

TECHNISCHE UNIVERSITÄT
DORTMUND

ANFÄNGERPRAKTIKUM PHYSIK
SOMMERSEMESTER
2014

V703
Das Geiger-Müller-Zählrohr

24.06.2014

2.ABGABE: 09.07.2014

Leonard Wollenberg
Joshua Luckey

leonard.wollenberg@udo.edu
joshua.luckey@udo.edu

1 Einleitung

Mit dem Geiger-Müller-Zählrohr lässt sich die Intensität von ionisierender Strahlung messen. Es entsteht beim Eintreffen von α -, β -, γ - oder Röntgenstrahlung ein elektrischer Impuls, wenn diese Impulse gezählt werden, kann eine Aussage über die Strahlenintensität getroffen werden.

2 Theorie

2.1 Aufbau Geiger-Müller-Zählrohrs

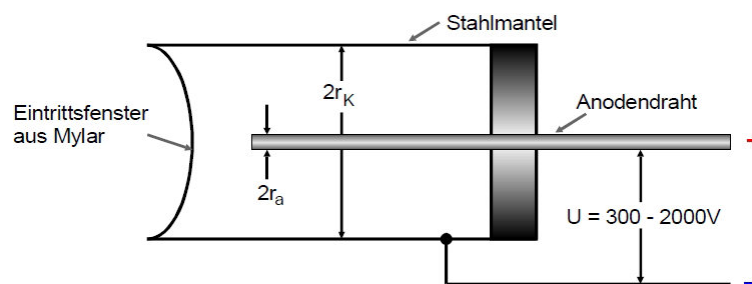


Abbildung 1: Der Schematische Aufbau eines Geiger-Müller-Zählrohrs [1]

In Abbildung 1 ist der schematische Aufbau eines Geiger-Müller-Zählrohrs zu sehen. Der Mantel wird als Kathodenzyylinder bezeichnet und der Stab in der Mitte als Anodendraht. Der zwischen Raum ist mit einem Gasgemisch aus einem Edelgas und wahlweise einem Alkoholgas gefüllt. Die Öffnung ist mit einer Mylarfolie verschlossen und ist aufgrund eines Unterdruckes nach innen gewölbt. Mylar wird dabei als Material gewählt da es dünn genug ist um α -Strahlung durchzulassen. Das resultierende elektrische Feld im Hohlraum bei angelegter Spannung U ist gegeben als

$$E(r) = \frac{U}{r \ln(r_K/r_a)}. \quad (1)$$

2.2 Wirkungsweise eines Geiger-Müller-Zählrohrs

Tritt ein geladenes Teilchen in den Zwischenraum ein, so gibt es seine Energie durch Ionisierung ab. Die Anzahl der Ionisierungsvorgänge ist abhängig von der angelegten Spannung.

Im Spannungsbereich I aus Abbildung 2 erreichen nur eine kleine Anzahl an Elektronen den Anodendraht, weil der Rest durch Rekombination wieder gebunden werden.

Bei Bereich II kommen fast alle Elektronen bis zum Draht, dadurch entsteht ein kontinuierlicher Strom, der proportional zur Energie und zur Intensität ist, deshalb kann in diesem Bereich das Geiger-Müller-Zählrohr als Intensitätsmesser verwendet werden, dies wird als **Ionisationskammer** bezeichnet.

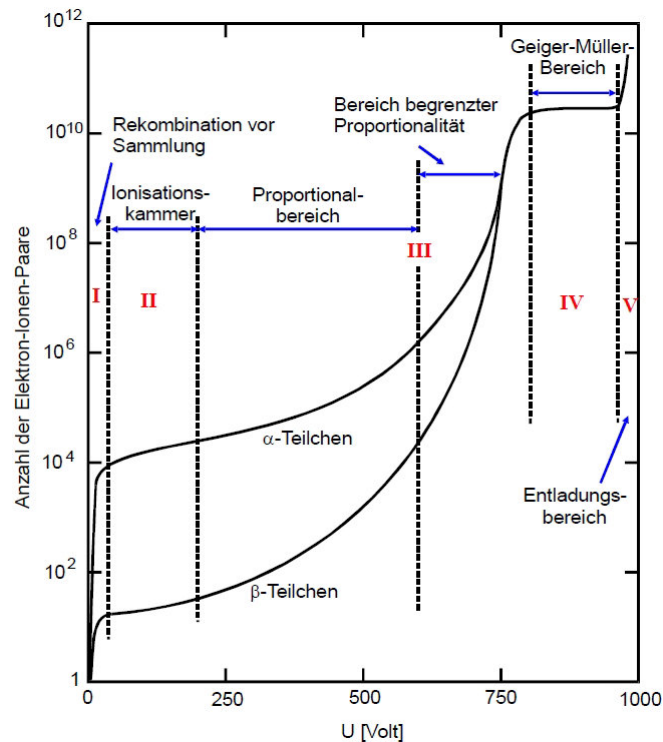


Abbildung 2: Die Abhängigkeit der erzeugten Elektronen-Ionenpaare zur angelegten Spannung [1]

Bei höheren Spannungen ist das elektrische Feld in der Nähe des Drahtes so groß, dass die Elektronen beim Zusammenstoß mit den Edelgasatomen, weiter ionisieren können. Bei hinreichend hoher Spannung ist es möglich, dass die freigewordenen Elektronen weiter ionisieren können. Dies wird als **Stoßionisation** bezeichnet und es kommt zu einem lawinenartigen Anstieg, der als **Townsend-Lawine** bezeichnet wird. In diesem Bereich, kann die Zahl der einfallenden Ladungen Q in Form von Ladungsimpulsen gemessen werden. Weil die Ladung proportional zur Energie ist, kann hier auch die Teilchenenergie gemessen werden. In diesem Bereich entspricht das Geiger-Müller-Zählrohr einem **Proportionalzählrohr**. Dieser Vorgang entspricht Bereich III in Abbildung 2.

Bereich IV ist der Arbeitsbereich des Geiger-Müller-Zählrohrs. Hier ist die Ladung unabhängig von der Primärionisation, denn es werden ebenfalls UV-Photonen bei der Ionisation frei gesetzt, die sich im Gegensatz zu den freien Elektronen auch senkrecht zur Feldrichtung bewegen können. Sie setzen weitere Elektronen beim Zusammenstoß mit den Edelgasatomen frei. Dies hat zur Folge, dass die Ladung nur noch von dem Zählrohrvolumen und der angelegten Spannung abhängt. Gemessen wird hier nur noch die einfallende Intensität.

Im Bereich V wird durch ein einzelnes geladenes Teilchen eine Dauerentladung hervorgerufen. Dies hat zur Folge, dass das Zählrohr schnell kaputt geht.

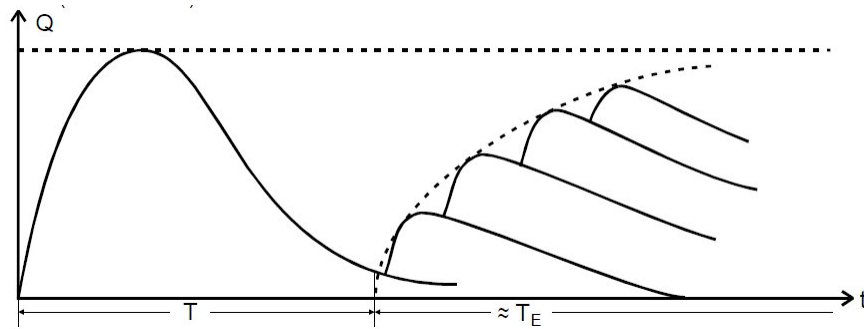


Abbildung 3: Die qualitative Darstellung der Totzeit und der Erholungszeit [1]

2.3 Totzeit und Nachentladungen

Bei der Ionisierung bleiben positiv geladene Atome übrig, diese setzen für eine Zeit T das elektrische Feld so weit herab, dass Stoßionisation nicht mehr zu lawinenartiger Ionisation führt, da die freien Elektronen wieder rekombinieren (vgl. Bereich I in Abbildung 2). Das hat zur Folge, dass die in der Zeit eintreffende Strahlung nicht registriert wird, deshalb wird die Zeit **Totzeit** genannt. Die positiven Ladungen entfernen sich mit der Zeit vom Anodendraht, das bedeutet, dass das elektrische Feld stärker wird, bis es wieder die volle Feldstärke besitzt. Dieser Zeitraum wird **Erholungszeit** T_E genannt.

Es kommt zu **Nachentladungen**, wenn die positiven Ladungen auf den Kathodenmantel treffen und deren kinetische Energie groß genug ist, um weitere Elektronen zu lösen. Diese Elektronen treffen nach der **Laufzeit** T_L auf den Anodendraht. Dies verursacht, dass in der Totzeit etwas gemessen wird und somit vortäuscht, dass neue ionisierende Teilchen eintreffen. Dies ist unerwünscht und kann durch das Hinzufügen eines Alkohols verhindert werden. Denn sie nehmen reduzieren die kinetische Energie des Edelgases und setzen diese Energie in Molekülschwingungen um. Die so abgebremsten Edelgasionen setzen beim Treffen auf den Kathodenmantel keine neuen Elektronen frei.

2.4 Charakteristik eines Geiger-Müller-Zählrohrs

Der fast konstante Bereich IV aus Abbildung 2 wird **Plateau** genannt. Der leichte Anstieg entsteht durch die Nachentladungen. Ein gutes Geiger-Müller-Zählrohr lässt sich an einer geringeren Steigung des Plateaus und an dessen Länge erkennen.

2.5 Ansprechvermögen

Unter dem Begriff **Ansprechvermögen** wird eine Wahrscheinlichkeit verstanden, mit der ein Teilchen nachgewiesen wird. Durch ihr hohes Ionisationsvermögen liegt diese Wahrscheinlichkeit für α - und β -Teilchen bei fast 100%, wenn die Teilchen wirklich in das Zählrohr eindringen. Das kann durch die Mylarfolie gewährleistet werden.

Das Ansprechvermögen von Photonen liegt bei ungefähr 1%. Das bedeutet für γ -Strahlung,

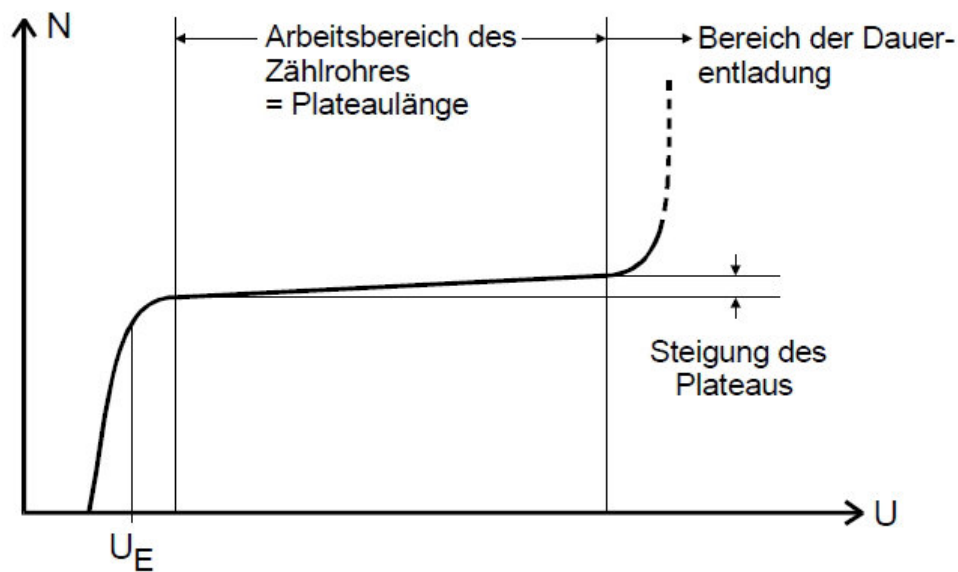


Abbildung 4: Die qualitative Darstellung, des Plateaus [1]

dass nur hohe Intensitäten gemessen werden können. Röntgen-Quanten sind besser zu messen, wenn Xenon als Edelgas verwendet wird.

3 Durchführung

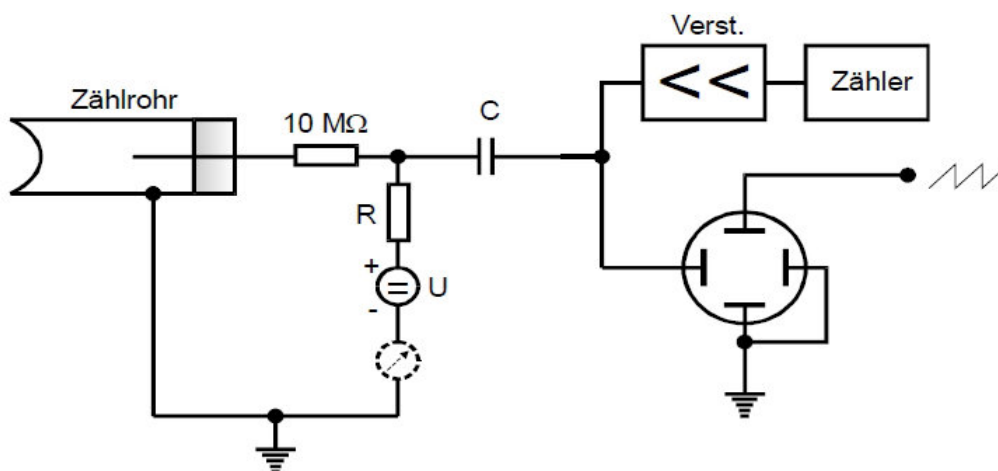


Abbildung 5: Die verwendete Schaltung für den Versuch [1]

In Abbildung 5 ist der schematische Aufbau zu sehen. Über den Widerstand R fließt der Ladungsimpuls, der durch den Kondensator C ausgekoppelt wird und durch den Verstärker und dem Zählgerät gemessen werden kann. Über ein Oszilloskop werden die Impulse sichtbar gemacht und in der internen Schaltung des Zählrohrs ist ein Mikroamperemeter mit dem der Strom gemessen werden kann.

3.1 Messung der Charakteristik

Es wird für eine β -Quelle die Abhängigkeit der Zählrate zur angelegten Spannung gemessen. Die Messzeit beträgt hier 100 s, damit der Fehler $>1\%$ beträgt. Die Spannung sollte bei diesem Geiger-Müller-Zählrohr nicht über 700 V gehen.

3.2 Messung der Nachentladung mithilfe des Oszilloskops

Die Strahlintensität wird so weit abgesenkt, dass auf dem Oszilloskop nur ein Impuls zu sehen ist. Damit keine Nachentladungen auftreten, wird die Spannung auf 350 V gestellt. Danach wird die Spannung auf 700 V gestellt um den zeitlichen Abstand zwischen den Primär- und dem Nachentladungsimpuls zu messen.

3.3 Messung der Totzeit mithilfe des Oszilloskops

Für eine hohe Strahlenintensität wird die Totzeit gemäß Abbildung 3 gemessen, dabei lässt sich die Erholungszeit nur grob abschätzen.

3.4 Bestimmung der Totzeit durch die Zwei-Quellen-Methode

Die registrierte Impulsrate N_r ist immer kleiner als die wahre Impulsrate N_W , aufgrund der Totzeit T . Es lässt sich der Zusammenhang

$$N_W = \frac{N_r}{1 - T N_r}$$

erkennen. Bei Verwendung von zwei Quellen, gilt aufgrund der Totzeit

$$N_{1+2} < N_1 + N_2,$$

ohne die Totzeit würde hier Gleichheit gelten. Hier raus lässt sich

$$T \approx \frac{N_1 + N_2 - N_{1+2}}{2N_1N_2} \quad (2)$$

herleiten. Für das Experiment bedeutet das, es wird erst die Zählrate für eine Quelle gemessen, anschließend für zwei und danach noch ein mal nur für die zweite Quelle. Beim Ein- und Ausbauen der Quelle ist darauf zu achten, dass die Position der jeweils anderen Quelle nicht verändert wird.

3.5 Messung der Ladungsmenge

Mithilfe des eingebauten Mikroamperemeters kann der Strom in Abhängigkeit von der angelegten Spannung gemessen werden. Nach Definition für den mittleren Strom gilt

$$\bar{I} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} Z. \quad (3)$$

4 Auswertung

Im folgenden Abschnitt sind die während des Versuchs aufgenommenen Messwerte und die aus diesen berechneten Ergebnisse tabellarisch und grafisch dargestellt. An entsprechender Stelle sind Anmerkungen und Erklärungen zu den Berechnungen und Ergebnissen gegeben. Die für die Fehlerrechnung verwendeten Gleichungen sind in Abschnitt 4.1 angegeben. Die Fehler für Messwerte werden im Allgemeinen durch die kleinste Skaleneinteilung des verwendeten Messgeräts abgeschätzt.

4.1 Fehlerrechnung

Im folgenden Abschnitt sind die, für die Fehlerrechnung genutzten, Gleichungen aufgelistet, die mit Hilfe der gaußschen Fehlerfortpflanzung bestimmt wurden.

Der Fehler einer poissonverteilten Größe, wie die Anzahl der radioaktiven Zerfälle ergibt sich durch

$$\sigma_Z = \sqrt{Z}. \quad (I)$$

Die Fehler der Impulsraten erhält man aus den Fehlern der Impulsanzahl durch

$$\sigma_N = \frac{\sigma_P}{\Delta t}. \quad (II)$$

Der Fehler der rechnerisch bestimmten Totzeit ergibt sich nach

$$\begin{aligned} \sigma_T^2 = & \frac{N_1^2 N_2^2}{4} \sigma_{N_{1+2}}^2 + \sigma_{N_1}^2 \left(\frac{N_1 N_2}{2} + N_2 \left(\frac{N_1}{2} + \frac{N_2}{2} - \frac{N_{1+2}}{2} \right) \right)^2 \\ & + \sigma_{N_2}^2 \left(\frac{N_1 N_2}{2} + N_1 \left(\frac{N_1}{2} + \frac{N_2}{2} - \frac{N_{1+2}}{2} \right) \right)^2. \end{aligned} \quad (III)$$

Den Fehler der freigesetzten Ladungsmenge pro einfallendem Teilchen erhält man durch

$$\sigma_{\Delta Q} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\bar{I}}}{N} \right)^2 + \left(\frac{\bar{I} \sigma_N}{N^2} \right)^2}. \quad (IV)$$

4.2 Bestimmung der Plateau-Steigung des Zählrohrs

Die für die Zählrohr-Charakteristik aufgenommenen Messwerte für Spannung U und Anzahl der registrierten Impulse Z in dem Zeitintervall $\Delta t = 100 \text{ s}$ sind in Tabelle 1 zu finden.

Spannung U [V]	Anzahl der Pulse (I) Z	Spannung U [V]	Anzahl der Pulse (I) Z
350 ± 1	5036 ± 70	530 ± 1	5354 ± 73
370 ± 1	4995 ± 70	550 ± 1	5002 ± 70
390 ± 1	4966 ± 70	570 ± 1	5162 ± 71
410 ± 1	5040 ± 70	590 ± 1	5185 ± 72
430 ± 1	5252 ± 71	610 ± 1	5184 ± 72
450 ± 1	5137 ± 71	630 ± 1	5292 ± 72
470 ± 1	5049 ± 71	650 ± 1	5033 ± 70
490 ± 1	5197 ± 72	670 ± 1	5297 ± 72
510 ± 1	5076 ± 71	690 ± 1	5153 ± 71

Tabelle 1: Messwerte für die Charakteristik des Zählrohrs

Diese Messwerte sind in Abbildung 6 grafisch dargestellt. Die Messwerte wurden für eine lineare Regression mit dem Ansatz

$$Z(U) = A \cdot U + Z_0 \quad (4)$$

verwendet. Die Durchführung der Regression unter Verwendung der *Python*-Bibliothek *SciPy* ergab die Parameter

$$A = (0,5 \pm 0,2) \text{ V}^{-1} \quad \text{und} \quad (4a)$$

$$Z_0 = 4860 \pm 120. \quad (4b)$$

Die prozentuale Änderung der Impulsanzahl pro 100 V, welche die übliche Angabe für die Plateau-Steigung des Zählrohrs ist, ergibt sich somit zu

$$\frac{Z(100 \text{ V}) - Z_0}{Z_0} \frac{1}{100 \text{ V}} = (1,1 \pm 0,5) \frac{\%}{100 \text{ V}}. \quad (5)$$

4.3 Bestimmung des zeitlicher Abstand zwischen Primär- und Nachentladungsimpuls

Auf dem mit dem Zählrohr verbundenen Oszilloskop, lässt sich die Primärentladung als annähernd stehendes Bild einer Kurve mit der in Abbildung 3 dargestellten Form ausmachen. Die Nachentladungen sind ebenfalls Kurven dieser Form, mit dem Unterschiede das diese nur für eine sehr kurze Zeit auf dem Bildschirm des Oszilloskops angezeigt werden.

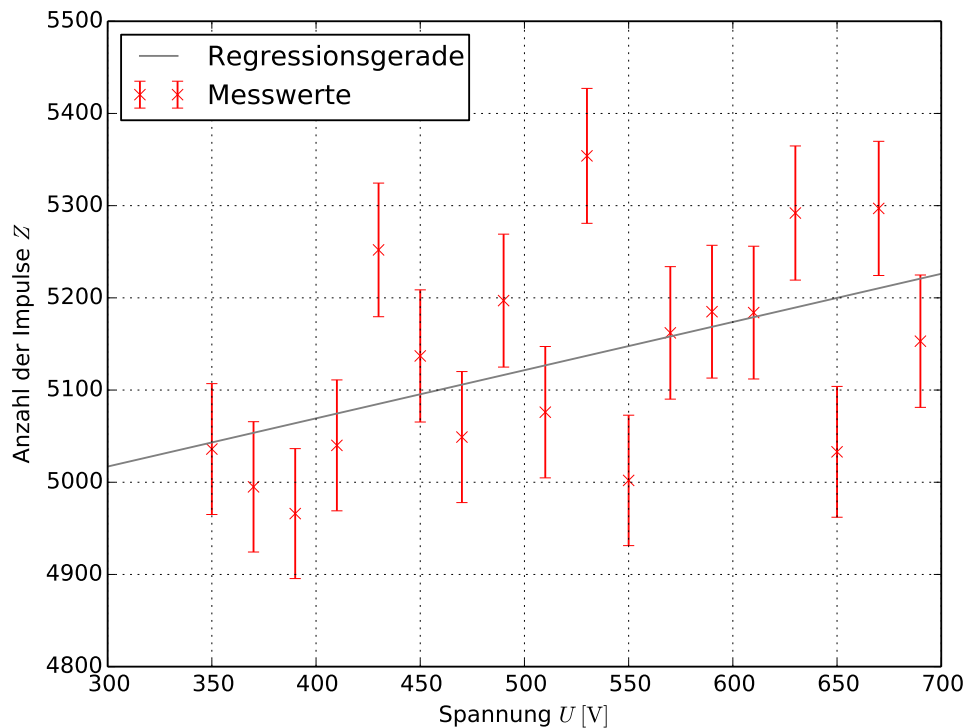


Abbildung 6: Grafische Darstellung der aufgenommenen Impulse in Abhängigkeit der Spannung mit linearer Regression des Plateaus

Der mittlere zeitliche Abstand zwischen beiden Entladungen konnte, aufgrund der kurzen Zeitspanne in der beide Entladungen zu sehen sind, nur auf den Wert

$$\Delta t_{P,N} \approx 150 \mu\text{s} \quad (6)$$

geschätzt werden.

4.4 Bestimmung der Totzeit mit Hilfe eines Oszilloskops

Die Totzeit des Zählrohrs entspricht nach Abbildung 3 in etwa der Breite des Primärladungsimpulses, diese wurde zu

$$T \approx 150 \mu\text{s} \quad (7)$$

bestimmt.

4.5 Bestimmung der Totzeit nach der Zwei-Quellen-Methode

In Tabelle 2 sind die aufgenommenen Werte für die Impulsraten der ersten Quelle N_1 , der zweiten Quelle N_2 und beider Quellen N_{1+2} gelistet.

Impulsrate 1 (II) $N_1 \text{ [s}^{-1}\text{]}$	Impulsrate 2 (II) $N_2 \text{ [s}^{-1}\text{]}$	Impulsrate 1+2 (II) $N_{1+2} \text{ [s}^{-1}\text{]}$
$10,3 \pm 0,3$	$73,9 \pm 0,8$	$82,7 \pm 0,8$

Tabelle 2: Aufgenommene Impulsraten der Einzelquellen und beider Quellen zusammen

Nach (2) ergibt sich die Totzeit des Zählrohrs rechnerisch zu

$$T = (900 \pm 800) \mu\text{s}. \quad (8)$$

Der Fehler wurde dabei mittels (III) bestimmt.

4.6 Bestimmung der Ladungsmenge pro eingefallenem Teilchen

Die Messwerte für die Stromstärke \bar{I} bei der jeweiligen Spannung U und die Werte für die Impulsrate $N = Z/\Delta t$ sind zusammen mit den, durch Umstellen von (3), berechneten Ladungsmengen ΔQ in Tabelle 3 eingetragen.

Spannung $U \text{ [V]}$	Stromstärke $\bar{I} \text{ [}\mu\text{A]}$	Impulsrate (II) $N \text{ [s}^{-1}\text{]}$	Ladungsmenge (IV) $\Delta Q \text{ [Ge]}$	Spannung $U \text{ [V]}$	Stromstärke $\bar{I} \text{ [}\mu\text{A]}$	Impulsrate (II) $N \text{ [s}^{-1}\text{]}$	Ladungsmenge (IV) $\Delta Q \text{ [Ge]}$
350 ± 1	$0,1 \pm 0,1$	$50,4 \pm 0,7$	12 ± 12	530 ± 1	$0,3 \pm 0,1$	$53,5 \pm 0,7$	34 ± 12
370 ± 1	$0,1 \pm 0,1$	$50,0 \pm 0,7$	12 ± 12	550 ± 1	$0,3 \pm 0,1$	$50,0 \pm 0,7$	37 ± 12
390 ± 1	$0,1 \pm 0,1$	$49,7 \pm 0,7$	12 ± 12	570 ± 1	$0,3 \pm 0,1$	$51,6 \pm 0,7$	36 ± 12
410 ± 1	$0,2 \pm 0,1$	$50,4 \pm 0,7$	24 ± 12	590 ± 1	$0,3 \pm 0,1$	$51,9 \pm 0,7$	36 ± 12
430 ± 1	$0,2 \pm 0,1$	$52,5 \pm 0,7$	23 ± 12	610 ± 1	$0,4 \pm 0,1$	$51,8 \pm 0,7$	48 ± 12
450 ± 1	$0,2 \pm 0,1$	$51,4 \pm 0,7$	23 ± 12	630 ± 1	$0,4 \pm 0,1$	$52,9 \pm 0,7$	47 ± 12
470 ± 1	$0,2 \pm 0,1$	$50,5 \pm 0,7$	24 ± 12	650 ± 1	$0,4 \pm 0,1$	$50,3 \pm 0,7$	49 ± 12
490 ± 1	$0,2 \pm 0,1$	$52,0 \pm 0,7$	24 ± 12	670 ± 1	$0,4 \pm 0,1$	$53,0 \pm 0,7$	47 ± 12
510 ± 1	$0,2 \pm 0,1$	$50,8 \pm 0,7$	24 ± 12	690 ± 1	$0,4 \pm 0,1$	$51,5 \pm 0,7$	48 ± 12

Tabelle 3: Aufgenommene Stromstärken und Impulsraten zu der jeweilig anliegenden Spannung

5 Diskussion

Im Folgenden werden die in Abschnitt 4 erhaltenen Ergebnisse noch einmal abschließend diskutiert und dabei auf ihre Plausibilität hin überprüft. Dabei wird auch auf Versuchsdurchführung und -aufbau Bezug genommen.

Die vom Oszilloskop abgelesenen Werte für Totzeit (7) und den zeitlichen Abstand zwischen Primär- und Nachentladung (6) sind nur als Schätzungen zu verstehen, da eine genaue Messung aufgrund der kurzen Anzeigezeit nicht möglich war. Dies zeigt sich auch in dem großen Unterschied zwischen der abgelesenen und der berechneten Totzeit (8).

Ein weiteres Problem stellt der Fehler der berechneten Totzeit dar. Der Grund für diese große Abweichung von rund 89 % ist die geringe Aktivität eines der verwendeten Beta-Strahler, wodurch der relative Fehler groß wird und bei der Berechnung der Totzeit zu einem entsprechend hohen Fehler führt.

Die erhaltenen Werte sind somit im Allgemeinen plausibel, jedoch in Bezug auf die Genauigkeit nicht belastbar.

Literatur

- [1] *Versuchsanleitung. V703 Geiger-Müller-Zählrohr*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V703.pdf> (besucht am 26.06.2014).