

Röntgenstrahlung und radioaktive Strahlung haben als gemeinsame Eigenschaft ihre ionisierende Wirkung. In diesem Versuch stehen die Ionisationskammer und das Zählrohr als wichtige Nachweisgeräte für ionisierende Strahlung im Vordergrund.

1. Theoretische Grundlagen

1.1 Röntgenstrahlung

Röntgenstrahlung entsteht beim Beschuss fester Materie mit schnellen Elektronen. Diese geben durch Wechselwirkung mit den Atomkernen und mit Elektronen kernnaher Schalen ihre kinetische Energie ganz oder teilweise ab. Nach der klassischen Elektrodynamik strahlen die Elektronen dabei elektromagnetische Wellen mit **kontinuierlichem Spektrum** ab. Dieser Anteil der Röntgenstrahlung wird als **Bremsstrahlung** bezeichnet.

Ein Röntgenquant maximaler Frequenz entsteht, wenn ein Elektron bei einem einzigen Stoß seine gesamte kinetische Energie verliert. Die Bremsstrahlung besitzt folglich eine obere Grenzfrequenz f_g , die gegeben ist durch die Spannung U_A , mit der die Elektronen beschleunigt wurden. Diesen Zusammenhang beschreibt das Duane-Huntsches-Gesetz:

$$E_{kin, Elektron} = E_{Röntgen, max}$$

$$e \cdot U_A = h \cdot f_g \quad (1)$$

Elementarladung $e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{ A} \cdot \text{s}$

Plancksches Wirkungsquantum $h = 6,6262 \cdot 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$

Einige der schnellen Elektronen lösen in der abbremsenden Materie aus den inneren Schalen der Atomhüllen Elektronen heraus. Die dabei entstehenden „Löcher“ werden von Elektronen aus äußeren Schalen unter Emission von Photonen wieder aufgefüllt. Wegen der diskreten Energien, die bei diesem Prozess auftreten, ist dem Bremspektrum ein **Linienpektrum** überlagert (**Bild1**). Da die Wellenlängen der Linien charakteristisch für das abbremsende Material sind, wird dieser Anteil der Röntgenstrahlung als charakteristische Strahlung bezeichnet.

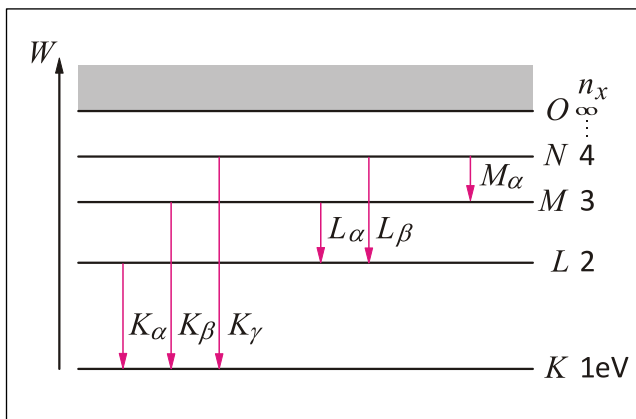


Bild1: Schematische Darstellung und Bezeichnung der Röntgenübergänge in einem Atom

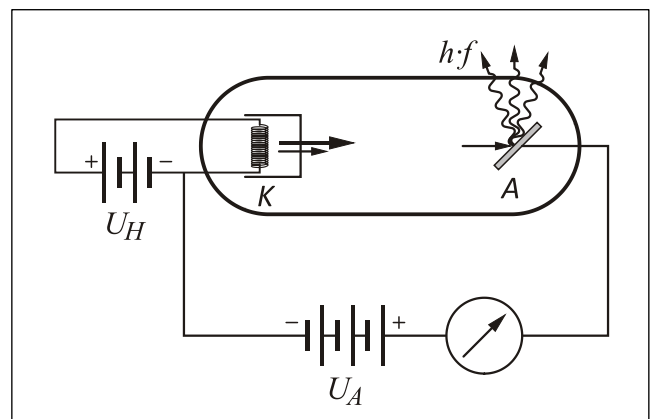


Bild2: Aufbau einer Röntgenröhre (K: Katode, A: Anode, U_H : Heizspannung, U_A : Beschleunigungsspannung)

Technisch wird Röntgenstrahlung mit Hochvakuum-Röntgenröhren erzeugt. Von einer Glühkatode treten Elektronen aus, die durch eine Hochspannung U_A auf eine massive Anode beschleunigt werden (**Bild 2**). Die Intensität der Strahlung einer Röntgenröhre kann durch den Heizstrom der Glühkatode reguliert werden, da eine Erhöhung des Heizstromes zu einem größeren Elektronen-Emissionsstrom an der Katode führt. Die Energie der auf die Anode treffenden Elektronen und damit das Spektrum der emittierten Röntgenstrahlung bleibt dabei praktisch unverändert, denn die thermische Energie ist um viele Größenordnungen kleiner als die kinetische Energie.

1.2 Dosimetrische Größen

Als Dosimetrie bezeichnet man das quantitative Erfassen der Wirkungen, die Röntgenstrahlung beim Durchgang durch Materie hervorruft und die zum Nachweis der Röntgenstrahlung genutzt werden können. Die Dosimetrie ist daher wichtig für medizinische und technische Anwendungen sowie für den Strahlenschutz. Sie stellt keine Messung der tatsächlichen Strahlungsstärke der Röntgenstrahlen dar. Hierzu wären z.B. kalorimetrische Messungen erforderlich, bei denen die gesamte Röntgenstrahlung absorbiert und in Wärme umgewandelt wird. Allerdings kann man aus Messungen von Dosis und Zeit nach entsprechender Kalibrierung auf die Strahlungsstärke schließen.

1.2.1 Strahlendosis und Strahlendosisleistung

Die Definition der Strahlendosis geht einerseits von der ionisierenden Wirkung und andererseits von der Energieabsorption der Röntgenstrahlung beim Durchgang durch Materie aus. Im ersten Fall wird die Ionendosis, im zweiten die Energiedosis erfasst.

Die ***Ionendosis***

$$J = \frac{dQ}{dm} \qquad 1 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1} = 1 \text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \qquad (2)$$

ist der Quotient aus der von Ladungsträgern eines Vorzeichens bei der Durchstrahlung von Luft erzeugten Ladung dQ und der Masse dm des durchstrahlten Volumenelements.

Die ***Energiedosis***

$$D = \frac{dW}{dm} \qquad 1 \text{ Gy} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \qquad (3)$$

ist der Quotient aus der von dem durchstrahlten Stoff absorbierten Energie dW und der Masse dm es durchstrahlten Volumenelements. Ihre abgeleitete SI-Einheit ist das Gray (Gy).

Die wirksame Intensität der Röntgenstrahlen ist als Quotient aus Ionendosis und Zeit definiert und wird als ***Ionendosisleistung*** bezeichnet:

$$\dot{J} = \frac{dJ}{dt} \qquad (1 \text{ A} \cdot \text{kg}^{-1}). \qquad (4)$$

Die ***Energiedosisleistung*** ist der Quotient aus Energiedosis und Zeit. Sie ist:

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \qquad 1 \text{ Gy} \cdot \text{s}^{-1} = 1 \text{ W} \cdot \text{kg}^{-1} . \qquad (5)$$

1.2.2 Bestimmung der Ionendosisleistung

Die Messung der Ionendosisleistung kann in einem luftgefüllten Plattenkondensator durch Messung des Sättigungswerts des Ionisationsstroms I_C erfolgen. Dieser geben durch

$$I_C = \frac{dQ}{dt} ,$$

daher folgt aus Gleichung (2) und Gleichung (4):

$$\dot{J} = \frac{dI_C}{dm} \quad (6)$$

Da die Röntgenstrahlung sich divergent ausbreitet und in Luft geschwächt wird, ist die Ionendosisleistung $\dot{J}$ eine ortsabhängige Größe, deren Messung einen hohen Aufwand erfordern würde. Leichter messbar ist daher die mittlere Ionendosisleistung

$$\langle \dot{J} \rangle = \frac{dI_C}{dm} , \quad (7)$$

für die der gesamte Ionisationsstrom I_C und die Masse $m = \rho \cdot V$ des gesamten durchstrahlten Volumens V zu bestimmen sind. Die Luftdichte ρ_L ergibt sich dabei gemäß:

$$\rho_L = \rho_0 \cdot \frac{T_0}{T} \cdot \frac{p_L}{p_0} \quad (8)$$

mit $\rho_0 = 1,293 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$, $T_0 = 273 \text{ K}$ und $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ aus der im Experimentierraum herrschenden Temperatur T und dem Luftdruck p_L . Das Volumen V lässt sich mit Hilfe des in von **Bild 3** dargestellten Prinzips berechnen.

1.2.3 Berechnung des durchstrahlten Volumens V

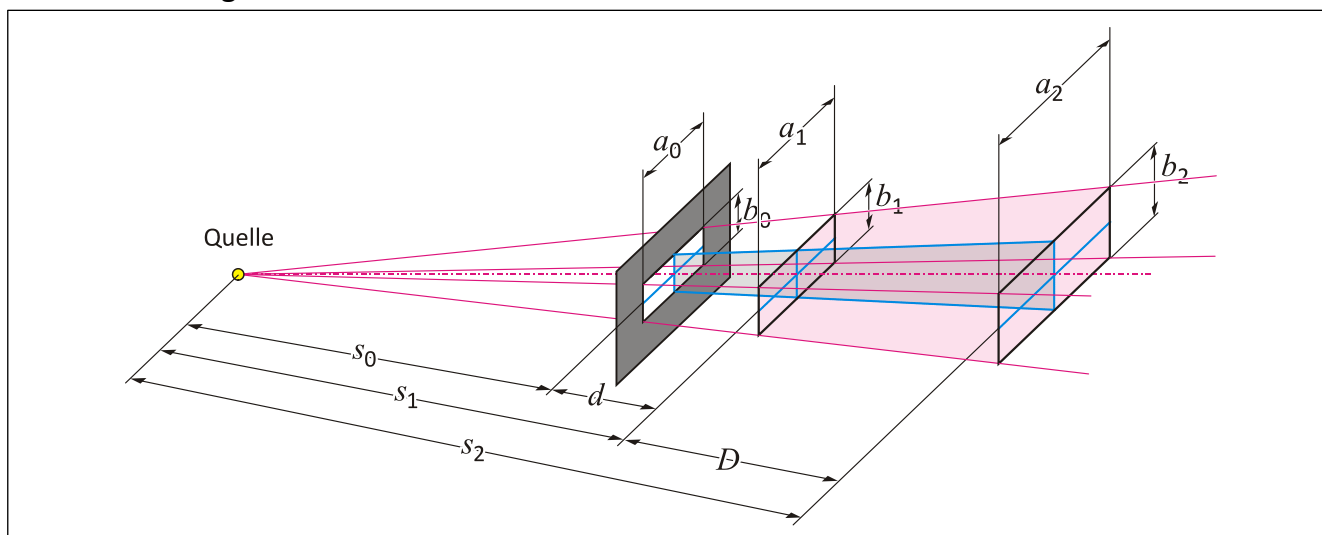


Bild 3: Darstellung des Strahlengangs im Plattenkondensator zur Berechnung des durchstrahlten Volumens V

Im **Bild 3** ist der Brennfleck der Röntgenröhre in guter Näherung als punktförmig angenommen. Durch die Rechteckblende vor dem Plattenkondensator wird aus dem Strahlenkegel der Röntgenröhre ein Bündel ausgeblendet, welches das zu berechnende Luftvolumen V im Kondensator durchdringt.

Die sich geradlinig ausbreitende Röntgenstrahlung leuchtet hinter der Blende in einem beliebigen Abstand s zum Brennfleck ein Rechteck aus mit den Abmessungen $a(s)$ und $b(s)$.

Es ergibt sich:

$$a(s) = \frac{s}{s_0} \cdot a_0 \quad \text{und} \quad b(s) = \frac{s}{s_0} \cdot b_0$$

Das durchstrahlte Luftvolumen V im Plattenkondensator entspricht daher dem Integral

$$V = \int_{s_1}^{s_2} a(s) \cdot b(s) \cdot ds \quad (9)$$

2. Versuch

2.1 Vorbetrachtung

Aufgabe: Das durchstrahlte Volumen V eines Plattenkondensators ist entscheidend für die Bestimmung der Ionendosisleistung (siehe Punkt 1.2.3). Die Abmessungen der Blende betragen $a_0=45 \text{ mm}$ und $b_0=6 \text{ mm}$ sowie die Entfernung des Brennflecks zur Rechteckblende $s_0=147 \text{ mm}$. Nach Gl. (9) entspricht das Integral mit den Grenzen $s_1 = s_0 + d$ und $s_2 = s_0 + d + D$ (Abstand zwischen Blende und Plattenkondensator $d=2,5 \text{ cm}$, Länge des Plattenkondensators $D=16,0 \text{ cm}$).

Somit erhält man:

$$V = \frac{1}{3} \cdot \frac{a_0 \cdot b_0}{s_0^2} \cdot (s_2^3 - s_1^3). \quad (10)$$

2.2 Versuchsdurchführung

2.2.1 Verwendete Geräte

Schülerröntgengerät mit Mo-Röntgenröhre, Ionisationskammer (Plattenkondensator), I-Messverstärker, Kleinstelltransformator, 3 Vielfachmessgeräte.

2.2.2 Versuchshinweise

Im **Bild 4** ist die Prinzipskizze des Versuchsaufbaus dargestellt.

- Machen Sie sich zunächst mit der Bedienungsanleitung des Röntgengerätes vertraut.
- Schalten Sie das Röntgengerät ein und nehmen Sie die Einstellungen am Bedienfeld des Röntgengerätes vor (siehe **Aufgaben 1a bis 1c**).
- Der Plattenkondensator ist in der Probenkammer des Röntgengerätes positioniert und wurde bereits ausgerichtet. Die Anschlussleitungen wurden über den Versorgungsschacht des Röntgengerätes herausgeführt und müssen wie folgt angeschlossen werden.

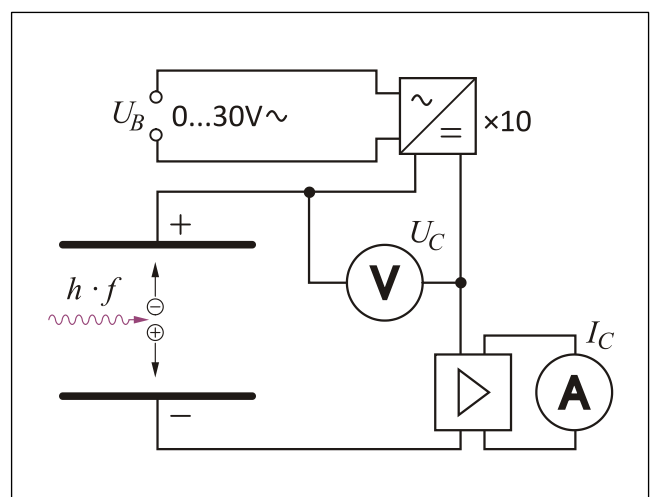


Bild 4: Versuchsaufbau

Anschlussbelegung

- Verbinden Sie die Laborkabel für die Betriebsspannung U_B mit dem AC-Ausgang des Stelltransformators.
- Schließen Sie die Messbox für die Kondensatorspannung U_C mit den Sicherheitslaborkabeln an eines der Digitalmultimeter an.
- Verbinden Sie das BNC-Kabel für den Ionisationsstrom I_C mit dem Stromeingang des Messverstärkers und legen Sie an den Spannungsausgang des Messverstärkers das zweite Digitalmultimeter an (*Spannungseingang und Spannungsmessbereich benutzen*).
- Schalten Sie die Betriebsspannung U_B am Stelltransformator ein.

Aufgabe 1: Untersuchung der Abhängigkeiten zwischen Ionisationsstrom I_C , Kondensatorspannung U_C und Hochspannung U_A einer Molybdänröntgenröhre

a) Ionisationsstrom I_C in Abhängigkeit von der Kondensatorspannung U_C

- Stellen Sie die Hochspannung ($U_A=35\text{ kV}$) und den Emissionsstrom ($I_{em}=1\text{ mA}$) ein.
- Schalten Sie das Gerät mit dem Taster **HV on/off** ein.
- Erhöhen Sie am Stelltransformator schrittweise die Kondensatorspannung U_C , welche am Multimeter angezeigt wird.

Einstellungen:

bei $U_C=(0 \dots 200)\text{ V}$ in Schrittweiten von 20 V
 bei $U_C=(200 \dots 300)\text{ V}$ in Schrittweiten von 50 V

- Notieren Sie sich alle relevanten Werte.
- Wiederholen Sie die Messungen bei einer Hochspannung von $U_A=(30, 25, 20, 15)\text{ kV}$.

b) Ionisationsstrom I_C bei Sättigung in Abhängigkeit vom Emissionsstrom I_{em}

- Stellen Sie die Hochspannung ($U_A=35\text{ kV}$) und eine Kondensatorspannung ($U_C=140\text{ V}$) ein. Der Sättigungswert des Ionisationsstromes I_C sollte hierbei erreicht sein.
- Erhöhen Sie den Emissionsstrom $I_{em}=(0 \dots 1)\text{ mA}$ in **0,1 mA-Schritten**.

c) Ionisationsstrom I_C bei Sättigung in Abhängigkeit von der Hochspannung U_A

- Stellen Sie den Emissionsstrom ($I_{em}=1\text{ mA}$) und eine Kondensatorspannung ($U_C=140\text{ V}$) ein.
- Erhöhen Sie die Hochspannung $U_A=(5 \dots 35)\text{ kV}$ in **5 kV-Schritten**.

Aufgabe 2: Bestimmung der Ionen- und die Energiedosisleistung

- Notieren Sie sich den Luftdruck p_L und die Raumtemperatur ϑ_{RT} .

2.3 Versuchsauswertung

Aufgabe 1: Untersuchung der Abhängigkeiten zwischen Ionisationsstrom I_C , Kondensatorspannung U_C und Hochspannung U_A

a) Ionisationsstrom I_C in Abhängigkeit von der Kondensatorspannung U_C

- Stellen Sie die Funktion $I_C = f(U_C)$ mit U_A als Parameter graphisch dar. Zeichnen Sie die Regressionskurven ein und bestimmen Sie den Sättigungsbereich.

- b) Ionisationsstrom I_C bei Sättigung in Abhängigkeit vom Emissionsstrom I_{em}
- Stellen Sie die Funktion $I_C = f(I_{em})$ graphisch dar und zeichnen Sie die Regressionsgrade ein. Bestimmen Sie den Anstieg des Graphen.
- c) Ionisationsstrom I_C bei Sättigung in Abhängigkeit von der Hochspannung U_A
- Stellen Sie die Funktion $I_C = f(U_A)$ graphisch dar. Zeichnen Sie die Regressionskurven ein.
 - Bringen Sie die einzelnen Kennlinien in Zusammenhang und diskutieren Sie die Ergebnisse.

Aufgabe 2: Bestimmung der Ionen- und die Energiedosisleistung

- a) Bestimmung der Ionendosisleistung $\langle \dot{J} \rangle$
- Berechnen Sie die mittlere Ionendosisleistung $\langle \dot{J} \rangle$ nach Gl (7) unter Verwendung der Messergebnisse aus den **Aufgaben 1b** und **1c**.
- b) Ionendosisleistung $\langle \dot{J} \rangle$ in Abhängigkeit vom Emissionsstrom I_{em}
- Stellen Sie die Funktion $\langle \dot{J} \rangle = f(I_{em})$ graphisch dar und zeichnen Sie die Regressionsgrade ein und bestimmen Sie den Anstieg des Graphen.
- c) Ionendosisleistung $\langle \dot{J} \rangle$ in Abhängigkeit von der Röhrenhochspannung U_A
- Stellen Sie die Funktion $\langle \dot{J} \rangle = f(U_A)$ graphisch dar.
- d) Bestimmung der maximalen Energiedosisleistung $\dot{D}$
- Berechnen Sie die maximal auftretende Energiedosisleistung $\dot{D}$ in $\mu\text{Sv/s}$ und Sv/h .
 - Interpretieren Sie die Kennlinien (zu **2b** und **2c**) und diskutieren Sie die Ergebnisse (zu **2a** und **2d**).

3. Ergänzung

Die Leistung der emittierten Röntgenstrahlung ist sehr viel kleiner als die Leistung $U_A \cdot I_{em}$ des Elektronenstromes. Ein großer Teil der aufgewendeten Energie heizt die Anode sehr stark auf. Das Anodenmaterial muss deshalb eine hohe Wärmeleitfähigkeit und eine hohe Schmelztemperatur besitzen. Daher sollte Kupfer oder Wolfram als Anodenmaterial verwendet werden.

Neben der Ionendosis J und der Energiedosis D ist auch noch die Organdosis $H_{T,R}$ von Bedeutung.

$$H_{T,R} = D_{T,R} \cdot w_R \qquad 1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$$

Die Organdosis $H_{T,R}$ ist das Produkt aus der Energiedosis D und dem Strahlungswichtungsfaktor w_R (Die Indizes T und R stehen für **T**issue = Gewebe und **R**adiation = Strahlungsart). Sie dient dazu, die Wirkung einer Strahlenquelle auf ein Gewebe bewerten zu können.

Eine Strahlung mit einer bestimmten Dosis ruft im Gewebe die gleiche biologische Wirkung hervor wie eine harte Röntgenstrahlung ($U_A=200 \text{ kV}$) mit der entsprechenden Energiedosis. Bei Röntgen- und γ -Strahlung stimmen Energiedosis D und Organdosis $H_{T,R}$ überein, weil der Wichtungsfaktor $w_R=1$ ist (siehe *Strahlenschutzheft*). Die Energiedosis D wird in Gy und die Organdosis $H_{T,R}$ in Sv gemessen.

Für die Ionendosis J gilt die Umrechnung: $1 \text{ Sv} = 0,0308 \text{ As} \cdot \text{kg}^{-1}$. So ist die Energiedosisleistung

$$\dot{D} = \frac{\langle \dot{J} \rangle}{0,0308 \text{ A} \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1}} \quad .$$