V703

Das Geiger-Müller-Zählrohr

Umut Aydinli
umut.aydinli@tu-dortmund.de

Muhammed-Sinan Demir
sinan.demir@tu-dortmund.de

Durchführung: 07.06.2022

Abgabe: 14.06.2022

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung

In dem Versuch V703 geht es um die Bestimmung der Zählrate von β-Strahlung durch das Geiger-Müller-Zählrohr, sowie die Bestimmung der Totzeit durch zwei verschiedene Methoden, wobei eine die Zwei-Quellen-Methode ist.

2 Theorie

2.1 Der Aufbau der Geiger-Müller-Zählrohrs

Das Geiger-Müller-Zählrohr ist ein Zählrohr, welches aus einem Zylinderförmigen Mantel mit einem Draht in der Mitte besteht. Auf diesen Draht, welcher von einem Gasgemisch, bestehend aus Agon und Ethylalkohol, kann eine Betriebsspannung gelegt werden, wodurch eine Potentialdifferenz zwischen Mantel und Draht entsteht. Zu sehen ist so eine Geiger-Müller-Zählrohr in Abbildung 1. Verwendet wird dieses um ionisierende Strahlung zu messen, da bei eintretender ionisierter Strahlung ein elektrischer Impuls abgegeben wird, der von einem Messgerät leicht gezählt werden kann. Das dabei entstehende elektrische Feld wird berechnet durch

$$\mathrm{E(r)} = \frac{\mathrm{U}}{\mathrm{r}\ \ln(\mathrm{r_k}/\mathrm{r_a})} \ .$$

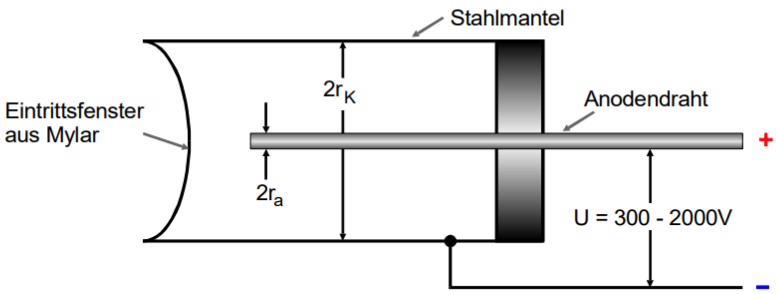


Abbildung 1: Querschnitt durch ein Endfenster-Zählrohr [1].

2.2 Spannungsabhängiges Verhalten des Geiger-Müller-Zählrohrs

Bei Absorption eines geladenen Teilchens vom Rohr, wird dieses solange durch den Gasraum bewegt bis die Energie aufgrund von Ionisationskontakten aufgebraucht ist. Ebenfalls gibt es verschiedene Verhalten des Zählrohr die Spannungsabhängig sind. Eingeteilt werden diese in fünf verschiedene Zonen, dessen Verlauf in Abbildung 2 bildlich dargestellt wird.

Die erste Zone ist die für kleine Betriebsspannungen, in welcher nur wenige Elektronen den Draht erreichen und die restlichen rekombinieren, bevor der Draht erreicht werden kann.

In der zweite Zone ist die Betriebsspannung schon höher, sodass sehr viele Elektronen den Draht erreichen können und ohne davor zu rekombinieren, was dazu führt, dass ein Ionisationsstrom erzeugt wird, der proportional zur Energie der ionisierenden Strahlung ist.

In der dritten Zone ist die Spannung so hoch angelegt, dass die durch Ionisation entstandenen Elektronen so schnell durch das Elektrische Feld beschleunigt werden, dass sie andere Atome beim Zusammenstoßen mit ionisieren. Dabei kommt es zu einer Kettenreaktion welche auch als Townsend-Lawine bezeichnet wird.

Die vierte Zone ist die Zone, in welcher der Arbeitsbereich des Geiger-Müller-Zählrohr liegt. Durch die sehr hohen Spannungen, entstehen bei der Primärionisation in großer Zahl UV-Protonen, welche sich aufgrund der Ladungsneutralität senkrecht zum elektrischen Feld im Zählrohr ausbreiten. Dies sorgt für weitere Elektronenlawinen im gesamten Zählrohrvolumen und die daraus resultierenden elektrischen Impulse sind hinreichend groß, dass diese einfach mit einem Impulszähler gezählt werden können. Die letzte Zone ist die Entladungszone.

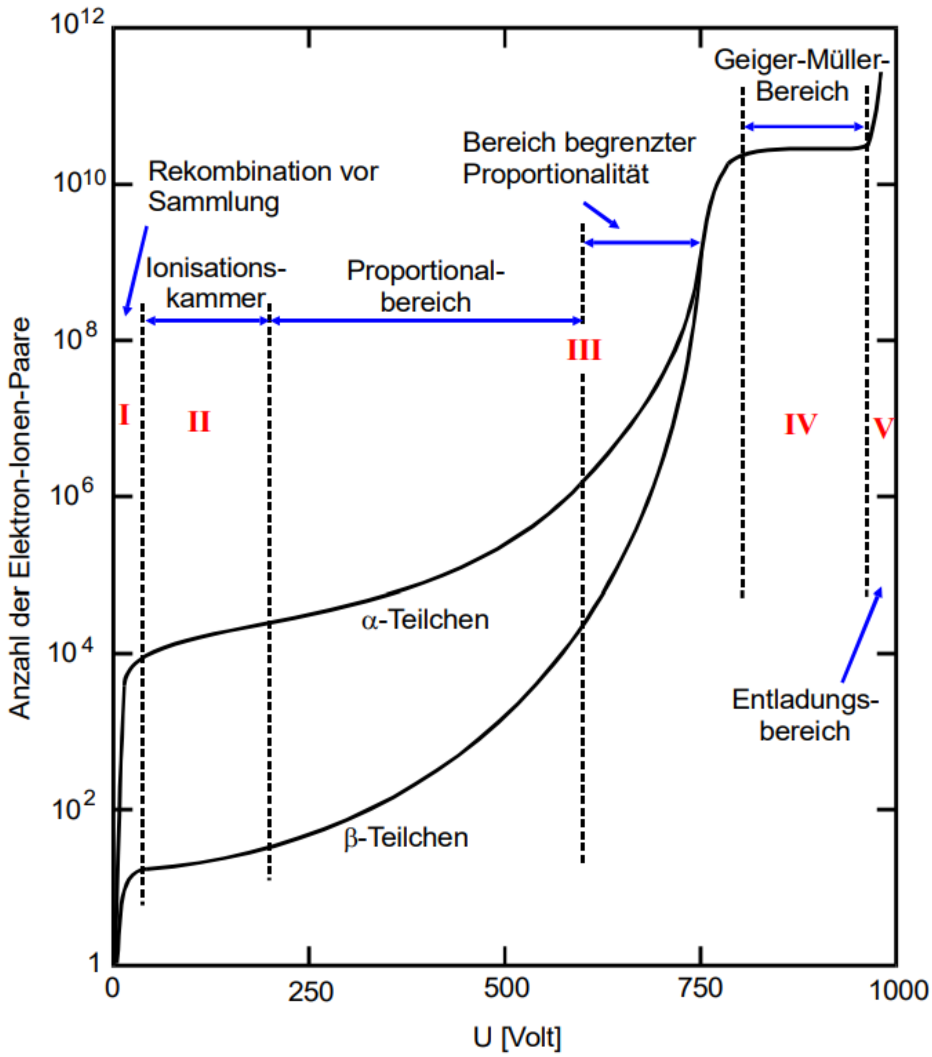


Abbildung 2: Anzahl der erzeugten Elektron-Ionenpaare als Funktion der Spannung U bei einem Proportionalzählrohr (nach Kleinknecht, Detektoren für Teilchenstrahlen) [1].

2.3 Tot-, Erholungszeit und Nachentladungen

Eine radialsymmetrische Raumladung entsteht, da sich die positiven Ionen auf Grund ihrer größeren Masse langsamer zur Kathode bewegen. Dies wird auch als Ionenschlauch bezeichnet. Aus diesem Grund nimmt die Feldstärke für einen Zeitraum T sehr stark ab, sodass keine Stoßionisationen erfolgen können. Die Teilchen, die in der Zeit eintreffen können nicht registriert werden, dieser Zeitraum wird deshalb auch als Totzeit bezeichnet. Es können wegen steigender Feldstärke weitere Lawinen ausgelöst werden. Die zunächst registrierten Ladungsimpulse sind ein wenig schwächer, da das elektrische Feld erst kontinuierlich entstehen muss, wobei der Zeitraum, in dem dies stattfindet, als

Erholungszeit bezeichnet wird. Nebeneffekte bei dem Vorgang sind die Nachentladungen, da Elektronen aus dem Metall gelöst werden können, wenn die positiven Ionen aud dem Mantel treffen. Diese lösen erneut Zählrohrentladungen aus. In Abbildung 3 wird der beschriebenen Prozesse verbildlicht.

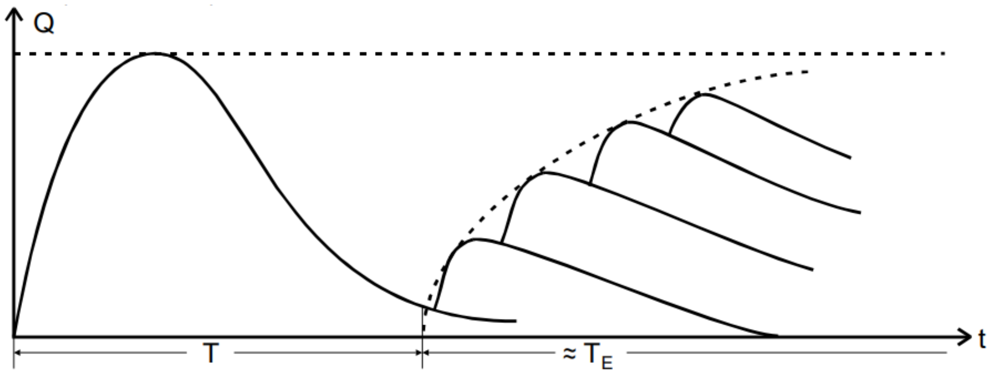


Abbildung 3: Tot- und Erholungszeit eines Zählrohrs, dargestellt im Ladungs-Zeit-Diagramm [1].

2.4 Charakteristik des Zählrohrs

Der Arbeitsbereich eines Geiger-Müller-Zählrohr ist in Abbildung 4 zu sehen. Es fällt auf, dass zwischen der Spannung U_E, bei welcher der Auslösebereich eintritt, und dem Bereich wo die Dauerentladung eintritt, die Kurve einen linearen Verlauf annimmt. Dieser wird auch Plateau genannt, welches bei einem idealen Zählrohr nicht ansteigen würde, jedoch ist ein kleiner Anstieg aufgrund der Nachladung vorhanden.

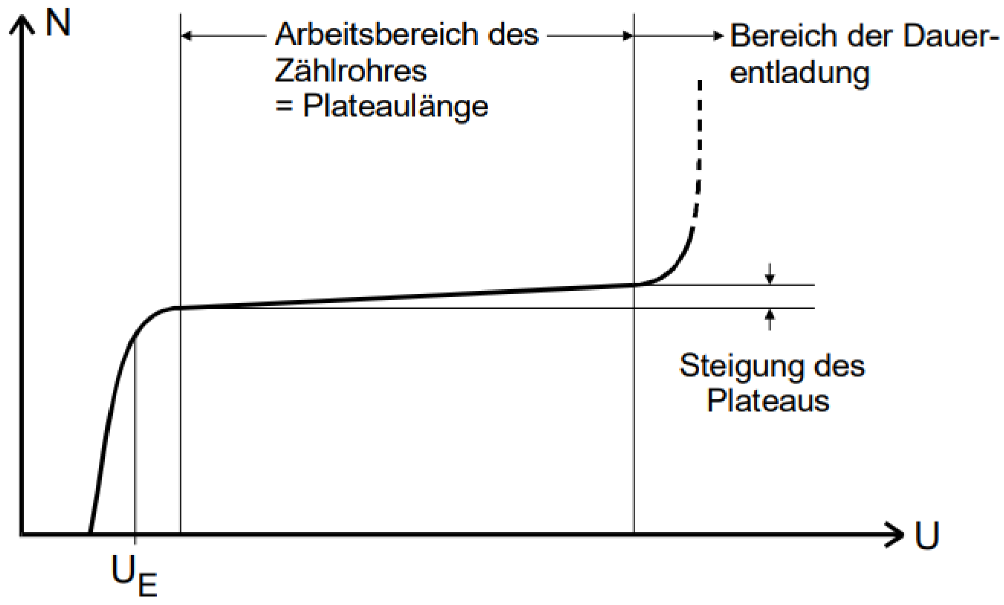


Abbildung 4: Zählrohrcharakteristik [1].

2.5 Bestimmung der Totzeit mit der Zwei-Quellen-Methode

Durch die Totzeit kommt es dazu, dass die registrierte Impulsrate immer kleiner ist als die Anzahl absorbierter Teilchen

$$\mathrm{N_W} = \frac{\text{Impulsrate}}{\text{Messzeit}} = \frac{\mathrm{N_r\,t}}{(1-\mathrm{T\,N_r})\,\mathrm{t}} = \frac{\mathrm{N_r}}{1-\mathrm{T\,N_r}}\,. \tag{1}$$

Würde keine Totzeit auftreten würde

$$\mathrm{N_{1+2}} = \mathrm{N_1} + \mathrm{N_2}\,.$$

gelten. Jedoch wird beobachtet, dass

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

gilt. Die Anzahl der in das Zählrohrvolumen eingedrungenen Teilchen wird mit der Gleichung (1) berechnet, dadurch ergibt sich

$$\frac{\mathrm{N_1}}{1-\mathrm{T\,N_1}}$$

und

$$\frac{\mathrm{N_2}}{1-\mathrm{T\,N_2}}\,.$$

Da $N_{1+2} = N_1 + N_2$ ist, folgt für die Totzeit Näherungsweise

$$T \approx \frac{N_1 + N_2 - N_{1+2}}{2\,N_1\,N_2}\,. \tag{2}$$

2.6 Messung der pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzten Ladungsmenge

Mit Hilfe eines Strommessgerätes kann der mittlere Zählrohrstrom $\bar{I}$ gemessen werden, wodurch sich dann mit

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t}\,Z \tag{3}$$

die Ladungsmenge ΔQ bestimmen lässt.

3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Zusehen ist der Versuchsaufbau in der Abbildung 5. Der Aufbau besteht aus einem Oszilloskop, einem Spannungsgenerator, einem Verstärker, einem Zählratenmesser, einer bzw. zwei β-Strahlungsquellen und einem Geiger-Müller-Zählrohr. Der Spannungsgenerator wird mit dem Geiger-Müller-Zählrohr verbunden, welches ebenso mit dem Zähler verbunden ist. Über den Zählratenmesser wird das Signal verstärkt über den Verstärker und auf dem Oszilloskop projiziert. Das Geiger-Müller-Zählrohr befindet sich mit den β-Strahlenproben in einem Aluminiumkasten.

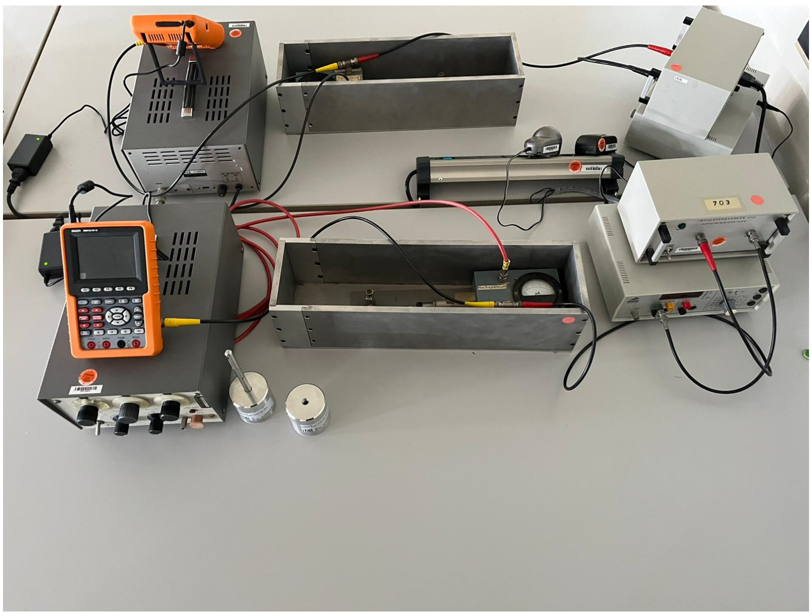


Abbildung 5: Die Abbildung zeigt den gesamten Versuchsaufbau.

3.1 Bestimmung der Zählrate von β-Strahlung

Der Aufbau wird wie in Abbildung 5 aufgebaut. Zuerst wird der Timer des Zählratenmessers auf 60 s und die Spannung von auf 320 V gestellt. Danach wird die β-Strahlenproben in den Aluminiumkasten vor das Geiger-Müller-Zählrohr platziert. Aufgenommen werden die Zählrate und der Strom, welcher auf dem Geiger-Müller-Zählrohr abzulesen ist, notiert. Dies wird für die Spannungen $320\,\mathrm{V} \leq x \leq 700\,\mathrm{V}$, in jeweils 10 V Schritten, wiederholt.

3.2 Bestimmung der Tot- und Erholungszeit mithilfe eines Oszilloskops

Der Aufbau wird nicht verändert. Als nächstes wird die Spannung auf 500 V gestellt und der Verlauf auf dem Oszilloskop wird fotografiert.

3.3 Bestimmung der Tot- und Erholungszeit durch Zwei-Quellen-Methode

Der Aufbau wird erneut nicht verändert. Diesmal wird der Timer des Zählratenmessers auf 120 s und die Spannung von auf 500 V gestellt. Danach werden drei verschiedene Messungen durchgeführt. Zuerst wird die Messung für die erste Probe, isoliert, durchgeführt. Danach wird die Messung für die zweite Probe, ebenfalls isoliert, durchgeführt. Und als letztes werden beide Proben gleichzeitig in dem Kasten platziert und die Zählrate aufgenommen. Wichtig dabei zu beachten ist, dass die Zählrate der beiden isoliert aufgenommenen Proben zusammen addiert höher ist als die der gleichzeitig verwendeten Proben.

4 Auswertung

4.1 Zählrohrcharakteristik

Die Zählrate N und der Strom $\mathrm{I_A}$ werden in Abhängigkeit von der Betriebsspannung U aufgenommen. Aufgenommen werden Messwerte von 320 V bis 700 V in 10 V Schritten mit einer Messzeit von $t = 60\,\mathrm{s}$. Die Messwerte befinden sich in der Tabelle 1. Das Plateau wird im Bereich von 390 V bis 620 V angenommen, mit einer Plateaulänge von 230 V.

Tabelle 1: Die Messwerte der Charakteristik

U / V	N	$N/60\,s$ / $\frac{1}{s}$	I / 10^{-6} A
320	4643 ± 68	$77,38 \pm 8,79$	$0,10 \pm 0,05$
330	4772 ± 69	$79,53 \pm 8,91$	$0,10 \pm 0,05$
340	4898 ± 69	$81,63 \pm 9,03$	$0,10 \pm 0,05$
350	4976 ± 70	$82,93 \pm 9,10$	$0,15 \pm 0,05$
360	5070 ± 71	$84,50 \pm 9,19$	$0,15 \pm 0,05$
370	4975 ± 70	$82,91 \pm 9,10$	$0,20 \pm 0,05$
380	4839 ± 69	$80,50 \pm 8,98$	$0,20 \pm 0,05$
390	5062 ± 71	$84,36 \pm 9,18$	$0,20 \pm 0,05$
400	5110 ± 71	$85,16 \pm 9,22$	$0,20 \pm 0,05$
410	5105 ± 71	$85,04 \pm 9,22$	$0,20 \pm 0,05$
420	4827 ± 69	$80,45 \pm 8,96$	$0,20 \pm 0,05$
430	4943 ± 70	$82,83 \pm 9,07$	$0,20 \pm 0,05$
440	5098 ± 71	$84,96 \pm 9,21$	$0,30 \pm 0,05$
450	5049 ± 71	$84,15 \pm 9,17$	$0,30 \pm 0,05$
460	5116 ± 71	$85,26 \pm 9,23$	$0,30 \pm 0,05$
470	5096 ± 71	$84,93 \pm 9,21$	$0,30 \pm 0,05$
480	5020 ± 70	$83,66 \pm 9,14$	$0,30 \pm 0,05$
490	5011 ± 70	$83,51 \pm 9,13$	$0,35 \pm 0,05$
500	4995 ± 70	$83,25 \pm 9,12$	$0,35 \pm 0,05$
510	5092 ± 71	$84,86 \pm 9,21$	$0,35 \pm 0,05$
520	5181 ± 71	$86,35 \pm 9,29$	$0,40 \pm 0,05$
530	4998 ± 70	$83,30 \pm 9,12$	$0,40 \pm 0,05$
540	5180 ± 71	$86,33 \pm 9,29$	$0,40 \pm 0,05$
550	5147 ± 71	$85,78 \pm 9,26$	$0,40 \pm 0,05$
560	5086 ± 71	$84,76 \pm 9,20$	$0,40 \pm 0,05$
570	5171 ± 71	$86,18 \pm 9,28$	$0,40 \pm 0,05$
580	5155 ± 71	$85,91 \pm 9,26$	$0,40 \pm 0,05$
590	5005 ± 70	$83,41 \pm 9,13$	$0,40 \pm 0,05$
600	5193 ± 72	$86,55 \pm 9,30$	$0,40 \pm 0,05$
610	5119 ± 71	$85,31 \pm 9,23$	$0,40 \pm 0,05$
620	5097 ± 71	$84,95 \pm 9,21$	$0,50 \pm 0,05$
630	5222 ± 72	$87,03 \pm 9,32$	$0,50 \pm 0,05$
640	5245 ± 72	$87,41 \pm 9,34$	$0,50 \pm 0,05$
650	5206 ± 72	$86,76 \pm 9,31$	$0,50 \pm 0,05$
660	5216 ± 72	$86,93 \pm 9,32$	$0,50 \pm 0,05$
670	5263 ± 72	$87,71 \pm 9,34$	$0,50 \pm 0,05$
680	5303 ± 72	$88,38 \pm 9,40$	$0,60 \pm 0,05$
690	5390 ± 73	$89,83 \pm 9,47$	$0,60 \pm 0,05$
700	5302 ± 72	$88,36 \pm 9,40$	$0,60 \pm 0,05$

Geführt wird eine lineare Regression am Plateau, in der Abbildung 6, mit der Ausgleichsrechnung

$$y = mx + b\,.$$

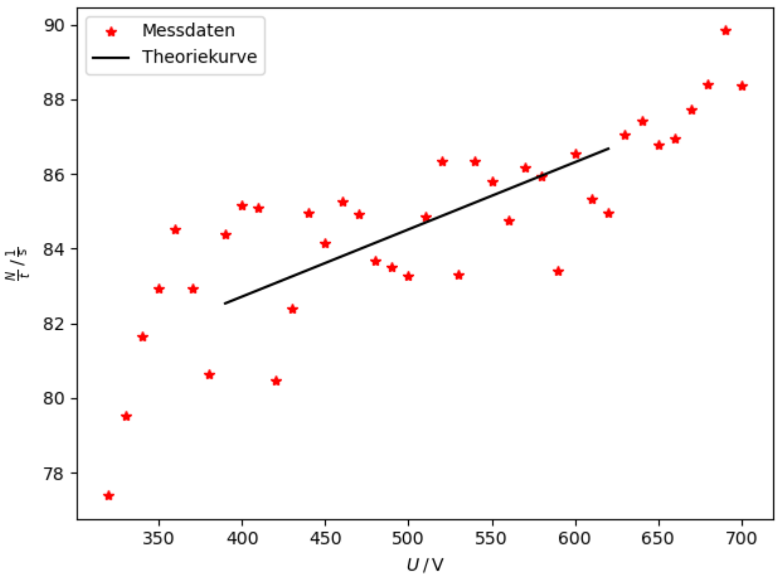


Abbildung 6: Die Steigung am Plateau mit der Spannung auf der x-Achse und der Zahlrate geteilt durch 60 s auf der y-Achse.

Die Regression liefert die Parameter

$$\begin{aligned} \text{Steigung } m &= (0,0084 \pm 0,0039)\,\frac{1}{V}\,, \\ b &= (80,38 \pm 1,99)\,\frac{1}{s}\,, \\ \rightarrow y &= (0,0084 \pm 0,0039)\,x + (80,38 \pm 1,99)\,. \end{aligned}$$

Aus den Parametern berechnet sich die prozentuale Steigung der Gerade nach der Formel

$$\frac{y(U_2) - y(U_1)}{y(U_2)} \cdot 100 = 0,69\%. \tag{4}$$

Demnach beträgt die prozentuale Steigung $m_{\%} = 0,69\%$. Wird die Steigung durch den Faktor der Plateaulänge dividiert, so folgt für die Steigung

$$m = 0,978\% \quad \text{pro} \;\; 100\,\mathrm{V}\,.$$

4.2 Totzeiten

Die Totzeit wird durch das Ablesen am Oszillographen bestimmt. Demnach folgt für die abgelesene Totzeit, anhand der Abbildung 7, einen Wert von

$$T_{\text{Osz.}} = (80 \pm 5)\,\mu\text{s}\,.$$

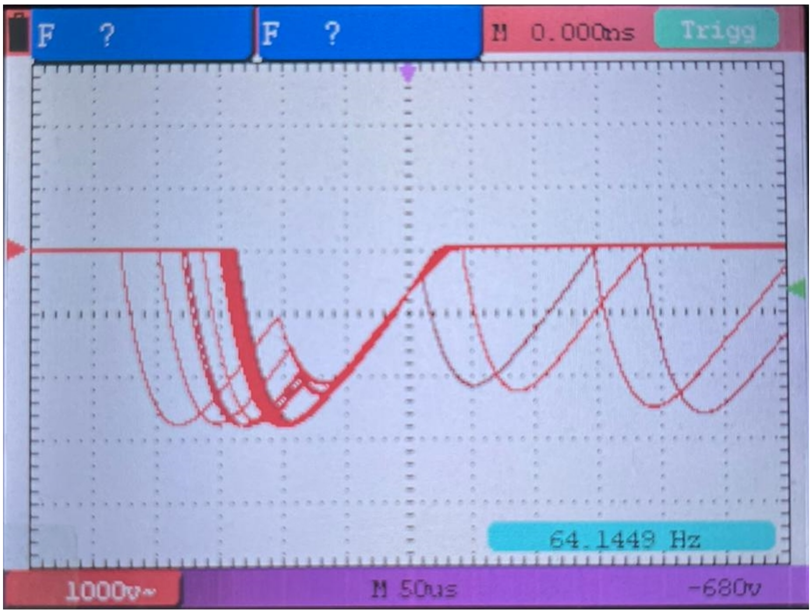


Abbildung 7: Tot und Erholungszeit am Oszillographen.

Anhand der 2-Quellen-Methode wird erneut die Totzeit bestimmt. Ausgenutzt wird bei dieser Methode, dass aufgrund der Totzeit die registrierte Impulszahl N_r kleiner ist als die wahre Anzahl N_W der in das Zählrohr gelangten ionisierenden Teilchen. Angelegt ist eine Spannung von 500 V und gemessen wird für 120 s. Durch die Formel (2) berechnet sich die Totzeit. Mit den gemessenenWerten aus Tabelle 2 ergibt sich

$$T = (72,29 \pm 4,41) \cdot 10^{-6}\,\text{s}\,.$$

Tabelle 2: Messwerte der Totzeiten.

N_1	N_2	N_{1+2}
87390 ± 295	11734 ± 342	180013 ± 424

4.3 Ladungsmenge pro Teilchen

Mit Hilfe der gemessenen Zählrate und dazugehörigen Ströme, wird nach der Formel (3) die Ladungsmengen pro vom Zählrohr freigesetztem Teilchen ermittelt. Die Anzahl der Ladungsmenge wird berechnet indem die Ladungsmengen durch die Elementarladung geteilt wird. Benutzt werden nur ausgewählte Messwerte, zu sehen in Tabelle 3. Anschließend wird die Ladungsmenge gegen die Spannung in Abbildung 8 aufgetragen und eine lineare Regression mit der Ausgleichsfunktion

$$\mathrm{y} = \mathrm{ax} + \mathrm{b}$$

durchgeführt.

Tabelle 3: Messwerte zur Ladungswerk.

U / V	N	N/60 s / $\frac{1}{s}$	I / 10^{-6} A	ΔQ / 10^{-9} C	$\frac{\Delta Q}{\varepsilon_0}$ / 10^{10}
350	4976 ± 70	$82,93 \pm 9,10$	$0,15 \pm 0,05$	$1,80 \pm 0,01$	1,12
380	4839 ± 69	$80,50 \pm 8,98$	$0,20 \pm 0,05$	$2,47 \pm 0,02$	1,54
410	5105 ± 71	$85,04 \pm 9,22$	$0,20 \pm 0,05$	$2,35 \pm 0,02$	1,46
450	5049 ± 71	$84,15 \pm 9,17$	$0,30 \pm 0,05$	$3,56 \pm 0,02$	2,22
500	4995 ± 70	$83,25 \pm 9,12$	$0,35 \pm 0,05$	$4,20 \pm 0,02$	2,62
550	5147 ± 71	$85,78 \pm 9,26$	$0,40 \pm 0,05$	$4,66 \pm 0,02$	2,91
600	5193 ± 72	$86,55 \pm 9,30$	$0,40 \pm 0,05$	$4,62 \pm 0,03$	2,88
630	5222 ± 72	$87,03 \pm 9,32$	$0,50 \pm 0,05$	$5,74 \pm 0,04$	3,58
680	5303 ± 72	$88,38 \pm 9,40$	$0,60 \pm 0,05$	$6,78 \pm 0,02$	4,23

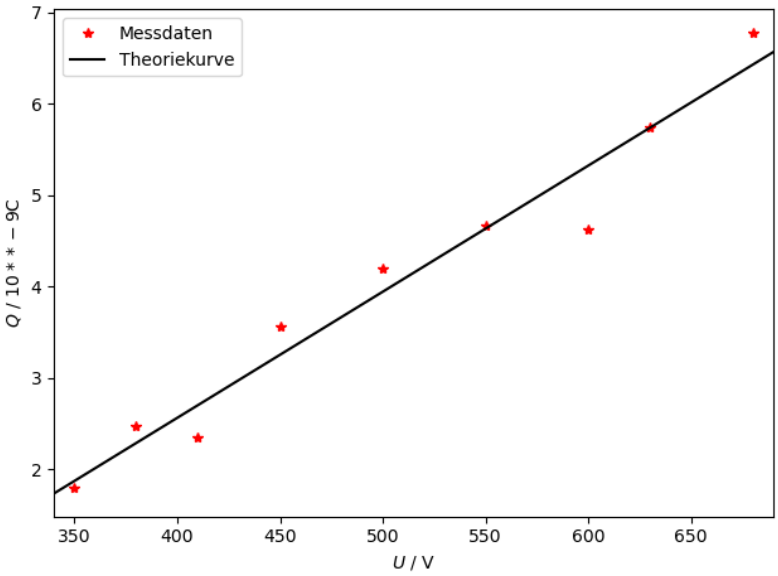


Abbildung 8: Die Ladungsmenge gegen die Spannung geplottet, mit der dazugehörigen Ausgleichsgerade.

Die Parameter ergeben

$$\mathrm{a} = (1{,}38 \pm 0{,}11) \cdot 10^{-21}\,\frac{\Delta \mathrm{C}}{\Delta \mathrm{V}}\,,$$
$$\mathrm{b} = (-2{,}95 \pm 0{,}57) \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}\,.$$

5 Diskussion

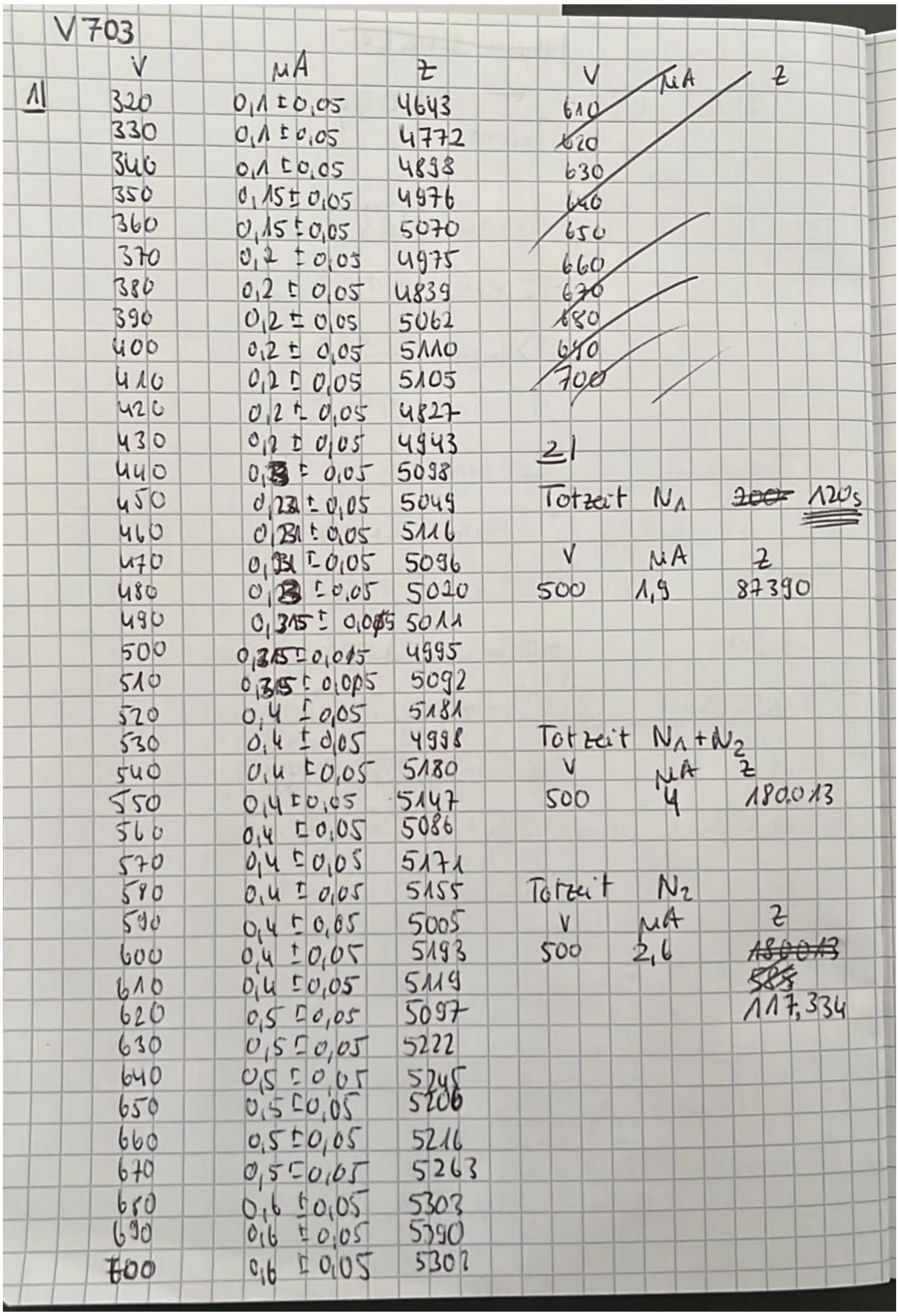
Durch die gemessenen Werte formt sich die Kurve der Charakteristik des Zählrohres, dennoch ist sie nicht vollständig ausgeprägt. Mit einer Plateausteigung von $\mathrm{m} = 0{,}978\%$ pro $1000\,\mathrm{V}$ ist die Steigung akzeptabel, denn je näher an einer Steigung von 0%, desto besser der Bereich.

Die Abweichung der gemessenen Totzeit und der errechneten Totzeit beträgt

$$\mathrm{T}_{\mathrm{Osz.}} = (80 \pm 5)\,\mu\mathrm{s} \quad \mathrm{T} = (72{,}29 \pm 4{,}41)\,\mu\mathrm{s}$$
$$\rightarrow 10{,}66\%\,.$$

Obwohl die Abweichung gering ist sind Ungenauigkeiten vorhanden. Mögliche Fehlerquellen sind z.B das falsche Ablesen der Totzeit oder das viele Auftreten der Nachentladungen. Die Beziehung der Spannung und der freigesetzten Ladungsmenge, ein linearer Anstieg, wurde mit der Regression bekräftigt. Resümierend lässt sich sagen, dass durch den Versuch am Geiger-Mülle-Zählrohr die Funktionsweise der Apparatur sowie die verschiedenen Kenngrößen angelernt und untersucht werden können.

6 Anhang



V703

1|

V	µA	Z
320	0,1 ± 0,05	4643
330	0,1 ± 0,05	4772
340	0,1 ± 0,05	4898
350	0,15 ± 0,05	4976
360	0,15 ± 0,05	5070
370	0,2 ± 0,05	4975
380	0,2 ± 0,05	4839
390	0,2 ± 0,05	5062
400	0,2 ± 0,05	5110
410	0,2 ± 0,05	5105
420	0,2 ± 0,05	4827
430	0,2 ± 0,05	4943
440	0,3 ± 0,05	5098
450	0,23 ± 0,05	5049
460	0,23 ± 0,05	5116
470	0,3 ± 0,05	5096
480	0,3 ± 0,05	5020
490	0,315 ± 0,005	5011
500	0,315 ± 0,015	4995
510	0,35 ± 0,005	5092
520	0,4 ± 0,05	5181
530	0,4 ± 0,05	4998
540	0,4 ± 0,05	5180
550	0,4 ± 0,05	5147
560	0,4 ± 0,05	5086
570	0,4 ± 0,05	5171
580	0,4 ± 0,05	5155
590	0,4 ± 0,05	5005
600	0,4 ± 0,05	5193
610	0,4 ± 0,05	5119
620	0,5 ± 0,05	5097
630	0,5 ± 0,05	5222
640	0,5 ± 0,05	5245
650	0,5 ± 0,05	5206
660	0,5 ± 0,05	5216
670	0,5 ± 0,05	5263
680	0,6 ± 0,05	5303
690	0,6 ± 0,05	5390
700	0,6 ± 0,05	5302

~~V~~	~~µA~~	~~Z~~
~~610~~		
~~620~~		
~~630~~		
~~640~~		
~~650~~		
~~660~~		
~~670~~		
~~680~~		
~~690~~		
~~700~~		

2|

Totzeit N_1 ~~200s~~ 120s

V	µA	Z
500	1,9	87390

Totzeit $N_1 + N_2$

V	µA	Z
500	4	180013

Totzeit N_2

V	µA	Z
500	2,6	~~180013~~ ~~583~~ 117,334

Literatur

[1] TU Dortmund. *Das Geiger-Müller-Zählrohr*. 2022. URL: https://moodle.tu-dortmund.de/pluginfile.php/1977204/mod_resource/content/2/V703.pdf (besucht am 07. 06. 2022).