

# Röntgenstrahlung (Mediziner)

## Versuchsziele:

*Physikalische Grundlagen der Röntgenstrahlung zeigen und somit die Wirkungsweise der Röntgenstrahlung in der Medizin erklären.*

## Grundlagen:

*Vor dem Versuch sollten folgende Begriffe und Vorgänge erklärt werden können: Erzeugung von Röntgenstrahlen und deren Nachweis (Röntgenröhre, Ionisationskammer, Zählrohr), Bremsstrahlung, charakteristische Strahlung, Wechselwirkung mit Materie (Durchgang, Absorption), Dosis, Strahlenschutz, biologische Wirkung.*

## 1 Versuchsvorbereitung

### 1.1 Einleitung – die Bedeutung von Röntgenstrahlen in der Medizin

Röntgenstrahlen besitzen zwei entscheidende Merkmale, die ihren Einsatz in der Medizin erklären. Die erste Eigenschaft ist ihre Fähigkeit zur Durchdringung von Materie, was ihren Einsatz in der Diagnostik erklärt; die zweite Eigenschaft ist das Ionisationsverhalten, welches bei der Tumorthherapie Verwendung findet.

Die Verwendung zur Therapie von Tumoren beruht auf der ionisierenden Wirkung der Röntgenstrahlung. Dies bedeutet eine Zerstörung von Molekülen in lebenden Zellen, besonders die Zucker- und Phosphatverbindungen im „Rückgrat“ der DNS und die Nukleobasen der DNS. Die Vernichtung der Tumore und die gleichzeitige Erhaltung von gesundem Gewebe beruht auf dem Effekt, daß sich gesunde Körperzellen zum Teil wieder reparieren können. Weit geringer können dies aber Tumorzellen. Durch Röntgenstrahlung kann also Tumorgewebe vernichtet werden und gesundes Gewebe weitgehend erhalten bleiben. Inwieweit sich Erfolge erzielen lassen können, kommt bei dieser Behandlung auf die genaue Dosierung (und mittlerweile auch Lokalisierung) an.

Ein Versuch beschäftigt sich mit diesem Teilgebiet. Vergleichen Sie dazu auch den Abschnitt Dosimetrie und Strahlenschutz. Die unterschiedliche Absorption von Röntgenstrahlen in den verschiedenen Körpergeweben ist die Grundlage bei der Anwendung von Röntgenstrahlung in der Diagnostik.

## 2 Grundlagen der Röntgenstrahlung

### 2.1 Erzeugung von Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlen sind elektromagnetische Wellen (wie Licht), die in einem Wellenlängenbereich von ca.  $10^{-9}$  m bis  $10^{-11}$  m liegen, wie in der Tabelle zu ersehen ist befindet sich dieser Teil zwischen dem Bereich des ultravioletten Lichts und der Gammastrahlung (Abb. 1).

Röntgenstrahlen werden in einer hochevakuierten Röhre erzeugt; dabei werden Elektronen aus der Glühkathode herausgelöst und mittels einer anliegenden Spannung zwischen Kathode und Anode in Richtung der positiven Elektrode beschleunigt (Abb. 2). Nach dem Durchlauf der angelegten Hochspannung  $U_A$  (ca. 10 kV - 100 kV) besitzen die Elektronen am Ende eine kinetische Energie (Gl. 1).

$$E_{kin} = e \cdot U \quad (1)$$

$-e$ :	Ladung eines Elektrons	$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$
$E_{kin}$ :	kinetische Energie	$[E_{kin}] = \text{eV}; 1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
$U$ :	Beschleunigungsspannung	$[U] = \text{V}$

Diese kinetische Energie wird beim Auftreffen auf die Anode hauptsächlich in Wärmeenergie (99%) um-

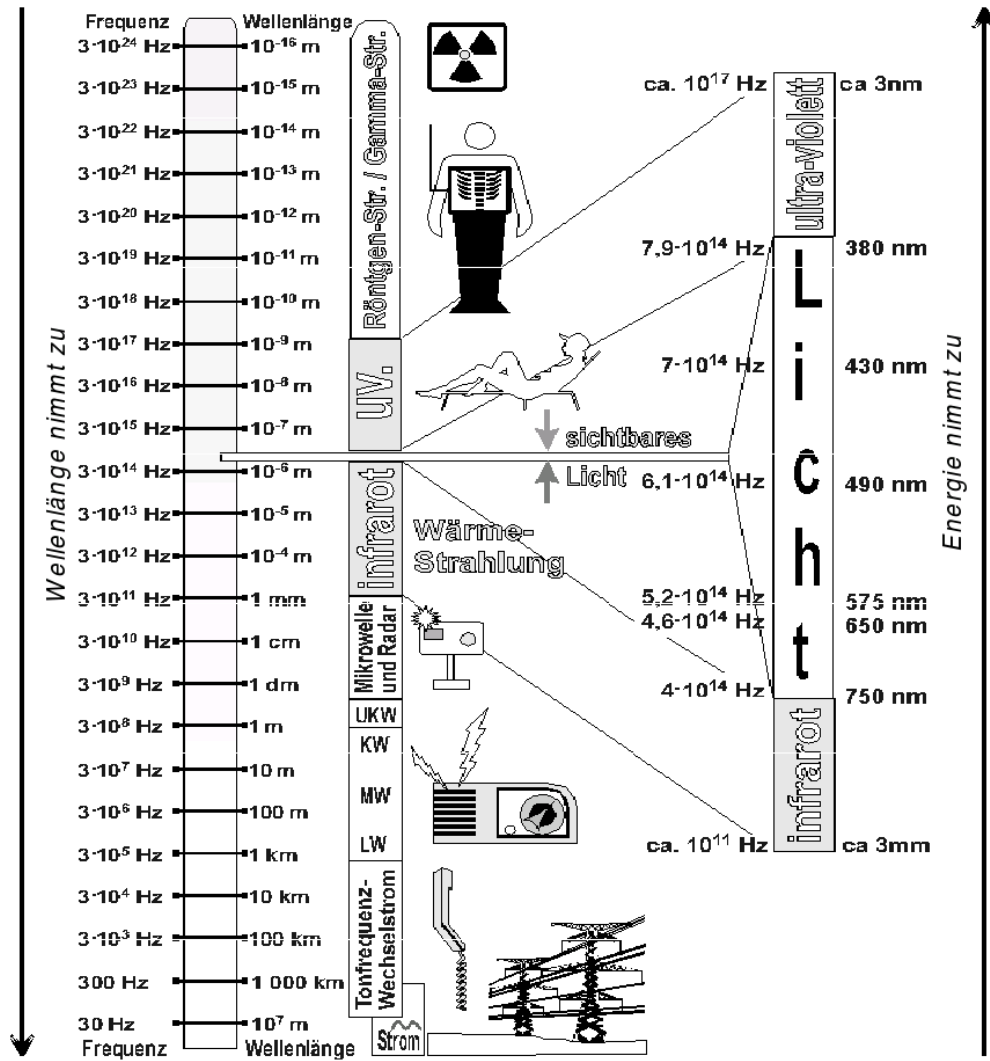


Abbildung 1: Einteilung elektromagnetischer Strahlung nach Frequenzen und Wellenlängen

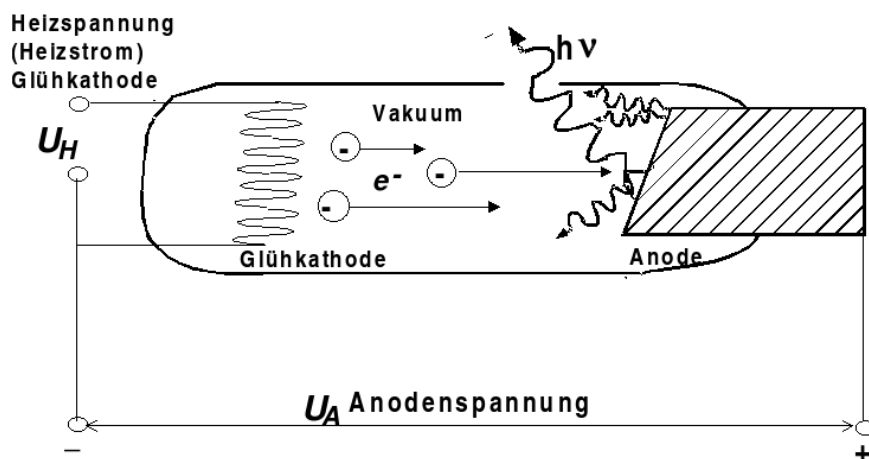


Abbildung 2: Schematischer Aufbau einer Röntgenröhre.

gewandelt und nur ein kleiner Rest wird als Röntgenstrahlung emittiert. Im Anodenmaterial verlieren die Elektronen Energie durch inelastische Stöße mit den Elektronen der Atome und durch Abstrahlung bei Ablenkung und Beschleunigung im Coulombfeld des Atomkerns. Bei diesem Vorgang entsteht ein conti-

nuerliches Spektrum, *das Bremsspektrum*.

Dabei ist diese Röntgenstrahlung zusammengesetzt aus *Röntgen-Bremstrahlung* und *Charakteristischer Röntgenstrahlung*, wobei die Entstehung der jeweiligen Art zur Namensgebung führte.

## 2.2 Röntgen-Bremstrahlung (kontinuierliches Bremsspektrum)

*Röntgen-Bremstrahlung* entsteht, wenn Elektronen im elektrischen Feld eines Atomkernes abgebremst werden. Dabei „verliert“ das Elektron durch den Abbremsvorgang Energie, die infolge des Energieerhaltungssatzes zum Großteil in Energie der entstehenden Photonen  $E_{ph}$  umgewandelt wird (Abb. 3).

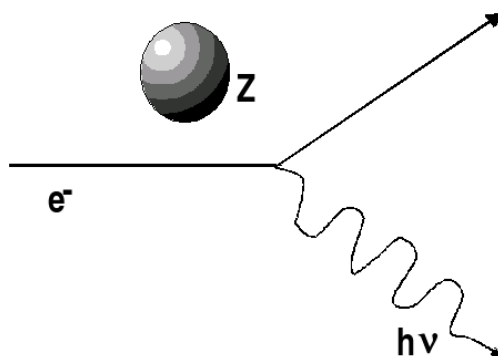


Abbildung 3: Abbremsvorgang eines Elektrons im Coulombfeld eines Kerns mit Aussendung eines Photons.

Die Energieabgabe verläuft dabei in unterschiedlichen, kontinuierlichen Beträgen, wodurch ein kontinuierliches Spektrum entsteht.

Die Photonenenergie  $E_{ph}$  ist abhängig von der Wellenlänge bzw. der Frequenz der Strahlung.

$$E_{ph} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2)$$

$\lambda$ :	Wellenlänge der Röntgenstrahlung	$[\lambda] = \text{m}$
$h$ :	Plank'sches Wirkungsquantum	$h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ $= 4,14 \cdot 10^{-15} \text{ eVs}$
$c$ :	Lichtgeschwindigkeit im Vakuum	$c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$
$\nu$ :	Frequenz der Röntgenstrahlung	$[\nu] = \text{Hz}$
	Nützlich: $hc = 1,242 \cdot 10^{-6} \text{ eVm}$	$= 1,242 \text{ eV}\mu\text{m}$

Je größer also die Energie der Photonen, desto größer die Frequenz  $\nu$  und desto kleiner die Wellenlänge  $\lambda$  der Röntgenstrahlung (vergl. Gl. 2).

Die kürzeste Wellenlänge  $\lambda_{min}$  ( $\equiv$  höchste Energie) des Röntgenspektrums entsteht, wenn ein Elektron seine gesamte Energie in nur einem Prozeß beim Abbremsen abgibt (Gl. 3).

$$\lambda_{min} = \frac{h \cdot c}{e \cdot U} \quad (3)$$

Die nachfolgende Abbildung zeigt verschiedene Bremspektren in Abhängigkeit von den Beschleunigungsspannungen und dem Emissionsstrom.

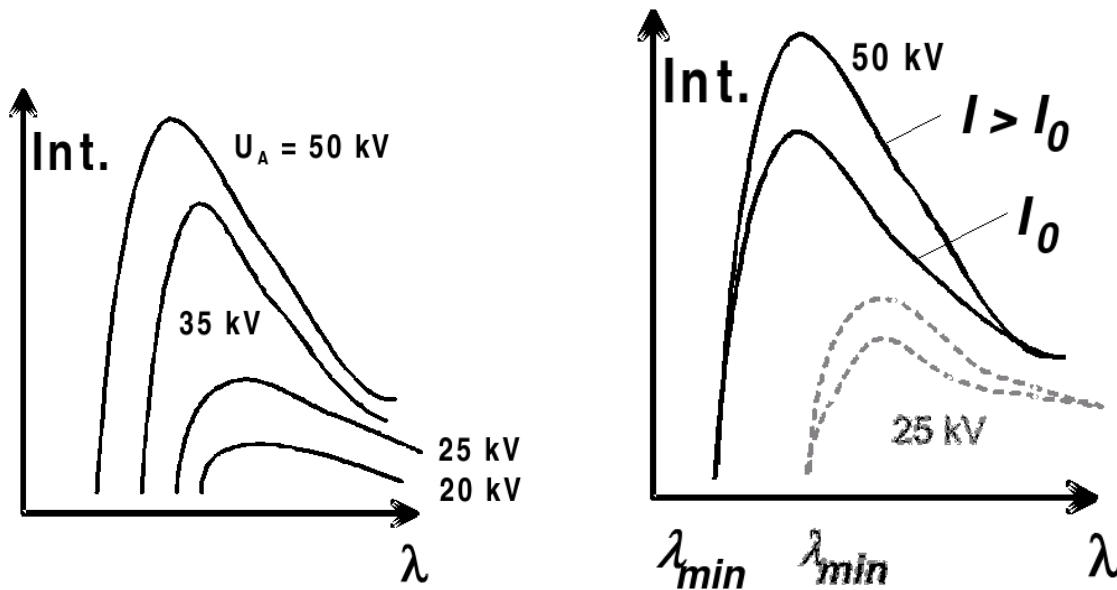


Abbildung 4: Links: Kontinuierliches Bremspektrum für einen festen Emissionsstrom  $I_0$  und verschiedene Beschleunigungsspannungen  $U_A$ . Rechts: Kontinuierliches Bremsstrahlungsspektrum zweier Beschleunigungsspannungen, aber jeweils unterschiedlichen Emissionsstroms.

### 2.3 Die charakteristische Röntgenstrahlung

Um einen Atomkern kreisen eine Anzahl von Elektronen auf ihren jeweiligen Bahnen. Die Anzahl der Elektronen entspricht der Ordnungszahl (= Kernladungszahl = Anzahl der Protonen im Kern) des jeweiligen Elementes.

Aufgrund gleicher physikalischer Eigenschaften lassen sich bestimmte Bahnen zu einzelnen Gruppen, zu sogenannten Schalen, zusammenfassen. Diese werden von innen nach außen mit Elektronen aufgefüllt (Pauliprinzip) und dementsprechend in diese Richtung durch Großbuchstaben gekennzeichnet (K, L, M, N, ...).

Die Schalen sind Energieniveaus, die die Energie der Elektronen der Schale charakterisieren. Die Energie der Niveaus nimmt von innen nach außen zu.

Ist die kinetische Energie der beschleunigten Elektronen groß genug, um ein Elektron beim Auftreffen aus der Atomhülle zu schlagen (ionisieren) dann kann ein Elektron aus einer weiter außen befindlichen Schale in die entstandene Lücke springen. Dabei sind nicht alle Übergänge erlaubt, sondern nur solche, welche bestimmte Auswahlregeln erfüllen (Abb. 5 links). Dies ist abhängig von der Energie der beteiligten Energieniveaus.

Die Differenzenergie  $E_{\text{aussen}} - E_{\text{innen}}$  wird in Form elektromagnetischer Strahlung im Wellenlängenbereich der Röntgenstrahlung abgegeben (Gl. 4). Dieses Röntgenquant (= Photon) hat eine diskrete Energie:

$$E_{\text{Ph}} = E_{\text{aussen}} - E_{\text{innen}} = h\nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (4)$$

Hierbei sind eine große Zahl von Übergängen möglich (Abb. 5 links). Es entsteht ein sogenanntes Linienspektrum, welches nur von der atomaren Zusammensetzung des Anodenmaterials abhängt. Die so entstandene Röntgenstrahlung wird deswegen *Charakteristische Strahlung* (Abb. 5 rechts) genannt.

Weitere Spezifikationen sind das Zusammenfassen der einzelnen Linien zu Serien. Übergänge von äußeren Schalen in die K-Schale werden als K-Serie bezeichnet, der Übergang L zu K bezeichnet man als  $K_\alpha$ -Strahlung, den Übergang von M zu K als  $K_\beta$  usw. Für Molybdän als Beispiel liegen die Energien der charakteristischen Strahlung bei  $K_\alpha = 17,4$  keV bzw.  $K_\beta = 19,6$  keV.

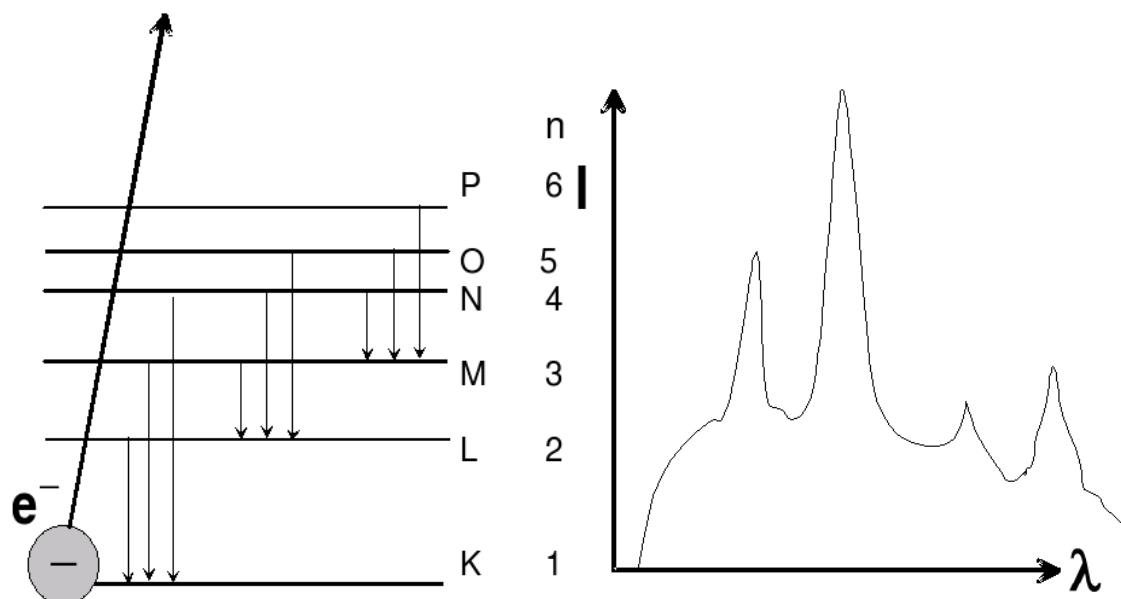


Abbildung 5: Links: Mögliche Übergänge beim Herausschlagen eines Elektrons der inneren Schalen. Rechts: Charakteristische Röntgenstrahlung.

### 3 Absorption von Röntgenstrahlen

#### 3.1 Wechselwirkung von Röntgenstrahlung mit Materie

Zwei Prozesse werden bei der Wechselwirkung von Röntgenstrahlen mit Materie unterschieden:

Vollständige Absorption, d.h. die gesamte Energie des Photons wird von den beteiligten Atomen aufgenommen; dies führt i.A. zur Ionisierung der Atome.

Streuung, d.h. die Richtung der Photonen ändert sich; eventuell geht ein Teil der Energie verloren.

Die Wechselwirkung mit Materie umfaßt:

- *Klassische Streuung*
- *Photo-Effekt*
- *Compton-Effekt*
- *Paarbildung*

#### 3.2 Klassische Streuung

Bei der klassischen Streuung bleibt die Energie des Röntgenquants erhalten, jedoch die Richtung ändert sich.

Zu beachten ist ihre dadurch auftretende Streustrahlung im Rahmen von Strahlenschutzmaßnahmen.

#### 3.3 Photo-Effekt

Der Photo-Effekt bezeichnet die Absorption der Röntgenstrahlen, bei der die gesamte Energie der Röntgenphotonen auf die Elektronen übertragen wird. Es entsteht ein freies Elektron, wenn beim Energieübertrag ein gewisser Schwellenwert, die Bindungsenergie  $E_B$  (Abb. 6) des Elektrons im Atom überschritten wird. Zurück bleibt ein positiv geladenes Atom (Ion) und das freie Elektron mit der kinetischen Energie  $E_{kin} = h\nu - E_B$ .

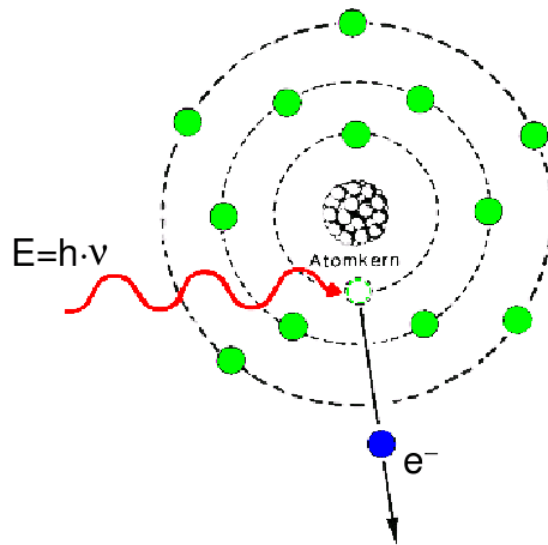


Abbildung 6: Photo-Effekt

### 3.4 Compton-Effekt

Darunter versteht man die Streuung eines Photons an den vergleichsweise schwach gebundenen Elektronen der äußeren Atomhülle (N, O, ... Schale). Das Photon gibt dabei nur einen Teil seiner Energie ( $E_\gamma = h\nu$ ) an ein Elektron ab. Das Photon fliegt mit verringerter Energie ( $E'_\gamma = h\nu'$ ) d.h. mit größerer Wellenlänge und veränderter Richtung weiter (Abb. 7). Das Elektron hat die Energiedifferenz  $E_e = E_\gamma - E'_\gamma$  übernommen und wird mit der kinetischen Energie  $E_{kin} = E_\gamma - E'_\gamma - E_B$  emittiert. Zurück bleibt ein ionisiertes Atom.

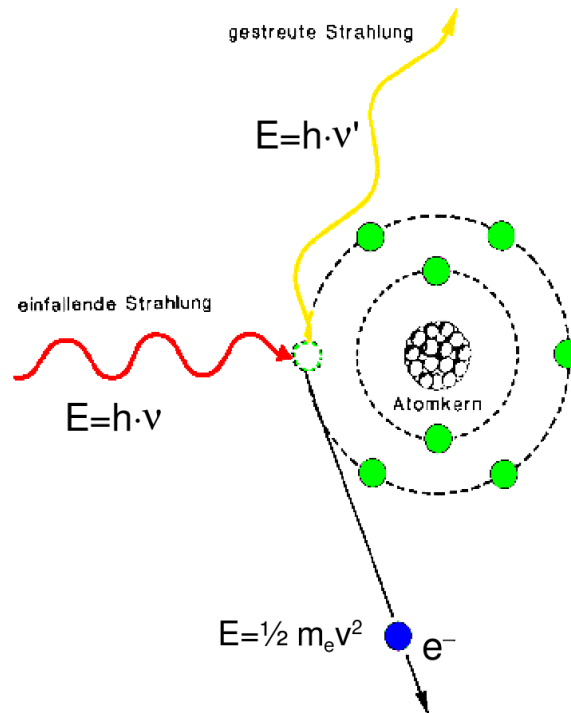


Abbildung 7: Compton-Effekt

### 3.5 Paarbildung (Elektron-Positron-Paarerzeugung)

Bei der Paarbildung werden ein Elektron und ein Positron erzeugt. Voraussetzung für diesen Prozeß der Paarbildung ist, daß das Photon eine Mindestenergie von 1,022 MeV besitzt. Das gebildete Positron vereinigt sich wieder mit einem Elektron, wobei eine sogenannte Vernichtungsstrahlung erzeugt wird (Vernichtung, da zwei Teilchen verschwinden und ein Röntgenquant entsteht). Diese Vernichtungsstrahlung ist energieärmer als die einfallende, primäre Röntgenstrahlung, da ein Teil der kinetischen Energie der erzeugten Elektronen und Positronen durch deren inelastische Streuung mit Materie in Wärmeenergie verwandelt wird. Es sei hier angemerkt, dass für den typischen Energiebereich der Röntgenstrahlung ( $< 100 \text{ keV}$ ) in der Medizintechnik die Paarbildung keine Rolle spielt.

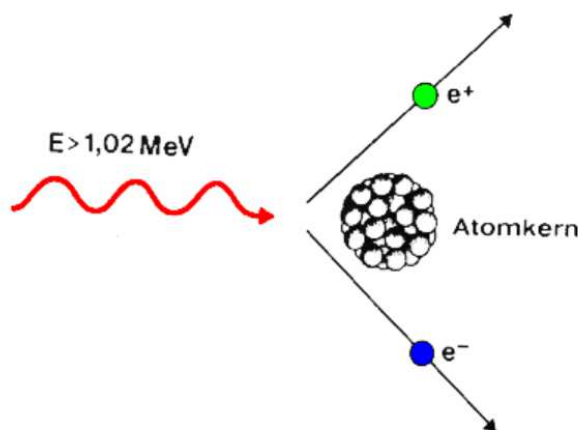


Abbildung 8: Paarbildung

### 3.6 Das Schwächungsgesetz

Alle vorher erwähnten Effekte führen zu einer Schwächung bzw. einer Absorption der ionisierenden elektromagnetischen Strahlung. Wird die Intensität vor dem Eintritt in die Materie gemessen ( $I_0$ ) und nach dem Durchgang ( $I$ ), so läßt sich die Schwächung durch das sogenannte *Schwächungsgesetz* beschreiben (Gl. 5). Die (vereinfachte) Annahme hierfür ist, dass in einem homogenen Material der pro Schichtdicke  $dz$  absorbierte Anteil der Intensität  $dI$  konstant ist und proportional zur einfallenden Intensität  $I$  ist ( $dI = -const \cdot I \cdot dz$ ) Die Intensität nimmt daher exponentiell mit der Dicke des durchstrahlten Materials ab (Abb. 9).

$$I = I_0 \cdot e^{-\kappa d} \quad (5)$$

$I$ :	Intensität nach dem Materialdurchgang	$[I] = \text{W}/\text{cm}^{-2}$
$I_0$ :	Intensität vor dem Materialdurchgang	$[I_0] = \text{W}/\text{cm}^{-2}$
$\kappa$ :	Schwächungs- (Extinktions-) koeffizient	$[\kappa] = \text{m}^{-1}$
$d$ :	Dicke der absorbierenden Schicht	$[d] = \text{m}$

Die Schwächung der Intensität der in Einfallsrichtung durch die Materie tretenden Strahlung wird dabei verursacht durch:

- Absorption, ausgedrückt durch den Absorptionskoeffizienten  $\tau$ .
- Streuung, beschrieben durch den Streukoeffizienten  $\sigma$  (wobei  $\sigma \ll \tau$ ).

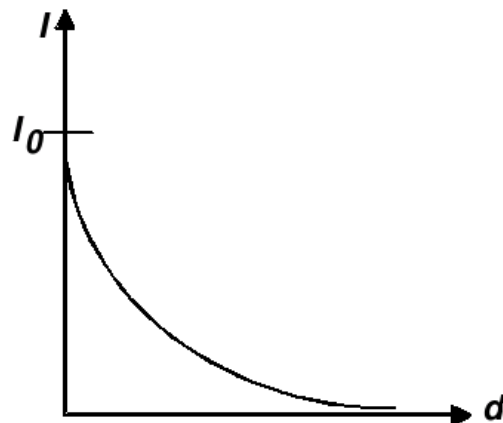


Abbildung 9: Intensitätsverlauf in Abhängigkeit von der Dicke des Absorbermaterials

Dies bedeutet für den Extinktionskoeffizienten  $\kappa$ :

$$\kappa = \tau + \sigma \quad (6)$$

Bei der Absorption durch Photo- und Compton-Effekt werden Elektronen aus der Atomhülle gelöst. Die

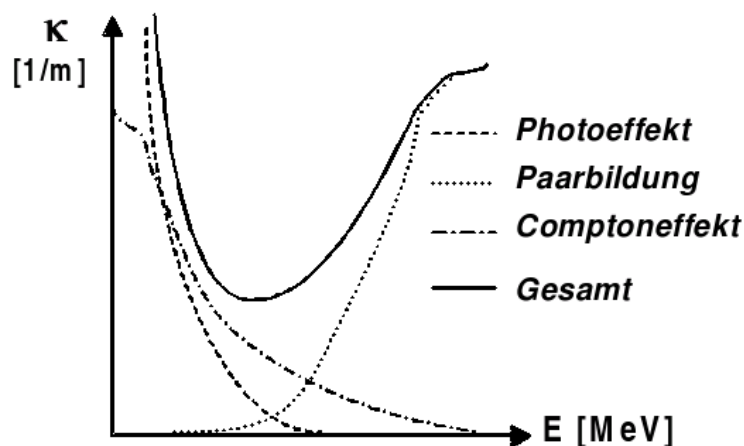


Abbildung 10: Grafische Darstellung des Schwächungskoeffizienten aufgetragen über der Strahlungsenergie als Summe der einzelnen Prozesse

Energie des Röntgenquants wird dabei auf das Elektron übertragen. Der Absorptionskoeffizient  $\tau$  hängt von der Wellenlänge  $\lambda$  der Röntgenstrahlung, der Ordnungszahl  $Z$  des Absorbermaterials und dessen Dichte  $\rho$  ab. Dieser Zusammenhang wird angenähert durch die empirisch ermittelte Beziehung:

$$\tau = c\rho Z^3 \lambda^3 \quad (7)$$

Bei Gleichung 7 ist der Faktor  $c$  eine dimensionsbehaftete Größe, die abschnittsweise konstant ist und bei einigen bestimmten Wellenlängen (= Absorptionskanten) springt, weil mit wachsender Energie plötzlich Elektronen einer tieferen Schale herausgeschlagen werden (Abb. 11).

Für die Lage der kurzwelligsten dieser Kanten, der K-Kante, gilt:

$$h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda_K} = (13.6 \text{ eV}) \cdot Z^2 \quad (8)$$

Dies entspricht der Rydberg-Gleichung für ein Atom der Ordnungszahl  $Z$  (Wasserstoff:  $Z = 1!$ ) und gibt die Bindungsenergie eines 1s-Elektrons an.

Diese Kanten sind ein Indiz für das Vorhandensein von diskreten Energiezuständen in der Atomhülle (Schalen gleicher Energie).



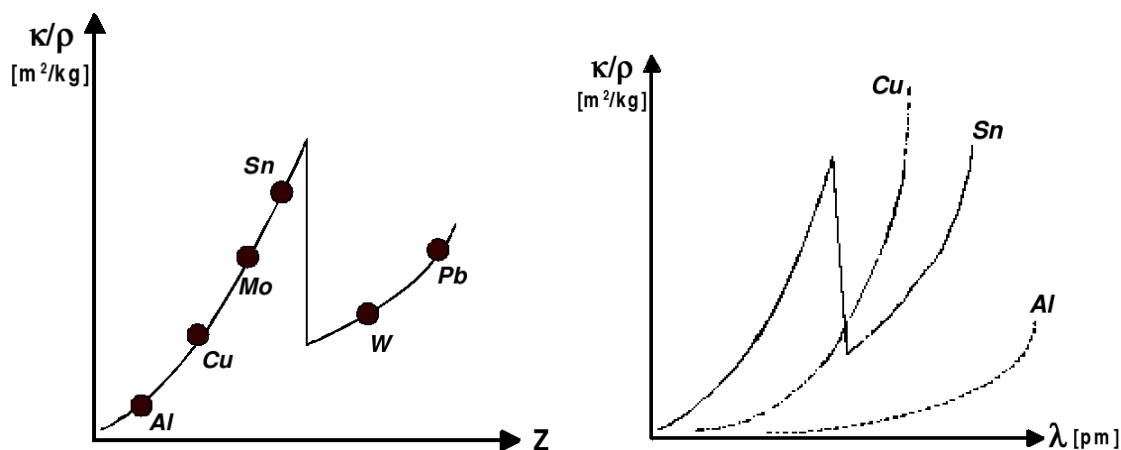


Abbildung 11: Links: Dichtebezogener Schwächungskoeffizient in Abhängigkeit von der Ordnungszahl  $Z$  bei  $\lambda = \text{konst.}$  Rechts: Dichtebezogener Schwächungskoeffizient in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$

## 4 Nachweis von Röntgenstrahlung

### 4.1 Ionisationskammer

Röntgenstrahlung kann in einer Ionisationskammer nachgewiesen werden, wobei hier nur die durch Strahlung erzeugte Ionenmenge gemessen wird. Diese Kammer ist im Prinzip ein Plattenkondensator, der so angeordnet ist, daß die Röntgenstrahlung zwischen den Platten eindringen kann. An dem Kondensator liegt dabei eine Spannung an. Durch die ionisierende Wirkung der Röntgenstrahlung entstehen zwischen den Kondensatorplatten Ladungsträger (Elektronen und positiv geladene Ionen), welche dann aufgrund der Spannung an eine Elektrode wandern und somit einen Strom bewirken, der gemessen wird. Hier ist das anliegende elektrische Feld nicht so stark, daß sich Ionen infolge von Stoßprozessen bilden können, was eine direkte Messung der durch die ionisierende Strahlung entstandenen Ladungsträger zur Folge hat.

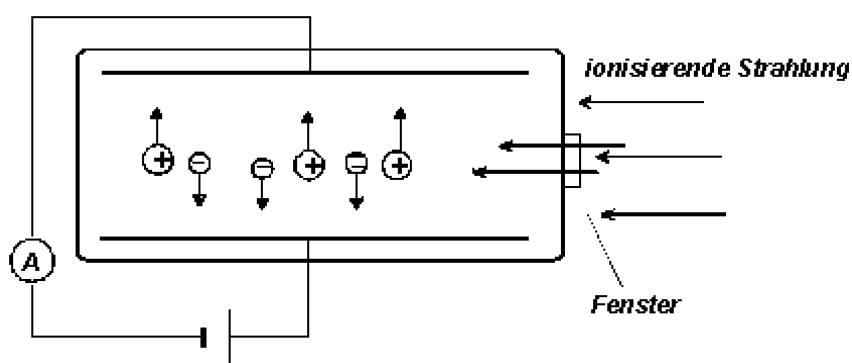


Abbildung 12: Funktionsprinzip einer Ionisationskammer

### 4.2 Geiger-Müller-Zählrohr

Das *Geigerzählrohr* besteht im wesentlichen aus einem Metallrohr, in dessen Mitte sich ein dünner Draht befindet. Zwischen beiden liegt eine hohe Spannung an. Tritt nun durch das Fenster Röntgenstrahlung in das Zählrohr, so werden durch die Strahlung Ionen erzeugt, welche durch die anliegende Spannung zur jeweils gegenpoligen Elektrode beschleunigt werden. Die Spannung ist dabei so hoch, daß die entstandenen Ladungsträger soviel Energie gewinnen, um durch Stoßprozesse mit weiteren Gasmolekülen neue Ionen zu erzeugen (Elektronenlawine). Durch jeden so entstandenen Ladungsträger kommt es zu einem kurzen

Stromstoß, der die anliegende Spannung zum Zusammenbruch bringt und einen Stromfluß erzeugt. Dies wird dann durch ein Registriergerät festgehalten.

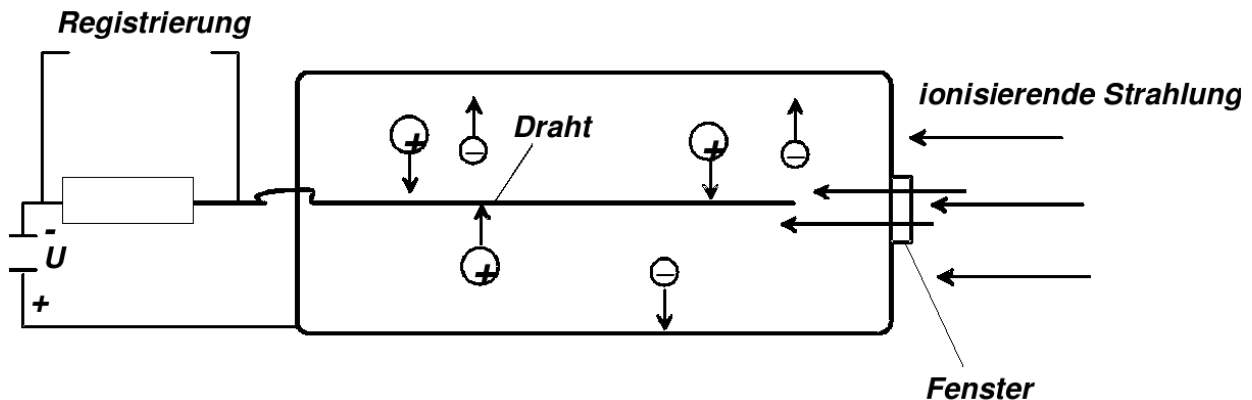


Abbildung 13: Funktionsprinzip des Geiger-Müller-Zählrohrs

### 4.3 Weitere Nachweismöglichkeiten

Hier sollen noch zwei Möglichkeiten erwähnt werden, die beide auf der fluoreszierenden Wirkung der Strahlung beruhen. Zum einen geschieht dies direkt an Fluoreszenzschirmen und zum anderen mit einem Szintillationszähler.

## 5 Dosimetrie und Strahlenschutz

Die Dosimetrie beschäftigt sich mit der Messung der ionisierenden Strahlung, vor allem der Messung der Strahlendosis. Der Begriff der Strahlendosis stammt aus der Pharmakologie. Bei den Messungen werden verschiedene Parameter erfasst und unterschieden. Die zwei wichtigsten Maßeinheiten sind:

### 5.1 Energiedosis

Die Energiedosis gibt die Energie an, die von der Strahlung auf die bestrahlte Materie übertragen wird:

$$\text{Energiedosis} = \frac{\text{absorbierte Energie}}{\text{durchstrahlte Masse}} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} [\text{Energiedosis}] &= \text{Gray (Gy)} = \text{Ws/kg (früher rad)} \\ [\text{absorbierte Energie}] &= \text{Ws} \\ [\text{durchstrahlte Masse}] &= \text{kg} \end{aligned}$$

## 5.2 Ionendosis

Die Ionendosis ist eine Einheit, die sich auf die durch Ionisation entstandene Ladung der Ionenpaare bezieht.

$$\text{Ionendosis} = \frac{\text{Ladung der Ionenpaare}}{\text{durchstrahlte Masse}} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} [\text{Ionendosis}] &= \text{C/kg (früher 1 R, Röntgen)} \\ [\text{Ladung der Ionenpaare}] &= \text{C} \\ [\text{durchstrahlte Masse}] &= \text{kg} \end{aligned}$$

Mit einem Umrechnungsfaktor, der von der durchstrahlten Materie abhängt, lassen sich Ionen- und Energiedosis ineinander umrechnen. Ein materialspezifischer Umrechnungsfaktor kommt durch die unterschiedliche Energieaufnahme des Materials zustande (z.B. entspricht für Luft einer Energiedosis von 100 Ws/kg eine Ionendosis von 6,6 C/kg).

Die Ionen- und Energiedosis von Luft entspricht in etwa der von Gewebe, nur die Volumina sind verschieden.

1 kg Luft hat etwa 1 Kubikmeter Volumen, 1 kg Gewebe etwa einen Liter.

## 5.3 Ionendosisleistung

Die Ionendosisleistung ist definiert als:

$$\text{Ionendosisleistung} = \frac{\text{Ionendosis}}{\text{Zeit}} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} [\text{Ionendosisleistung}] &= \text{C/kg s} \\ [\text{Ionendosis}] &= \text{C/kg} \\ [\text{Zeit}] &= \text{s} \end{aligned}$$

# 6 Versuchsdurchführung

## 6.1 Abhängigkeit der Schwächung von der Absorberdicke

Messen Sie die Zählrate bei der Verwendung von Aluminium und Kupfer in verschiedenen Dicken. Hierzu wird die jeweilige Fassung mit dem Material in die Kunststoffhalterung des Goniometers (Winkelmesser) gesteckt. Am Röntgengerät ist es dabei zweckmäßig, die folgenden Werte einzustellen:

Material	Ordnungszahl Z	Dicke $d$ in mm
Aluminium (Al)	13	0.5/1.0/1.5/2.0/2.5/3.0
Kupfer (Cu)	29	0.1/0.2/0.3/0.4/0.5/0.6

Tabelle 7: Dicken und Parameter der Absorber

$$U = 30 \text{ kV}; I = 0,1 \text{ mA}; t = 2 \text{ s}; \Delta\beta = 10^\circ$$

**Nach Drücken des Target-Knopfes:**

$$\beta = 60^\circ \uparrow; \beta = 0^\circ \downarrow$$

Die Zählrate kann dann in Abhängigkeit der Materialdicken bestimmt werden.

Mit Gleichung 5 wird danach der Extinktionskoeffizient  $\kappa$  bestimmt, indem man  $\ln(I_0/I) = f(d)$  graphisch aufträgt und damit  $\kappa$  aus der Steigung gewinnt.

## 6.2 Abhängigkeit des Schwächungskoeffizienten von der Ordnungszahl Z

Die Messung hat den gleichen Ablauf wie bei 6.1, nur daß anstelle eines Einsatzes mit gleichem Material hier ein Foliensatz unterschiedlicher Materialien mit konstanter Dicke  $d = 0,5 \text{ mm}$  verwendet wird.

Außer Gleichung 5 ist hier Gleichung 7 anzuwenden. Aus den Zählraten kann dann die Abhängigkeit von  $Z$  ermittelt werden.

Die Auftragung von  $\kappa/\rho$  über  $Z$  wird hier zweckmäßigerweise doppelt-logarithmisch vorgenommen, da sich dann die Potenz der  $Z$ -Abhängigkeit aus der Steigung der Geraden ergibt.

Material	Ordnungszahl $Z$	Dichte $\rho$ in $10^3\text{kg/m}^3$	Dicke in mm
Kohlenstoff (C) [Polystrol]	6	1.05	0.5
Aluminium (Al)	13	2.7	0.5
Eisen (Fe)	26	7.8	0.5
Kupfer (Cu)	29	8.9	0.5
Zirkonium (Zr)	40	7.1	0.5
Silber (Ag)	47	10.5	0.5

Tabelle 8: Ordnungszahlen und Dichten der Absorbermaterialien