des Absorptionsweges aufgehärtet. Volumenelemente gleichen Materials haben einen scheinbar geringeren Schwächungskoeffizienten in größerer Objektiefe.

- **Metallartefakte** entstehen durch Totalabsorption der Strahlung und führen zu inkonsistenten Messwerten und daraus bedingt Streifenartefakten im Bild.
- **Partialvolumenartefakte** entstehen durch nicht homogene Voxel (wie in der MRI auch). Läuft ein Teil des Strahls durch einen Bereich mit Röntgenschwächungskoeffizienten μ_1 , und ein anderer Teil des Strahls durch einen Bereich μ_2 . Treffen diese beiden Teilstrahlen auf den gleichen Detektor, so registriert dieser die Intensität

$$J = J_0 \frac{1}{2} [e^{-\mu_1 \Delta x} + e^{-\mu_2 \Delta x}] \neq J_0 e^{-\frac{\mu_1 + \mu_2}{2} \Delta x}.$$

Mögliche Folgen sind eine nichtlineare Mittelung über die Schichtdicke, sowie Verfälschung von dünnen Objekten, die schräg durch die Schicht verlaufen (Blutgefäße!).

- **Streustrahlartefakte** wurden bereits diskutiert.
- **Kopplungsartefakte**: zwei getrennte Strukturen laufen ineinander.

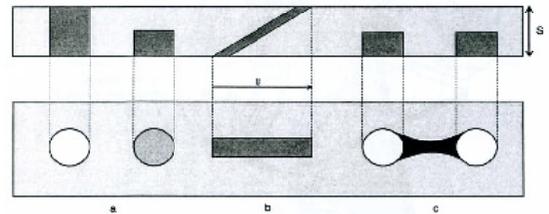


Abbildung 6.60: Artefakte bei der CT.

6.9 Phasenkontrast-Mikrotomographie

6.9.1 Mikrotomographie

Röntgentomographie wird nicht nur im klinischen Bereich verwendet, sondern auch für andere Forschungszwecke. So kann man mit Hilfe von sehr hoch aufgelösten Aufnahmen die Struktur von Knochen, Nerven und anderen Geweben im Detail untersuchen. Wenn man Geräte baut, welche nicht für

Menschen ausgelegt sind, so wird es möglich, sehr hohe Auflösungen zu erreichen. Pionierarbeit für diese Anwendungen hat Prof. Bonse (E1) geleistet.

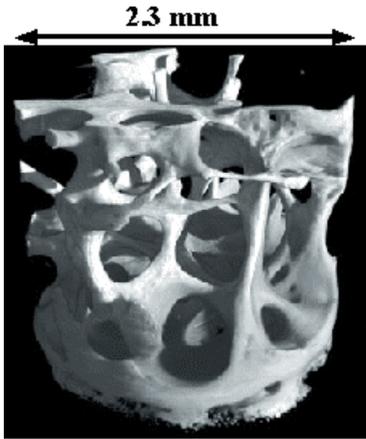


Abbildung 6.61: Knochen eines Osteoporose Patienten.

In der Micro-CT (μ -CT) werden Proben mit einer hohen räumlichen Auflösung in der Größenordnung μm abgebildet. In Abb. 6.61 ist ein Knochen eines Osteoporose Patienten gezeigt. Anhand solcher Aufnahmen werden z.B. die Wirkungen von Medikamenten überprüft.

6.9.2 Phasenkontrast

Bei Röntgenaufnahmen wird normalerweise die Absorption des Gewebes gemessen. Eine Alternative dazu ist die Messung einer Phasenänderung. Dabei wird die Phasenänderung von Röntgenstrahlen in einem Medium mit dem Brechungsindex n , im Vergleich zu der Ausbreitung im Vakuum, ausgenutzt.

Die in der Abbildung 6.62 gezeigte Phasenänderung ist in der Realität etwa 10^6 mal kleiner. Außer der Phasenänderung tritt auch eine Schwächung auf, die den Phasenkontrast beeinträchtigen kann. Der Phasenkontrast erlaubt insbesondere auch, bei Weichteilen einen guten Kontrast zu erzielen, wo die Absorption üblicherweise nur wenig Kontrast ergibt.

Eine Phasenänderung kann nicht direkt nachgewiesen werden: Das Signal eines Röntgendetektors ist proportional zur Intensität und damit unabhängig

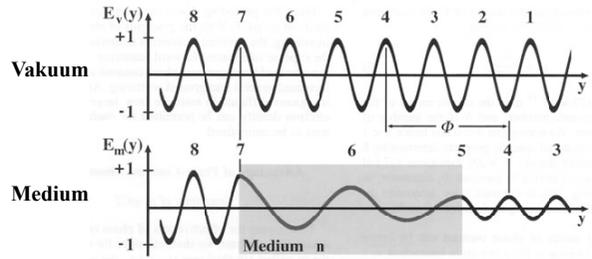


Abbildung 6.62: Phasen- und Amplitudenänderung eines (monochromatischen) Röntgenstrahls beim Durchqueren eines Mediums mit dem Brechungsindex n .

von der Phase. Um die Phase messen zu können, benötigt man eine interferometrische Messmethode - ähnlich wie bei der Holographie.

6.9.3 Röntgen-Interferometrie

Der typische Aufbau ist in der Abbildung 6.63 zu sehen. Für die Messung benötigt man kohärentes Röntgenlicht.

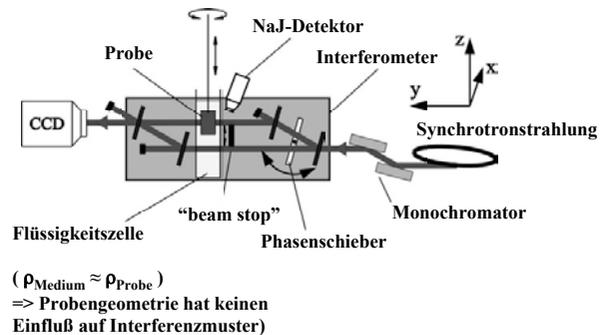


Abbildung 6.63: Röntgen-Interferometer.

Als Quelle dient Synchrotronstrahlung, die durch einen Monochromator schmalbandig gemacht wird. Der Röntgenstrahl wird durch Bragg-Reflexion an einem Kristall in zwei Teilstrahlen aufgeteilt. Der eine Teilstrahl durchstrahlt die Probe, der andere dient als Referenzstrahl. Diese beiden Strahlen werden zur Interferenz gebracht und das Interferenzmuster wird mit dem Detektor aufgenommen.

Wenn man den Referenzstrahl mit dem *beam stop*

ausblendet, dann erhält man das sogenannte *Attenuation Phase Contrast Image*, das dem Vergleich dienen soll.

Die Probe befindet sich in einer Flüssigkeitszelle, deren mittlere Dichte auf die der Probe angepasst ist, um Einflüsse der Probengeometrie auf das Interferenzmuster zu vermeiden. Die Einstellung des Interferometers auf maximale Intensität der interferierenden Strahlen wird mit dem NaI-Detektor durchgeführt.

Bei der *Attenuation- μ -CT* ($A\mu CT$) sind die Projektionen normierte Intensitätsprofile:

$$I_n(x, z) := \frac{I(x, z)}{I_0(x, z)} = e^{-\int dy \mu(x, y, z)},$$

mit $\mu(x, y, z)$ als ortsabhängiger Abschwächungskoeffizient und y die Einfallsrichtung der Röntgenstrahlung.

Bei der $P\mu CT$ werden Phasenverschiebungsprofile $\phi(x, z)$ aufgenommen:

$$\phi(x, z) = \frac{2\pi}{\lambda} \int dy n(x, y, z),$$

hier ist n der ortsabhängige Brechungsindex, der die Probenstruktur widerspiegelt. Die Phasenverschiebungsprofile werden im Rechner aus den Interferenzmustern gewonnen.

6.9.4 Anwendung: Nervengewebe

In der Abbildung 6.64 sind oben Interferenzmuster mit Probe zu sehen, darunter ohne Probe. Aufnahmebedingungen: *Trigeminus Nerv* einer Ratte; Messung bei 12 keV. Die vier unterschiedlichen Aufnahmen entsprechen unterschiedlichen Phasenverschiebungen ϕ , welche durch die Einstellung des Phasenschiebers im Aufbau erzeugt werden. Unten sind die Summen der Projektionen mit einem Phasenunterschied von π zu sehen, die als Test dazu dienen, wie konsistent die Phasenmessung ist. Die übrig gebliebene leichte Modulation kommt durch die Abschwächung des Signals zustande.

In der Abbildung 6.65 wird der Kontrast zweier Bilder, gewonnen mit $A\mu CT$ und $P\mu CT$, verglichen.

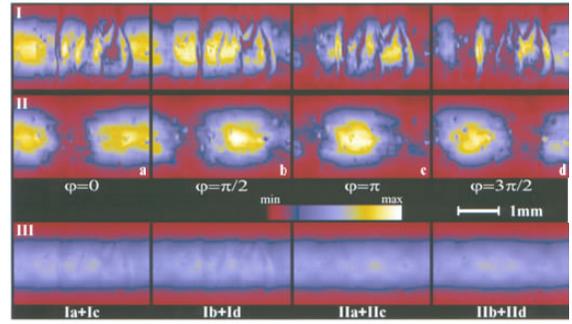


Abbildung 6.64: Interferenzmuster. Oben mit Probe, in der Mitte ohne Probe und unten ist die Summe der Projektionen mit einer Phasenverschiebung um π zu sehen.

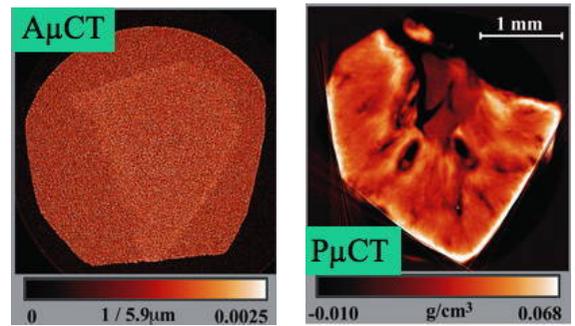


Abbildung 6.65: Kontrastvergleich $A\mu CT$ und $P\mu CT$.

Bei der $P\mu CT$ kann man quantitative Strukturmessungen durchführen. Es kann die Elektronendichte und die Massendichte bestimmt werden.

Abbildung 6.66 vergleicht das Tomogramm des Trigeminus-Nervs einer Ratte mit einem histologischen Schnitt. Der Übergang vom Nervengewebe (gelb) zum Gehirn (blau) ist in der $P\mu CT$ -Aufnahme deutlich zu erkennen.

6.9.5 Vergleich Phasenkontrast - Amplitudenkontrast

Eine mögliche Basis für den Vergleich der beiden Techniken ist die Bestimmung der Gewebedicke, welche notwendig ist, um das maximale Signal um 1% abzuschwächen. Diese ist bei einer Phasenkon-

Histologischer Schnitt Tomogramm (12 keV)

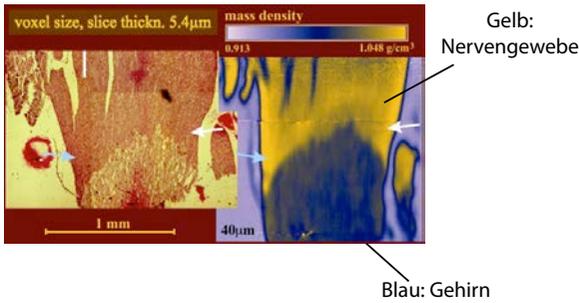


Abbildung 6.66: Vergleich zwischen einem histologischen Schnitt und einer PμCT-Aufnahme.

trastmessung deutlich kleiner als bei einer Amplitudenkontrastmessung (Abbildung 6.67: Messung in Wasser).

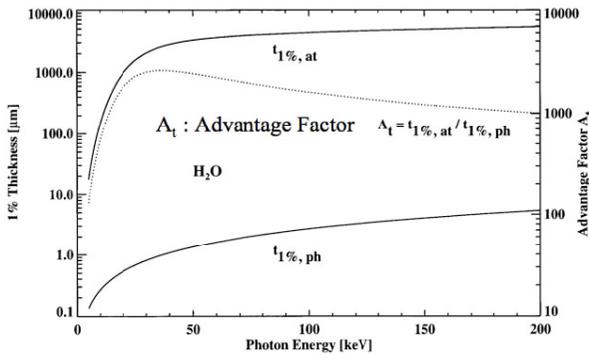


Abbildung 6.67: Vergleich der 1%-Schichtdicken bei AμCT und PμCT.

Der Phasenkontrast hat andere Abhängigkeiten als der Amplitudenkontrast: Der Schwächungskoeffizient ist

$$\mu \propto Z \left(\frac{Z}{E} \right)^m \rho(x, y, z),$$

mit $m \approx 2.5 \dots 3.5$. Der entsprechende Koeffizient für die Amplitudenmessungen ist

$$P \propto \frac{Z}{E} N.$$

Wie in Abb. 6.67 gezeigt, ist die Empfindlichkeit im Falle der Phasenkontrasttomographie um mehr als drei Größenordnungen höher als bei Amplitudenmessungen. Aufgrund der wesentlich geringeren

Abhängigkeit von der Ordnungszahl (linear statt ca. 4te Potenz) ist die Phasentomographie vor allem für leichte Elemente (also Weichteile) sehr attraktiv.

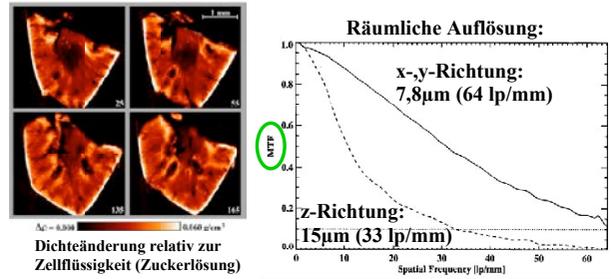


Abbildung 6.68: Zur Sensitivität (links) und Auflösung (rechts) von PμCT.

In der Abbildung 6.68 links sind 4 Schichten an unterschiedlichen Positionen (Zahlen in μm) gezeigt. Die Farbskala gibt den Dichteunterschied $\Delta\rho$ gegenüber der Dichte der Zellflüssigkeit (Zuckerlösung) an. Man erkennt die hohe Sensitivität gegenüber relativen Dichteschwankungen von der Größenordnung 10^{-3} .

Rechts in der Abbildung ist die Modulationsübertragungsfunktion (MTF) entlang der Drehachse (z-Richtung) und senkrecht dazu gemessen worden. Man sieht, dass die räumliche Auflösung in x- und y-Richtung mit 64 lp/mm ($7.8 \mu\text{m}$) besser ist als in z-Richtung 33 lp/mm bzw. $15 \mu\text{m}$.