

V703 Das Geiger-Müller-Zählrohr

Alina Landmann, alina.landmann@tu-dortmund.de
Jannine Salewski, jannine.salewski@tu-dortmund.de

Durchführung: 05.06.2018

Abgabe: 12.06.2018

TU Dortmund - Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	1
2 Theorie	1
2.1 Aufbau	1
2.2 Funktionsweise	1
2.3 Totzeit und Erholungszeit	3
2.4 Charakteristik eines Zählrohrs	4
2.5 Messung der pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzten Ladungsmenge . . .	5
3 Durchführung	5
4 Auswertung	6
4.1 Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs	6
4.2 Qualitative Bestimmung der Tot- sowie der Erholungszeit	8
4.3 Ermittlung der Totzeit mittels der zwei-Quellen Methode	9
4.4 Messung der pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzten Ladungsmenge . . .	10
5 Diskussion	11
Literatur	13

1 Zielsetzung

Im diesem Versuch wird die Funktionsweise eines Geiger-Müller-Zählrohrs untersucht.

2 Theorie

2.1 Aufbau

Der Aufbau eines Geiger-Müller-Zählrohrs ist in Abbildung 1 dargestellt. Hauptsächlich besteht dieses aus einem mit Gas gefüllten Hohlzylinder, welcher als Kathode dient, und einem Anodendraht in der Mitte. Das Gas ist meist ein Gemisch aus Argon und Ethylalkohol. Wird nun eine Spannung an das Geiger-Müller-Zählrohr angelegt entsteht ein radialsymmetrisches elektrisches Feld im Inneren des Rohrs, welches beschrieben wird durch

$$E(r) = \frac{U}{\ln(r_k/r_a)} \cdot \frac{1}{r} ,$$

wobei r_k den Radius des Hohlzylinders, r_a den Radius des Anodendrahtes und U die anliegende Spannung beschreibt. Da mit dem Geiger-Müller-Zählrohr vor allem α - und β -Strahlung nachgewiesen werden kann und diese aber von dem Hohlzylinder absorbiert werden würden, ist das Eintrittsfenster aus Mylar-Folie, welches sogar auch γ -Strahlung hindurch lässt.

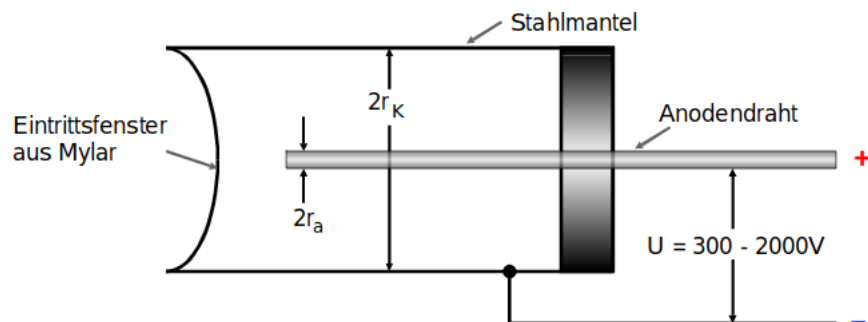


Abbildung 1: Aufbau eines Geiger-Müller-Zählrohrs. [Dor]

2.2 Funktionsweise

In einem Geiger-Müller-Zählrohr kann α - und β -Strahlung zu fast 100 % nachgewiesen werden, γ -Strahlung hingegen ist zu hochenergetisch, hier kann nur Strahlung mit hohen Intensitäten nachgewiesen werden, da die Wechselwirkung mit Materie hier relativ gering ist. Gelangt nun ein geladenes Teilchen in das Volumen des Geiger-Müller-Zählrohrs, führt dies dazu, dass ein Teilchen aus dem Gas ionisiert wird. Die Ionisation führt dazu,

dass ein Kation und ein Elektron entstehen: Das Elektron wird durch das elektrische Feld in Richtung des Anodendrahtes beschleunigt und dort absorbiert. Der daraus entstehende elektrische Impuls wird durch einen Kondensator ausgekoppelt und verstärkt, sodass ein Zähler die Impulse messen kann. Das Kation hingegen wird in Richtung des Kathodenzylinders beschleunigt und eigentlich im Kathodenmaterial absorbiert. Hierbei ist aber zu beachten, dass das Kation eine hohe Energie hat und somit aus dem Kathodenmaterial weitere Elektronen herauslösen kann, diese werden als **Sekundärelektronen** bezeichnet. Würde man diesen Effekt nicht verhindern, würden diese Elektronen zu einem weiteren Ausschlag des Geiger-Müller-Zählrohrs führen. Dieser Effekt kann aber durch Hinzugabe von Ethylalkoholgas verhindert werden, denn die Kationen werden von diesen Atomen absorbiert und regen diese zu Schwingungen an. Somit gelangen die Kationen nicht mehr bis zu dem Kathodenmaterial und können auch somit keine Sekundärelektronen mehr herauslösen. Da die Energie des eintreffenden, geladenen Teilchens viel höher ist, als die Ionisierungsenergie, können mehrere Ionisationen gleichzeitig stattfinden. Der weitere Verlauf nach der Ionisierung hängt stark von der angelegten Spannung ab:

- Für niedrige Spannungen (siehe Abbildung 2, Bereich I) ist die Wahrscheinlichkeit einer **Rekombination** sehr hoch. Durch die Rekombination wird die Ionisation rückgängig gemacht. Es entstehen in diesem Bereich also nur sehr geringe, kaum messbare Ströme.
- Im Proportionalitätsbereich (siehe Abbildung 2), Bereich II und III) regt die oben beschriebene Ionisation weitere Ionisationen an, indem das ionisierte Elektron durch das elektrische Feld in Richtung des Anodendrahtes beschleunigt wird. Hierbei gewinnt es so viel Energie, dass es ein weiteres Atom zu Ionisierung anregen kann. So entsteht schnell eine **Elektronenlawine**. Wichtig in diesem Bereich ist außerdem, dass die gemessenen elektrischen Impulse proportional zu der **Energie** und der **Intensität** der eindringenden Strahlung ist.
- In dem Spannungsbereich des Geiger-Müller-Zählrohrs (siehe Abbildung 2, Bereich IV) kommt zu der Elektronenlawine noch ein weiterer Effekt hinzu: Bei der Elektronenlawine entstehen nicht nur eine große Anzahl an Elektronen, sondern für hohe Spannungen auch **UV-Photonen**. Diese können, aufgrund ihrer neutralen Ladung, auch senkrecht oder entgegengesetzt der Feldlinien in dem Zylinderkondensator bewegen und somit weitere Atome und somit Elektronenlawinen anregen. In diesem sogenannten **Auslösebereich** ist der gemessene elektrische Impuls jetzt nun noch von der **Intensität** abhängig und es kann keine Aussage mehr über die Energie der Strahlung getroffen werden.
- Überschreitet man den Auslösebereich und erhöht die Spannung weiter, so wird durch eine einzelne Ionisation eine Dauergasentladung entzündet und das Geiger-Müller-Zählrohr wird durch daraus entstehende zu hohe Stromdichten zerstört. Dies wird der Bereich der **selbständigen Gasentladung** genannt.

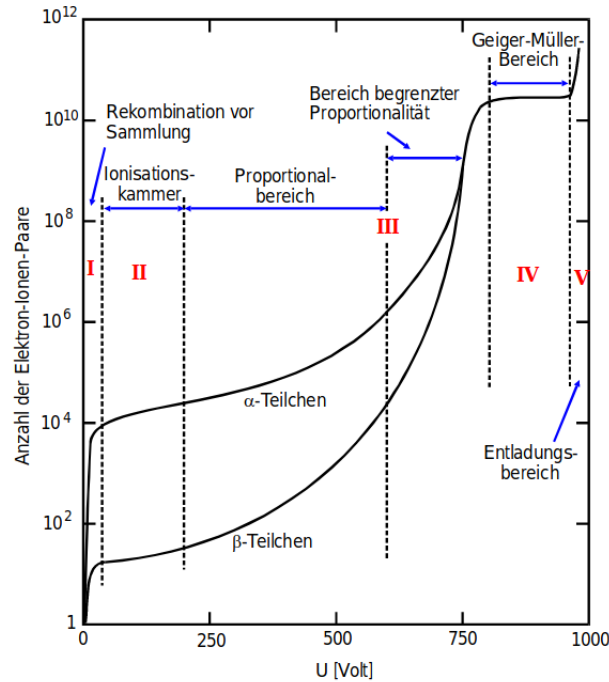


Abbildung 2: Anzahl Elektronen in Abhängigkeit der Spannung. [Dor]

2.3 Totzeit und Erholungszeit

Im Gegensatz zu Elektronen, die sich durch ihre geringe Masse relativ schnell zum Anodendraht bewegen, werden die positiv geladenen Kerne durch ihre größere Masse langsamer beschleunigt und benötigen für die Zeit bis zur Kathode länger. Da diese nicht instantan zum Kathodenmaterial gelangen, bildet sich für eine kurze Zeit eine positive Raumladung, auch **Ionenschlauch** genannt, welche sich dem elektrischen Feld entgegengesetzt. Das führt dazu, dass in dem Bereich um den Anodendraht keine Ionisationen mehr möglich sind. Also auch wenn in diesem Zeitraum ein weiteres geladenes Teilchen in das Zählrohrvolumen eintritt, kann dies nicht detektiert werden. Man definiert also eine Zeit T , in der es nach einer Detektion nicht möglich ist, weitere Teilchen zu detektieren, die sogenannte **Totzeit**. Nach solch einer Ionisationslawine und der Totzeit müssen die Ionen zunächst wieder vollständig neutralisiert werden, damit das elektrische Feld nicht mehr durch Ionen gestört werden kann. Diese Zeit wird **Erholungszeit** genannt. Diese beiden charakteristischen Zeiten können an einem Oszilloskop durch Darstellung des elektrischen Impulses abgelesen werden. Außerdem gibt es für die Messung der Totzeit noch die **Zwei-Quellen-Methode**: Hierbei wird in einem Zeitintervall eine Messung mit der Quelle Q_1 durchgeführt, darauf folgend eine Messung im selben Zeitintervall mit der Quelle Q_1 und Q_2 und zuletzt eine Messung mit der Quelle Q_2 . Hierbei sollten sich die jeweiligen Quellen zu den Messungen an der selben Stelle befinden. Das Ergebnis

dieser Messungen wird hervorbringen, dass gilt

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

wobei N jeweils die Anzahl der Counts ist. Aus dieser Relation kann man näherungsweise die Totzeit T bestimmen durch

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

Die Totzeit und die Erholungszeit sind in Abbildung 3 dargestellt.

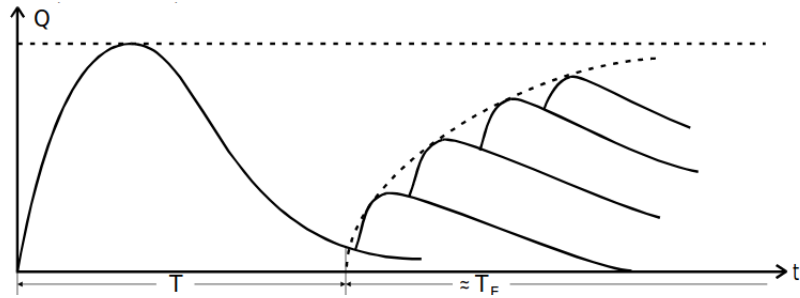


Abbildung 3: Totzeit und Erholungszeit eines Geiger-Müller-Zählrohrs. [Dor]

2.4 Charakteristik eines Zählrohrs

Die Charakteristik eines Geiger-Müller-Zählrohr wird bei konstanter Intensität aufgenommen, hierzu wird die Spannung gegen die erfasste Teilchenanzahl aufgetragen. Solch eine Charakteristik ist in Abbildung 4 zu sehen. Etwa nach der Spannung U_E setzt

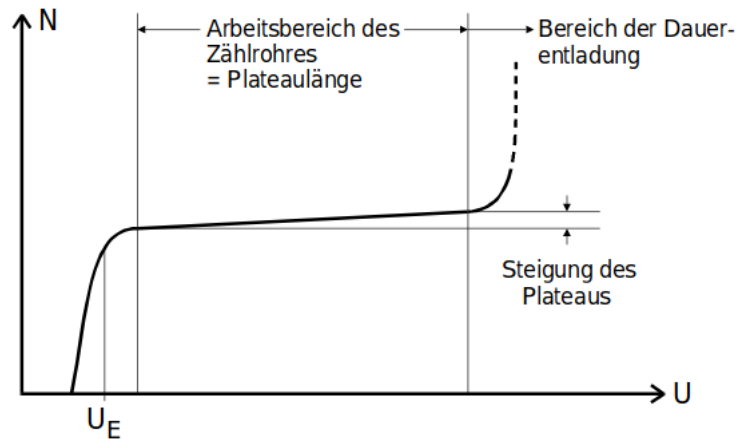


Abbildung 4: Charakteristik eines Geiger-Müller-Zählrohrs. [Dor]

der Auslösebereich ein, hier beginnt bei der Charakteristik das Plateau. Dieses Plateau

hat idealerweise keine Steigung, dies kann aber aufgrund von Nachentladungen nicht erreicht werden. Je geringer die Steigung und je länger das Plateau, desto höher ist die Qualität des Geiger-Müller-Zählrohrs. Nach dem Plateau schließt sich der Bereich der Dauerentladung an, hierbei kann das Zählrohr für hohe Spannungen zerstört werden.

2.5 Messung der pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzten Ladungsmenge

Durch den mittleren Zählrohrstrom \bar{I} kann außerdem die Ladung ΔQ berechnet werden, hierzu werden die Definitionen

$$\bar{I} = \int_0^\tau \frac{U(t)}{R} dt \quad (2)$$

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

gleichgesetzt, wobei $U(t)$ die Spannung, R der Widerstand, Δt das Zeitintervall, ΔQ die in dem Zeitintervall Δt gemessene Ladung und Z die Anzahl der registrierten Teilchen beschreibt.

3 Durchführung

Der Versuch wird nach Abbildung 5 aufgebaut. Zur Messung wird ein -Stahler vor dem Geiger-Müller-Zählrohr platziert.

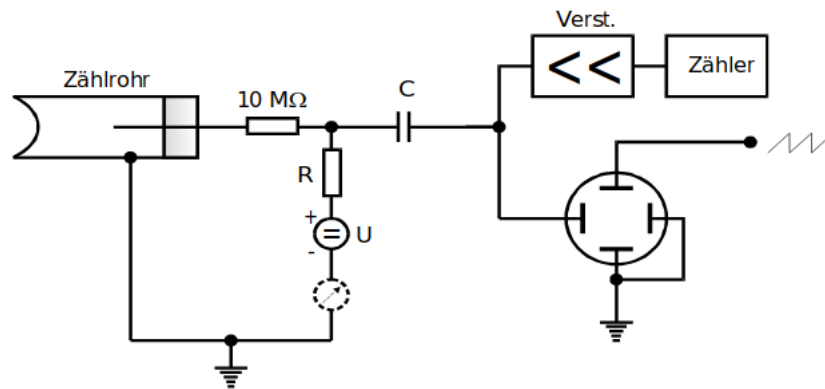


Abbildung 5: Versuchsaufbau. [Dor]

Zur Messung der Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs werden die Counts in Abhängigkeit der Spannung gemessen. Hierbei wird ein Bereich von 300 V bis 700 V in 10 V-Schritten abgetastet und die jeweiligen Counts in einer Zeit von $\Delta t = 60$ s gemessen.

Im zweiten Teil des Versuch soll die Totzeit T und die Erholungszeit T_{er} gemessen werden. Hierzu werden die elektrischen Impulse auf dem Oszilloskop sichtbar gemacht und durch den Trigger an einer Stelle zum Stehen gebracht. Nun wird die Totzeit abgelesen, indem man die Breite des Impulses abliest. Die Erholungszeit kann dadurch bestimmt werden, dass man die Zeit zwischen dem Ende des Hauptimpulses und dem Anfang des nächsten Impulses misst, welcher genauso hoch sein muss, wie der Hauptimpuls. An der Stelle haben sich die Ionen wieder vollständig neutralisiert und es kann ein neuer Impuls gemessen werden. Diese Messungen werden für 5 verschiedene Spannungen im Bereich des Plateaus durchgeführt.

Zur genaueren Messung der Totzeit wird außerdem die Zwei-Quellen-Methode einmal durchgeführt, indem je beide Quellen einzeln und einmal beide Quellen zusammen in einem Zeitintervall von 60 s gemessen werden. Die Spannung beträgt hierbei 550 V.

Zuletzt soll die Abhängigkeit der Ladung von der Spannung bestimmt werden, hierzu werden für mindestens 5 verschiedene Spannungen zwischen 300 V und 700 V die Counts und die Stromstärke gemessen.

4 Auswertung

4.1 Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs

Im ersten Teil des Versuchs wird die Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs untersucht. Hierzu wird die Zählrate N gegen die Betriebsspannung U aufgetragen. Die zur Erstellung des Plots 6 benötigten Werte befinden sich in Tabelle 1. Die Ausschläge des Geiger-Müller-Zählrohrs unterliegen der Poissonverteilung und sind somit fehlerbehaftet. Dieser statistische Fehler wird durch die Fehlerbalken in der Graphik 6 gekennzeichnet und berechnet sich mit \sqrt{N} . Im Plot ist zwischen 370 V und 610 V deutlich ein Plateau zu erkennen, welches eine Breite von 240 V aufweist. Durch die Werte der Plateaus wird eine lineare Ausgleichsgerade gelegt, die in Abbildung 7 explizit zu sehen ist, die folgende Gestalt aufweist:

$$F = ax + b$$

Hierbei ergeben sich für a und b folgende Werte:

$$a = 0.021 \pm 0.005$$

$$b = (182.7 \pm 2.7) \frac{1}{\text{s}}$$

Mit Hilfe folgender Formel lässt sich dann der Steigungswinkel mit zugehörigem Fehler berechnen:

$$\alpha = \arctan(a) = 1.203^\circ$$

$$\Delta\alpha = \sqrt{\left(\frac{1}{a^2 + 1} \Delta a\right)^2} = 0.002^\circ$$

Folglich wird eine Steigung von $(2.1 \pm 0.2) \%$ pro 100 V mit Hilfe folgender Formeln berechnet:

$$S_{\%} = \tan(\alpha) \cdot 100$$

$$\Delta S_{\%} = \sqrt{\left(\frac{1}{\cos^2(\alpha)} \Delta\alpha\right)^2}$$

Tabelle 1: Messwerte zur Erstellung des Plots zur Analyse der Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs.

U / V	N	U / V	N
300	0	510	11665
310	10509	520	11647
320	10938	530	11658
330	11256	540	11811
340	11253	550	11737
350	11261	560	11479
360	11367	570	11839
370	11476	580	11621
380	11279	590	11642
390	11367	600	11697
400	11624	610	11570
410	11298	620	11724
420	11436	630	11628
430	11617	640	11844
440	11668	650	11929
450	11468	660	11861
460	11609	670	12040
470	11409	680	12279
480	11677	690	12236
490	11599	700	12388
500	11665		

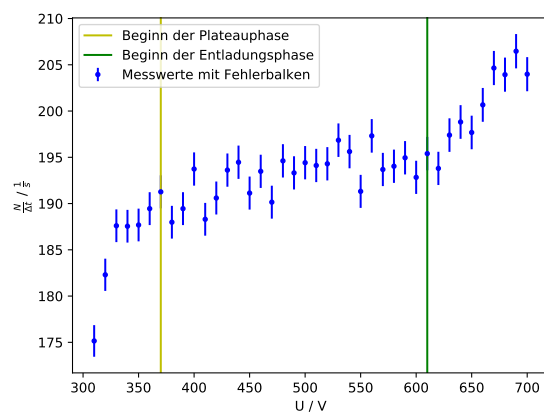


Abbildung 6: Plot zur Untersuchung der Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs.

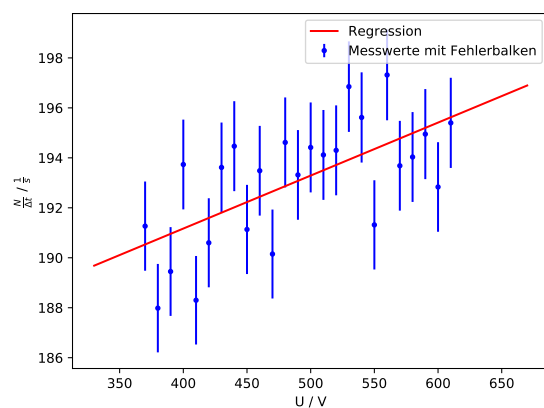


Abbildung 7: Plot zur Analyse des Plateaubereichs mit eingezeichnetem linearem Fit.

4.2 Qualitative Bestimmung der Tot- sowie der Erholungszeit

Die Totzeit kann auf zwei Arten ermittelt werden. Zum einen können die einlaufenden Impulse mittels eines Oszilloskops sichtbar gemacht werden. Dann kann leicht der Abstand zwischen Beginn der Kurve und dem Erreichen der Nulllinie abgelesen werden. Hier ergab sich für verschiedene Betriebsspannungen ein mittlerer Wert von $T_T = (207.5 \pm 9.5) \mu\text{s}$. Außerdem kann auf ähnliche Weise die Erholungszeit ermittelt werden. Hierzu wird der Oszillograph genau beobachtet, da in dessen Display für kurze Zeit Kurven mit der gleichen Höhe wie die der Totzeit in einem gewissen Abstand zu dieser aufflackern. Der Abstand zwischen dem Maximum der Kurve der Totzeit und dem Maximum der Erholungszeit wird ebenfalls für verschiedene Betriebsspannungen abge-

lesen, gemittelt und im Anschluss dazu der Fehler berechnet, was zu einem Wert für die Erholungszeit (T_E) von (0.525 ± 0.096) ms führt. Die abgelesenen Werte für die Totzeit, Erholungszeit und die jeweils zugehörige Spannung sind in tabelle 2 zu finden.

Tabelle 2: Werte zur Ermittlung der Totzeit und der Erholungszeit am Oszillographen.

$T_T / \mu\text{s}$	T_E / ms	U / V
200	0,6	450
200	0,4	500
210	0,5	550
220	0,6	600

Die Mittlung und der zugehörige Fehler für T_T und T_E berechnen sich wie folgt:

$$\overline{T_{T,E}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 T_i$$

$$\Delta \overline{T_{T,E}} = \sqrt{\frac{1}{3} \sum_{i=1}^4 (T_i - \overline{T_i})^2}$$

4.3 Ermittlung der Totzeit mittels der zwei-Quellen Methode

Die Ermittlung der Totzeit mittels der zwei Quellen-Methode wird mit Hilfe von Gleichung 1 durchgeführt. Die dazu benötigten Werte für die Zählraten der einzelnen Quellen (N_1 und N_2), sowie die Zählrate beider Quellen gemeinsam (N_{1+2}) sind in Tabelle 3 zu finden.

Tabelle 3: Messwerte zur Ermittlung der Totzeit

$N_1 / \frac{1}{\text{s}}$	$N_2 / \frac{1}{\text{s}}$	$N_{1+2} / \frac{1}{\text{s}}$	U / V
177 ± 2	205 ± 2	381 ± 3	550

Mit Gleichung 1 ergibt sich für die Totzeit ein Wert von $(13.86 \pm 33.95) \mu\text{s}$. Bei der Berechnung der Totzeit ist zu beachten, dass sich in der Formel für deren Ermittlung mehrere fehlerbehaftete Größen befinden, weshalb hier die Gauß'sche Fehlerfortpflanzung zu beachten ist:

$$\Delta T_T = \sqrt{\left(\frac{N_{1+2} - N_2}{2N_2N_1^2} \Delta N_1\right)^2 + \left(\frac{N_{1+2} - N_1}{2N_1N_2^2} \Delta N_2\right)^2 + \left(\frac{-1}{2N_1N_2} \Delta N_{1+2}\right)^2}$$

4.4 Messung der pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzten Ladungsmenge

Im letzten Teil des Versuchs wird mittels Umstellung von 2 die vom Zählrohr freigesetzte Ladungsmenge pro Teilchen berechnet:

$$\Delta Q = \frac{\Delta t \cdot I}{N}$$

Hierbei beschreibt N die im Zeitintervall Δt registrierten Teilchen und I ist die gemessene Stromstärke. Die berechneten Ergebnisse für die freigesetzte Ladung pro Teilchen sind in Tabelle 4 zu sehen. Der Fehler für die freigesetzte Ladung ergibt sich abermals aus der Tatsache, dass die gemessene Teilchenzahl einen statistischen Fehler besitzt. Für eine Spannung von 300 V wurde vom Zählrohr eine Teilchenzahl von Null gemessen, wovon auszugehen ist, dass dies nicht der Realität entspricht. Es lässt sich mit diesem Messergebnis jedoch keine Ladungsmenge bestimmen. In Abbildung 8 sind die berechneten Ladungsmengen gegen die Betriebsspannung aufgetragen. Auf Grund der wenigen Messwerte ist diese Grafik als relativ ungenau zu betrachten, jedoch ist der lineare Zusammenhang zwischen Spannung und Ladungsmenge zu erahnen.

Tabelle 4: Werte der pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzten Ladungsmenge.

U / V	N / $\frac{1}{s}$	I / A	ΔQ / C	$\frac{\Delta Q}{e_0}$
300	0	0,1	-	-
400	202 ± 2	0,3	$(1,485 \pm 0,015) \cdot 10^{-9}$	$(9,27 \pm 0,09) \cdot 10^9$
550	205 ± 2	0,7	$(3,415 \pm 0,033) \cdot 10^{-9}$	$(2,131 \pm 0,021) \cdot 10^{10}$
600	210 ± 2	0,8	$(3,81 \pm 0,04) \cdot 10^{-9}$	$(2,378 \pm 0,023) \cdot 10^{10}$
700	216 ± 2	1,1	$(5,09 \pm 0,05) \cdot 10^{-9}$	$(3,179 \pm 0,029) \cdot 10^{10}$

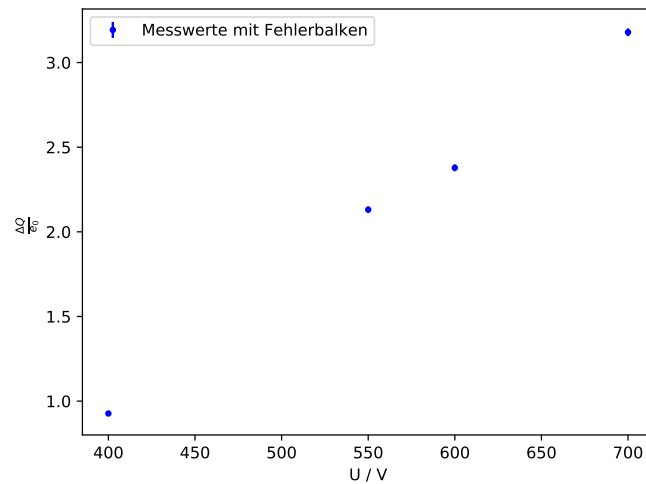


Abbildung 8: Plot zur Darstellung des Verhältnisses zwischen Spannung und freigesetzter Ladungsmenge.

5 Diskussion

Die im Experiment ermittelte prozentuale Steigung des linearen Fits an den Plateaubereich ist als sehr gering zu betrachten. Von daher ist davon auszugehen, dass das Geiger-Müller-Zählrohr zuverlässig arbeitet. In der Literatur werden Steigungen innerhalb des Plateaubereichs bis zu 5 % toleriert [Düs]. Des Weiteren werden die grundsätzlichen Charakteristiken eines Geiger-Müller-Zählrohrs anhand der Grafik (siehe Abbildung 6) gut sichtbar.

Bei der Ermittlung der Totzeit fällt auf, dass sich deutliche Unterschiede zwischen den beiden Methoden abzeichnen. In der Literatur [Düs] sind keine exakten Angaben für die Totzeit kleiner Halogenzählrohre, wie dem im Versuch verwendeten, angegeben. Sie wird lediglich mit $50\,\mu\text{s}$ bis $100\,\mu\text{s}$ abgeschätzt. Ausgehend von einem Wert von $75\,\mu\text{s}$, besteht bei der Ermittlung der Totzeit über die zwei-Quellen-Methode eine prozentuale Abweichung von 81.52 %. Die prozentuale Abweichung von dem qualitativ ermittelten Wert liegt hingegen bei 176.67 %. Beide Bestimmungen sind daher als recht fehleranfällig zu betrachten. Eine mögliche Fehlerquelle bei der Ermittlung durch die zwei-Quellen-Methode ist, dass beide Proben nicht den exakt gleichen Abstand vom Glimmerfenster besitzen. Bei der qualitativen Bestimmung ist das exakte Ablesen des Oszillographen wahrscheinlich die größte Fehlerquelle. Bei der Ermittlung der Erholungszeit ist die größte Schwierigkeit, die nur sehr kurz und mit einer hohen Frequenz aufblitzenden Kurven wahrzunehmen. Deshalb kann der Abstand der beiden Maxima lediglich abgeschätzt werden.

Die Messungen der pro Teilchen freigesetzten Ladungsmengen ergaben plausible Werte

und der lineare Zusammenhang zwischen den freigesetzten Ladungsmengen und der angelegten Betriebsspannung ist trotz der wenigen Messwerte zu erahnen. Hier bleibt zu erwähnen, dass bei wiederholtem Durchführen des Versuchs darauf zu achten ist, schon bei der Untersuchung der Charakteristik des Zählrohrs, bei jeder Messung die entsprechenden Stromstärken zu notieren. Somit stehen zur Auswertung deutlich mehr Werte zur Verfügung, was ein eindeutigeres Ergebnis liefern würde.

Literatur

[Dor] TU Dortmund. *Versuchsanleitung zu Versuch Nr. 601 Franck-Hertz-Versuch*. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/MEDPHYS/BACHELOR/AP/SKRIPT/V703.pdf> (besucht am).

[Düs] Universität Düsseldorf. *25 Schlüsselexperimente/V19_Geiger_Mueller_Zaehlrohr*. URL: http://www.didaktik.physik.uni-due.de/veranstaltungen/soe/25Schluesselexperimente/V19_Geiger_Mueller_Zaehlrohr.pdf (besucht am).