

V703 - Das Geiger-Müller-Zählrohr

Jan Herdieckerhoff
jan.herdieckerhoff@tu-dortmund.de

Karina Overhoff
karina.overhoff@tu-dortmund.de

Durchführung: 28.05.2019, Abgabe: 04.06.2019

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel	3
2	Theorie	3
2.1	Aufbau und Wirkungsweise eines Geiger-Müller-Zählrohrs	3
2.2	Totzeit, Nachentladung	4
2.3	Charakteristik des Zählrohrs	5
2.4	Ansprechvermögen des Zählrohrs	6
3	Fehlerrechnung	7
4	Durchführung	7
4.1	Messung der Charakteristik	8
4.2	Messung der Totzeit	8
4.2.1	Messung mit dem Oszillographen	8
4.2.2	Messung mit der Zwei-Quellen-Methode	8
5	Auswertung	8
5.1	Zählrohr-Charakteristik	8
5.2	Totzeitbestimmung	11
5.3	Transportierte Ladungsmenge	13
6	Diskussion	14
6.1	Zählrohr-Charakteristik	14
6.2	Totzeitbestimmung	14
6.3	Transportierte Ladungsmenge	15
	Literatur	15

1 Ziel

Das Ziel dieses Versuchs ist es die Funktionsweise eines Geiger-Müller-Zählrohrs kennenzulernen. Es soll die Zählrohr-Charakteristik aufgenommen werden. Außerdem werden die pro einfallendem Teilchen freigesetzte Ladung sowie die Totzeit des Zählrohrs bestimmt. Die Totzeit soll auf zwei Arten bestimmt werden.

2 Theorie

2.1 Aufbau und Wirkungsweise eines Geiger-Müller-Zählrohrs

Das Zählrohr besteht wie in Abb. 1 zu erkennen aus einem Kathodenzylinder mit Radius r_k und einem Anodendraht mit Radius r_a . Im Inneren befindet sich ein Gasgemisch. Indem an das Äußere des Rohrs und den Draht eine äußere Spannung angelegt wird, entsteht ein radiales E-Feld. Die Feldstärke beträgt

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

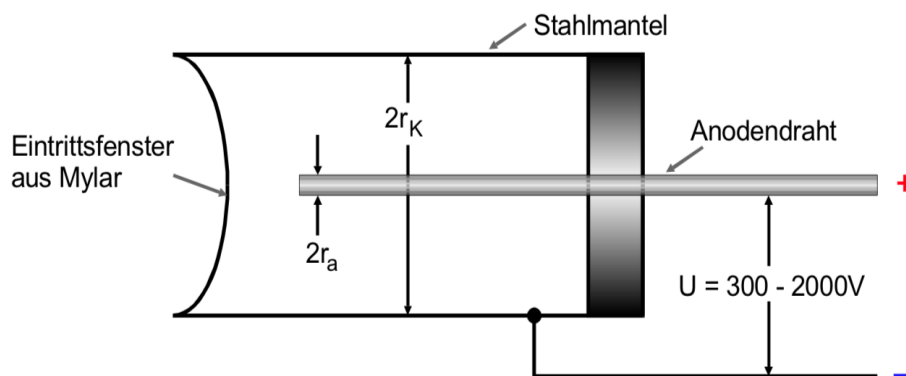


Abbildung 1: Zu sehen ist der Aufbau eines Geiger-Müller-Zählrohrs. Der äußere Zylinder ist die Kathode und der Draht die Anode. Das Eintrittsfenster besteht aus einer durch den Druck nach innen gewölbten Mylar-Folie. [1]

Durch die Energie des eindringenden Teilchens werden Atome ionisiert und Elektronen werden losgelöst. Je nach angelegter Spannung können verschiedene Phänomene auftreten. Ein Gerät, das nur so viel Spannung benutzt, dass der Ionisationsstrom proportional zur Energie und Intensität der einfallenden Strahlung ist, ist eine Vorstufe zum Zählrohr und wird Ionisationskammer genannt.

Wenn die Energie der Elektronen groß genug ist, um ihrerseits Atome zu ionisieren, wird dieser Vorgang Stoßionisierung genannt. Wenn lawinenartig die Zahl der freien Elektronen zunimmt, wird dies eine Townsend-Lawine genannt. Die Ladung ist dann so groß, dass sie

als Ladungsimpuls gemessen werden kann. Eine Proportionalität zwischen der Ladung Q und der Primärteilchenenergie definiert das Zählrohr als Proportionalitätszählrohr. Sobald der Proportionalitätsbereich überschritten ist, wird der Auslösebereich, der eigentliche Arbeitsbereich des Geiger-Müller-Zählrohrs, erreicht. Die dabei entstehenden UV-Photonen können sich senkrecht zu den Feldlinien bewegen und so auch an anderen Stellen noch zusätzliche Elektronen loslösen. So entstehen im gesamten Zählrohr weitere Lawinen.

2.2 Totzeit, Nachentladung

Während die Elektronen schnell zum Draht wandern, bleiben die positiven Ionen aufgrund der größeren Masse länger im Gasraum. Sie bauen vorübergehend einen sogenannten "Ionenschlauch" auf. Für eine bestimmte Zeit sind dann keine Stoßionisationen mehr möglich, da die Feldstärke dadurch verringert wird. Diese Zeit wird Totzeit genannt, weil währenddessen kein Teilchen registriert werden kann.

Die Totzeit kann mithilfe der Zählraten zweier Präparate bestimmt werden

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

Dabei ist N_1 die Zählrate des ersten, N_2 die des zweiten Präparats und N_{1+2} ist die Zählrate mit beiden Präparaten.

Den Zeitraum, der sich an die Totzeit anschließt, bis die Registrierung von Teilchen wieder möglich ist, wird Erholungszeit genannt.

Auf den Zählrohrmantel auftreffende Ionen können dort Elektronen aus der Oberfläche befreien. Diese "Sekundärelektronen" können die Zählrohrentladung erneut zünden, sodass durch den Durchgang nur eines Teilchens mehrere zeitlich versetzte Ausgangsimpulse entstehen können. Diese Impulse werden Nachentladungen genannt. Um diese Impulse zu verhindern, sind Gase im Inneren des Rohres vorhanden. Die Edelgasionen stoßen mit den Atomen der Gasmoleküle zusammen und ionisieren diese. Diese haben dann weniger Energie und können somit nicht zu Nachentladungen führen.

Die Totzeit, Erholungszeit und die Nachentladungen sind in Abb. 2 zu sehen.

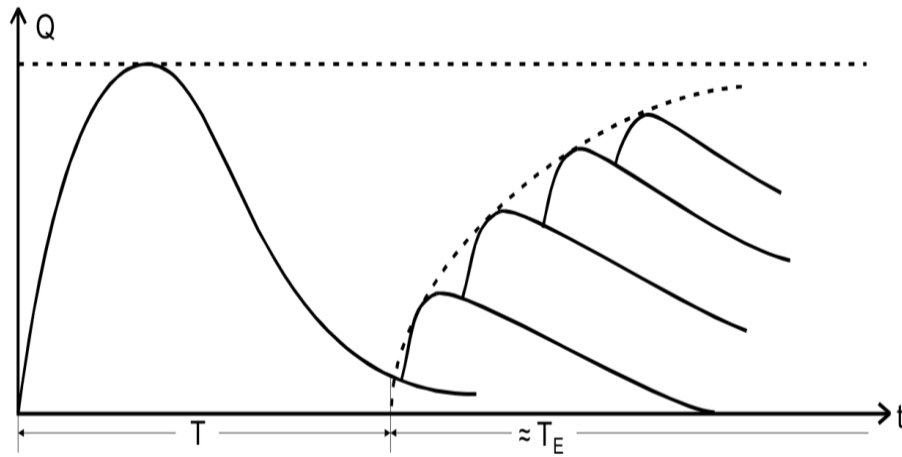


Abbildung 2: Es ist die Ladung gegen die Zeit aufgetragen. Dabei ist die Totzeit gekennzeichnet. Anschließend folgen die Nachentladungen. [1]

2.3 Charakteristik des Zählrohrs

Wenn die Teilchenzahl N bei konstanter Strahlungsintensität gegen die angelegte Spannung U aufgetragen wird, entsteht eine Charakteristik wie in Abb. 3. Bei der Spannung U_E setzt der Auslösebereich ein. Der darauf folgende lineare Teil wird Plateau genannt. Die Steigung des Plateaus sollte am besten null sein. Am Ende des Plateaus nimmt die Anzahl der Nachentladungen extrem zu. Sie geht über in den Bereich der selbstständigen Gasentladung, der sehr schädlich für ein Strahlrohr ist.

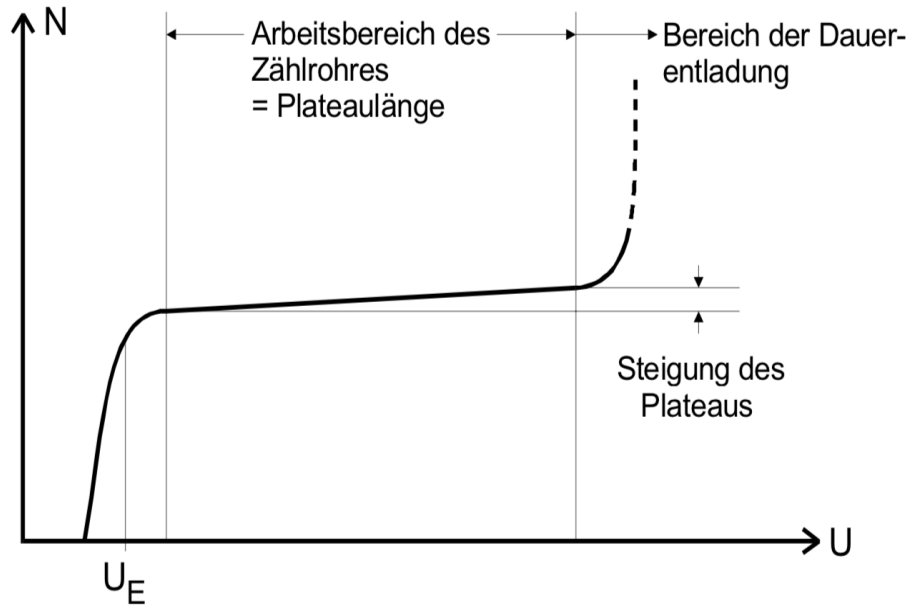


Abbildung 3: Es ist die Zählrohrcharakteristik zu sehen. Die Zählrate N wird dabei gegen die angelegte Spannung U aufgetragen. Durch die vertikalen Linien werden der Arbeitsbereich des Zählrohrs und der Bereich der Dauerentladung gekennzeichnet. Es ist außerdem die Steigung des Plateaus eingezeichnet. [1]

Die Steigung des Plateaus kann mittels

$$s = \frac{N_2 - N_1}{N_A} \cdot \frac{100\%}{100\text{ V}} \quad (2)$$

bestimmt werden. Dabei ist N_A die Zählrate bei der Arbeitsspannung U_A . Die Zählraten N_1 und N_2 sind die der Spannungen $U_A \mp 50\text{ V}$.

Die transportierte Ladungsmenge kann mittels

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

bestimmt werden. Dabei ist \bar{I} der mittlere Zählerstrom, Δt das Zeitintervall und N die Anzahl der registrierten Teilchen.

2.4 Ansprechvermögen des Zählrohrs

Das Ansprechvermögen ist die Wahrscheinlichkeit dafür, dass ein Teilchen im Zählrohr nachgewiesen wird. Für α - und β -Teilchen liegt diese bei fast 100 %. Wichtig ist, dass die Teilchen überhaupt in das Rohr gelangen. Es wird deshalb eine Mylar-Folie als Fenster verwendet. Diese Folie ist leicht nach innen gewölbt, durch den Unterdruck im Inneren des Rohres.

3 Fehlerrechnung

Der Mittelwert einer Stichprobe von N Werten wird durch

$$\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

bestimmt.

Die Standardabweichung der Stichprobe wird berechnet mit

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}.$$

Die relative Abweichung zwischen zwei Werten kann durch

$$f = \frac{x_a - x_r}{x_r}$$

bestimmt werden.

Die allgemeine Formel für eine lineare Regression ergibt sich mit der Steigung m und dem y -Achsenabschnitt n zu

$$y = m \cdot x + n. \quad (4)$$

4 Durchführung

Die Anordnung sieht wie in Abb. 4 dargestellt aus. Durch die gesammelten Ladungen Q entsteht ein messbarer Spannungsimpuls. Dieser wird über den Kondensator ausgekoppelt und nach der Verstärkung im Zählgerät registriert.

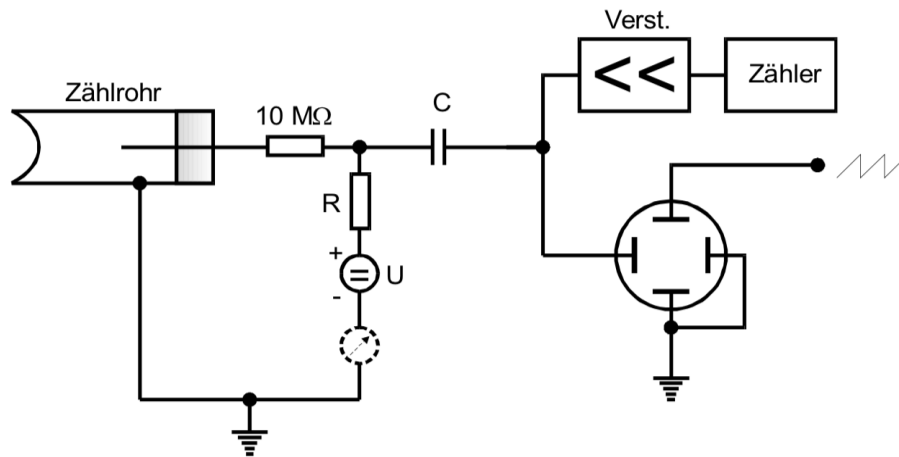


Abbildung 4: Zu sehen ist der Aufbau der Apparatur. Das Zählrohr ist an einer Spannungsquelle angeschlossen. Der Strom kann durch ein Mikroammeter gemessen werden. Außerdem sind ein Verstärker und ein Zähler angeschlossen. [1]

4.1 Messung der Charakteristik

Eine β -Quelle wird vor das Zählrohr gestellt und die Zählrate wird in Abhängigkeit von der Betriebsspannung U gemessen. Dabei wird zwischen Quelle und Zählrohr ein Stück Papier gestellt, um die Strahlungsintensität zu schwächen.

Die Spannung wird zunächst auf 320 V gestellt und in 20 V Schritten auf 680 V erhöht. Mithilfe eines Strommessgeräts wird dabei der mittlere Zählrohrstrom gemessen.

4.2 Messung der Totzeit

Die Totzeit wird auf zwei Arten bestimmt. Zunächst wird sie mithilfe eines Oszillographen und anschließend mit der Zwei-Quellen-Methode bestimmt.

4.2.1 Messung mit dem Oszillographen

Die Strahlintensität wird wieder erhöht, indem das Papier entfernt wird. Die Spannung wird auf 500 V gestellt, damit die Messung etwa in der Mitte des Plateaus stattfindet. Die Zeitablenkung des Oszillographen wird durch die Anstiegsflanke getriggert, sodass die Totzeit abgelesen werden kann. Diese entspricht dabei der Strecke auf der x -Achse, die mit dem Anfang der Kurve beginnt und bei dem gedachten Schnitt der ersten Nachentladungskurve mit der Achse endet (siehe Abb. 2).

4.2.2 Messung mit der Zwei-Quellen-Methode

Es wird die Totzeit mit der Zwei-Quellen-Methode gemessen. Dafür wird bei einer Spannung von 500 V die Anzahl der registrierten Teilchen des ersten Präparats pro 60 s gemessen. Anschließend wird ein zweites Präparat hinzugefügt. Die Zählrate wird wieder gemessen. Zum Schluss wird das erste Präparat entfernt und die Zählrate des zweiten Präparats wird gemessen.

5 Auswertung

5.1 Zählrohr-Charakteristik

Im Folgenden wird die Zählrohr-Charakteristik eines Halogenzählrohrs bestimmt. Die Werte für die angelegte Spannung U und die Anzahl der gemessenen Impulse sind in Tab. 1 dargestellt.

Tabelle 1: Die angelegte Spannung des elektrischen Feldes innerhalb des Geiger-Müller-Zählrohrs und die Anzahl der jeweils gemessenen Impulse.

U/V	$N/\frac{1}{130\text{s}}$	$N/\frac{1}{\text{s}}$
320	11298 86,9	$0.8 \pm$
340	11674 89,8	$0.8 \pm$
360	11921 91,7	$0.8 \pm$
380	11839 91,1	$0.8 \pm$
400	11820 90,9	$0.8 \pm$
420	12087 93,0	$0.8 \pm$
440	11940 91,8	$0.8 \pm$
460	12259 94,3	$0.9 \pm$
480	12135 93,3	$0.8 \pm$
500	12013 92,4	$0.8 \pm$
520	12099 93,1	$0.8 \pm$
540	12301 94,6	$0.9 \pm$
560	12068 92,8	$0.8 \pm$
580	12097 93,1	$0.8 \pm$
600	12354 95,0	$0.9 \pm$
620	12289 94,5	$0.9 \pm$
640	12403 95,4	$0.9 \pm$
660	12507 96,2	$0.9 \pm$
680	12659 97,4	$0.9 \pm$

Die Anzahl der Impulse wird in einer Zeit von

$$\Delta t = 130 \text{ s}$$

gemessen. Die normierten und fehlerbehafteten Werte für die Anzahl der Impulse befinden sich in Tab. 2.

Tabelle 2: Die Spannung U gegen die Anzahl der Impulse pro Sekunde mit den dazugehörigen Fehlerwerten.

U/V	$N/\frac{1}{\text{s}}$
320	$86,9 \pm 0,8$
340	$89,8 \pm 0,8$
360	$91,7 \pm 0,8$
380	$91,1 \pm 0,8$
400	$90,9 \pm 0,8$
420	$93,0 \pm 0,8$
440	$91,8 \pm 0,8$
460	$94,3 \pm 0,9$
480	$93,3 \pm 0,8$
500	$92,4 \pm 0,8$
520	$93,1 \pm 0,8$
540	$94,6 \pm 0,9$
560	$92,8 \pm 0,8$
580	$93,1 \pm 0,8$
600	$95,0 \pm 0,9$
620	$94,5 \pm 0,9$
640	$95,4 \pm 0,9$
660	$96,2 \pm 0,9$
680	$97,4 \pm 0,9$

In Abb. 5 sind diese Werte gegeneinander aufgetragen und es wird eine Ausgleichsgerade im Bereich von 360 bis 620 V mit der allgemeinen Gleichung (4) für die lineare Regressionen bestimmt.

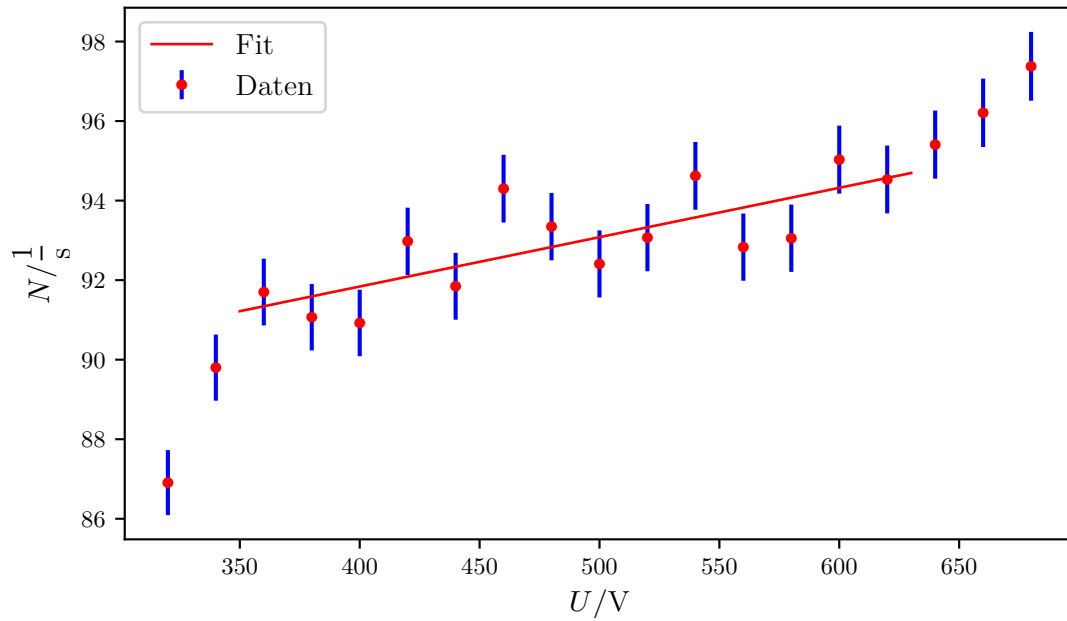


Abbildung 5: Die Zählrate N ist gegen die angelegte Spannung U aufgetragen. Es sind die Daten mit Fehlern sowie eine Ausgleichsgerade im Bereich von 360 bis 620 V eingetragen.

Die lineare Regression ergibt als Parameter

$$m = (0,012 \pm 0,004) \frac{1}{\text{V s}}$$

$$n = (86,9 \pm 2,0) \frac{1}{\text{s}}.$$

Mit diesen Parametern lässt sich aus den Werten für die Anzahl bei 450 und 550 V die Steigung des Plateaus mit Gleichung (2) bestimmen. Die Steigung des Plateaus beträgt

$$m_{\text{Plateau}} = 1,3 \pm 0,4 \frac{\%}{100 \text{ V}}.$$

5.2 Totzeitbestimmung

Bei einer Spannung von 500 V ergibt sich durch das Ablesen vom Oszilloskop (Abb. 6) eine Totzeit von

$$T_{\text{Tot},1} = (54 \pm 10) \mu\text{s}.$$

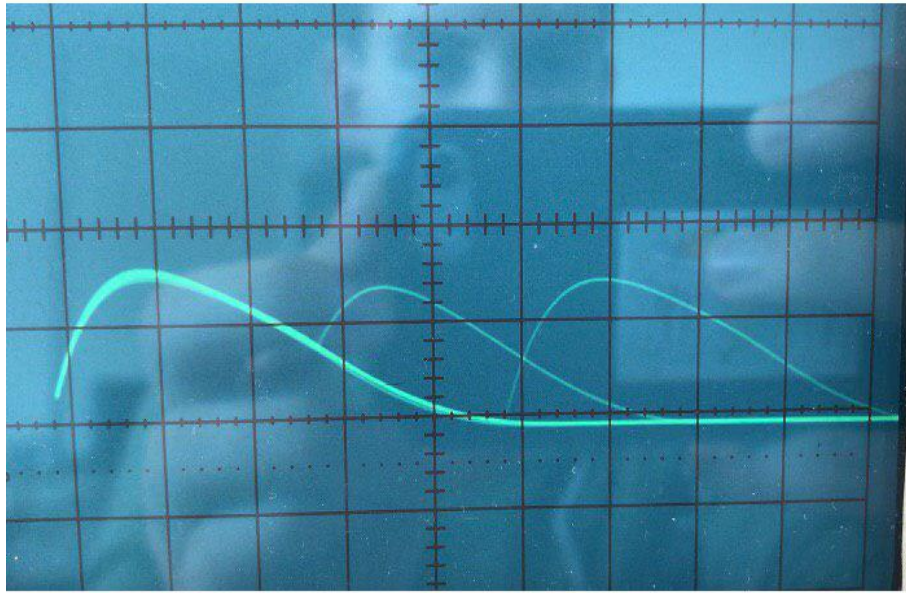


Abbildung 6: Das Foto des Bildschirms des Oszilloskops. Die x -Achse entspricht der Zeit ($20 \mu\text{s}$ pro Kästchen) und die y -Achse (1 V pro Kästchen) der Spannung. Die beiden rechten Kurven entsprechen den Nachentladungen.

Die Totzeit lässt sich auch durch die Zwei-Quellen-Methode berechnen. Bei der Messung haben sich für die erste und zweite Quelle, sowie für die Kombination aus beiden folgende Werte ergeben

$$\begin{aligned} N_1 &= 9730 \frac{1}{60 \text{ s}} \\ N_2 &= 11918 \frac{1}{60 \text{ s}} \\ N_{1+2} &= 21187 \frac{1}{60 \text{ s}}. \end{aligned}$$

Diese Werte werden durch die Messdauer von

$$\Delta t = 60 \text{ s}$$

geteilt und ein Fehler entsteht ebenfalls dadurch

$$\begin{aligned} N_1 &= 162,17 \pm 0,101 \frac{1}{\text{s}} \\ N_2 &= 198,63 \pm 0,111 \frac{1}{\text{s}} \\ N_{1+2} &= 353,12 \pm 0,141 \frac{1}{\text{s}}. \end{aligned}$$

Daraus ergibt sich für die Totzeit mit Gleichung (1) ein Wert von

$$T_{\text{Tot},2} = (119,3 \pm 3,1) \mu\text{s}.$$

5.3 Transportierte Ladungsmenge

In Tab. 3 stehen die Anzahl der gemessenen Impulse und die Stromstärke bei verschiedenen angelegten Spannungen. In Abb. 7 sind die Spannung und die Stromstärke gegeneinander aufgetragen.

Tabelle 3: Die angelegte Spannung des elektrischen Feldes innerhalb des Geiger-Müller-Zählrohrs, die Anzahl der jeweils gemessenen Impulse und der Strom innerhalb des Geiger-Müller-Zählrohrs.

U/V	$N/\frac{1}{130,00\text{s}}$	$I/\mu\text{A}$
320	11298	0,10
400	11820	0,20
480	12135	0,30
540	12301	0,35
560	12068	0,40
600	12354	0,45
640	12403	0,50
660	12507	0,55
680	12659	0,60

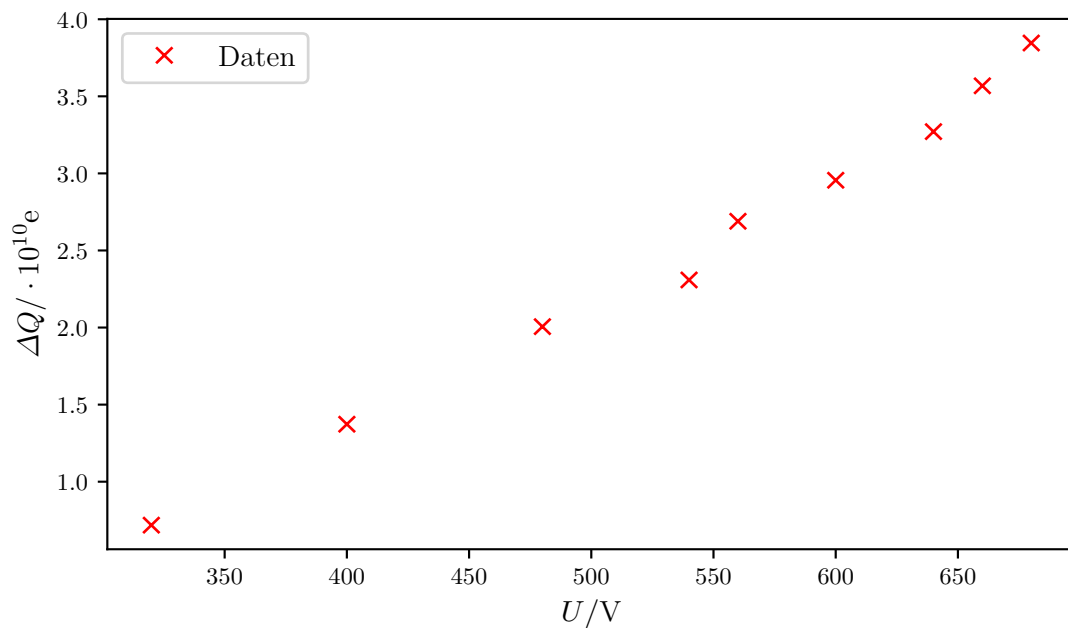


Abbildung 7: Die Stromstärke ist gegen die angelegte Spannung aufgetragen. Es sind nur die Daten eingetragen.

Aus den Werten für die Stromstärke und der Anzahl der Impulse ergibt sich mit Gleichung (3) die transportierte Ladungsmenge ΔQ und daraus wiederum die transportierte Ladungsmenge in Abhängigkeit von der Elementarladung e . Die Ergebnisse sind in Tab. 4 eingetragen.

Tabelle 4: Die Spannung, die Stromstärke, die Anzahl der Impulse, die transportierte Ladungsmenge und die transportierte Ladungsmenge in Einheiten der Elementarladung.

U / V	I / μA	$N/\frac{1}{\text{s}}$	$\Delta Q/\text{nC}$	$\Delta Q/\cdot 10^{10}e$
320	0,10	$86,910 \pm 0,07$	$1,150 \pm 0.001$	0.718 ± 0.001
400	0,20	$90,920 \pm 0,07$	$2,199 \pm 0.002$	1.373 ± 0.001
480	0,30	$93,350 \pm 0,07$	$3,213 \pm 0.003$	2.006 ± 0.002
540	0,35	$94,620 \pm 0,07$	$3,698 \pm 0.003$	2.309 ± 0.002
560	0,40	$92,830 \pm 0,07$	$4,308 \pm 0.003$	2.689 ± 0.002
600	0,45	$95,030 \pm 0,07$	$4,735 \pm 0.004$	2.956 ± 0.002
640	0,50	$95,410 \pm 0,08$	$5,241 \pm 0.004$	3.271 ± 0.003
660	0,55	$96,210 \pm 0,08$	$5,717 \pm 0.004$	3.568 ± 0.003
680	0,60	$97,380 \pm 0,08$	$6,162 \pm 0.005$	3.846 ± 0.003

6 Diskussion

6.1 Zählrohr-Charakteristik

Die Steigung liegt mit ungefähr einem Prozent pro 100 V in einem Bereich, der ungefähr dem entspricht, was zu erwarten war. Im Vergleich liegt der Wert bei einem handelsüblichen Geiger-Müller-Zählrohr [2] bei 0,04 %/V. Somit liegt die relative Abweichung bei 75 %.

6.2 Totzeitbestimmung

Die Totzeit durch die Messung mit dem Oszilloskop ergibt einen Wert, der bei einer relativen Abweichung von 54,74 % zu der Messung durch die Zwei-Quellen-Methode liegt. Zumindest die Größenordnung scheint ungefähr gleich zu sein.

Der relative Fehler der ersten Totzeitmessung liegt bei 18,52 %. Die Messung mit der Zwei-Quellen-Methode ergibt einen relativen Fehler von 2,60 %.

Die angegebene Totzeit bei einem handelsüblichen Geiger-Müller-Zählrohr [2] beträgt

$$T_{\text{lit}} = 90 \mu\text{s}.$$

Die ermittelten Totzeiten weichen davon für $T_{\text{Tot},1}$ um 40 % bzw. für $T_{\text{Tot},2}$ um 32,56 % ab.

6.3 Transportierte Ladungsmenge

Die transportierten Ladungsmengen haben einen relativen Fehler, der sehr klein ist, also unter 0,1 %.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Versuch Nr. 703 - Das Geiger-Müller-Zählrohr*. 2019. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V703.pdf>.
- [2] „Geiger-Müller-Zählrohr“. In: (2019). URL: https://www.lehrmittel-xxl.de/refID/99/shop/Geiger-Mueller-Zaehlrohr_p17031.html?gclid=EAIaIQobChMIzP-i2dHA4gIViaiaCh1e0grAEAkYASABEgLgy_D_BwE.
- [3] 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/>.
- [4] Eric Jones, Travis E. Oliphant, Pearu Peterson u. a. „SciPy: Open source scientific tools for Python“. Version 0.16.0. In: (). URL: <http://www.scipy.org/>.
- [5] Eric O. Lebigot. „Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties“. Version 2.4.6.1. In: (). URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.
- [6] 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/>.