

1 Röntgen

1.1 Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlen wurden 1895 von Wilhelm Conrad Röntgen entdeckt. Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen (wie Licht), die in einem Wellenlängenbereich von ca. 10^{-8} m bis 10^{-12} m liegen (zwischen UV und Gamma-Strahlung). 1901 wurde Röntgen der erste Nobelpreis für Physik verliehen. Elektromagnetische Wellen verhalten sich immer auch wie Teilchen (sogenannte Photonen).

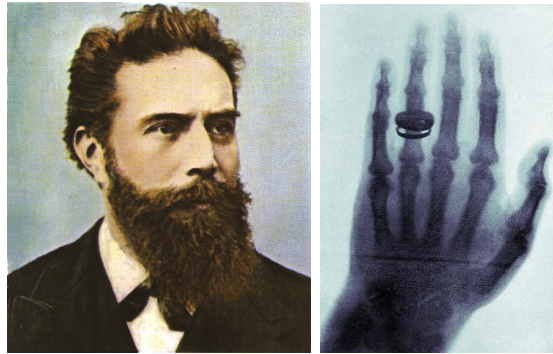


Abbildung 1: Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923); Bertha Röntgens Hand (1896).

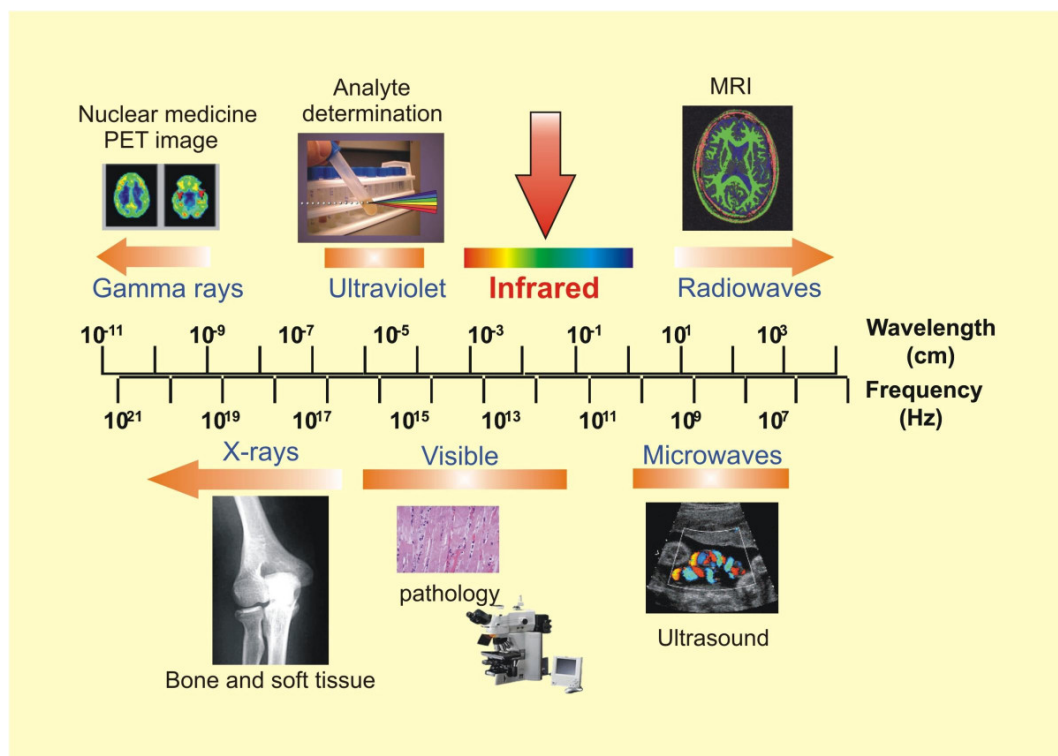


Abbildung 2: Röntgenstrahlen sind energiereiche elektromagnetische Strahlen. Die Energie der Strahlung ist proportional zur Frequenz der elektromagnetischen Strahlung.

Eigenschaften von Röntgenstrahlen

1. Röntgenstrahlen sind unsichtbar für das menschliche Auge;
2. Röntgenstrahlung kann Materie durchdringen;

3. Röntgenstrahlung wird von Materie absorbiert;
 4. Röntgenstrahlung ionisiert Stoffe (Luft und Gase und feste Stoffe);
 5. Röntgenstrahlung kann menschliche Zellen beschädigen;
 6. Röntgenstrahlen sind weder durch elektrische noch magnetische Felder ablenkbar;
- Diese Eigenschaften ermöglichen radiologische Diagnostik sowie Strahlentherapie bei Krebs.

Die Röntgenstrahlung wird anhand ihrer Energie¹ eingeteilt in:

- Weiche Strahlung ($< 100\text{keV}$)
- Harte Strahlung ($100\text{keV} - 1\text{MeV}$)
- Ultraharte Strahlung ($> 1\text{MeV}$)

1.2 Erzeugung von Röntgenstrahlung

1.2.1 Röntgenröhre

Eine Röntgenröhre besteht aus einer Hochvakuumröhre, in der sich eine beheizbare Kathode und eine Anode befinden. In einem glühenden Draht (Glühkathode K) bewegen sich die Elektronen so schnell, dass sie diesen verlassen können (thermische Elektronenemission). Die so erzeugten freien Elektronen werden mit Hilfe einer Hochspannung U_a (z.B. 100 kV) in einem starken elektrischen Feld beschleunigt und prallen auf eine Anode A aus Metall, meistens Wolfram. Dabei werden sie abgebremst und erzeugen Röntgenstrahlen (Bremsstrahlung und sogenannte charakteristische Röntgenstrahlung).

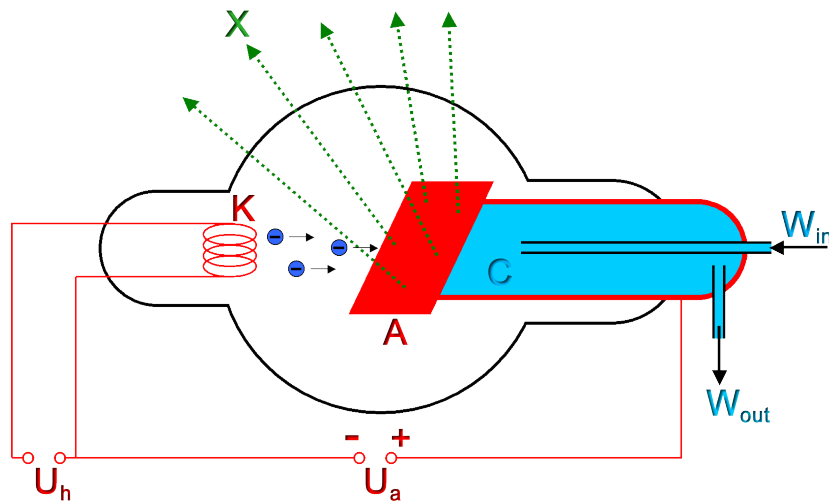


Abbildung 3: Aufbau einer Röntgenröhre: X=Röntgenstrahlung, K=Kathode, A=Anode, C=Wasserkühler, U_h =Kathodenheizspannung, U_a =Anodenspannung.

Röhrenspannung U_a und Anodenmaterial bestimmen Qualität der Strahlung. Die Heizspannung U_h bestimmt die Dosisleistung. Kriterien für das Anodenmaterial sind: hohe Ordnungszahl Z , hohe Schmelztemperatur und hohe Wärmeleitfähigkeit.

Insgesamt wird aber nur ca. 1% der Elektronenenergie in verfügbare Röntgenstrahlungsenergie verwandelt. Das hängt damit zusammen, dass die Elektronen zum Teil auch niederenergetische Strahlung erzeugen oder die Metallatome durch Stöße nur zu Schwingungen anregen. Letzteres äußert sich in einer starken Temperaturerhöhung der Anode, falls diese nicht aufwendig gekühlt wird. Teilweise

¹Das Elektronenvolt (eV) ist eine Einheit der Energie, die in der Atomphysik häufig benutzt wird. 1 eV ist die Energie, die ein Elektron bei der Beschleunigung durch die Spannung 1 V gewinnt: $1\text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$.

wird die erzeugte Röntgenstrahlung auch direkt im Metall wieder absorbiert und steht damit für die Anwendung nicht zur Verfügung.

Aufgabe: Erzeugung von Röntgenstrahlung

Beschreiben Sie anhand einer Skizze den prinzipiellen Aufbau einer Röntgenröhre.



1.2.2 Röntgenspektrum

Das Röntgenspektrum besteht aus zwei Anteilen:

1. Einem kontinuierlichen Spektrum (wird als Bremspektrum bezeichnet), dessen maximale Photonenenergie von der Beschleunigungsspannung U_a der Röntgenröhre abhängt.
2. Einem Linienspektrum, das als charakteristische Röntgenstrahlung bezeichnet wird. Die Energie der Linien ist typisch für die verwendete Anode der Röntgenröhre, daher der Name charakteristische Strahlung.

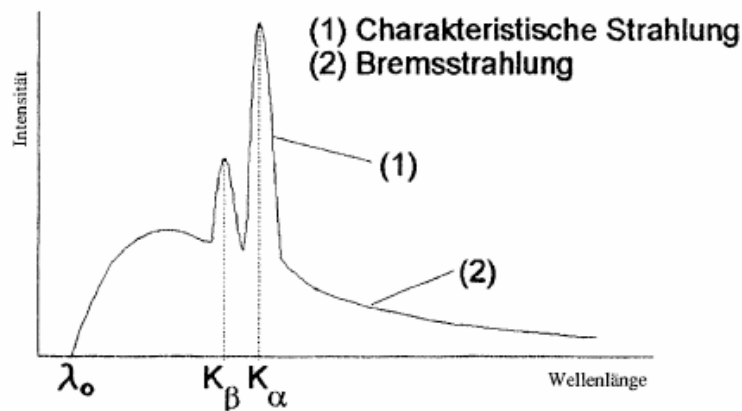


Abbildung 4: Röntgenspektrum: Aufgetragen ist die Intensität gegen die Energie der Röntgenstrahlung. Dem kontinuierlichen Bremsstrahlungsspektrum sind zwei Spitzen überlagert. Deren Energie hängt nur vom verwendeten Anodenmaterial ab. Das Bremsstrahlungsspektrum wird dagegen stark von der verwendeten Beschleunigungsspannung U_a beeinflusst.

Bremsstrahlung

Die Röntgenbremsstrahlung entsteht durch die Abbremsung der Elektronen beim Durchlaufen des Metalls der Anode. Wird eine elektrische Ladung beschleunigt, d.h. ändert sich ihr Geschwindigkeitsbetrag bzw. ihre Bewegungsrichtung, so entsteht elektromagnetische Strahlung. Die Energie der dabei auftretenden Photonen ist umso höher, je stärker die Beschleunigung ist. Es gibt allerdings eine minimale Wellenlänge λ_0 , bei der die Bremsstrahlung abbricht:

$$\lambda_0 = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_a}$$

mit c : Lichtgeschwindigkeit, h : Planck'sche Konstante und e die Elementarladung.

Aufgabe: Röntgenstrahlen

An einer Röntgenröhre liegt eine Beschleunigungsspannung von $U_a = 100 \text{ kV}$. Beschreiben Sie das beim Auftreffen der Elektronen auf die Anode entstehende Röntgenbremspektrum und berechnen Sie die zugehörige Grenzwellenlänge λ_0 .



Charakteristische Strahlung

Zusätzlich zum Bremsspektrum findet man diskrete Linien im Spektrum, die charakteristisch für das benutzte Anodenmaterial sind. Die charakteristische Röntgenstrahlung entsteht, wenn beschleunigte Elektronen auf Materie treffen. Hierbei werden Elektronen aus kernnahen (inneren) Schalen in weiter aussen liegende Schalen angehoben. Darauf hin fallen Elektronen von weiter aussen liegenden Schalen in die entstanden Löcher und strahlen die charakteristische Röntgenstrahlung in Form von elektromagnetischen Wellen mit ganz charakteristischer Wellenlänge (Linienspektrum) aus.

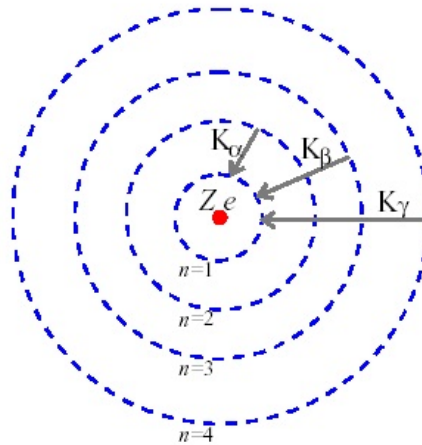


Abbildung 5: Entstehung der charakteristischen Röntgenstrahlung der K-Schale

1.3 Absorption von Röntgenstrahlung

Wenn Strahlung Materie durchdringt wird ihre Intensität geschwächt. Diese Schwächung ist Energie- und stoffabhängig. Verringert wird die Intensität durch Streuung oder, was den Hauptteil ausmacht, durch Absorption.

Betrachtet man einen parallelen monochromatischen Röntgenstrahl, der durch ein Material mit homogener Zusammensetzung durchläuft, so gilt folgende Absorptionsgesetz (Lambert-Beer). Die Lichtintensität nimmt exponentiell ab:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot x}$$

Dabei ist die Intensität $I(x)$ abhängig von der Eingangsintensität I_0 , von dem Absorptionskoeffizient (auch Schwächungskoeffizient genannt) μ der die Intensitätsabnahme pro Längeneinheit beschreibt, und von der bereits durchlaufenden Länge x . Der Absorptionskoeffizient (Einheit: $[\mu] = m^{-1}$) ist abhängig vom Material und von der Photonenenergie. Die eulersche Zahl e ist die Basis des natürlichen Logarithmus und der (natürlichen) Exponentialfunktion.

Die Schichtdicke einer homogenen Schicht, nach der die Intensität der Röntgenstrahlung auf die Hälfte des Anfangswertes absinkt ist, heisst Halbwertsdicke $d_{1/2}$ und ist definiert durch

$$d_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\mu}$$

Jede zusätzliche Halbwertsdicke halbiert die Intensität weiter.

Aufgabe: Absorptionskoeffizient

Wie gross ist der Absorptionskoeffizient eines Stoffes, wenn die Intensität nach 1 cm Schichtdicke auf $1/e = 0.37$ abgenommen hat?



Aufgabe: Absorption von Röntgenstrahlung in Knochen

Mit einer Röntgenröhre und einem Detektor (Ionisationskammer vgl. 1.7.1) soll die Schwächung von Röntgenstrahlung in Knochen untersucht werden. Aus dem Röntgenspektrum wird mit Hilfe eines Filters näherungsweise monochromatische Röntgenstrahlung erzeugt. Man misst in Abhängigkeit von der Schichtdicke d der Knochen folgende Strömestärke I , die der Strahlungsintensität proportional ist:



| | | | | | | | | | | |
|----------|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|
| d (mm) | 0 | 1.0 | 2.0 | 3.0 | 4.0 | 5.0 | 7.0 | 9.0 | 15 | 20 |
| I (mA) | 50 | 46 | 41 | 38 | 34 | 31 | 26 | 22 | 12 | 8 |

1. Stellen Sie den Strömestärke I in Abhängigkeit von der Dicke d in einem Diagramm graphisch dar.
2. Bestimmen Sie die Halbwertsdicke $d_{1/2}$ durch Eintragung entsprechender Hilfslinien in das Diagramm der Teilaufgabe 1).
3. Berechnen Sie mit dem Ergebnis der Teilaufgabe 2 den Strom in der Ionisationskammer, der hinter einer Schicht der Dicke $d = 30$ mm zu erwarten ist.
4. Stellen Sie den Logarithmus der Ionisationsstrom I in Abhängigkeit von der Dicke d in einem Diagramm graphisch dar. Was ergibt sich? Wie lautet die Geradengleichung? Bestimmen Sie den Absorptionskoeffizient.

1.3.1 Wovon hängt die Schwächung ab?

Die Schwächung von Röntgenstrahlen in Materie steigt mit der Röntgenwellenlänge (oder sinkt mit der Energie der Photonen), mit der Ordnungszahl Z des Materials, mit der Dichte des Materials und mit der Dicke des Materials.

| Wellenlänge | Ordnungszahl | Dichte (spez. Gew.) | Dicke |
|---|---|-----------------------------------|----------------------------------|
| | | | |
| | | | |
| Schwächung steigt proportional mit der 3. Potenz der Wellenlänge. | Schwächung steigt mit der 3. Potenz der Ordnungszahl. | Schwächung steigt mit der Dichte. | Schwächung steigt mit der Dicke. |

Abbildung 6: Schematisches Modell der Schwächungsfaktoren.

Je kleiner der Parameter $d_{1/2}$ ist, desto schneller nimmt die Intensität mit der zurückgelegten Wegstrecke ab, desto grösser ist also auch die Schwächung. $d_{1/2}$ ist also ein Mass für die Strahlschwächung.

| Energie in keV | Halbwertsdicke $d_{1/2}$ in mm | | | | |
|----------------|--------------------------------|------------------|------|------|------|
| | Luft | H ₂ O | Al | Cu | Pb |
| 1240 | 85.000 | 110 | 47 | 15 | 10,4 |
| 620 | 60.000 | 78 | 33 | 11 | 4,8 |
| 250 | 48.000 | 55 | 23 | 6,2 | 1,1 |
| 125 | 38.000 | 44 | 17 | 2,6 | 0,28 |
| 40 | 22.000 | 26 | 4,5 | 0,17 | 0,05 |
| 25 | 10.000 | 13 | 1,3 | 0,04 | 0,01 |
| 15 | 3.400 | 4,3 | 0,35 | 0,01 | - |
| 12 | 1.800 | 2,4 | 0,18 | - | - |
| 8 | 600 | 0,7 | 0,06 | - | - |

Abbildung 7: Halbwertsdicken verschiedener Materialien in Abhängigkeit von der Energie der Röntgenstrahlung.

Blei hat eine besonders kleine Halbwertsdicke für Röntgenstrahlung. Daher werden bei Röntgenuntersuchungen Bleischürzen umgehängt, um andere Körperregionen als die zu untersuchende vor Strahlung zu schützen.

Je grösser die Energie der Photonen, desto geringer die Schwächung des Strahls (kleine Halbwertsdicke). Deshalb werden in der CT die Anteile des Röntgenspektrums mit kleiner Energie durch geeignete Absorber herausgefiltert, da diese den Detektor praktisch nicht erreichen und damit nur zur Strahlenbelastung des Körpers beitragen.

Je dichter die durchstrahlten Substanz, desto kleiner die Halbwertsdicke bei gleicher Energie. Dies liefert gerade den Kontrast zwischen unterschiedlichen Organen: Dichteres Gewebe schwächt den Röntgenstrahl stärker und lässt somit weniger Photonen passieren als dünneres Gewebe.

Aufgabe: Röntgenaufnahme

Warum sind auf einer herkömmlichen Röntgenaufnahme helle und dunkle Bereiche zu sehen?

Aufgabe: eine Bleischürze als Strahlenschutz

Ein Patient soll mit Hilfe einer Bleischürze vor unnötiger Röntgenstrahlung geschützt werden. Dazu wird ihm eine Bleischürze umgelegt, die die Röntgenstrahlung bei der verwendeten Energie nach 1.1 mm auf die Hälfte reduziert.

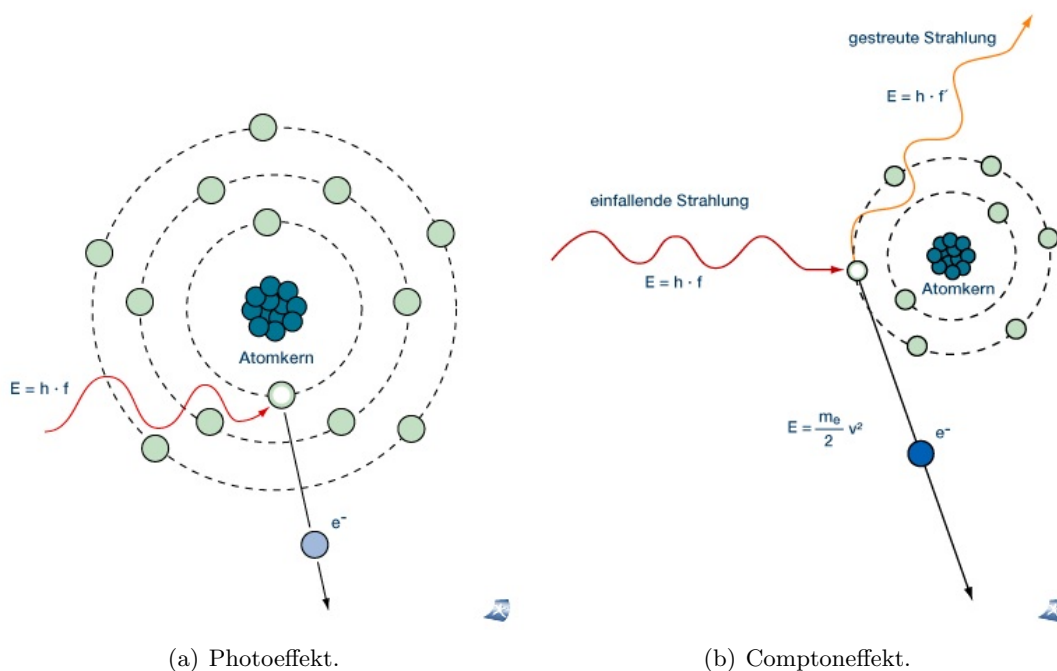
1. Wie gross ist die Energie der verwendeten Röntgenstrahlung?
2. Welche Dicke muss die Bleischicht haben, um die Röntgenintensität auf $1/64$ des ursprünglichen Werts zu reduzieren? Begründen Sie Ihr Ergebnis.
3. Wie dick muss die Bleischicht sein, so dass die Röntgenintensität auf weniger als 1 Promille abgeschwächt wird?

1.3.2 Wechselwirkung von Photonen mit Materie

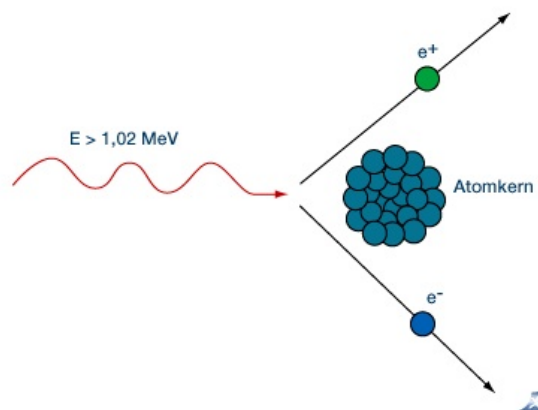
Was geschieht mit der Röntgenstrahlung im Körper? Für die Schwächung von Röntgenstrahlung im menschlichen Körper gibt es drei wichtige Mechanismen: Photoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung.

Photoeffekt Ein Photon stösst ein Elektron aus einer inneren Schale des Absorberatoms heraus und wird dabei absorbiert. Bis auf die Bindungsenergie erhält das Elektron die gesamte Photonenenergie als kinetische Energie.

Comptoneffekt Ein Photon wird an einem äusseren, schwach gebundenen (quasi freien) Elektron des Absorbers unter Energieverlust gestreut (unelastische Streuung). Ein Teil der Energie des Photons wird auf das Elektron übertragen, das die Atomhülle verlässt. Das gestreute Photon hat eine kleinere Energie und eine andere Bewegungsrichtung als das einfallende Photon.



Paarbildung Bei Photonenenergien von mehr als 1.022 MeV kann sich ein Photon im elektrischen Feld eines Atomkerns in ein Elektron-Positronpaar umwandeln.



Alle vorher erwähnten Effekte führen insgesamt zu einer Schwächung bzw. einer Absorption der ionisierenden elektromagnetischen Strahlung durch Materie. Diese Schwächung hängt stark von der Kernladungszahl Z des Materials ab, aber auch von der Energie der Röntgenstrahlung. Ein Maß für die Schwächung ist der Absorptionskoeffizient μ . Im Abb. 8 sind im Falle von Blei die Beiträge von Fotoeffekt, Comptoneffekt und Paarbildung in Abhängigkeit der Photonenenergie aufgetragen.

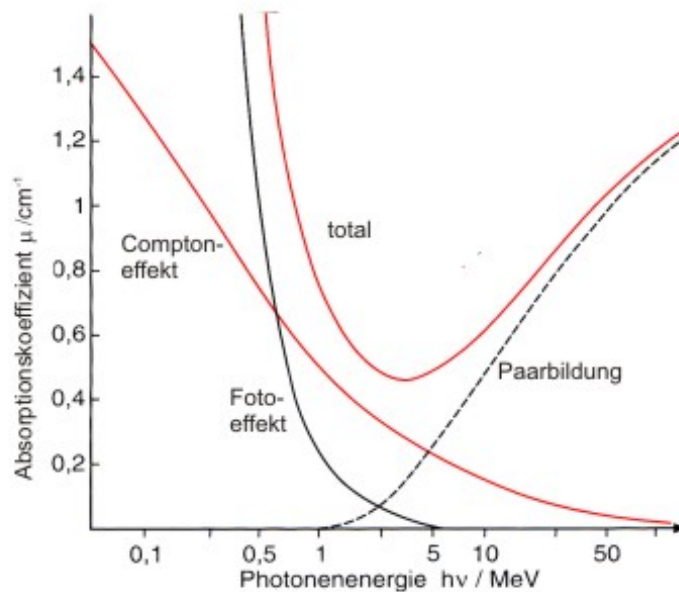


Abbildung 8: Anteile der Wechselwirkungsprozesse an der Energieabhängigkeit des Absorptionskoeffizienten.

Für Energien unter 1000 kV sind nur der Photoeffekt und der Comptoneffekt relevant, was für die meisten industriellen Computertomographen der Fall ist. Die Paarbildung spielt für die CT daher keine Rolle.

Bei allen drei Wechselwirkungsprozessen entstehen freie Elektronen, die so genannten Sekundärelektronen. Diese Tatsache ist die Grundlage der meisten dosimetrischen Verfahren.

1.4 Das klassische Röntgebild

Trotz neuer moderner Untersuchungen (Bsp. CT, MRT) hat das konventionelle Röntgen immer noch einen festen Stellenwert in der Radiologie. Grosse Vorteile dieser Untersuchungstechnik sind: geringe Strahlenexposition, kurze Dauer der Untersuchung, günstig.

Eigenschaften von Röntgenbilder

- Objekte, die viel Strahlung absorbieren, sind gut zu erkennen (Knochen, Metallteile);
- Röntgen hat die höchste Auflösung (sehr kleine Strukturen sind zu erkennen);
- Alle Organe und Objekte werden übereinander projiziert (verdeckte Weichteile sind nicht zu erkennen);
- Eventuelles Problem: Strahlenbelastung;

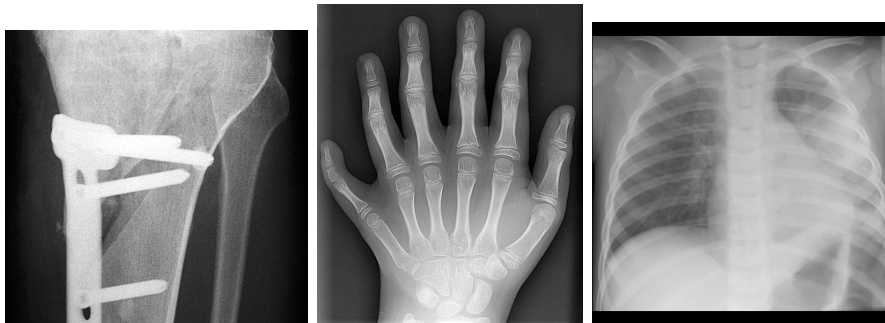


Abbildung 9: Beispiele von Röntgenbilder.

1.5 Röntgencomputertomographie

Die Computertomographie (CT oder CT-Scan abgekürzt) ist ein spezielles Röntgenverfahren, das dreidimensionale (3D) Rekonstruktionen verschiedener Körperregionen in digitaler Form liefert. 1972 entwickelten der amerikanische Physiker A.M. Cormack und der britische Ingenieur G.N. Hounsfield das Verfahren. Dafür erhielten sie im Jahr 1979 den Nobelpreis für Medizin. Die Methode wurde innerhalb weniger Jahre zu einem der wertvollsten diagnostischen Verfahren der Radiologie. Beim herkömmli-



Abbildung 10: Die CT-Aufnahme zeigt einen Querschnitt durch den Brustbereich. Sogar Details der Lungenstruktur sind noch zu erkennen.

chen Röntgenverfahren wird das abzubildende Objekt von einer Röntgenquelle durchleuchtet und auf einem Röntgenfilm abgebildet (bildgebendes Verfahren). Es entsteht eine Projektion des Volumens auf eine Fläche. Bei dieser Projektion gehen Informationen, welche die dritte Dimension (Dicke) des

durchleuchteten Körpers betreffen, weitgehend verloren. Grund hierfür ist, dass im Nachhinein nicht mehr unterschieden werden kann, ob die im Röntgenbild sichtbare Schwächung (helle Bereiche im Bild) durch ein Material höherer Absorption oder durch eine grössere Schichtdicke hervorgerufen wurde.

Die Computertomographie umgeht dieses Problem, indem sie viele Röntgenbilder des Objekts aus den unterschiedlichsten Richtungen erstellt und nachträglich aus diesen Abbildungen die nicht erfasste Volumenstruktur rekonstruiert (sog. Rekonstruktion oder Rückprojektion).

1.5.1 Wie funktioniert die CT?

Das Gerät erzeugt einen schmalen Röntgenstrahl. Dieser durchdringt die gewünschte Körperstelle und wird innerhalb des Körpers durch die verschiedenen Strukturen (z.B. Haut, Fett, Muskeln, Organe, Knochen) unterschiedlich stark abgeschwächt. Genau gegenüber der Röntgenröhre befindet sich ein Sensor (Detektor), der das abgeschwächte Signal empfängt, elektronisch aufbereitet und an einen Computer zur Auswertung weiterleitet.

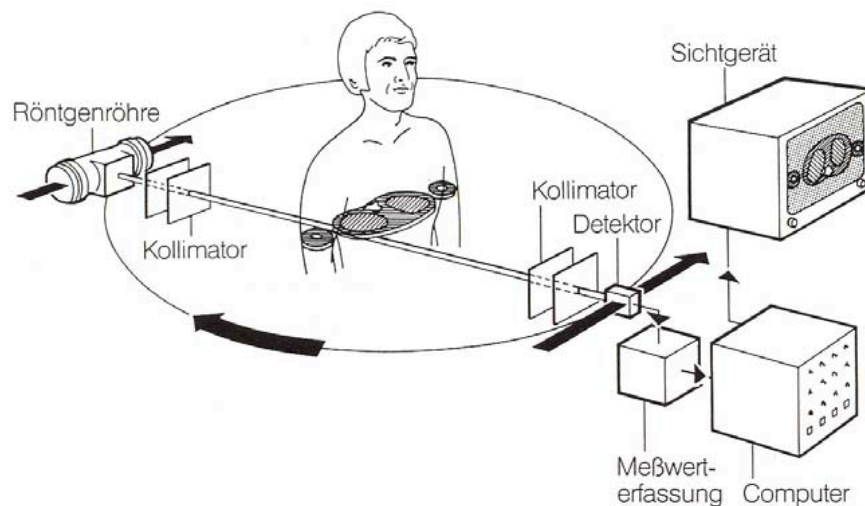


Abbildung 11: Schematische Darstellung der Computertomographie.

Dieser Vorgang wiederholt sich immer wieder aus verschiedenen Richtungen. So werden verschiedene Ansichten (Projektionen) erzeugt und im Computer zu einem Graustufenbild umgerechnet. Diese 2D-Projektionen werden dann in eine 3D-Rekonstruktion rückprojiziert, die die originale Struktur abbildet. Die CT-Aufnahme birgt mehr Informationen in sich als ein normales Röntgenbild. Der grosse Vorteil der CT-Aufnahme liegt darin, dass die Daten digital in 3D vorliegen und Schichtbilder daher in beliebig wählbaren Raumrichtungen erzeugt und angeschaut werden können. Darüberhinaus können dadurch interne Körperstrukturen wie beispielsweise Knochen quantitativ in 3D mit dem Computer ausgewertet werden, was mit herkömmlichen 2D-Röntgenfilmen unmöglich ist.

Aufgabe: CT-Aufnahmen

Erläutern Sie anhand einer Skizze das Prinzip der Messwertaufnahme in der Röntgen-Computertomographie. Was ist der wesentliche Unterschied zur Aufnahmetechnik für ein konventionelles Röntgenbild?



1.5.2 CT Rückprojektion

Um aus den Messdaten ein Querschnittsbild zu gewinnen wird häufig das Verfahren der Rückprojektion verwendet. Dabei wird die Intensität der registrierten Röntgenstrahlung mit Hilfe des Computers gleichmässig auf alle Bildelemente (Pixel) verteilt. Die Beiträge der Durchstrahlung aus verschiedenen Richtungen werden anschliessend pixelweise addiert. Je stärker ein Körperelement Röntgenstrahlung

absorbiert, desto kleiner ist diese Summe. Im Bild werden die entsprechenden Pixel je nach Summe unterschiedlich hell dargestellt (Graukodierung).

Rückprojektion: Beispiel

Bei der Computertomographie wird die untersuchte Körperschicht in ein regelmässiges Gitternetz eingeteilt, um einen Punkt wie auf einem Schachbrett festzulegen. Die gemessenen Projektionswerte werden gleichmässig in die Kästchen des Gitternetzes verteilt. Aber wie kann man dann wissen, wo ein Tumor liegt?

Der Röntgenstrahl durchdringt den Körper und wird am Ende detektiert. Der einzige Punkt, der Strahlung absorbiert, ist der Schwarze (Tumor). Geht der Strahl durch den Tumor misst der Detektor den Projektionswert 1, ansonsten 0.

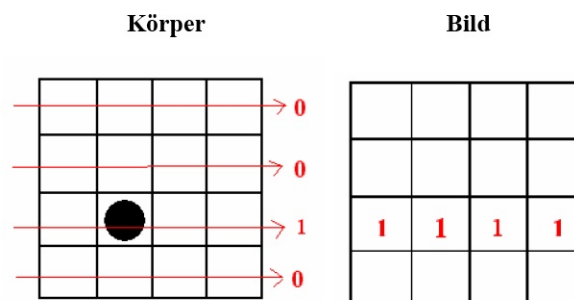


Abbildung 12: Wir zeichnen horizontale Strahlen in den Körper ein und notieren jeweils rechts daneben den Projektionswert. Wir projizieren dann die Messwerte in die Bildebene zurück. Was fällt auf?

Die Messwerte sind alle gleichmässig verteilt, so dass keine Lokalisierung des Tumors möglich ist.

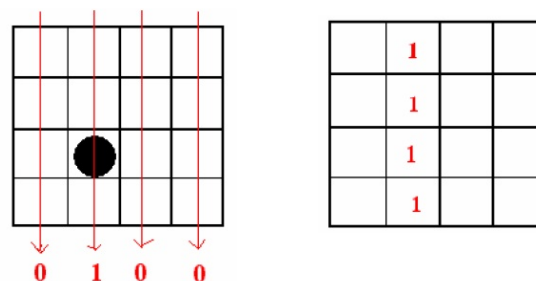


Abbildung 13: Die Messvorrichtung wird um 90° gedreht, so dass die Strahlen den Körper nun vertikal durchdringen.

Wir addieren nun die Rückprojektionswerte in dem Gitternetz und ordne jeder Zahl eine Graustufe zu (in der Medizin werden helle Grautöne für starke Absorption genutzt (hier dunkle)). Was stellen wir fest? Der Tumor ist eindeutig lokalisiert!

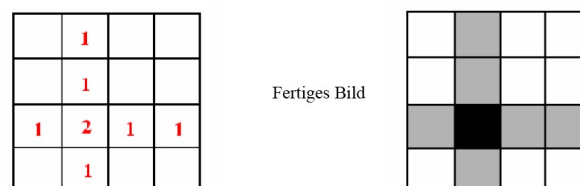
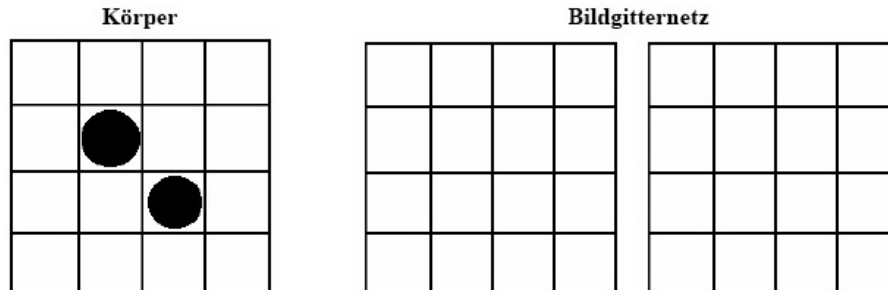


Abbildung 14: Der Tumor ist eindeutig lokalisiert!

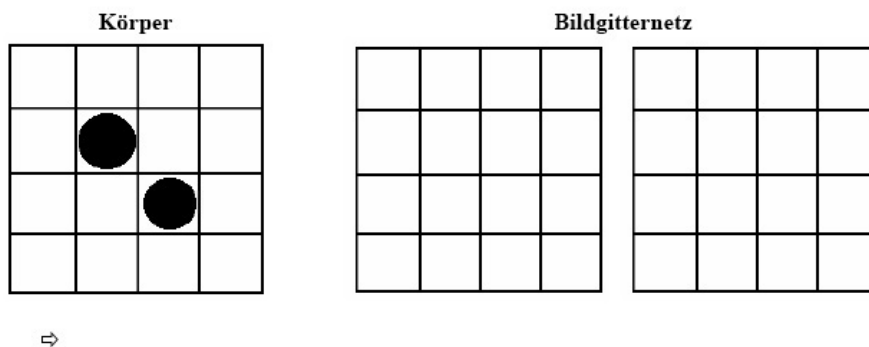
Aufgabe: Rückprojektion mit zwei Absorptionsstellen

Im Körper sind jetzt zwei Tumore (Schwächung 1) zu sehen. Tragen Sie wieder wie im letzten Beispiel die vertikalen und horizontalen Strahlen mit den zugehörigen Projektionswerten ein. Projizieren Sie die Werte im Bildgitternetz zurück, addieren Sie sie und färben Sie sie wieder grau.



Was fällt auf?

Aus diesem Grund lässt man noch eine weitere Projektionsrichtung aus 45° zu. Verfahren Sie wieder wie oben. Wie sieht dann das CT-Bild aus?



Da der menschliche Körper aber nicht nur aus zwei Schwächungszentren, sondern aus viel mehr besteht, benötigt man eine grosse Anzahl an Projektionen aus verschiedenen Winkeln. Die Verwaschungen neben den Tumorpixeln lassen sich rechnerisch entfernen.

1.5.3 Weiterentwicklungen der CT

Um die Aufnahmedauer zu verkürzen, kamen nach kurzer Zeit Geräte auf den Markt, die mit einem aufgefächerten Röntgenstrahl und mehreren Detektoren arbeiteten.

Die Spiral-Computer-Tomographie ist eine Weiterentwicklung der Computer-Tomographie (vgl. Abb. 16). Hier dreht sich die Röntgenröhre spiralförmig und kontinuierlich um den Patienten herum, wobei grössere Körperabschnitte fortlaufend dargestellt und zu einer 3D-Rekonstruktion rückprojiziert werden können. So erhält man ein genaueres Bild der Strukturen im Inneren des menschlichen Körpers.

1.6 Hounsfield-Skala

Die Hounsfield-Skala wird in der Computertomographie (CT) benutzt, um die ortsabhängige Abschwächung der Röntgenstrahlung durch Absorption im Gewebe zu beschreiben und als Graustufenbild darzustellen. Sie ermöglicht es, die Schwächung der Röntgenstrahlung bestimmten Geweben zuzuordnen und darüber pathologische Abweichungen von gesundem Gewebe feststellen zu können.

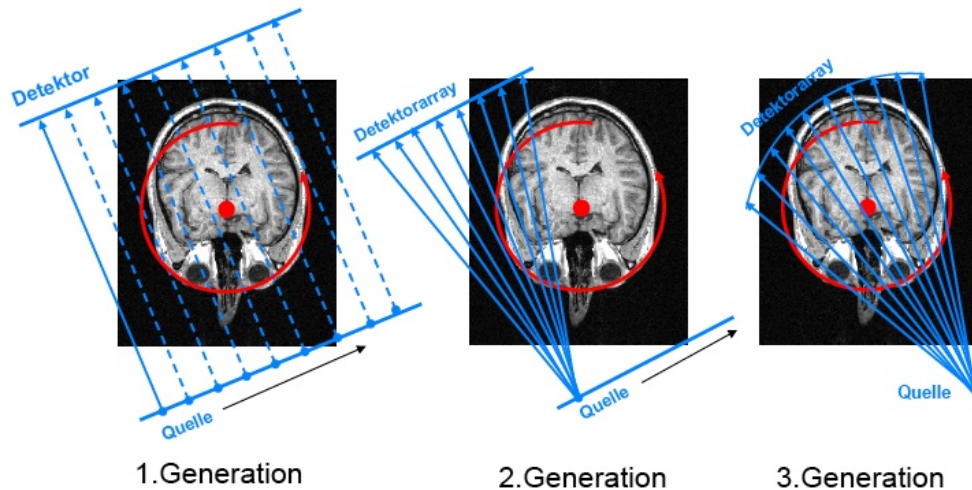


Abbildung 15: Technische Weiterentwicklungen der ersten Tomographen. Vorteile der Geräte 3. Generation: keine Translation notwendig.

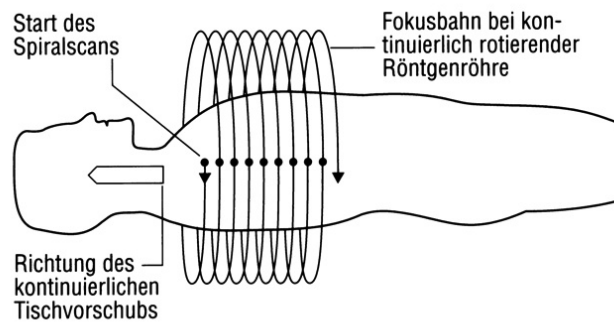


Abbildung 16: Prinzip der Spiral-CT.

Mit dem Schwächungskoeffizienten des betrachteten Gewebes μ_{Gewebe} und von Wasser μ_{Wasser} wird die CT-Zahl in Hounsfield-Einheiten (HU) definiert als:

$$\text{CT-Zahl} = \frac{\mu_{\text{Gewebe}} - \mu_{\text{Wasser}}}{\mu_{\text{Wasser}}} \cdot 1000 \text{ HU}$$

Die Hounsfield-Skala gibt den relativen Absorptionsunterschied der jeweiligen Substanz im Vergleich zu Wasser in Promille an (vgl. Abbildung 17). Ein Wert von -1000 HU entspricht der Absorptionsstärke von Luft (genauer: des Vakuums) und 0 HU der Absorptionsstärke von Wasser. Nach oben ist diese Skala offen. Das Absorptionsvermögen von dichten Knochen liegt bei ca. 3000 HU. Die Definition der Hounsfield-Skala trägt der Tatsache Rechnung, dass moderne Tomographen Absorptionsunterschiede im Promillebereich messen können. Dies entspricht somit einem Auflösungsvermögen von ca. 1 HU.

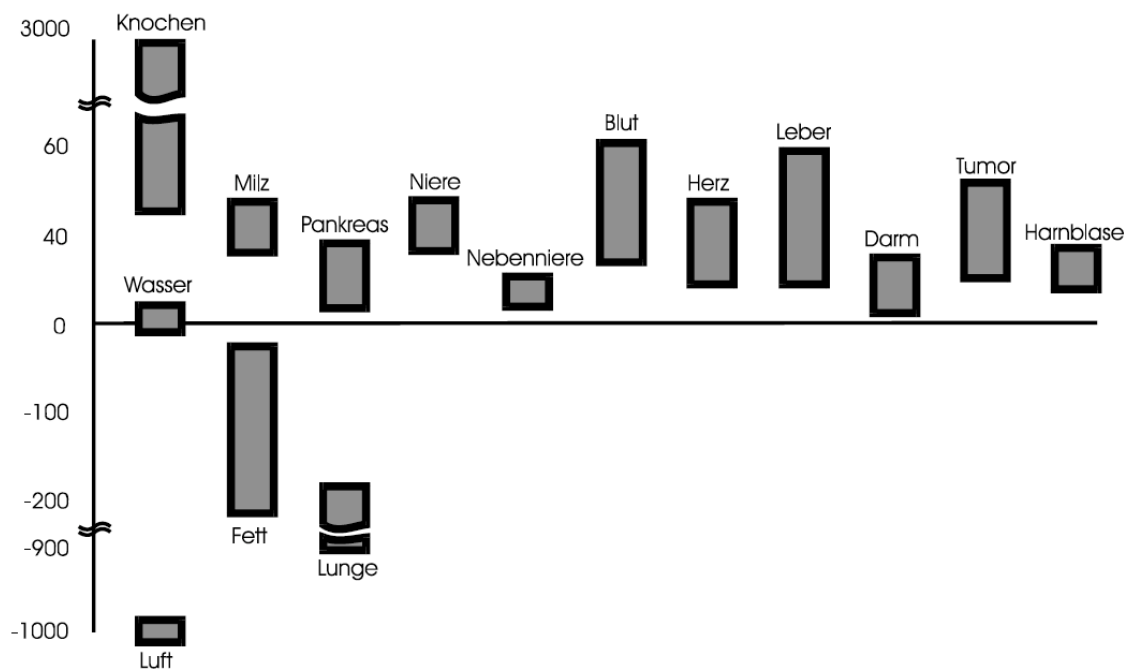


Abbildung 17: Schwächungswerte von Gewebe in Hounsfield-Einheiten (HU).

1.7 Detektoren

Wie wird denn nun die Intensität der Strahlung gemessen, wie funktioniert also der Detektor im Röntgen-Computertomographen?

1.7.1 Ionisationskammer

Die eindringenden Röntgenquanten ionisieren die Xenon- Atome. Die freigesetzten Elektronen wandern aufgrund ihrer negativen Ladung zur (positiven) Anode, die positiv geladenen Xenon-Atomrümpfe (ihnen fehlt ja ein Elektron!) zur (negativen) Kathode. Beim Anlegen einer Spannung fließt somit ein Strom im Stromkreis, der umso grösser ist, je mehr Photonen einfallen, d.h. je grösser die Röntgenintensität ist. Dieser Detektor erfüllt somit alle Anforderungen für die Intensitätsmessungen.

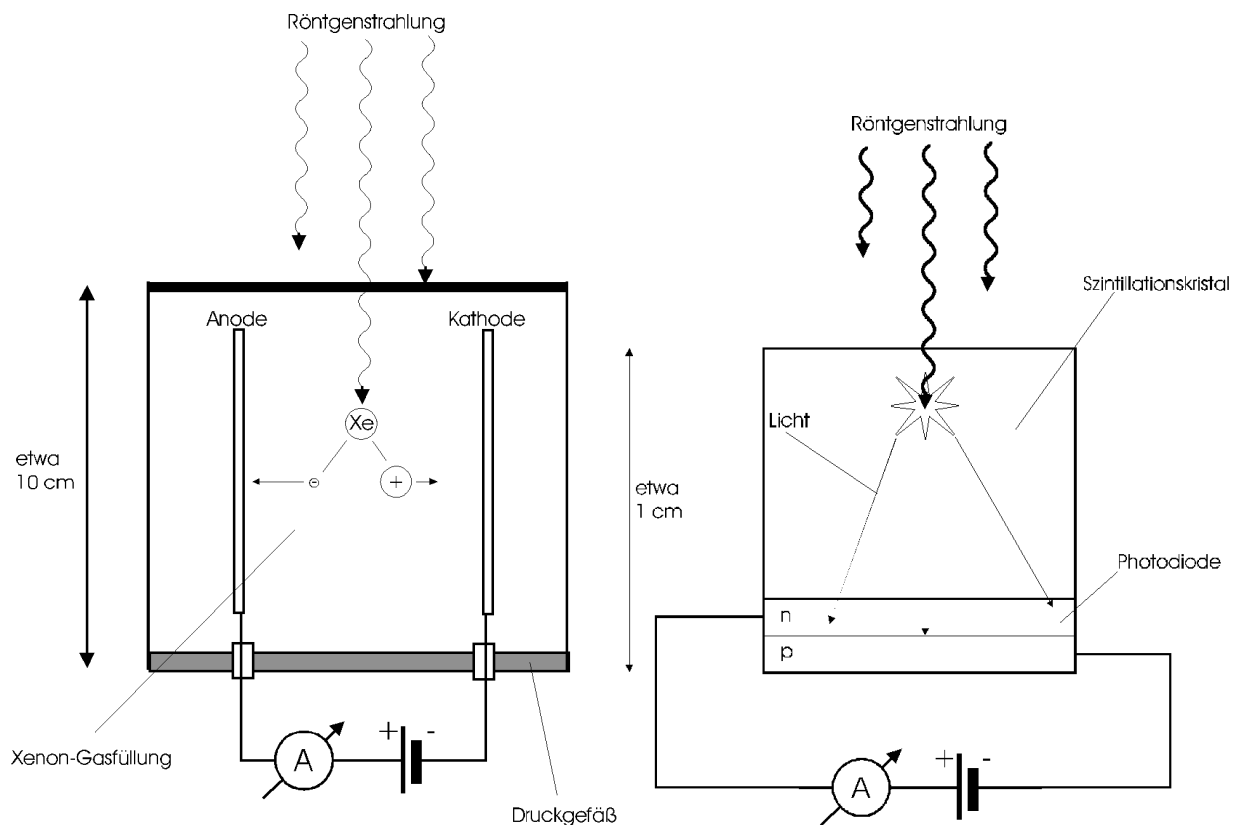


Abbildung 18: links: Xenon-Ionisationskammer. Rechts: Szintillationsdetektor

1.7.2 Szintillationsdetektoren

Im Kristall (z.B. Cäsiumjodid) ionisiert die Röntgenstrahlung die Kristallatome. Die entstehenden Elektronen stoßen vielfach gegen das Kristallgitter und geben dabei ihre Energie bis auf eine kleine Restenergie ab. Dieser Rest wird bei der Rückkehr des Elektrons zum Atomrumpf überwiegend in Form von sichtbarem Licht (also eines Photons mit relativ kleiner Energie) abgestrahlt. Dieses Licht trifft, zumindest zum Teil, auf eine Photodiode und ändert deren elektrischen Widerstand. Diese Widerstandsänderung ist umso grösser je höher die Röntgenintensität ist. Auch dieses System ist daher ein geeigneter Detektor. Der Vorteil dieses Detektors ist, dass aufgrund der grösseren Teilchendichte im Kristall (Festkörper!) die Wahrscheinlichkeit der Absorption der Röntgenphotonen wesentlich grösser als im Xenon- Detektor (Gas!) ist. Andererseits ist der Xenon-Detektor für kurze (dies ist natürlich erwünscht) Aufnahmezeiten besser geeignet, da das erzeugte elektrische Signal sehr schnell abfällt. Ausserdem sind Edelgas-Detektoren wesentlich unempfindlicher gegen Umgebungsbedingungen wie Feuchtigkeit und Temperatur.

1.8 Dosimetrie und Strahlenschutz

Die Dosimetrie beschäftigt sich mit der Messung der ionisierenden Strahlung, vor allem der Messung der Strahlendosis.

Energiedosis

Die Energiedosis D gibt die durch die Strahlung auf das Gewebe übertragene Energie an.

$$D = \frac{\Delta E_{abs}}{\Delta m} = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{durchstrahlte Masse}}$$

Einheit: $[D] = 1 \text{ J/kg} = 1 \text{ Gy (Gray)}$.

Die Dosis 50 Gy erhöht in 1 l Wasser die Temperatur um 0.01 °C.

Äquivalentdosis

Die Äquivalentdosis H wichtet die Energiedosis unter Berücksichtigung der biologischen Wirksamkeit der Strahlungsarten. Sie ergibt sich aus der Energiedosis durch Multiplikation mit einem dimensionslosen Wichtungsfaktor Q .

$$H = Q \cdot D$$

Die Einheit ist wie bei der Energiedosis J/kg, um aber eindeutig darzustellen, dass dabei bereits der Wichtungsfaktor Q berücksichtigt ist, wurde als Einheit von H das Sievert eingeführt. Einheit: $[H] = 1 \text{ Sv (Sievert)}$. Der Qualitätsfaktor wird für die verschiedenen Strahlungsarten so gewählt, dass z.B. 1 mSv aufgrund von Röntgenstrahlung und 1 mSv aufgrund von Neutronenstrahlung dieselbe biologische Wirksamkeit ergeben.

Tabelle 1: Wichtungsfaktoren unterschiedlicher Strahlungsarten.

| Strahlungsart | Q |
|-------------------------------------|------|
| Photon (Röntgen und Gammastrahlung) | 1 |
| Elektronen | 1 |
| Protonen | 1-5 |
| Neutronen | 5-20 |
| α -Strahlung | 20 |

Der Qualitätsfaktor von 200 keV-Röntgenstrahlung wird mit 1 festgelegt. Die Qualitätsfaktoren von α -Strahlung bzw. Neutronenstrahlung ist mit 10 bzw. 20 festgelegt. Die Einführung der Äquivalentdosis ermöglicht eine Abschätzung der biologischen Wirksamkeit durch Addition der Äquivalentdosen bei verschiedenen Strahlungsarten. Beispielsweise ergibt eine Lungenbestrahlung mit einer Dosis von je 2 mGy Röntgen- und Neutronenstrahlung eine Äquivalentdosis von $1 \cdot 2 \text{ mGy} + 10 \cdot 2 \text{ mGy} = 42 \text{ mSv}$.

Effektive Dosis

Da verschiedene Organe verschieden empfindlich sind, dürfen die Äquivalentdosen verschiedener Organe für eine sinnvolle Aussage nicht einfach addiert werden. Um bei gleichzeitiger Bestrahlungen verschiedener Organe, z.B. bei Ganzkörperbestrahlungen, trotzdem die biologischen Wirkungen abschätzen zu können, wird die „effektive Dosis“ eingeführt.

Die effektive Dosis E wichtet die Äquivalentdosis unter Berücksichtigung der Strahlungsempfindlichkeit (auch Gewichtungsfaktoren w genannt) der Organe und Gewebe. Die effektive Dosis E erhält man durch Summation der gewichteten Organdosen aller spezifizierten Organe und Gewebe, wobei die Summe der Gewebe-Wichtungsfaktoren 1 ergibt.

$$E = \sum_i w_i \cdot H_i$$

Einheit: $[E] = 1 \text{ Sv}$ (Sievert).

| Gewebeart, Organ | Gewichtungsfaktor w |
|-------------------|---------------------|
| Keimdrüsen | 0,25 |
| Brust | 0,15 |
| rotes Knochenmark | 0,12 |
| Lunge | 0,12 |
| Schilddrüse | 0,03 |
| Knochenoberfläche | 0,03 |
| Rest | je 0,06 |

Abbildung 19: Gewichtungsfaktoren zur Ermittlung der effektiven Äquivalentdosis.

Davon weichen die neueren Empfehlungen der internationalen Strahlenschutzkommission ICRP etwas ab. Eine Äquivalentdosis von 22mSv führt bei Bestrahlung der Lunge (Gewichtungsfaktor $w_L = 0,12$) zu einer effektiven Äquivalentdosis von $0,12 \cdot 22 \text{ mSv} = 2,64 \text{ mSv}$. Die Belastung der Schilddrüse ($w_S = 0,03$) mit derselben Äquivalentdosis ergibt eine effektive Äquivalentdosis von $0,03 \cdot 22 \text{ mSv} = 0,66 \text{ mSv}$. Die effektive Äquivalentdosis der Lunge ist also viermal so gross wie die der Schilddrüse. Damit entsteht mit viermal grösserer Wahrscheinlichkeit ein Lungenkrebs als ein Schilddrüsenkrebs.

Beispiele von effektiven Äquivalentdosis

1. Natürliches Strahlungsniveau in der Schweiz (kosmische Strahlung, terrestrische Strahlung, Radon): 2 mSv/Jahr;
2. Flug von Zürich nach New York und zurück: 0,1 mSv;
3. Grenzwert für beruflich nicht strahlenexponierte Pers²: 1 mSv/Jahr;
4. Grenzwert für beruflich strahlenexponierte Personen: 20 mSv/Jahr;
5. Klassische Röntgenaufnahme des Thorax: 0,1 mSv;
6. Computertomographie des Thorax: 8 mSv;
7. Letaldosis bei einmaliger Ganzkörperbestrahlung: 4-5 Sv;

Aufgabe: Strahlenschutz

An einem Arbeitsplatz wird eine Energiedosisleistung von $2 \times 10^{-5} \text{ Gy/h}$ gemessen, hervorgerufen von langsamen Neutronen ($Q = 2,3$). Wie gross ist die Äquivalentdosisleistung? Wie viele Stunden einer Arbeitswoche darf man sich dort aufhalten, wenn die wöchentliche Äquivalentdosis auf 1 mSv begrenzt ist?



Aufgabe: Dosimetrie

Welche Energie absorbiert ein Mensch von 75 kg bei einem Strahlenunfall, bei dem er eine lebensbedrohliche Dosis von 4 Gy empfängt? Um wieviel Grad erhöht sich die Temperatur des Menschen?



²Für die Berechnung der Dosisgrenzwerte wird die Strahlenexposition durch die natürliche Strahlung und durch allfällige medizinische Massnahmen nicht berücksichtigt.

1.9 Biologische Wirkung

Was geschieht nun, wenn Röntgenstrahlung auf biologisches Gewebe trifft? Die Folgen kann man grob in drei Phasen unterteilen, die sich durch ihre unterschiedlichen Zeitskalen unterscheiden. In der **Physikalischen Phase** werden in grosser Anzahl Atome ionisiert, d.h. ein (oder mehrere) Elektronen herausgestossen. Der nun positiv geladene Atomrumpf und das freie Elektron werden als Ionenpaar bezeichnet. Da der Körper zu fast 80% aus Wasser besteht, entstehen beim Durchgang der Röntgenstrahlung vor allem sogenannte Wasserradikale: das sind Bruchstücke von Wassermolekülen (Elektronen, Protonen, neutraler Wasserstoff und OH-Gruppen). Die Dauer dieser Vorgänge ist im Wesentlichen von der Durchquerungsdauer der Photonen durch die Zelle festgelegt. Die Zeitskala ist damit sehr klein und beträgt 10^{-16} bis 10^{-13} Sekunden. In der **Physikalisch-Chemischen Phase** breiten sich die Radikale in der Körperzelle aus und lagern sich an Wasser an oder reagieren mit anderen Molekülen der Zelle, die dadurch ihre chemische Struktur verändern und dadurch ihrerseits Radikale bilden können. Diese Vorgänge verlaufen auf einer Zeitskala von 10^{-13} bis 10^{-2} Sekunden. Radikale können z.B. der dns, in der die Erbinformation enthalten ist, Wasserstoffatome aus Wasserstoffbrücken entziehen. Besonders kritisch sind dabei Schäden an den Basen, den „Quersprossen“ des dns-Doppelstranges, da in der Basenreihenfolge die genetische Information kodiert ist. Eine direkte Schädigung der dns durch Röntgenstrahlung ohne „Umweg“ über die Wechselwirkung mit Radikale ist sehr unwahrscheinlich, da das Volumen der dns im Vergleich zum gesamten Zellvolumen sehr klein ist.

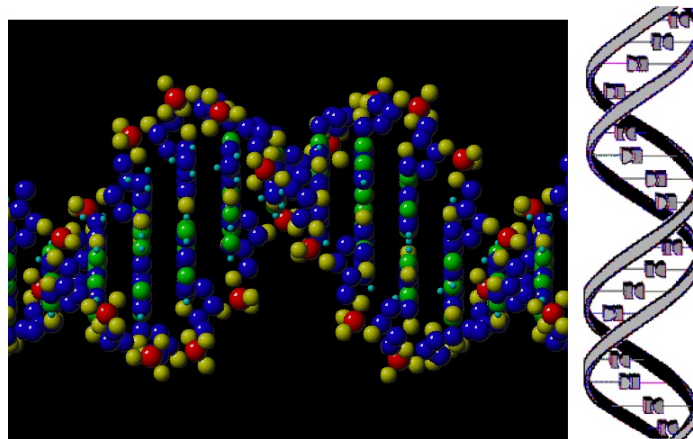


Abbildung 20: In der Abbildung links ist ein Kugelmodell der dns zu sehen. In der schematischen Darstellung rechts erkennt man die Doppelhelix. Die genetische Information ist in der Reihenfolge der „Quersprossen“ (Basen) kodiert. Werden durch die Röntgenstrahlung Basen geschädigt kann dies schwerwiegende Folgen für die Zelle haben.

Da Lebewesen schon immer ionisierender natürlicher Strahlung ausgesetzt waren, haben sie im Laufe der Evolution sehr leistungsfähige Reparaturmechanismen für Strahlenschäden entwickelt. So sind im Zellplasma Substanzen enthalten, die Radikale neutralisieren und die Zelle damit schützen können. Auch ein Schaden an einem Strang der dns wird mit hoher Wahrscheinlichkeit repariert. Der zweite Strang dient dabei als Vorlage. Ein seltener Doppelstrangbruch kann daher mit einer nur wesentlich geringeren Wahrscheinlichkeit repariert werden. Dies ist kritisch, da die meisten Bestandteile der Zelle mehrfach, die dns als zentrale Steuereinheit aber nur einfach in der Zelle vorhanden ist. Kann ein Schaden nicht repariert werden, so kann dies in der **Biologischen Phase** zur Zellteilungshemmung oder zum Zelltod führen. Auch die Entstehung von Erbgutveränderungen („Mutationen“) sind möglich. Daraus kann sich ein Tumor entwickeln. Die Vorgänge in dieser Phase laufen innerhalb von 10^{-2} Sekunden bis hin zu Jahrzehnten ab. Nicht jede Mutation ist aber mit der Bildung eines Tumors verbunden, da die Erbinformation in der dns oft auch dann noch „lesbar“ ist, wenn einzelne Veränderungen aufgetreten sind. Bereits jede Zellteilung erzeugt ohne äussere Einwirkung eine bis zehn fehlerhafte Basen, die zu Mutationen führen können. Ohne diese „spontanen“ Mutationen wäre

die Evolution zum Menschen hin nicht möglich gewesen.

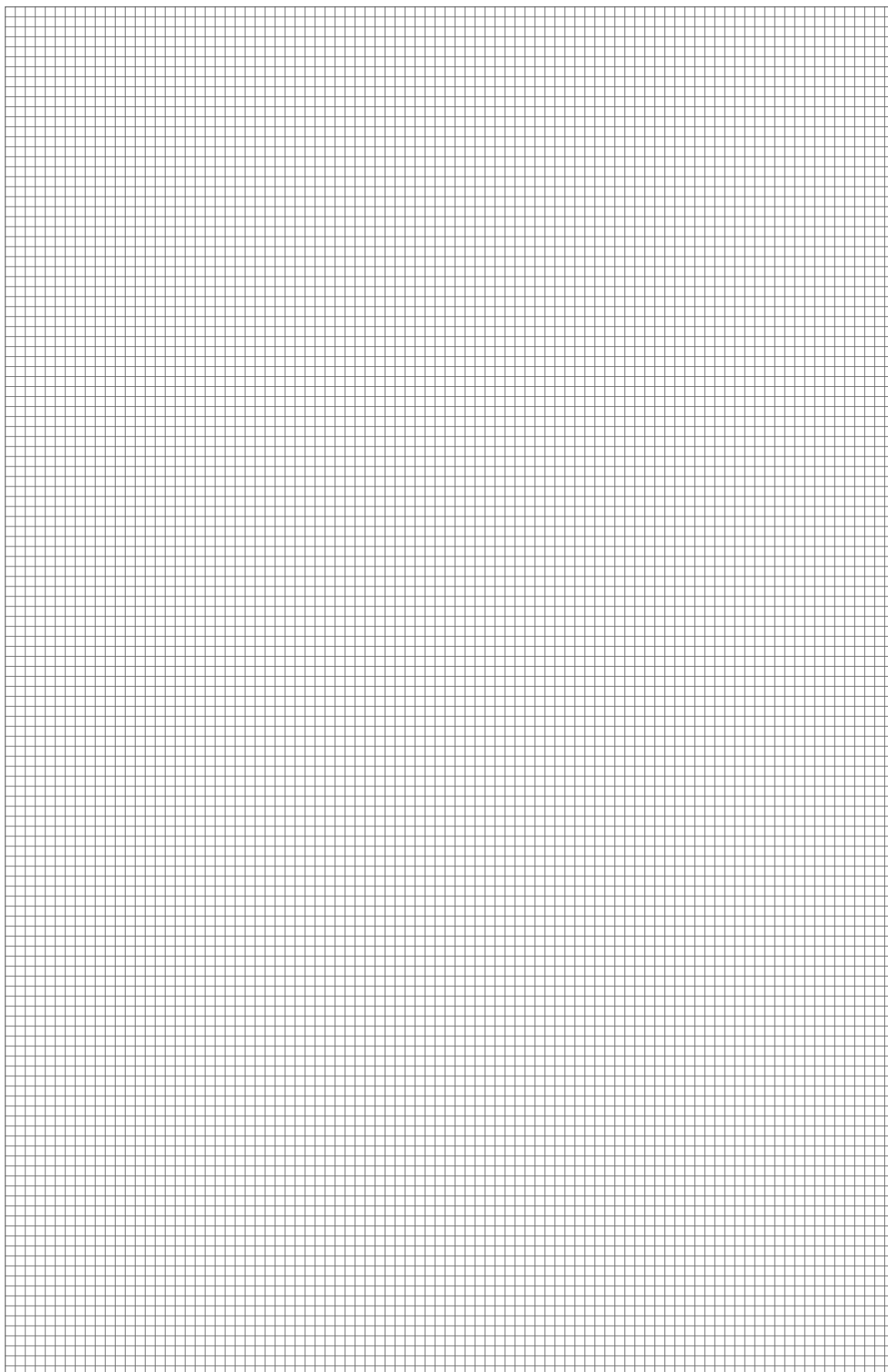
Aufgabe: Wirkung von Röntgenstrahlung auf den Körper

1. Schildern Sie kurz die im Unterricht besprochene Wirkungskette vom Einfall der Röntgenstrahlung bis zur Schädigung der Dns.
2. Nennen Sie die Grundregeln des Strahlenschutzes und begründen Sie kurz deren physikalische Bedeutung. Welche der Regeln ist auf einen einzelnen Röntgenstrahl demnach nicht anwendbar?
3. Erläutern Sie, weshalb es erforderlich ist, „Energiedosis“ und „Äquivalentdosis“ zu unterscheiden.
4. Die Lunge nimmt bei einer Bestrahlung mit Neutronen bzw. Röntgenstrahlung der Energiedosen 3 mGy bzw 8 mGy auf. Berechnen Sie die gesamte aufgenommene Äquivalentdosis. Welche der beiden Strahlungsarten ist „gefährlicher“?



1.10 Strahlentherapie

Die Röntgenstrahlung wird auf Grund ihrer biologischen Wirkung auch in der Therapie angewendet. Die einzelnen Zellen oder Zellverbände des Körpers sind der Röntgenstrahlung gegenüber verschieden empfindlich. Junges, sich schnell teilendes Gewebe wird schneller geschädigt als anderes. Das erklärt die positive Wirkung der Röntgenstrahlung bei bösartigen Geschwülsten (Krebs) und bestimmten Entzündungsprozessen. Eine intensive oder länger andauernde Anwendung von Röntgenstrahlung ruft Veränderungen bestimmter Zellen oder Zellgruppen hervor. Das gesunde Gewebe um einen Tumor soll möglichst nicht geschädigt werden. Oftmals muss man zufrieden sein, wenn gesundes Gewebe nur 20% von der Dosis im Tumor abbekommt. Die notwendigen Dosen, um einen Tumor in seinem Wachstum zu hemmen, liegen aber bei einigen Sievert. Da sind 20% nicht mehr harmlos.



Musterlösungen

Erzeugung von Röntgenstrahlung

vgl. Lehrtext

Röntgenstrahlen

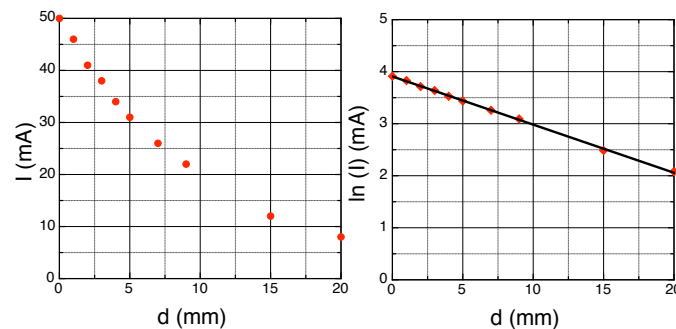
$$\lambda_0 = \frac{h \cdot c}{e \cdot U_a} = \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ Js} \cdot 3 \times 10^8 \text{ m/s}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C} \cdot 1 \times 10^5 \text{ V}} = 0.012 \text{ nm}$$

Absorptionskoeffizient

$$1/e = e^{-\mu \cdot x} = e^{-\mu \cdot 1 \text{ cm}} \text{ Es folgt } \mu = 1/x = 1 \text{ cm}^{-1}$$

Absorption von Röntgenstrahlung in Knochen

1. Intensitätsabnahme von Röntgenstrahlung: lineare und logarithmische Darstellung.



2. Aus dem Diagramm erhält man (Dicke für $I=25$ mA): Die Halbwertsdicke beträgt 7.5 mm.
3. 30 mm entsprechen vier Halbwertsdicken ($30:7.5=4$), somit wird die Zählrate viermal halbiert. Hinter einer 30mm dicken Bleiplatte kann man nur mehr $50 \cdot (1/2)^4 = 3$ mA messen.
4. Geradengleichung: $y = m \cdot x + b$, mit $y = \ln(I)$, Steigung $m = -\mu$ und $b = \ln(I_0)$. Der Absorptionskoeffizient beträgt $\mu = 0.093 \text{ mm}^{-1}$

Röntgenaufnahme

Verschiedene Substanzen absorbieren die Röntgenstrahlung unterschiedlich stark. Knochen z.B. wesentlich mehr als die Lunge. Damit hängt auch die auf den Film auftreffende Strahlungsintensität vom durchdrungenen Material ab und schwärzt ihn unterschiedlich stark.

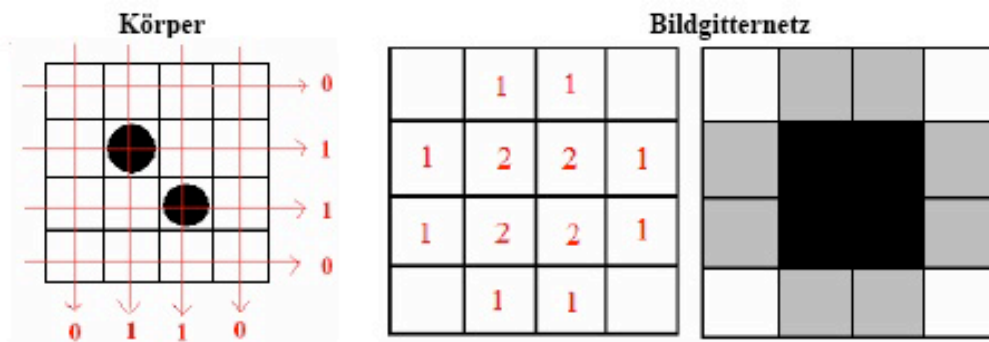
Eine Bleischürze als Strahlenschutz

1. 250 keV
2. Es werden 6 Halbwertsdicken Blei benötigt, da die Zählrate jedes mal auf die Hälfte sinkt ($2^6 = 64$). Dies entspricht einer Gesamtdicke von 6.6 mm.
3. Es werden 10 Halbwertsdicken Blei benötigt (weil $2^{10} = 1024$).

CT-Aufnahmen

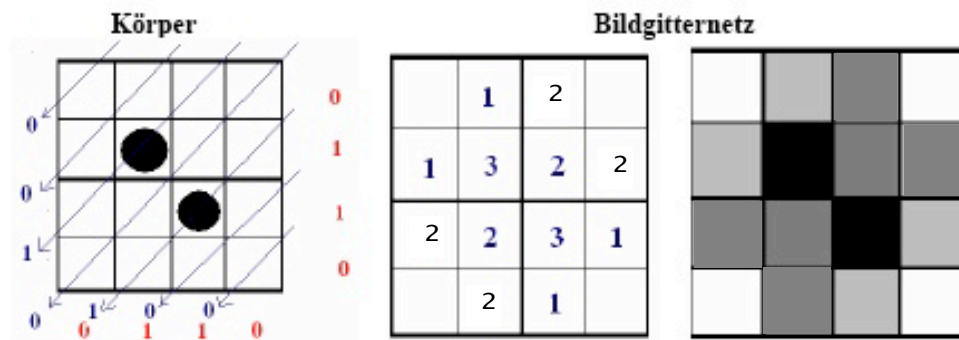
Vgl. Lehrtext. Wesentlicher Unterschied zu herkömmlichen Röntgenaufnahmen: Die Röntgenstrahlung durchdringt den Körper nicht nur aus einer, sondern vielen verschiedenen Richtungen.

Rückprojektion mit zwei Absorptionsstellen



⇒ Man erkennt sofort das Problem. Die Tumore können nicht mehr unterschieden werden. Ist es ein großer Tumor oder sind es zwei kleine und wo liegen sie?

Aus diesem Grund lässt man noch eine weitere Projektionsrichtung aus 45° zu. Verfähre wieder wie oben. Wie sieht dann das CT-Bild aus?



⇒ Auf diese Weise lassen sich die Tumore wieder zweifelsfrei unterscheiden.

Strahlenschutz

0.046 mSv/h. Also höchstens 21 Stunden pro Woche.

Strahlenschutz

$D = \frac{E}{m}$, es folgt für die Energie $E = m \cdot D = 300 \text{ J}$.

Die Wärmemenge um Wasser zu erwärmen beträgt: $E = m_{\text{Wasser}} \cdot c_{\text{Wasser}} \cdot \Delta T$. Es folgt: $\Delta T = \frac{m \cdot D}{0.7 \cdot m \cdot c_{\text{Wasser}}} = \frac{4 \text{ Gy}}{0.7 \cdot 4182 \text{ J/Kkg}} = 1.4 \text{ mK}$

Wirkung von Röntgenstrahlung auf den Körper

1. Die durch Ionisation entstehenden schnellen Elektronen erzeugen Wasserbruchstücke. Diese breiten sich in der Zelle aus und können mit der Dns reagieren, wodurch sich deren Struktur verändert.
2. Abstand halten! Grund: Für jede Art der Strahlung gilt das quadratische Abstandsgesetz. Voraussetzung ist aber, dass die Strahlung in alle Richtungen gleichmässig emittiert wird. Dies ist

aber bei einem Röntgenstrahl wie er in der CT verwendet wird nicht der Fall. Abschirmung! Röntgenstrahlung wird exponentiell geschwächt. Kurze Bestrahlungszeiten! Grund: Die aufgenommene Dosis ist proportional zur Bestrahlungszeit.

3. Bei gleicher Energiedosis erzeugen unterschiedliche Strahlungsarten unterschiedlich viele Schäden in einer Zelle. Eine niedrige Schadensdichte kann besser repariert werden als eine hohe Schadensdichte. Dies wird in der Äquivalentdosis berücksichtigt.
4. Die gesamte Äquivalentdosis beträgt $10 \cdot 3 \text{ mGy} + 1 \cdot 8 \text{ mGy} = 38 \text{ mGy}$. Die Neutronenstrahlung trägt daher etwa viermal so viel zur gesamten Belastung bei.