

# Röntgendosimetrie (Artikelnr.: P2541805)

## Curriculare Themenzuordnung



### Schwierigkeitsgrad



Schwer

### Vorbereitungszeit



1 Stunde

### Durchführungszeit



2 Stunden

### empfohlene Gruppengröße



2 Schüler/Studenten

### Zusätzlich wird benötigt:

### Versuchsvarianten:

- Hinweis: Dieser Versuch kann alternativ auch mit einer Kupfer-, Molybdän- oder Eisen-Röntgenröhre durchgeführt werden (09057-50, 09057-60, 09057-70).

### Schlagwörter:

Röntgenstrahlung, Ionisierungsenergie, Energiedosis, Äquivalentdosis, Ionendosis, Ortsdosis, Dosisraten, Qualitätsfaktor, quadratisches Abstandsgesetz, Dosimeter

## Einführung

## Kurzbeschreibung

### Prinzip

Dosimetrie ist ein Teilbereich der medizinischen Physik und beschäftigt sich mit der Ermittlung und Berechnung von Strahlendosen, die auch für Strahlenschutzbestimmungen von zentraler Bedeutung sind. Im Versuch wird das Messprinzip verdeutlicht und die verschiedenen Einheiten Energiedosis, Äquivalentdosis oder Energiedosisrate erläutert. In einem Plattenkondensator wird ein Luftvolumen mit Röntgenstrahlung bestrahlt. Aus dem erzeugten Ionenstrom ermittelt man die dosimetrischen Daten.

Dieser Versuch ist in dem Erweiterungsset „XRD 4.0 X-ray Dosimetrie, Strahlenschädigung“ enthalten.



Abb. 1: Versuchsaufbau (zeigt alten Gleichstrommessverstärker anstelle Messverstärker universal)

## Material

Position	Material	Bestellnr.	Menge
1	XR 4.0 expert unit Röntgengerät, 35 kV	09057-99	1
2	XR 4.0 X-ray Einschub mit Wolfram-Röntgenröhre	09057-81	1
3	XR 4.0 X-ray Plattenkondensator für Röntgengerät	09058-05	1
4	PHYWE Netzgerät, geregelt DC: 0...12 V, 0,5 A; 0...650 V, 50 mA / AC: 6,3 V, 2 A	13672-93	1
5	PHYWE Messverstärker universal	13626-93	1
6	Digitalmultimeter 2005	07129-00	2
7	Widerstand mit 4-mm-Stecker und Buchse, 50 MOhm	07159-00	1
8	Schichtwiderstand 100 kOhm, 1 W, G1	39104-41	1
9	Adapter, BNC-Stecker/4 mm-Buchsenpaar	07542-26	1
10	Verbindungsleitung, 32 A, 100 mm, blau	07359-04	2
11	Verbindungsleitung, 32 A, 500 mm, rot	07361-01	2
12	Verbindungsleitung, 32 A, 500 mm, blau	07361-04	2
13	Verbindungsleitung, 32 A, 750 mm, rot	07362-01	2
14	Verbindungsleitung, 32 A, 250 mm, blau	07360-04	2
15	Verbindungsleitung, 32 A, 250 mm, rot	07360-01	1
16	XR 4.0 X-ray Fluoreszenzschirm	09057-26	1
17	XR 4.0 X-ray Plattenkondensatorhalter	09057-05	1
18	XR 4.0 X-ray Optische Bank	09057-18	1
19	Reiter für optische Bank expert	08286-00	1
20	XR 4.0 X-ray Blendentubus d = 2 mm	09057-02	1
21	XR 4.0 X-ray Blendentubus d = 5 mm	09057-03	1

## Aufgabe

- Bestimmen Sie das ionisierte Luftvolumen im Kondensator.
- Bestimmen Sie den Ionenstrom als Funktion der Kondensatorspannung für zwei Blendentuben mit unterschiedlichen Lochdurchmessern. Berechnen Sie aus dem Ionensättigungsstrom und dem bestrahlten Luftvolumen die Ionendosis und die Energiedosisrate.
- Messen Sie die Ionenströme  $I_c$  für verschiedene Anodenströme  $I_A$  mit maximaler Anoden- und Kondensatorspannung.
- Bestimmen Sie die Ionenströme  $I_c$  für verschiedene Anodenspannungen  $U_A$  mit maximalem Anodenstrom und maximaler Kondensatorspannung.

## Aufbau und Durchführung

### Aufbau

Die Verschaltung der elektrischen Komponenten zeigt Abb. 2-4. Eine schematische Zeichnung zeigt Abb. 6. Ein Digitalvoltmeter dient zur Bestimmung der Kondensatorspannung  $U_c$ , das andere wird mit dem Messausgang des Verstärkers verbunden. Für Kondensatorspannungen  $U_c > 300$  V werden die entsprechenden Ausgänge des Netzgerätes in Se-rie geschaltet (siehe Abb. 4a und 4 b).



Abb. 2: Verschaltung der elektrischen Komponenten



Abb. 3: Anschluss des Röntgengeräts

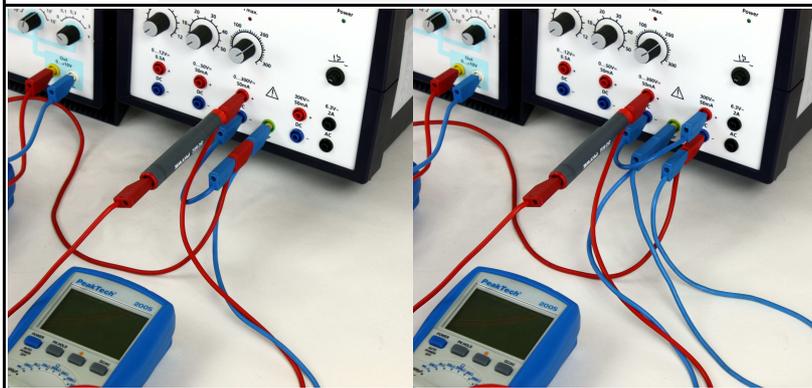


Abb. 4a: Detailbild Verkabelung am Netzgerät bis 300 V; Abb. 4b: Reihenschaltung für Messungen bis zu 600 V



Abb. 5: Aufbau und Verkabelung des Plattenkondensators im Experimentierraum

Die Kondensatorplatten werden in die entsprechenden Buchsen des Adapters gesteckt. Dann wird dieser mit zwei 25 cm langen Kabeln mit den Buchsen im Experimentierraum verbunden. Die Kabel dürfen sich nicht berühren (Abb. 5)! An der äußeren Anschlussleiste des Röntgengeräts wird der positive (rote) Ausgang aus Sicherheitsgründen mit dem positiven Spannungsausgang des Netzgerätes nur über den 50-M $\Omega$ -Widerstand verbunden. Der andere wird mit dem Messverstärker über den BNC-Adapter verbunden, an den Messeingang wird parallel der 100-k $\Omega$ -Messwiderstand angeschlossen (siehe Abb. 1 und 3).

Der Messverstärker wird auf die Betriebsart „Electrometer“, den Verstärkungsfaktor  $10^3$  und die Zeitkonstante 0 s eingestellt. Das Multimeter wird in der Messart DC auf einen Messbereich von 2 V eingestellt.

Bei maximaler Kondensatorspannung und ohne Betrieb der Röntgenröhre sollte kein Strom zu messen sein (eventuell mit Nullsteller am Verstärker nachregeln). In dieser Einstellung entspricht eine gemessene Spannung von 0,1 V einem Strom von 1 nA (mit Messwiderstand von 100 k $\Omega$ ):

$$I_c = \frac{U_{\text{Sig}}}{V \cdot R}$$

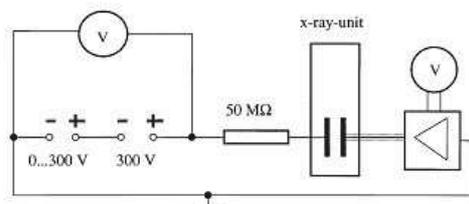


Abb. 6: Schematische Schaltskizze zur Bestimmung der Ionenströme



## Theorie und Auswertung

### Theorie

Trifft ionisierende Strahlung auf ein Massenelement  $\delta m$ , so wird ein Teil der Strahlungsenergie  $\Delta E$  absorbiert. Das Verhältnis aus absorbierter Energie zur absorbierenden Masse heißt Energiedosis  $D$ .

$$D = \Delta E / \Delta m \quad (1)$$

Die SI-Einheit der Energiedosis ist das Gray (Gy) [ $1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$ ]. Verschiedene Strahlungsarten mit gleicher Energiedosis haben gleiche physikalische, aber unterschiedliche biologische Wirkung. Um auch hier eine Vergleichbarkeit erzielen zu können, ist mit Berücksichtigung eines sog. Qualitätsfaktors  $Q$  die Äquivalentdosis  $H$  eingeführt worden.

$$H = D \cdot Q \quad (2)$$

Die Einheit der Äquivalentdosis ist das Sievert (Sv) [ $1 \text{ Sv} = 1 \text{ J kg}^{-1}$ ].

Da die Wirkungszeit ionisierender Strahlung eine erhebliche Rolle bei der Beurteilung z. B. von Strahlenschäden spielt, wurde noch die Ionendosisrate  $P$  eingeführt. Für die Energiedosisrate, die von der Äquivalentdosisrate zu unterscheiden ist, gilt:

$$P = dD/dt \quad (3)$$

Die entsprechende SI-Einheit ist:  $1 \text{ Gy s}^{-1} = 1 \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1}$

Da die Messung der absorbierten Energie nicht einfach ist, misst man die in einem Luftvolumen durch Strahlung erzeugten Ionen. Hierzu definiert man die Ionendosis  $I$  als Quotienten aus erzeugter Ladung  $\Delta Q$  gleichen Vorzeichens und der Masse  $\Delta m$  eines Luftvolumenelements  $\Delta V$  unter Normalbedingungen.

$$I = dQ/dm [\text{As kg}^{-1}] \quad (4)$$

Für die entsprechenden Ionendosisrate  $j$  gilt:

$$j = \frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{dQ}{dm} \right) = \frac{di}{dm} [\text{A kg}^{-1}] \quad (5)$$

#### Messprinzip:

Durch die Röntgenstrahlung wird im Kondensator bei angelegter Spannung ein Strom erzeugt. Der Messverstärker misst die über den Eingangswiderstand abfallende Spannung und verstärkt die in ein proportionales Spannungssignal  $U_{\text{Sig}}$ . Dieses wird durch das angeschlossene digitale Messinstrument angezeigt. Die Umrechnung erfolgt abhängig vom Eingangswiderstand wie folgt:

$$I_c = \frac{U_{\text{Sig}}}{V \cdot R} = \frac{U_{\text{Sig}}}{10^3 \cdot 100 \text{ k}\Omega} = \frac{U_{\text{Sig}}}{10^8 \Omega}$$

## Aufgabe 1

Bestimmen Sie das ionisierte Luftvolumen im Kondensator.

Die von der Anode  $T$  der Röntgenröhre ausgehende Strahlung (s. Abb. 7) wird von einem Blendentubus mit dem Lochdurchmesser  $d$  begrenzt und bestrahlt kegelförmig ein Luftvolumen des Plattenkondensators. Das bestrahlte Luftvolumen ergibt sich aus Abb. 7:

$$V = \frac{\pi(x_2 - x_1)}{3} \cdot (R^2 + rR + r^2) \quad (6)$$

mit den Radien

$$r = \frac{x_1 \cdot d}{x_0} ; R = \frac{x_2 \cdot d}{x_0} \quad (7)$$

$x_0$  kann mit Hilfe der Strahlensätze aus dem in Aufgabe 1 gemessenen Durchmesser der zugehörigen Leuchtbilder ermittelt werden.

Der Mittelwert ist in unserem Fall:

$$\begin{aligned} x_0 &= 6,65 \text{ cm} \\ x_1 &= 12,95 \text{ cm} \\ x_2 &= 20,85 \text{ cm} \end{aligned}$$

Für  $d = 2 \text{ mm}$  (2-mm-Blende) ergibt sich:

$$\begin{aligned} r &= 0,39 \text{ cm} \\ R &= 0,63 \text{ cm} \\ V &= 6,57 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

Für  $d = 5 \text{ mm}$  (5-mm-Blende) ergibt sich:

$$\begin{aligned} r &= 0,97 \text{ cm} \\ R &= 1,57 \text{ cm} \\ V &= 40,76 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

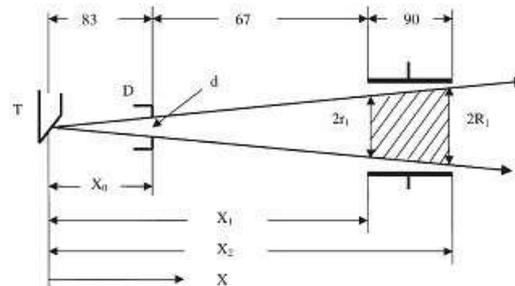


Abb. 7: Schematische Darstellung der Strahlgeometrie zur Bestimmung des bestrahlten Luftvolumens (Angaben in mm)

## Aufgabe 2

Mit maximalen Werten von Anodenspannung und Anodenstrom ist der Ionenstrom als Funktion der Kondensatorspannung zu bestimmen. Die Messreihen sind für zwei Blendentuben mit unterschiedlichen Lochdurchmessern durchzuführen.

In Abb. 8 ist der Kondensatorstrom  $I_c$  als Funktion der Kondensatorspannung  $U_c$  für zwei verschiedene durchstrahlte Volumina eingetragen.

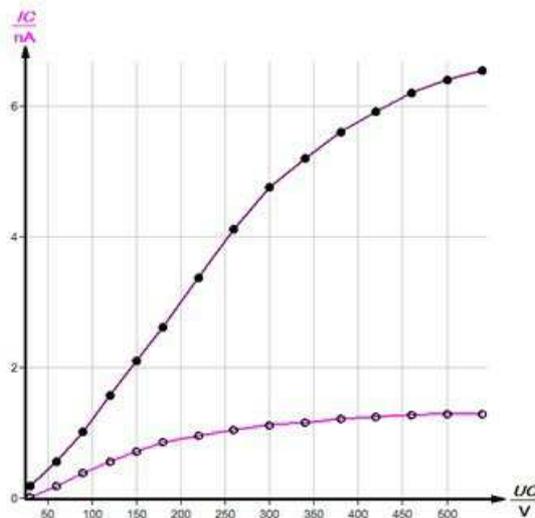


Abb. 8: Ionisationsstrom  $I_c$  als Funktion der Kondensatorspannung  $U_c$ . Röntgenröhre:  $U_A=35$  kV,  $I_A=1$  mA; Kurve A: Blendentubus  $d=5$  mm, Kurve B: Blendentubus  $d=2$  mm

### Berechnung der Ionendosis

Um die Ionendosisrate von Röntgenstrahlen bestimmen zu können, wird das von einem Plattenkondensator eingeschlossene Luftvolumen bestrahlt. Die erzeugten Elektronen und positiven Ionen liefern am Kondensator einen Strom, der mit steigender Saugspannung allmählich wächst und schließlich in den Sättigungsbereich geht, wo alle erzeugten Ladungsträger zum Strom beitragen.

Aus den aus Abb. 8 resultierenden Sättigungsströmen (für Kurve A ergibt sich durch Extrapolation ein Sättigungsstrom von  $6,7$  nA) erhält man mit (5) unter Einbeziehung der Werte aus Aufgabe 1 folgende Werte für die Ionendosisrate:

$$d = 0,5 \text{ cm} : j_m = \frac{I_{c, \text{Sättigung}}}{m_{\text{Luft}}} = \frac{I_{c, \text{Sättigung}}}{\rho_{\text{Luft}} \cdot V} = \frac{6,7 \cdot 10^{-9} \text{ A}}{1,2 \cdot 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{cm}^3} \cdot 40,76 \text{ cm}^3} = 1,4 \cdot 10^{-5} \text{ A kg}^{-1} \quad (8)$$

$$d = 0,2 \text{ cm} : j_m = \frac{1,29 \cdot 10^{-9}}{1,2 \cdot 10^{-6} \cdot 6,57} \text{ A kg}^{-1} = 1,6 \cdot 10^{-5} \text{ A kg}^{-1}$$

(Dichte der Luft bei  $20^\circ\text{C}$  und  $1013$  hPa:  $\rho = 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ kg cm}^{-3}$ ).

### Bestimmung der Energiedosisrate

Dividiert man den Mittelwert der oben bestimmten Ionendosisraten durch die Elementarladung  $e$ , so erhält man die pro Zeit- und Masseneinheit erzeugte Ionenanzahl  $n$ . Die Ionisierungsenergie  $\Phi$  eines Luftmoleküls beträgt  $\Phi \approx 33 \text{ eV} = 52,8 \cdot 10^{-19} \text{ J}$ . Mit (1) und (3) ergibt sich mit dem Mittelwert aus den oben errechneten Werten für  $j$  die auf die Zeit- und Masseneinheit bezogene mittlere Energiedosisrate:

$$P_m = \frac{D}{t} = \frac{W}{m \cdot t} = n \cdot \Phi = \frac{j \cdot \Phi}{e} = \frac{1,5 \cdot 10^{-5} \cdot 52,8 \cdot 10^{-19}}{1,6 \cdot 10^{-19}} \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1} = 4,95 \cdot 10^{-4} \text{ J kg}^{-1} \text{ s}^{-1} \quad (9)$$

### Aufgabe 3

Für verschiedene Anodenströme  $I_A$  sind mit maximaler Anoden- und Kondensatorspannung die entsprechenden Ionenströme  $I_c$  zu messen. Der Funktionsverlauf  $I_c = f(I_A)$  ist zu zeichnen.

Abb. 9 zeigt den linearen Verlauf des Ionisationsstroms als Funktion des Anodenstroms ( $U_A = \text{konst.}$  und  $U_c = \text{konst.}$ )

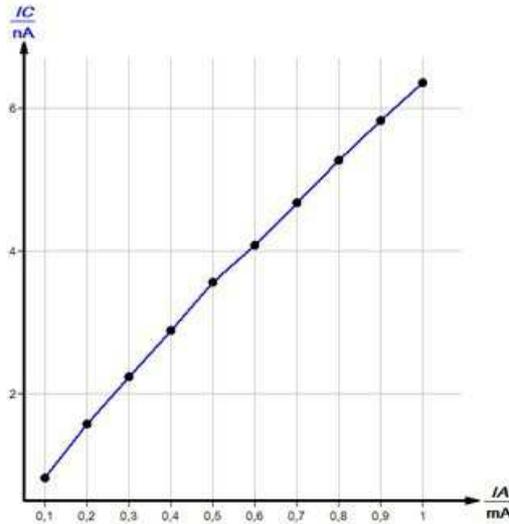


Abb. 9: Ionisationstrom  $I_c$  als Funktion des Anodenstroms  $I_A$ . Anodenspannung  $U_A = 35 \text{ kV}$ , Kondensatorspannung  $U_c = 500 \text{ V}$ . Blendentubus  $d = 5 \text{ mm}$

### Aufgabe 4

Der Ionensättigungsstrom ist als Funktion der Anodenspannung zu bestimmen

Abb. 10 zeigt die Funktionsverläufe  $I_c = f(U_c)$  für verschiedene Anodenspannungen  $U_A$ . Die Extrapolation der Messkurve  $I_c = f(U_A)$  in Richtung kleiner  $U_A$ -Werte zeigt (Abb. 9), dass für  $U_A$

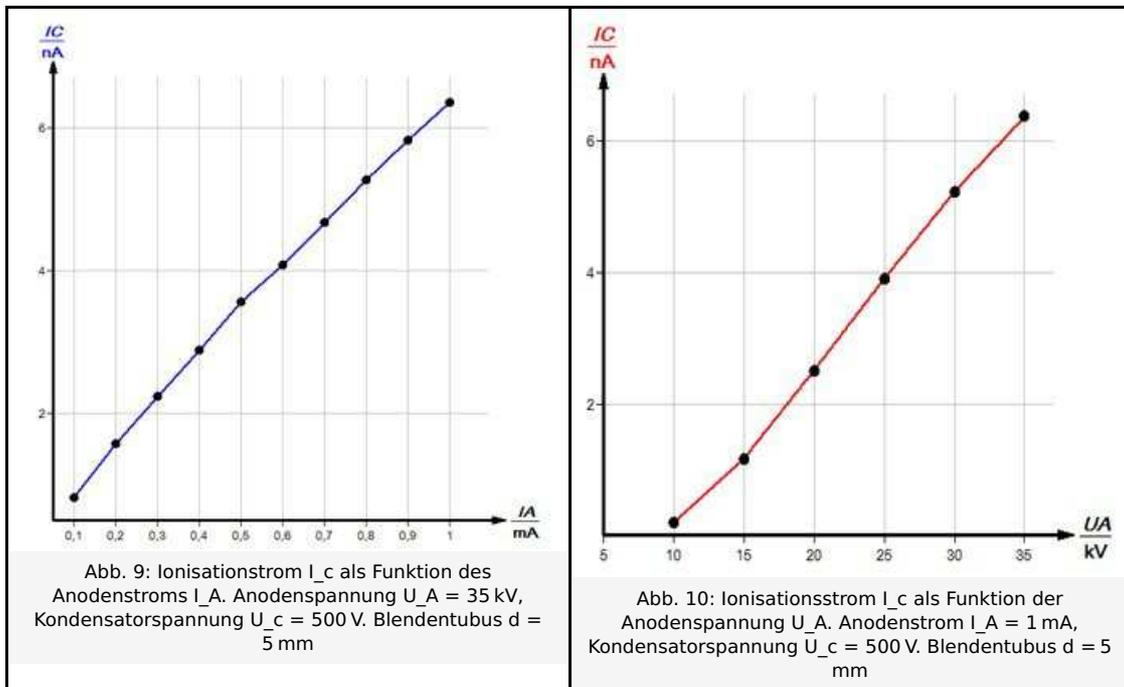


Abb. 9: Ionisationstrom  $I_c$  als Funktion des Anodenstroms  $I_A$ . Anodenspannung  $U_A = 35 \text{ kV}$ , Kondensatorspannung  $U_c = 500 \text{ V}$ . Blendentubus  $d = 5 \text{ mm}$

Abb. 10: Ionisationsstrom  $I_c$  als Funktion der Anodenspannung  $U_A$ . Anodenstrom  $I_A = 1 \text{ mA}$ , Kondensatorspannung  $U_c = 500 \text{ V}$ . Blendentubus  $d = 5 \text{ mm}$