

V703

Geiger-Müller Zählrohr

Tahir Kamcili
tahir.kamcili@udo.edu

Marina Andreß
marina.andress@udo.edu

Durchführung: 19.01.2021

Abgabe: 26.01.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theoretische Grundlagen	3
2.1	Aufbau und Funktionsweise des Geiger-Müller-Zählrohrs	3
2.2	Tot- und Erholungszeit	5
2.3	Charakteristik des Zählrohres	7
2.4	Ansprechvermögen des Zählrohres	7
2.5	Die pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzte Ladungsmenge	8
3	Durchführung	8
3.1	Aufgabe a)	8
3.2	Aufgabe c)	8
3.3	Aufgabe d)	9
4	Auswertung	10
4.1	Plateau-Bereich	10
4.2	Bestimmung der Totzeit	13
4.2.1	Zwei-Quellen-Methode	13
4.2.2	Oszilloskop	13
4.3	Bestimmung des Zählrohrstroms	14
5	Diskussion	15
	Literatur	16

1 Zielsetzung

In diesem Versuch wird das Geiger-Müller-Zählrohr auf seine Funktionen und Eigenschaften untersucht. Hierzu wird die Charakteristik des Zählrohrs untersucht, sowie die freigesetzte Ladungsmenge und die Totzeit gemessen.

2 Theoretische Grundlagen

Mit dem Geiger-Müller-Zählrohr kann ionisierende Strahlung detektiert und dessen Intensität gemessen werden. Sobald ionisierende Strahlung in das Zählrohr eintritt, wird ein Impuls abgegeben der mittels Impulszähler gezählt werden kann.

2.1 Aufbau und Funktionsweise des Geiger-Müller-Zählrohrs

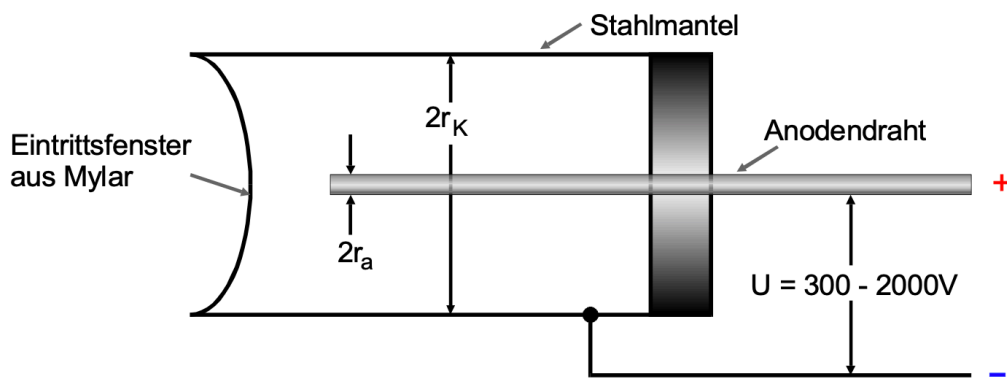


Abbildung 1: Aufbau eines Zählrohrs (Quelle: [6]).

Das Zählrohr hat den in Abbildung (1) dargestellten Aufbau und besteht aus einer zylinderförmigen Kathode (Radius r_k), in der sich mittig, parallel zum Mantel, ein Anodendraht (Radius r_a) befindet. An die Öffnung des Rohres, wo die ionisierende Strahlung eintreten soll, wird Mylar-Folie gespannt, die sich durch einen Unterdruck nach Innen wölbt. Das Rohr ist mit einem Gasgemisch, wie zum Beispiel aus Argon und Ethylalkohol gefüllt. Wird eine äußere Spannung angelegt, entsteht ein radialsymmetrisches Feld zwischen Kathode und Anode hat im Abstand r von der Zählrohrachse den Wert

$$E(r) = \frac{U}{r \ln\left(\frac{r_k}{r_a}\right)}. \quad (1)$$

Trifft ionisierende Strahlung in das Geiger-Müller-Zählrohr entstehen durch Ionisationsakte Elektronen und Ionen. Die freien Elektronen werden durch das elektrische Feld (1) zur Anode beschleunigt, wobei zwischen verschiedenen Spannungsgrößen unterschieden wird.

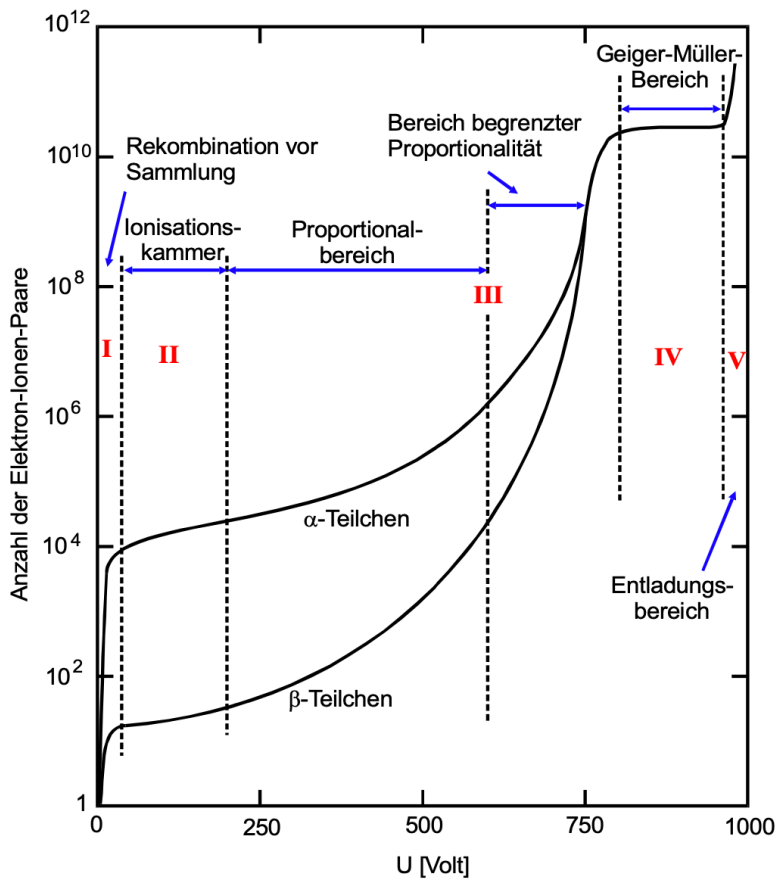


Abbildung 2: Anzahl der Elektron-Ionenpaare als Funktion der Spannung U (Quelle: [6]).

Im Folgenden werden die einzelnen Spannungsbereiche in Abbildung (2) näher erläutert.

1. Bei kleinen Zählrohrspannungen erreichen nicht alle Elektronen den Anodendraht und gehen durch Rekombination verloren.
2. Erhöht sich die Spannung und somit die Feldstärke, erreichen alle Elektronen den Draht und es fließt ein kontinuierlicher Ionisationsstrom der proportional zur Energie und Intensität der einfallenden Strahlung ist. Eine solche Ionisationskammer kann aufgrund seiner geringen Ionisationsströme nur bei hohen Strahlungsintensitäten verwendet werden.
3. Bei weiterer Erhöhung der Spannung werden die Elektronen so stark beschleunigt, dass es zur Stoßionisation kommt. Die dadurch freigesetzten Elektronen können ebenfalls ionisieren, sodass es zu einer Townsend-Lawine kommt. Die nun am Anodendraht gesammelte Ladung Q kann als Ladungsimpuls gemessen werden. Da Q proportional zur Energie ist, die das einfallende Teilchen an das Gasvolumen

abgegeben hat, ist der Ladungsimpuls ein Maß für die Teilchenenergie. Aufgrund dieser Eigenschaft wird das Messinstrument als Proportionalzählrohr bezeichnet.

4. Wenn die Spannung über dem Proportionalitätsbereich liegt, wird der Auslösebereich erreicht, der eigentliche Arbeitsbereich des Geiger-Müller-Zählrohrs. Hier entsteht eine Großzahl an UV-Photonen, die sich im Gegensatz zu den Elektronen auch senkrecht zum elektrischen Feld ausbreiten können, was zu Elektronenlawinen im gesamten Zählrohrvolumen führt. Bei so großer Spannung kann das Zählrohr effektiv nur als Intensitätsmesser eingesetzt werden.
5. Ab einer noch größeren Spannung beginnt der Entladungsbereich.

2.2 Tot- und Erholungszeit

Neben den Elektronen entstehen im Zählrohr positiv geladene Ionen, die durch ihre große Masse nur langsam zur Kathode beschleunigt werden. In dieser Zeit baut sich eine radialsymmetrische Raumladung (Ionenschlauch) auf. Dadurch wird die Feldstärke für eine Zeit T in Drahtnähe so gering, dass keine Stoßionisation mehr stattfindet und eintreffende Teilchen nicht registriert werden. Diese Zeit T wird deswegen Totzeit genannt. Wenn die positive Ladungswolke zur Kathode abwandert und die Feldstärke ansteigt, können eintreffende Teilchen wieder registriert werden. Anschließend an die Totzeit T gibt es den Zeitraum der Erholungszeit T_E , in dem die Ausgangsimpulse eine geringere Höhe haben. Der Verlauf der Tot- und Erholungszeit ist in Abbildung (3) dargestellt.

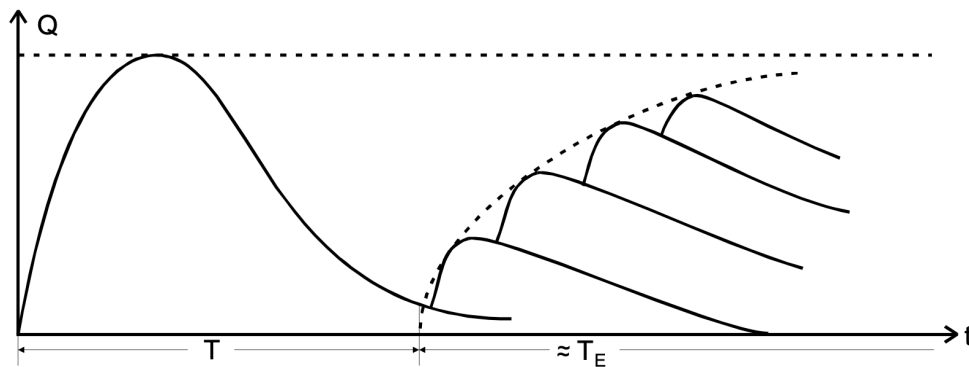


Abbildung 3: Tot- und Erholungszeit eines Zählrohrs (Quelle: [6]).

Wenn die Ionen auf die Zylinderkathode treffen, setzen sie bei der Neutralisation Elektronen aus der Metalloberfläche frei. Diese Sekundärelektronen rufen weitere Zählrohrentladungen hervor, da sie das gesamte Zählrohrpotential U durchlaufen. Der Durchgang eines Teilchens durch das Gasvolumen hat mehrere, zeitlich versetzte Ausgangsimpulse zur Folge, die als Nachentladungen bezeichnet werden. Um die Nachentladung zu verhindern, wird dem Zählrohrgas Alkoholdampf hinzugefügt, damit bei der Neutralisation keine Elektronen freigesetzt werden.

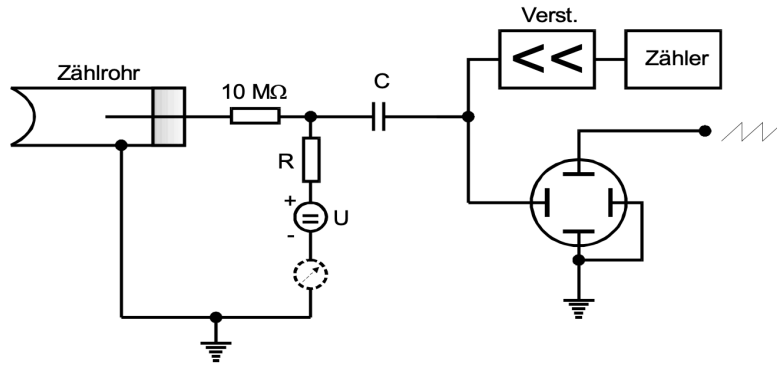


Abbildung 4: Versuchsaufbau (Quelle: [6]).

Die nachfolgenden Zählrohruntersuchungen können mit einem Versuchsaufbau nach Abbildung (4) durchgeführt werden. Sobald die Ladung Q auf dem Zählendraht über den Widerstand R abfließt wird ein Spannungsimpuls erzeugt, der über den Kondensator C ausgekoppelt, im Verstärker vergrößert und im Zählgerät registriert wird.

Die Totzeit kann auf 2 verschiedene Arten bestimmt werden. Die Oszillographische Messung ist eine Methode, bei der die Totzeit einem Oszillogramm gemäß Abbildung (3) abgelesen werden kann. Dabei sollte eine hohe Strahlungsintensität in das Zählrohr eintreten, wobei die Zeitablenkung des Oszillographen durch die Anstiegsflanke der Zählrohrimpulse getriggert wird.

Das andere Messverfahren ist die Zwei-Quellen-Methode. Durch die Totzeit T ist die registrierte Impulsrate N_r immer kleiner als die Zahl N_w der in das Zählrohr eingetretenen und absorbierten Teilchen. Für die tatsächliche Impulsrate N_w gilt:

$$N_w = \frac{N_r}{1 - TN_r}. \quad (2)$$

Um die Totzeit zu bestimmen, werden mit zwei radioaktiven Präparaten gemessen. Zunächst wird die Zählrate N_1 des ersten Präparats gemessen. Anschließend wird ein zweites Präparat daneben gestellt, sodass die beiden Präparate im gleichen Abstand zum Zählrohr stehen, ohne die Lage des ersten Präparats relativ zum Zählrohr zu verändern. Diese Summenzählrate entspricht N_{1+2} . Danach wird das erste Präparat entfernt und die Zählrate N_2 des zweiten Präparats wird registriert.

Nach Gleichung (2) gilt:

$$N_{w_1} = \frac{N_1}{1 - TN_1}$$

$$N_{w_2} = \frac{N_2}{1 - TN_2}$$

$$N_{w_{1+2}} = \frac{N_{1+2}}{1 - TN_{1+2}}$$

Da außerdem $N_{w_{1+2}} = N_{w_1} + N_{w_2}$ gilt, folgt

$$\frac{N_{1+2}}{1 - TN_{1+2}} = N_{w_1} = \frac{N_1}{1 - TN_1} + N_{w_2} = \frac{N_2}{1 - TN_2}. \quad (3)$$

Gleichung (3) lässt sich näherungsweise umschreiben zu

$$T \approx \frac{N_1 + N_2 - N_{1+2}}{2N_1N_2}. \quad (4)$$

2.3 Charakteristik des Zählrohres

Die Charakteristik eines Zählrohres kann untersucht werden, indem die registrierte Teilchenzahl N bei konstanter Strahlungsintensität gegen die angelegte Spannung U aufgetragen wird. Eine Charakteristik hat eine wie in Abbildung (5) gezeigte Gestalt.

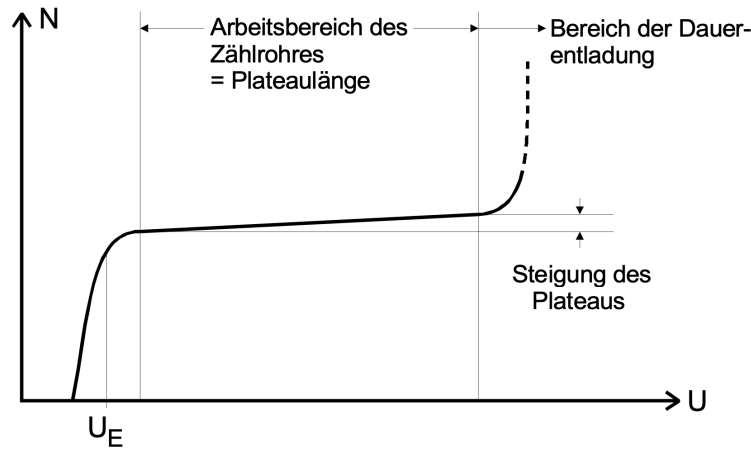


Abbildung 5: Charakteristik eines Zählrohres (Quelle: [6]).

Der lineare Teil der Kurve ist das Plateau, was eine Aussage über die Qualität des Zählrohres trifft. Im Idealfall ist die Steigung des Plateaus gleich Null. In der Praxis jedoch nimmt die Zählrate mit der Spannung aufgrund von einigen wenigen Nachentladungen zu.

2.4 Ansprechvermögen des Zählrohres

Das Ansprechvermögen ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein einfallendes ionisierendes Teilchen detektiert wird. Für α - und β -Teilchen liegt diese aufgrund ihres hohen Ionisationsvermögens nahezu bei 100%. Um sicher zu stellen, dass die Teilchen überhaupt in das Zählrohr eintreten, werden Endfensterzählrohre gebaut. Diese haben eine Stirnseite aus einem dünnwandigen Material mit Atomen niedriger Ordnungszahl (hier Mylar), sodass auch α -Teilchen sie durchdringen können.

2.5 Die pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzte Ladungsmenge

Der mittlere Zählrohrstrom

$$\bar{I} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{U(t)}{R} dt$$

kann nach Abbildung (4) gemessen werden. Wenn die Impulszahl pro Zeiteinheit bekannt ist, kann daraus die pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzte Ladungsmenge bestimmt werden. Nach der Definition des Stromes gilt

$$\bar{I} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} Z. \quad (5)$$

3 Durchführung

Das Experiment wird nach Abbildung (4) mit einer ^{204}Tl Quelle aufgebaut.

3.1 Aufgabe a)

Die β -Quelle wird vor dem Eintrittsfenster des Zählrohres platziert. Dabei wird die Zählrate von $100 \frac{\text{Imp}}{\text{s}}$ bei mittlerer Spannung nicht überschritten, um eine Totzeit-Korrektur zu vermeiden. Nun wird die Zählrate für Spannungen zwischen 300V und 700V im Abstand von $\Delta U = 10\text{V}$ für jeweils 60s gemessen und notiert. Die Werte wurden in Tabelle (1) zusammengetragen.

3.2 Aufgabe c)

Die Totzeit wird nun auf 2 verschiedene Arten bestimmt.

1. Oszilloskop

Die Quelle wird an das Zählrohr gestellt, damit eine hohe Strahlenintensität in das Zählrohr eintritt. Nun kann auf dem Oszilloskop eine Kurve nach Abbildung (3) beobachtet werden, aus der die Totzeit abgelesen wird.

2. Zwei-Quellen-Methode

Die genauere Methode ist die Zwei-Quellen-Methode. Hierzu wird die ^{204}Tl Quelle näher an das Zählrohr gestellt, um eine Totzeit-Korrektur zu erhalten (N_1). Danach wird eine zweite Quelle im gleichen Abstand auf das Zählrohr gerichtet (N_{1+2}). Anschließend wird die ^{204}Tl Quelle entfernt (N_2). Die Messzeit beträgt bei allen drei Messungen $t = 120\text{s}$, um die Genauigkeit zu erhöhen. Dabei wurden folgende Zählraten gemessen:

$$N_1 = 96041 \frac{\text{Imp}}{120\text{s}}$$

$$N_{1+2} = 158479 \frac{\text{Imp}}{120\text{s}}$$

$$N_2 = 76518 \frac{\text{Imp}}{120\text{s}}$$

3.3 Aufgabe d)

Der Zählrohrstrom kann parallel zur Aufnahme der Messwerte in a) notiert werden. Alle 50V wird am Mikro-Amperemeter der Zählrohrstrom abgelesen. Die Werte sind in Tabelle (??) eingetragen. Es gilt $\Delta t = 60\text{s}$.

4 Auswertung

4.1 Plateau-Bereich

Es werden zunächst folgende Daten gemessen:

Tabelle 1: Messdaten zur Kennlinie

Spannung U in V	Entladungen N in imp/min
320	9672
330	9689
340	9580
350	9837
360	9886
370	10041
380	9996
390	9943
400	9995
410	9980
420	9986
430	9960
440	10219
450	10264
460	10174
470	10035
480	10350
490	10290
500	10151
510	10110
520	10255
530	10151
540	10351
550	10184
560	10137
570	10186
580	10171
590	10171
600	10253
610	10368
620	10365
630	10224
640	10338
650	10493
660	10467
670	10640
680	10939
690	11159
700	11547

Der absolute Fehler für N Entladungen ergibt sich durch die Poissonverteilung zu:

$$\Delta N = \sqrt{N} \quad (6)$$

Die Werte werden mit Fehlern aus der Tabelle (1) in eine Grafik eingetragen und für das Plateau wird eine Ausgleichsgerade modelliert. Daraus ergibt sich für die Ausgleichsgerade

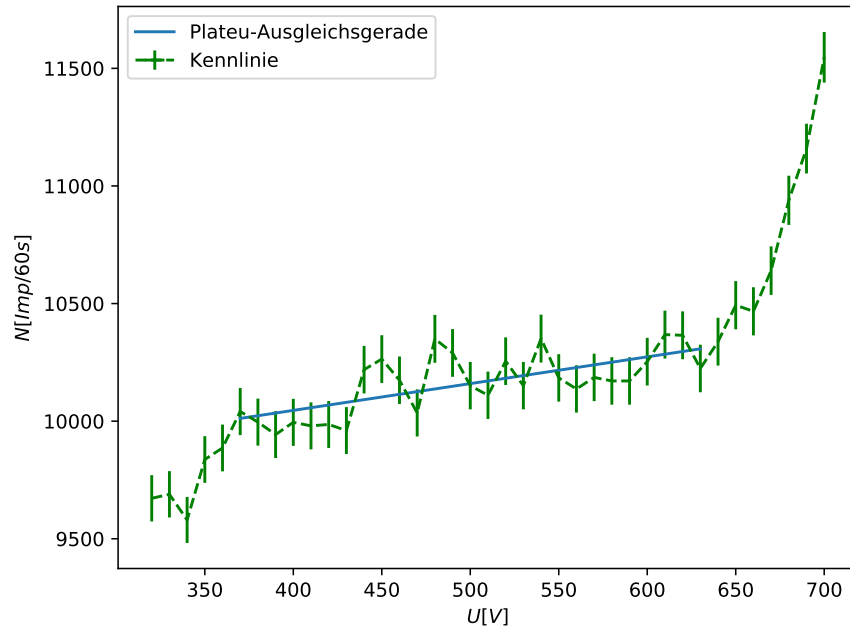


Abbildung 6: Charakteristik des Zählrohres mit Fehlern und Plateaugerade.

in der Form:

$$y = mx + b$$

folgende Werte:

$$m = 1.1377 \pm 0.2407$$

$$b = 9590.7346 \pm 121.8236.$$

Daraus folgt dann das die Plateau-Steigung in % pro 100 V gegeben ist durch:

$$m = 1.1377 \pm 0.2407\% \text{ pro } 100V.$$

4.2 Bestimmung der Totzeit

4.2.1 Zwei-Quellen-Methode

Zur Bestimmung der Totzeit wurden die ermittelten Werte aus (3.2) genutzt. Mithilfe der Formel (4) und der Gauss Fehlerfortpflanzung welche gegeben ist durch:

$$\sigma_T = \sqrt{\left(\frac{N_{1+2} - N_2}{2N_1^2 N_2}\right)^2 \cdot \sigma_{N_1}^2 + \left(\frac{N_{1+2} - N_1}{2N_1 N_2^2}\right)^2 \cdot \sigma_{N_2}^2 + \left(\frac{1}{2N_1 N_2}\right)^2 \cdot \sigma_{N_{1+2}}^2} \quad (7)$$

Ergibt sich für die Totzeit folgender Wert:

$$T = 0.00011 \pm 0.00005 \text{s.}$$

4.2.2 Oszilloskop

Mithilfe des Oszilloskops kann die Totzeit ebenfalls bestimmt werden. Die Methode ist jedoch sehr ungenau. Anhand des folgenden Bildes kann diese auf $T = 0.5 \pm 0.1 \mu\text{s}$ bestimmt werden. Die Zeitachse am Oszilloskop ist durch $100 \mu\text{s}/\text{DIV}$ gegeben.

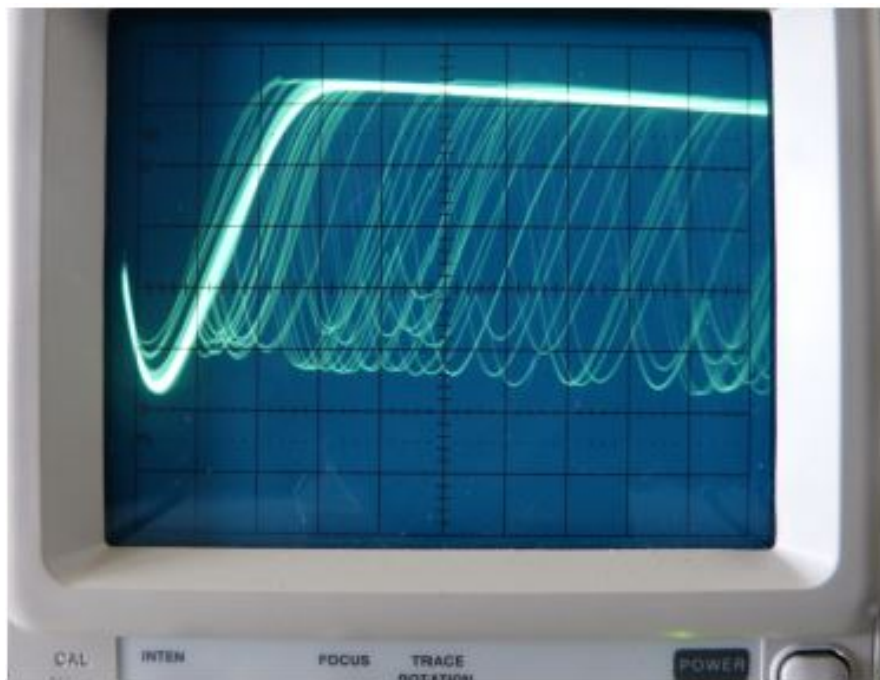


Abbildung 7: Momentaufnahme eines Oszilloskops

4.3 Bestimmung des Zählrohrstroms

Aus dem mittleren Zählrohrstrom I kann die Zahl $Z = \frac{I}{\varepsilon_0 N}$ der freigesetzten Ladungen pro eingefallenen Teilchen berechnet werden. Dazu wurden folgende Werte erhoben:

Tabelle 2: Zählerstrom Messdaten

Spannung U in V	Entladungen N in imp/min	Strom I in μA
350	9837	0.3
400	9995	0.4
450	10264	0.7
500	10151	0.8
550	10184	1.0
600	10253	1.3
650	10493	1.4
700	11547	1.8

Mithilfe der Formel (5) und $Z = \frac{I}{\varepsilon_0 N}$ kann der Zählerstrom berechnet und in eine Grafik eingetragen werden:

Tabelle 3: Errrechnete Daten

$I / \mu\text{A}$	Z in Mrd.
$0,3 \pm 0,05$	$11,4209 \pm 2,1021$
$0,4 \pm 0,05$	$14,9871 \pm 2,2041$
$0,7 \pm 0,05$	$25,5401 \pm 2,6722$
$0,8 \pm 0,05$	$29,5136 \pm 2,9242$
$1,0 \pm 0,05$	$36,7724 \pm 3,3686$
$1,3 \pm 0,05$	$47,4824 \pm 4,0656$
$1,4 \pm 0,05$	$49,9654 \pm 4,1785$
$1,8 \pm 0,05$	$58,3773 \pm 4,5097$

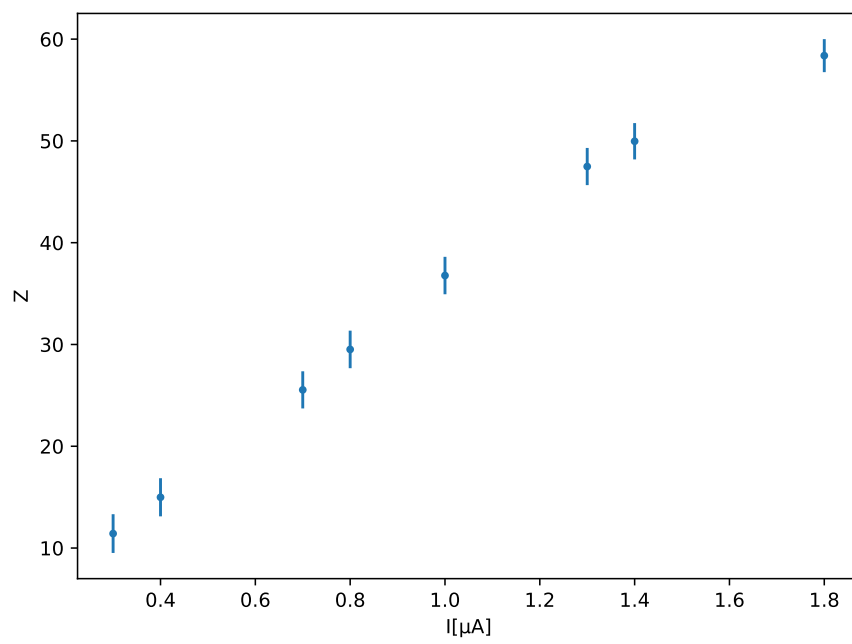


Abbildung 8: Errechneter Zählerstrom mit Fehler

5 Diskussion

Bei diesem Versuch sind Fehlerquellen und Unsicherheiten, die die Ergebnisse verfälschen, unumgänglich.

Die Integrationszeit, über die in allen drei Aufgaben gemessen wurde, wurde manuell gestartet und gestoppt. Dadurch kommt es zu einer Unsicherheit aufgrund der individuellen Reaktionszeit.

Die dabei gemessenen Zählraten sind Poisson verteilt, d.h. es gibt eine Messunsicherheit von $\Delta N = \sqrt{N}$.

Bei der oszillographischen Totzeit Bestimmung gilt das Ergebnis als verfälscht, da die Totzeit vom Bildschirm des Oszilloskops abgelesen wird.

Bei der Zwei-Quellen-Methode entsteht eine Messunsicherheit, da nicht sichergestellt werden kann, dass sich die beiden Präparate in genau dem gleichen Abstand relativ zum Eintrittsfenster des Zählrohrs befinden. Außerdem ist die Formel (4) zur Berechnung der Totzeit genähert.

Zur Bestimmung der freigesetzten Ladungsmenge wurde der Zählrohrstrom von einem Amperemeter abgelesen. Die Ablesegenauigkeit beträgt $\Delta I = 0,05 \mu A$

Diese Faktoren führen dazu, dass theoretische Werte von praktisch gemessenen Werten abweichen und die Ergebnisse verfälscht wurde.

Literatur

- [1] John D. Hunter. „Matplotlib: A 2D Graphics Environment“. Version 1.4.3. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 90–95. URL: <http://matplotlib.org/>.
- [2] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. *SciPy: Open source scientific tools for Python*. Version 0.16.0. URL: <http://www.scipy.org/>.
- [3] Eric O. Lebigot. *Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties*. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [4] *Literaturwert für spezifische Wärmekapazität von Wasser*. 2020. URL: https://www.chemie.de/lexikon/Spezifische_W%C3%A4rmekapazit%C3%A4t.html (besucht am 01.11.2020).
- [5] Travis E. Oliphant. „NumPy: Python for Scientific Computing“. Version 1.9.2. In: *Computing in Science & Engineering* 9.3 (2007), S. 10–20. URL: <http://www.numpy.org/>.
- [6] *Versuchsanleitung zu Versuch V703 Das Geiger-Müller-Zählrohr*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2020.