Praktikum METE1

Autoren: Patrik Eschle <escl@zhaw.ch>, Christian Sommer <some@zhaw.ch>
Durchführung: Stephan Scheidegger <scst@zhaw.ch> und Christian Sommer
Version: HS 2019

Inhalt

V1 Versuch Röntgenanlage: Spannung, Strom, Dosis 2
V2 Versuch Abschirmung und Rückstreuung 6
V3 Versuch Aktivität und Dosis - Bestimmung der Dosisleistungskonstante 9
V4 Versuch Gamma-Spektroskopie 12

Versuch	***Wer***	***Raum***	***Thema***
V1	scst	TP404	Röntgenanlage: Spannung, Strom, Dosis
V2	some	TP212	Abschirmung und Rückstreuung
V3	scst	TP212	Aktivität und Dosis
V4	some	Lab TP105	Gamma-Spektroskopie

	HK1	HK2
SW 4, Do 10.10.2019, 10:00-11:35	V1	V3
SW 4, Do 10.10.2019, 10:00-11:35	V3	V1
SW 5, Do 17.10,2019, 10:00-11:35	V2	V4
SW 5, Do 17.10.2019, 10:00-11:35	V4	V2

In diesem Praktikum wenden Sie Kenntnisse an, die Ihnen in der Vorlesung METE1 zum Thema ionisierende Strahlung in der Medizin vermittelt wurden. Die Versuche dauern je eine Lektion (45 Minuten), danach wechseln die Gruppen. Die Versuche werden direkt in dieser Anleitung gelöst und sind nach Ende der Lektion abgeschlossen.

Die Vorlesung wird von Stephan Scheidegger (scst@zhaw.ch) gehalten. Das Praktikum wird von Stephan Scheidegger und Christian Sommer (some@zhaw.ch) durchgeführt.

V1 Versuch Röntgenanlage: Spannung, Strom, Dosis

1.1 Aufgabe

Lesen und verstehen Sie den Theorieteil und machen Sie sich mit den Geräten vertraut.

Bestimmen Sie die Abhängigkeit der Dosis als Funktion der Röhrenspannung und des Röhrenstroms. Vergleichen Sie ihr Ergebnis mit den theoretischen Überlegungen.

1.2 Theorie

1.2.1 Erzeugung von Röntgenstrahlung[1]

In einer Röntgenröhre werden Elektronen mit Hochspannung beschleunigt und prallen auf ein schweres Metall (in unserem Falle Wolfram (W)). Im Wolfram werden die Elektronen stark abgebremst und erzeugen dabei elektromagnetische Strahlung (Bremsstrahlung oder Röntgenstrahlung). Die erzeugten Photonen werden in einem weiten Energiebereich (von fast 0 bis zur Energie der Elektronen) und einem grossen Raumwinkel abgestrahlt.

Dieser Prozess ist ineffizient. Bei 100 kV Beschleunigungsspannung erzeugen nur rund 0.80 % der Elektronen ein Photon. Die Wahrscheinlichkeit nimmt mit der Spannung ab, bei 25 kV beträgt sie noch 0.22 %.

1.2.2 Einheit Elektronenvolt

Durchläuft ein Elektron mit Ladung q_e (q_e=1.602 10^{-19} Coulomb) eine Potentialdifferenz (Spannung zwischen zwei Metallplatten) U (Volt), wird es auf die kinetische Energie E (Joule) beschleunigt:

$$E = q_e U \tag{1}$$

Die Energie lässt sich einfacher in der Einheit Elektronenvolt (eV) ausdrücken: 1 eV = 1.602 10^{-19} J. Wird ein Elektron mit 15000 Volt beschleunigt, erhält es dadurch die k inetische Energie 15000 eV oder 15 keV.

1.2.3 Dosis und Strom

Jedes Elektron erzeugt beim Aufprall mit einer Wahrscheinlichkeit p ein Photon. N Elektronen erzeugen deshalb p*N Photonen. Der Strom der erzeugten Photonen (Anzahl Photonen pro Sekunde) ist proportional zum Strom der Elektronen (mA).

1.2.4 Dosis und Beschleunigungsspannung

An einer dicken Anode (dicker als die Reichweite der Elektronen im Material) ist die Zahl der abgestrahlten Photonen ungefähr proportional zum Quadrat der Spannung. Erhöht man die Beschleunigungsspannung z.B. von 15 kV auf 30 kV (Faktor 2), so vervierfacht sich die Zahl der Photonen. Der Zusammenhang mit der gemessenen Dosis ist komplex: Die Absorption ist hängt von der Energie ab, der genaue Zusammenhang lässt sich nur mit numerischer Berechnung feststellen.

[1]Die Darstellung folgt Hanno Krieger, Strahlungsquellen für Medizin und Technik, Springer Spektrum 2013

1.3 Material

Stellen Sie das Dosisleistungsmessgerät Cobia auf „W/3 mm“. Es startet und stoppt automatisch und zeigt Dosis (Gy), Dosisrate (Gy/s) und Zeit (s) an. Hochspannung und Anodenstrom können Sie direkt am Röntgengerät einstellen (Menu / x-ray parameters). Nutzen Sie die Gelegenheit, eine Röntgenröhre von nahe zu betrachten!

1.4 Messprotokoll

Messen Sie die Dosisrate für die gegebenen Spannungen und Ströme und tragen Sie die Werte in das Messprotokoll ein.

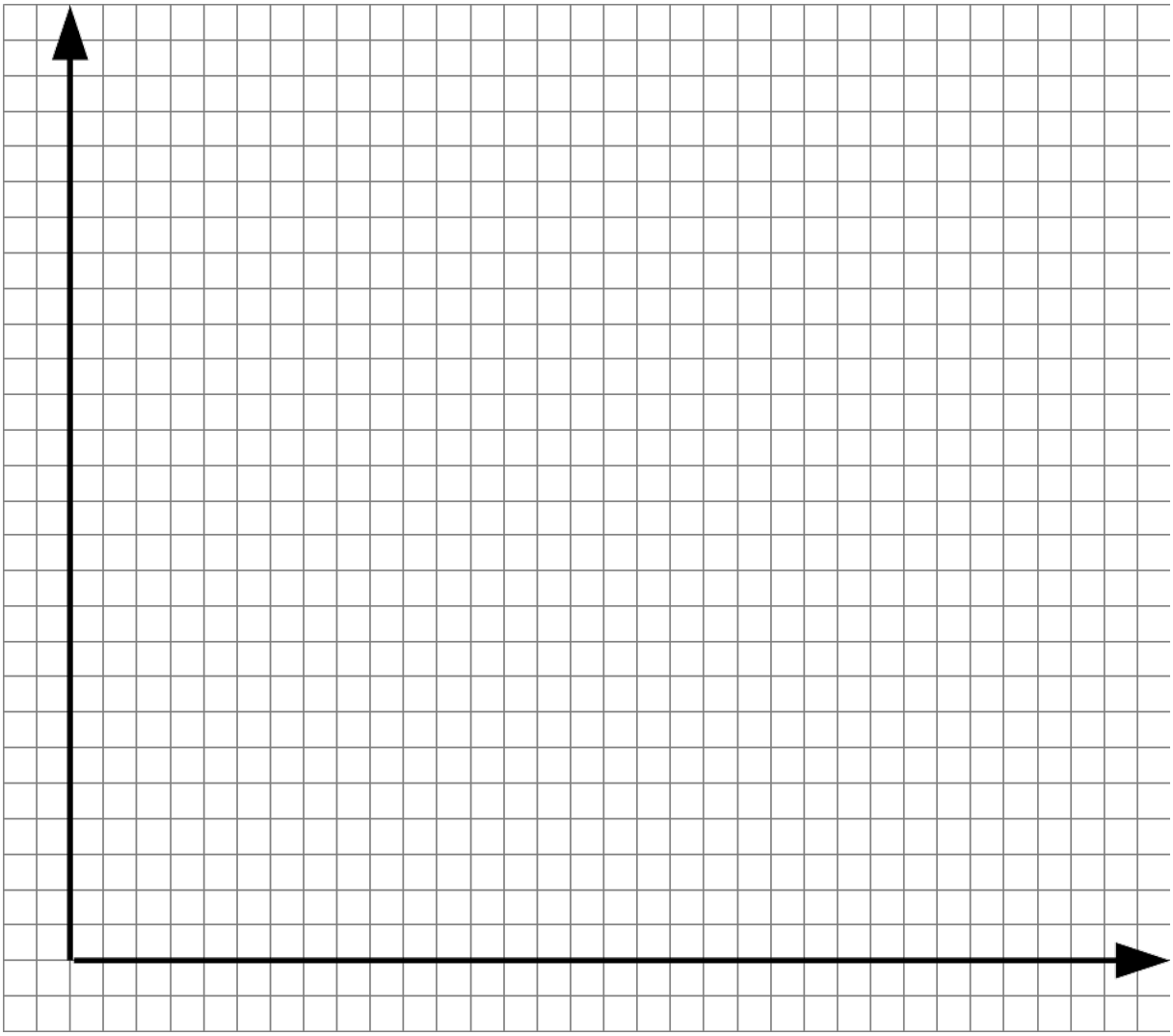
Spannung (kV)	***Strom (mA)***	***Dosisrate Cobia (µGy/s)***
20	0.20	
20	0.50	
20	0.80	
20	1.00	
25	0.50	
30	0.10	
30	0.30	
30	0.50	
30	0.90	
35	0.50	

1.5 Skizze

Skizzieren Sie die Versuchsanordnung. Achten Sie auf Abstände und Materialien.

1.6 Auswertung Strom und Dosis

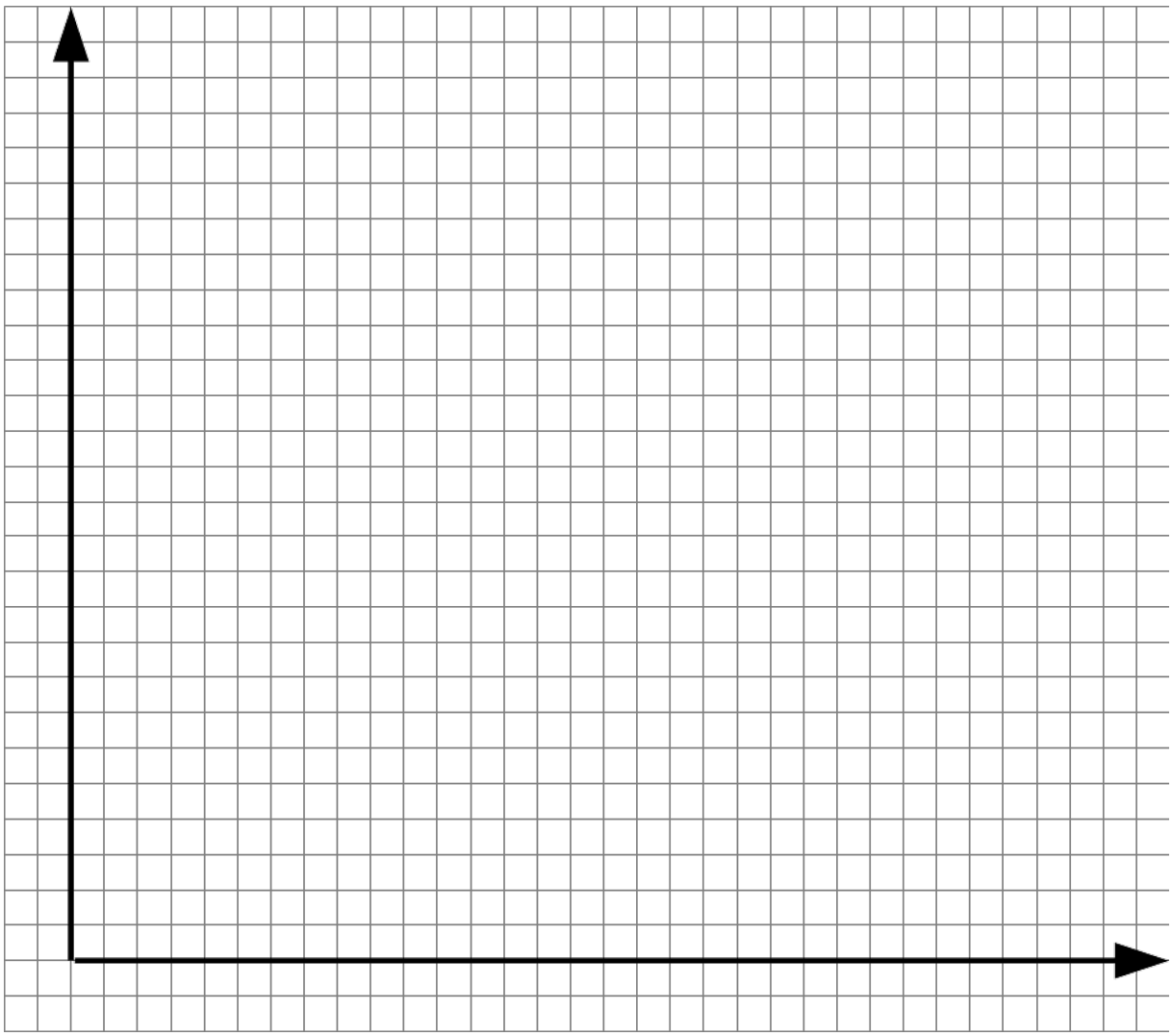
Tragen Sie die Dosis als Funktion des Stromes auf. Zeichnen Sie für die Spannungen 20 und 30 kV eine eigene Kurve. Passt eine Gerade durch die Punkte für jede Spannung?



Ihre Folgerung:	

1.7 Auswertung Spannung und Dosis

Tragen Sie für den Strom 0.50 mA die Dosis als Funktion der Spannung auf. Wie verläuft die Kurve? Ist sie eine Gerade oder eine Parabel? Geht sie durch null?



Ihre Folgerung:	

V2 Versuch Abschirmung und Rückstreuung

2.1 Aufgabe

Lesen und verstehen Sie den Theorieteil und machen Sie sich mit den Geräten vertraut. Messen Sie, wie stark verschiedene Materialien ionisierende Strahlung abschirmen und wie viel Strahlung von der Abschirmung reflektiert wird.

2.2 Theorie

Treffen monoenergetische Photonen (nur eine einzige Energie, kein Spektrum) auf ein Material, so wird in jeder dünnen Materialschicht der gleiche *Anteil* der Strahlung absorbiert oder gestreut. Die Intensität nimmt deshalb exponentiell mit der Absorberdicke ab:

$$\frac{I(x)}{I_0} = \exp(-\mu x) \tag{2}$$

Dabei ist I(x) die Intensität nach dem Absorber, I_0 die Intensität vor dem Absorber ($1/cm^2$), μ der lineare Schwächungskoeffizient (1/cm) und x die Absorberdicke (cm). In der Dosimetrie werden Längen in Zentimeter und Massen in Gramm gemessen.

Ein Teil der Photonen wird vom Absorber zurückgestreut. Die Theorie dazu sprengt den Rahmen dieses Praktikums, wir messen lediglich, welcher Anteil zurückgestreut wird.

2.3 Material

Wir verwenden als Strahlungsquelle das Cäsium-Isotop Cs-137. Es strahlt Photonen von 662 keV ab (die Einheit keV ist im Abschnitt *2 Einheit Elektronenvolt* erklärt). Als Absorber stehen Blei und Aluminiumplatten zur Verfügung. Wir messen die Zählrate mit einem Geiger-Müller-Zählrohr.

Achtung: Ionisierende Strahlung kann Schäden verursachen. Halten Sie deshalb Abstand von der Quelle, schrauben Sie die Quelle ausserhalb der Messung in den Bleiblock und setzen Sie sich so kurz wie möglich der Strahlung aus.

2.4 Messprotokoll Absorption

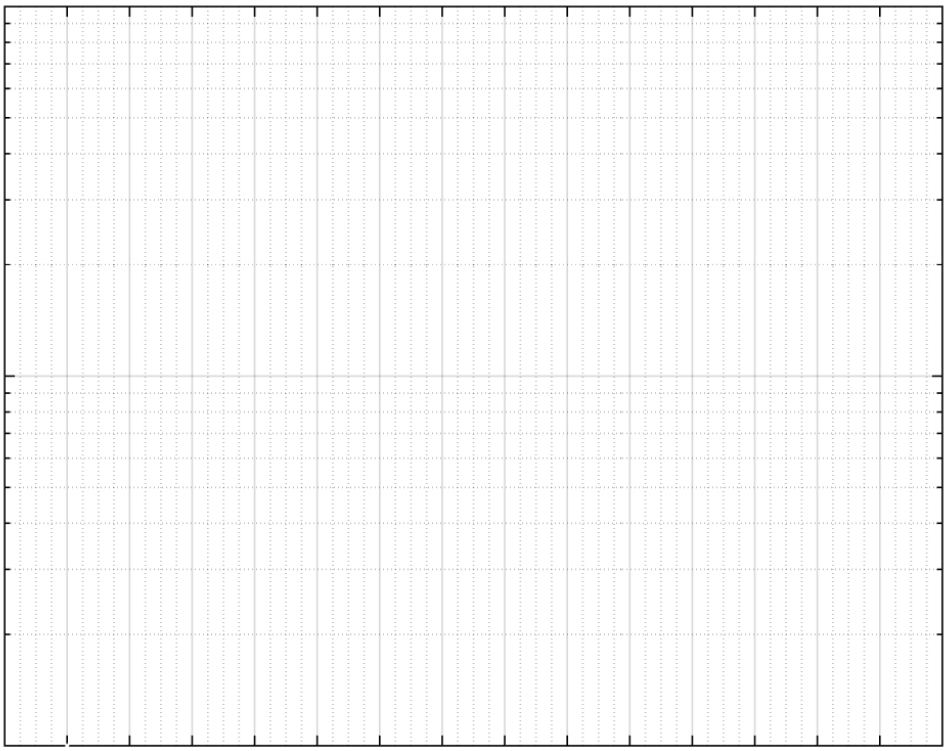
Messen Sie für 5 verschiedene Dicken der Abschirmung die Zählrate. Machen Sie eine Messung auch ohne Abschirmung (Dicke 0). Bestimmen Sie vor der Messung den Strahlungshintergrund, indem Sie das Gerät fern der Quelle zählen lassen.

Untergrund:	***Gemessene Counts [#]***	***Messdauer [s]***	***Counts per second [cps]***

Absorberdicke (cm)	***Gemessene Counts [#]***	***Messdauer [s]***	***Counts per second [cps]***	***cps minus Untergrund***

2.5 Auswertung Absorptionsmessung

- Tragen Sie in im halblogarithmischen Papier die Zählrate als Funktion der Absorberdicke auf. Weil wir einen exponentiellen Zusammenhang erwarten, ist es vorteilhaft, die Werte auf halblogarithmisches Papier aufzutragen.
- Bestimmen Sie graphisch die Dicke, bei der sich die Intensität halbiert (Halbwertsdicke).



2.6 Messprotokoll Rückstreuung

Entfernen Sie den Absorber und messen Sie die Zählrate am Ort des Absorbers. Setzen Sie dann den Absorber wieder ein und stellen Sie das Zählrohr unter 45 Grad *vor* den Absorber. Schirmen Sie das Zählrohr so ab, dass es nur den Absorber sieht, nicht aber die Quelle. Messen Sie die Zählrate mit und ohne Absorber.

	Gemessene Counts [#]	***Messdauer [s]***	***Counts per second [cps]***	***cps minus Untergrund***
Untergrund				
Zählrate am Ort Absorber				
Zählrate 45° OHNE Absorber				
Zählrate 45° MIT Absorber				

2.7 Auswertung Rückstreumessung

- Subtrahieren Sie den Untergrund von den Messwerten. Für den Wert mit Absorber muss als Untergrund der Wert der Messung OHNE Absorber verwendet werden.
- Ohne Absorber sollten Sie vor dem Absorber 0 messen (weshalb ist dieser Wert selten exakt 0?).
- Bestimmen Sie das Verhältnis der Zählraten vor dem Absorber und an der Stelle des Absorbers.

$$Verhältnis = \frac{\text{Zählrate 45° MIT Absorber}}{\text{Zählrate am Ort Absorber}} = \underline{\qquad\qquad\qquad} = \underline{\qquad\qquad}$$

V3 Versuch Aktivität und Dosis - Bestimmung der Dosisleistungskonstante

3.1 Aufgabe

Lesen und verstehen Sie den Theorieteil und machen Sie sich mit den Geräten vertraut.

Messen Sie die Teilchenrate einer Quelle und ihre Dosisrate. Bestimmen Sie aus der Teilchenrate die Aktivität (Anzahl emittierte Teilchen pro Sekunde im vollen Raumwinkel). Aus der Aktivität und der gemessenen Dosisrate berechnen Sie die Dosisleistungskonstante.

3.2 Theorie

Ionisierende Strahlung (in unserem Fall Photonen) deponiert Energie W in einem Absorber. Die deponierte Energie W ist proportional der Anzahl Photonen und einer energieabhängigen Konstante μ_{en}.

$$\text{Deponierte Energie} W_{dep} \propto N_{Photon} \mu_{en} \tag{3}$$

Die Zahl der Photonen im Absorber ist eine unhandliche Grösse. Wir arbeiten deshalb mit der Aktivität A der Quelle. Sie gibt die Anzahl Teilchen an, die in den gesamten Raumwinkel 4π ausgestrahlt werden und wird in der Einheit Becquerel (Bq, 1/s) gemessen. Eine Kugel mit Radius R um die Quelle hat die Oberfläche S:

$$S = 4\pi R^2 \tag{4}$$

Die Intensität (Teilchen pro Fläche) nimmt entsprechend mit $1/R^2$ ab. In der Strahlenschutzverordnung (SR 814.501, Anhang 3) ist dieser Zusammenhang tabelliert. In der Spalte h_{10} findet man den Faktor Γ, mit dem man die Aktivität (GBq) der Quelle multiplizieren muss, um die Dosisrate DR (mSv/h) im Abstand R von 1 m zu erhalten. Γ nennt man Dosisleistungskonstante.

$$\text{Dosis-Rate} DR = \Gamma \cdot \frac{A}{R^2}, \text{ Einheit: } [\Gamma] = \frac{mSv \cdot m^2}{h \cdot GBq} \tag{5}$$

Strahlenschutzverordnung **814.501**

Radionuklid	Halbwertszeit	Zerfallsart/ Strahlung	Beurteilungsgrössen e_{inh} Sv/Bq	e_{ing} Sv/Bq	h_{10} (mSv/h)/ GBq in 1 m Abstand	$h_{0,07}$ (mSv/h)/ GBq in 10 cm Abstand	$h_{c,0,07}$ (mSv/h)/ (kBq/cm²)	Befreiungsgrenze LL Bq/g	Bewilligungsgrenze LA Bq	Richtwerte CA Bq/m³	CS Bq/cm²	Instabiles Tochternuklid
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Cs-130	29.21 min	ec, β⁺, β⁻ / ph	1.50E-11	2.80E-11	0.087	500	0.8	1.E+02 [1]	3.00E+08	6.00E+05	10	
Cs-131	9.689 d	ec / ph	4.50E-11	5.80E-11	0.016	2	<0.1	1.E+03 [1]	1.00E+08	2.00E+05	1000	
Cs-132	6.479 d	ec, β⁺, β⁻ / ph	3.80E-10	5.00E-10	0.119	50	0.1	1.E+01	1.00E+07	2.00E+04	100	
Cs-134	2.0648 a	β⁻, ec / ph	9.60E-09	1.90E-08	0.236	1000	1.1	1.E-01	5.00E+05	9.00E+02	3	
Cs-134m	2.903 h	it / ph	2.60E-11	2.00E-11	0.009	1000	1.5	1.E+03	2.00E+08	3.00E+05	3	→ Cs-134 [6]
Cs-135	2.3 E6 a	β⁻	9.90E-10	2.00E-09	0.000	600	0.7	1.E+02	5.00E+06	8.00E+03	10	
Cs-135m	53 min	it / ph	2.40E-11	1.90E-11	0.239	70	0.2	1.E+01 [1]	2.00E+08	3.00E+05	30	→ Cs-135
Cs-136	13.16 d	β⁻ / ph	1.90E-09	3.60E-09	0.527	1000	1.5	1.E-00	3.00E+06	4.00E+03	3	
Cs-137 / Ba-137m	30.1671 a	β⁻, it / ph	6.70E-09	1.30E-08	0.092	2000	1.5	1.E-01 [2]	7.00E+05	1.00E+03	3	
Cs-138	32.41 min	β⁻ / ph	4.60E-11	9.20E-11	0.445	1000	1.8	1.E+01 [1]	1.00E+08	2.00E+05	3	

Beispiel: Eine Cs-137 Quelle hat eine Aktivität von 200 MBq. Aus der Tabelle lesen wir in Spalte 6 den Faktor h_{10}=0.092 mSv/h/GBq. Dann ist die Dosisrate in 50 cm Abstand:

$$DR = 0.092 \cdot \frac{0.2}{0.5^2} = 0.0736\text{mSv/h} \tag{6}$$

Der Faktor 0.092 in der Strahlenschutzverordnung liefert den Wert der medizinisch wichtigen Personen-Tiefendosis $H_P(10)$ 10 mm unter der Haut in Sievert (Sv). Dieser Wert liegt nahe (10 %) der technisch interessanten Grösse Luftkerma (gemessen in Gray). Wir unterscheiden in diesem Praktikum die beiden Grössen nicht.

3.3 Material

Wir verwenden als Strahlungsquelle das Cäsium-Isotop Cs-137. Es strahlt Photonen von 662 keV ab (die Einheit keV ist im Abschnitt *2 Einheit Elektronenvolt* erklärt).

Wir messen die Zählrate mit dem „Vernier Digital Radiation Monitor“, den Sie direkt ablesen können. Die Photonen werden mit einem Geiger-Müller-Zählrohr detektiert. Das Zählrohr hat für die 662 keV-Photonen von Cs-137 eine *Ansprechwahrscheinlichkeit* ε=1.5 % (oder 1/68). Der Durchmesser des Zählrohrs beträgt 1 cm.

Misst man mit dem Gerät Dosisraten, gilt die Kalibrierung nur für Cs-137. Man kann mit diesem Gerät zum Beispiel nicht zuverlässig die Dosis einer Röntgenanlage bestimmen.

Achtung: Ionisierende Strahlung kann Schäden verursachen. Halten Sie deshalb Abstand von der Quelle, schrauben Sie die Quelle ausserhalb der Messung in den orangen Transportbehälter und setzen Sie sich so kurz wie möglich der Strahlung aus.

3.4 Messprotokoll

Messen Sie die Zählrate in ungefähr 20 cm Abstand (nachmessen!). Wählen Sie den Abstand so, dass die Zählrate um die 40 cps liegt.

Zählrate cps, gemessen		***s^{-1}***
Durchmesser der Zählrohrfläche	***0.01***	***m***
Abstand Quelle-Zählrohr		***m***
Dosisrate, gemessen mit Vernier		***µSv / h***

3.5 Bestimmung von Γ

Die Aktivität A bestimmt man aus der korrigierten Zählrate und dem Verhältnis von Kugelfläche zur Fensterfläche:

$$A = \frac{cps}{\epsilon} \cdot \frac{4\pi R^2}{r^2\pi} \tag{7}$$

Benutzen Sie dazu die folgende Tabelle:

Effektive Zählrate $\frac{cps}{\epsilon}$, ε=1.5 %		***s^{-1}***
Fläche der Zählrohröffnung		***m^2***

Fläche der Kugel um Quelle		***m²***
Verhältnis Kugel / Zählrohr		***1***
Aktivität		***GBq***

Mit Gleichung 6 erhält man damit den Faktor Γ (Dosisrate DR in mSv/h, Radius R in m, Aktivität in Gbq):

$$\Gamma = \frac{DR \cdot R^2}{A} \left(\frac{mSv \cdot m^2}{h \cdot GBq}\right) \tag{8}$$

Faktor Γ aus Messung		***mSv m² / (h GBq)***
Faktor Γ aus Strahlensch. V.		***mSv m² / (h GBq)***

3.6 Andere Quelle – Dosis aus Aktivität (ohne Messung)

Eine Co-60 Quelle trägt den Aufdruck „200 MBq, 1.9.1980“. Welche Dosisrate erwarten Sie in 3 m Abstand?

Halbwertszeit von Co-60		***Jahre***
Dosisleistungskonstante		***mSv m² / (h GBq)***
Anzahl Halbwertszeiten		***1***
Heutige Aktivität		***Bq***
Dosisrate in 1 m Abstand		***µSv/h***

					Beurteilungsgrössen			Freigrenze	Bewilligungs-grenze	Richtwerte		
Nuklid	Halbwerts-zeit	Zerfallsart/ Strahlenart	e_{inh} Sv/Bq	e_{ing} Sv/Bq	h_{10} (mSv/h)/GBq in 1 m Abstand	$h_{0,07}$ (mSv/h)/GBq in 10 cm Abstand	$hc_{0,07}$ (mSv/h)/ (kBq/cm²)	LE Bq/kg bzw. LE_{abs} Bq	LA Bq	CA Bq/m³	CS Bq/cm²	Instabiles Tochternuklid
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Co-58	70.80 d	ε, β⁺, γ	1.7 E-09	7.4 E-10	0.147	300	0.3	1 E+04	3 E+06	5 E+03	30	
Co-58m	9.15 h	γ	1.7 E-11	2.4 E-11	<0.001	10	<0.1	4 E+05	3 E+08	5 E+05	1000	→ Co-58 [6]
Co-60	5.271 a	β⁻, γ	1.7 E-08	3.4 E-09	0.366	1000	1.1	1 E+03	9 E+04	5 E+02	3	
Co-60m	10.47 m	β⁻, γ	1.2 E-12	1.7 E-12	0.001	20	<0.1	6 E+06	4 E+09	7 E+06	300	→ Co-60 [6]
Co-61	1.65 h	β⁻, γ	7.5 E-11	7.4 E-11	0.017	1000	1.6	1 E+05	7 E+07	1 E+05	3	
Co-62m	13.91 m	β⁻, γ	3.7 E-11	4.7 E-11	0.436	1000	1.8	2 E+05	1 E+08	2 E+05	3	

(Lösung: Halbwertszeit 5.3 Jahre, DLK=0.366, Anzahl HWZ=35/5.3=6.6 Jahre, heutige Aktivität 200 MBq/2^6.6=2.1 MBq, Dosisrate = 0.0021 GBq *0.366=7.5E-4 mSv/h = 7.5E-4 mSv/h = 0.75 µSv/h)

V4 Versuch Gamma-Spektroskopie

4.1 Aufgabe

Lesen und verstehen Sie den Theorieteil und machen Sie sich mit den Geräten vertraut. Messen Sie in der Gruppe das Absorptionsspektrum einer Cs-137 Quelle. Identifizieren Sie die wichtigsten Merkmale des Spektrums.

4.2 Theorie

Ionisierende Strahlung deponiert Energie in Materie. Je nach Einfallswinkel und physikalischen Prozessen wird nur ein Teil der Energie deponiert. Wir verwenden einen dicken NaI-Szintillator, der mit Blei abgeschirmt ist. Ionisierende Strahlung setzt im Szintillator Lichtblitze frei, die vom Photomultiplier gemessen werden. Die Höhe der Ausgangspulse ist proportional zur deponierten Energie. Ein Multichannel-Analyzer erstellt ein Histogramm der Pulshöhen, das wir als Spektrum bezeichnen.

Ein prominentes Merkmal ist die Compton-Kante. Ein Photon stösst zentral auf ein Elektron und wird unter 180° zurückgeschleudert. Dabei überträgt es – wie beim Stoss in der Mechanik – die maximale Energie auf das Elektron. Die Compton-Kante liegt bei

$$E_{Compton} = \frac{2E_{Photon}^2}{m_{Electron}/c^2 + 2E_{Photon}} \tag{9}$$

Im Nenner steht die Masse des Elektrons dividiert durch die Lichtgeschwindigkeit im Quadrat, dieser Wert beträgt 511 keV.

4.3 Cs-137 Quelle

Die Quelle besteht aus dem Isotop 137 des Elements Cäsium (Cs). Cs ist ein β- Strahler (ein Neutron zerfällt zu einem Proton und einem Elektron) und wird zu Barium (Ba-137). Aus dem angeregten Zustand des Ba-137 wird ein Photon mit einer Energie von 662 keV (Kilo-Elektronenvolt) abgestrahlt. Die Elektronen (β-) des Beta-Zer falls werden in der Quelle ausgefiltert.

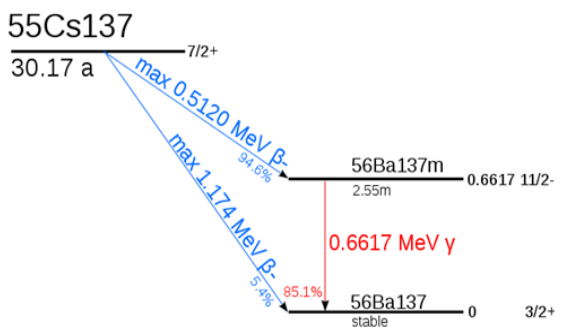


Abb. 1: Zerfall von Cs-137 zu Ba-137 unter Aussendung eines Photons mit einer Energie von 662 keV.

4.4 Messung

Das Spektrometer wird vom Betreuer bedient, die Einstellungen sind etwas diffizil. Eine kleine Menge Cs-137 wird in den Bleiturm gelegt, der die Messung gegen natürliche Aktivität abschirmt. Jedes Photon erzeugt im silbernen Natrium-Jodid (NaI) Kristall einen Lichtblitz proportional zur deponierten Energie. Der Lichtblitz wird durch eine Photomultiplier-Röhre verstärkt und in einen Spannungspuls gewandelt. Die Höhe des Pulses ist immer noch proportional zur Energie, die das Photon im NaI-Kristall deponiert hat. Der Multichannel-Analzyer erstellt ein Histogramm der Pulshöhen. Das Histogramm wächst mit jedem detektierten Photon und seine Konturen erscheinen immer schärfer.

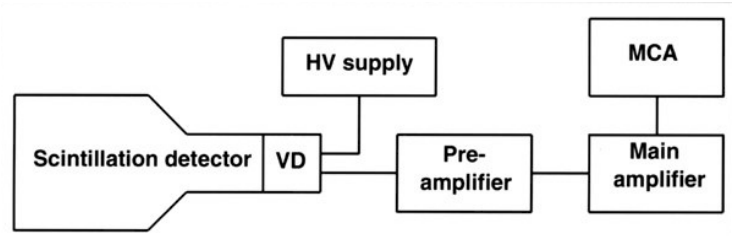


Abb. 2: Schematische Darstellung der Messapparatur (siehe Text).

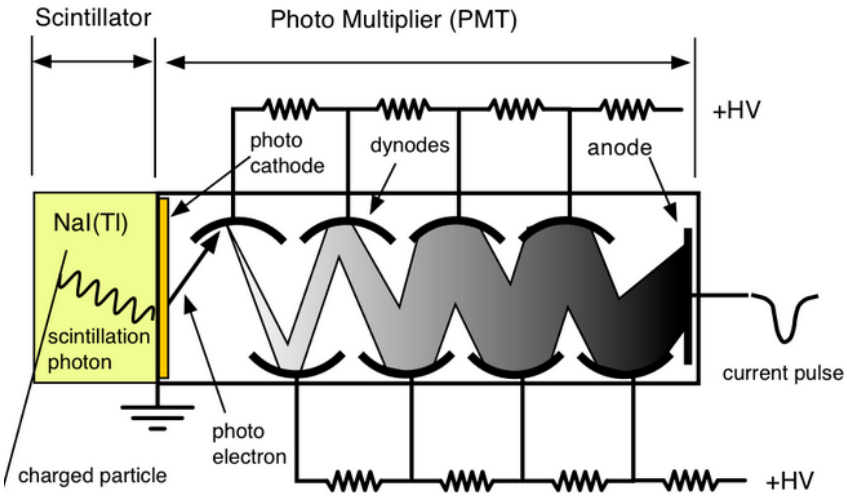
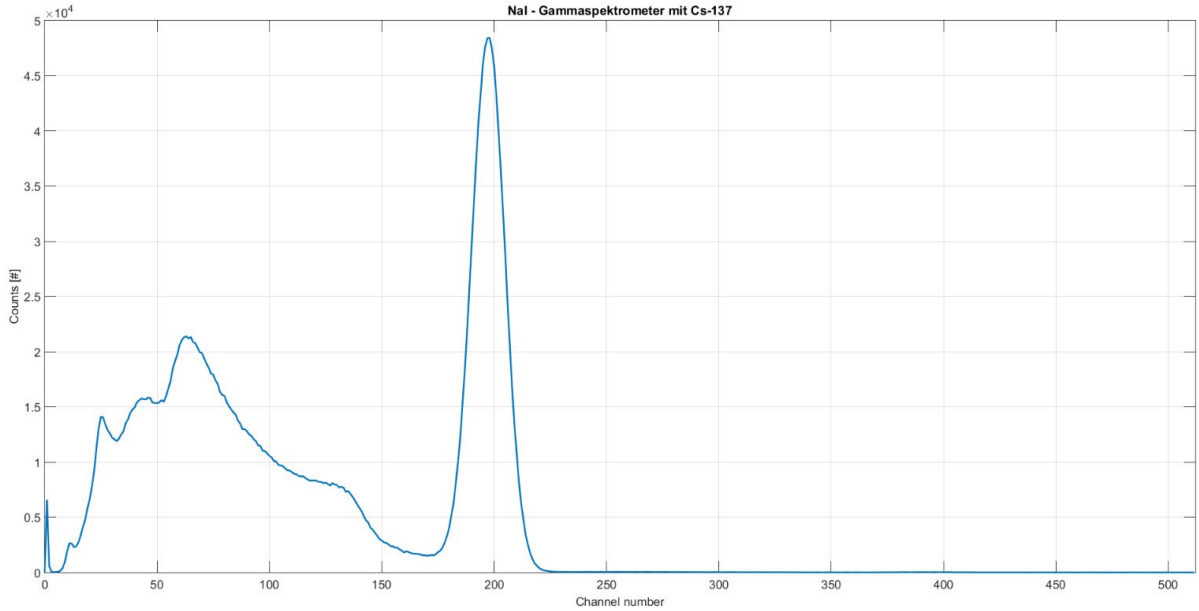


Abb. 3: Details der Signalerzeugung (siehe Text).

4.5 Messprotokoll

Das gemessene Spektrum wird am Bildschirm dargestellt. Es sieht ähnlich aus wie in der folgenden Abbildung.



4.6 Auswertung

- Markieren Sie im Spektrum die maximale deponierte Energie.
- Welches ist der Umrechnungsfaktor von Kanalnummer auf Energie?
- Markieren Sie die Compton-Kante, berechnen Sie ihre Energie und vergleiche Sie den Wert mit Formel (9).
- Von welchem Effekt rührt die Spitze bei ungefähr 200 keV her?
- Bei 80 keV gibt es einen weiteren Peak. Wodurch wird er erzeugt?
- Berechnen Sie die absolute Energieauflösung (FWHM) des Spektrometers bei 662 keV.