

V703 Das Geiger-Müller-Zählrohr

Tobias Rücker
tobias.ruecker@tu-dortmund.de

Durchführung: 19.05.2020, Abgabe: 26.05.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Ziel	1
2	Theorie	1
3	Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung	4
4	Auswertung	6
4.1	Aufnahme der Charakteristik des Zählrohrs	7
4.2	Bestimmung der Totzeit	9
4.3	Pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzten Ladungsmenge	10
5	Diskussion	11
	Literatur	13

1 Ziel

Das Geiger-Müller-Zählrohr stellt in der Physik ein wichtiges Instrument zur Messung der Intensität ionisierter Strahlung. Zur näheren Verständnis des Instruments wird im folgenden aus einer Messung die Zählrohr-Charakteristik untersucht und die Totzeit des Geräts bestimmt.

2 Theorie

Beim Geiger-Müller-Zählrohr entsteht durch die Absorption von Strahlung ein elektrischer Impuls. Diese Impulse werden daraufhin durch einen Impulszähler gezählt und damit die Intensität bestimmt. Der Aufbau des Geiger-Müller-Zählrohrs besteht aus einem Kathodenzylinder in dem sich ein Anodendraht befindet. Das innere des Zylinders ist mit einem Gasgemisch aus einem Edelgas und einem Alkohol.

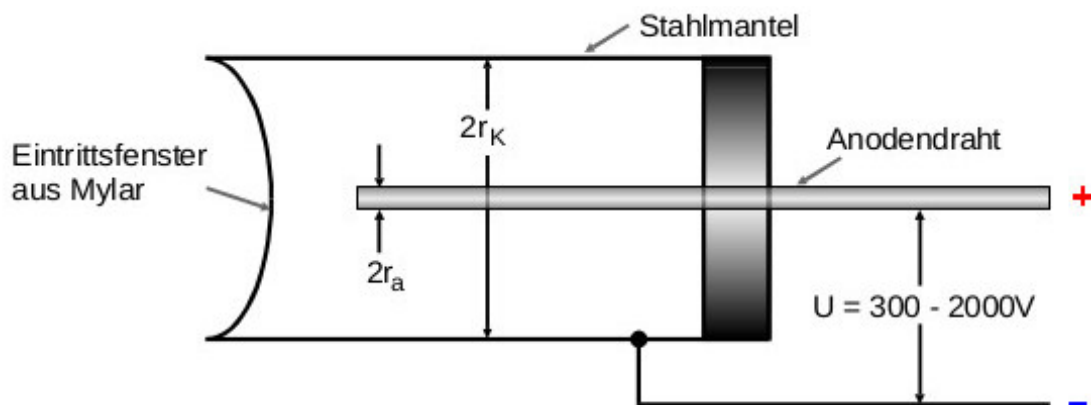


Abbildung 1: Querschnitt durch ein Endfenster-Zählrohr [1]. Die Elektronen dringen von links in das Zählrohr ein und ionisieren das darin enthaltene Gas. Die Elektronen bewegen sich zum Anodendraht und werden gezählt. Die Ionen bewegen sich zum Kathodenzylinder und nehmen Elektronen auf und lösen bei genügend Energie Sekundärelektronen aus.

Durch diesen Aufbau können je nach Radiusgröße des Anodendrahts verschiedene große Beschleunigungen erreicht werden. In dem Kathodenzylinder wechselwirken die einkommenden Teilchen mit dem Gas, bis sie keine Energie mehr besitzen. Dieser Vorgang wird die Primärionisation genannt. Alle Vorgänge, die danach kommen hängen von der jeweiligen Spannung ab.

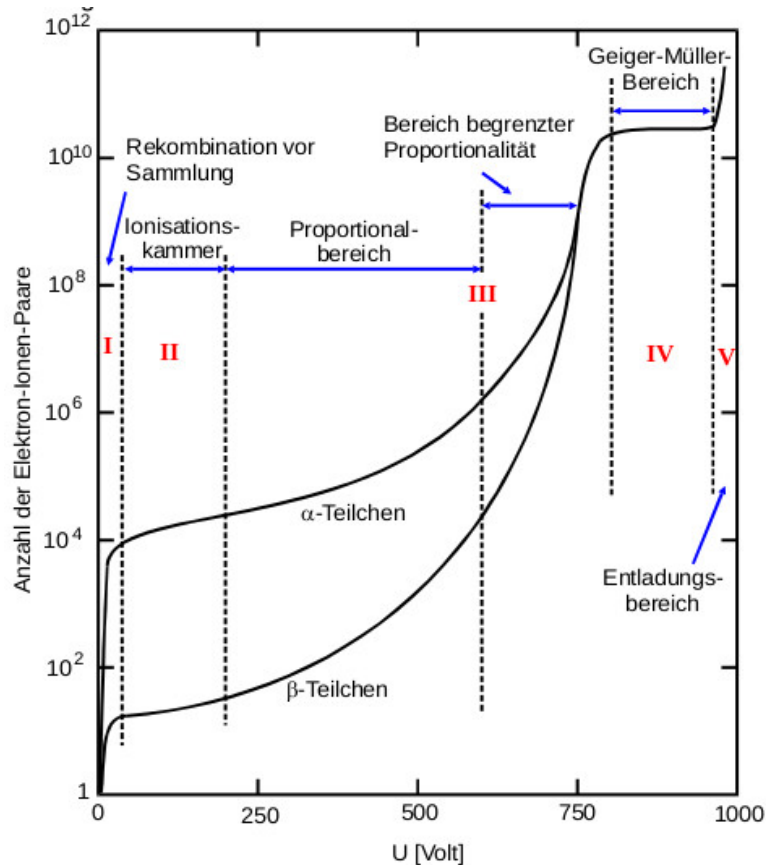


Abbildung 2: Anzahl der erzeugten Elektron-Ionenpaare als Funktion der Spannung [1]. Insgesamt wird die Graphik in 5 Bereiche eingeteilt. In Teil 1 geht das meiste an Ladungen durch Ionisation verloren. Teil 2 heißt Ionisationskammer und enthält bereits einen kleinen Ionisationsstrom. Im dritten Bereich können die Elektronen eine Kaskade von Ionisation auszulösen. Der vierte Bereich stellt den Arbeitsbereich des Geiger-Müller-Zählrohrs dar, welches einen linearen Teil enthält, welcher Plateau genannt wird. Bei einem idealen Zählrohr existiert keine Steigung. Im fünften Teil entsteht ein sehr großer Ionisationsstrom, welcher das Zählrohr zerstören würde.

Diese Graphik veranschaulicht abhängig von der Spannung in welchem Bereich sich das System befindet. Im ersten Bereich gehen die meisten der durch Ionisation erzeugten Elektronen verloren.

Mit steigender Feldstärke entsteht im Bereich II ein Ionisationsstrom, der proportional zur Energie und Intensität. Dieser Bereich wird Ionisationskammer genannt. Diese stellt eine Vorstufe zum Geiger-Müller-Zählrohr dar. Hier sind große Intensitäten nötig, um den kleinen Ionisationsstrom zu messen.

In dem dritten Bereich sind die Elektronen energiereich genug, dass die ausgelösten Elektronen weitere Atome ionisieren. Dieser Prozess wird Townsend-Lawine bezeichnet.

Hier ist die Ladung Q im Draht proportional zur Feldstärke und kann als Maß für die Energie genutzt werden. In diesem Bereich können Intensitäts- und Energiemessungen vorgenommen werden. Im Allgemeinen wird dieser Bereich als Proportionalitätsrohr bezeichnet. Der vierte Bereich umfasst den Arbeitsbereich des Zählrohrs. Hier ist die Ladung Q , die im Draht ankommt, unabhängig von der Primärionisation. Ab dem Punkt, wo die α - und die β -Kurve sich überlagern, beginnt der Auslösebereich. In diesem entstehen UV-Photonen und es finden Elektronenlawinen im gesamten Zählrohr statt. Hier können nur Intensitätsmessungen vorgenommen werden. Durch die Ionisationsprozesse bauen die einzelnen Ionen ein elektrisches Feld in der Nähe des Drahtes auf und schwächen damit die durch die Spannung angelegte Feldstärke. Dadurch finden keine Elektronenlawinen statt. Dadurch entsteht eine Totzeit wie es in der folgenden Graphik zu sehen ist.

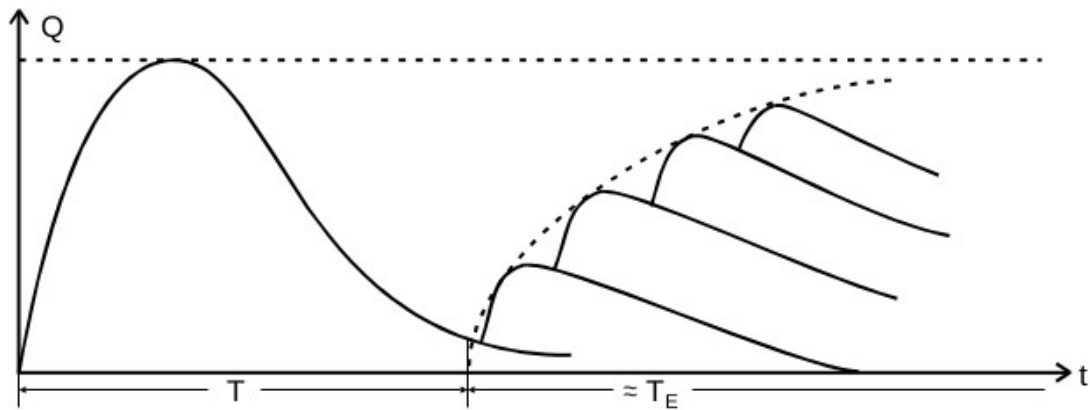


Abbildung 3: graphische Darstellung der Tot- und Erholungszeit [1]. Augetragen ist die im Draht ankommende Ladung gegenüber der Zeit. Durch ionisierte Atome in der Nähe des Drahts können keine Stoßionisation stattfinden und der Anzahl der Ladungen nimmt ab. Diese Zeit T der Abnahme heißt Totzeit. Der Strom erreicht dann nach und nach seine ursprüngliche Stärke zurück in der Erholungszeit T_E .

Nach der Totzeit kommt eine Erholungszeit, bis die Feldstärke wieder seinen ursprünglichen Wert eingenommen hat. Die Ionen nehmen dann nach einiger Zeit Elektronen von dem Metall auf. Dabei sind die Energien der Ionen so groß, dass weitere Elektronen herausgelöst werden. Dadurch entstehen vereinzelt und versetzte Impulse, welche Nachentladungen genannt werden. Dabei ist deren Laufzeit größer als die Totzeit, was ionisierte Ladungen vortäuscht. Das ist der Grund, weshalb in dem Gas zusätzlich Alkoholmoleküle sind. Diese stoßen mit den ionisiertem Edelgas zusammen und werden selbst ionisiert. Da sie aber eine geringere Energie besitzen, lösen sie keine Sekundärelektronen aus, sondern regen nur Schwingungen an.

In einem Gebiet des vierten Bereichs findet sich die Charakteristik des Zählrohrs. Das ist der Gebietsteil, in dem ein linearer Teil, welcher Plateau genannt wird, existiert. Bei einem idealen Gerät findet in diesem Spannungsbereich kein Anstieg statt. In der Realität existieren allerdings noch ein paar Nachentladungen, wodurch ein kleiner Anstieg

vorhanden ist, wie diese Graphik dies zeigt:

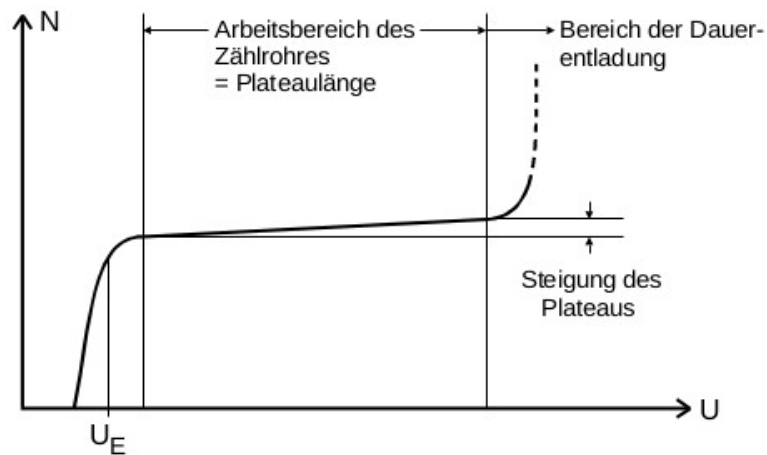


Abbildung 4: Zählrohrcharakteristik (einfallende Strahlung konstant) [1]. Eine vergrößerte Darstellung des vierten Bereichs der Abbildung 2. U_E markiert den Beginn des Auslösebereichs. Zudem ist das Plateau eingezeichnet, sowie dessen Steigung, welches durch Nachentladungen entsteht.

Im fünften und letzten Bereich auf der Graphik 2 erhöht sich die Anzahl der Nachentladungen drastisch, wodurch es zu einer hohen Stromdichte kommt, die das Geiger-Müller-Zählrohr zerstören würde.

Bei diesen ganzen Messungen muss erkannt werden, wieviele Teilchen in das Volumen vordringen. Das wird bei den Endfenster-Zählrohren über eine dünnsschichtige Wand realisiert, in die auch α -Teilchen eindringen können. Hochenergetische Photonen hingegen haben nur eine geringe Chance mit der Wand zu wechselwirken, weshalb Messungen nur bei hohen γ -Intensitäten sinnvoll ist.

3 Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der Grundlegende Aufbau der Messartur sieht folgendermaßen aus:

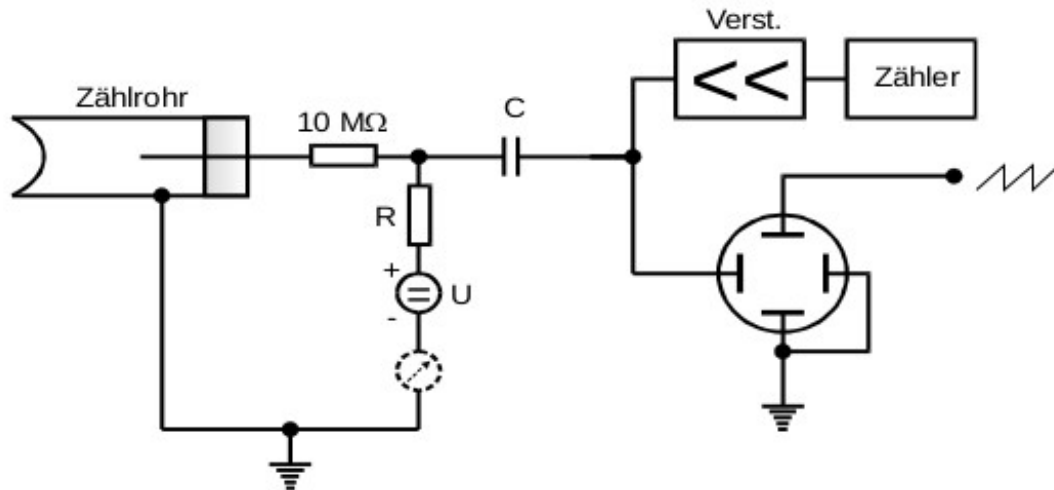


Abbildung 5: Schematischer Aufbau eines Geiger-Müller-Zählrohrs [1]. Auf dem Zählrohr gesammelte Ladungen fließen über einen Widerstand ab und erzeugen einen Spannungsimpuls. Über den Kondensator und einen Verstärker werden die Ladungen dann am Zähler gemessen.

Für die Aufnahme des Charakteristischen Spektrums wird eine β -Quelle vor das Fenster des Zählrohrs platziert. Gemessen wird dabei die Zählrate in Abhängigkeit der Spannung U . Die maximale Impulsrate soll dabei 100 Imp/s nicht überschreiten. Die Messzeit wird dabei auf einen Wert eingestellt, sodass der statistische Fehler geringer als 1% ist. Die Spannung soll dabei nicht in den Entladungsbereich gehen. Parallel zu dieser Messung wird mit einem Amperemeter alle 50 V die Stromstärke gemessen.

Für die Messung der Totzeit mit dem Oszilloskop soll eine hohe Strahlungsintensität vorhanden sein. Nun kann, nachdem das Oszilloskop auf die Anstiegsflanke getriggert wurde, die Totzeit aus dem Graphen gemäß der Abbildung 3 bestimmt werden.

Bei der Zwei-Quellen-Methode zur Messung der Totzeit wird zuerst möglichst Präzise die Zählrate des ersten radioaktiven Präparats bestimmt. Der Aufbau sieht dabei folgendermaßen aus:

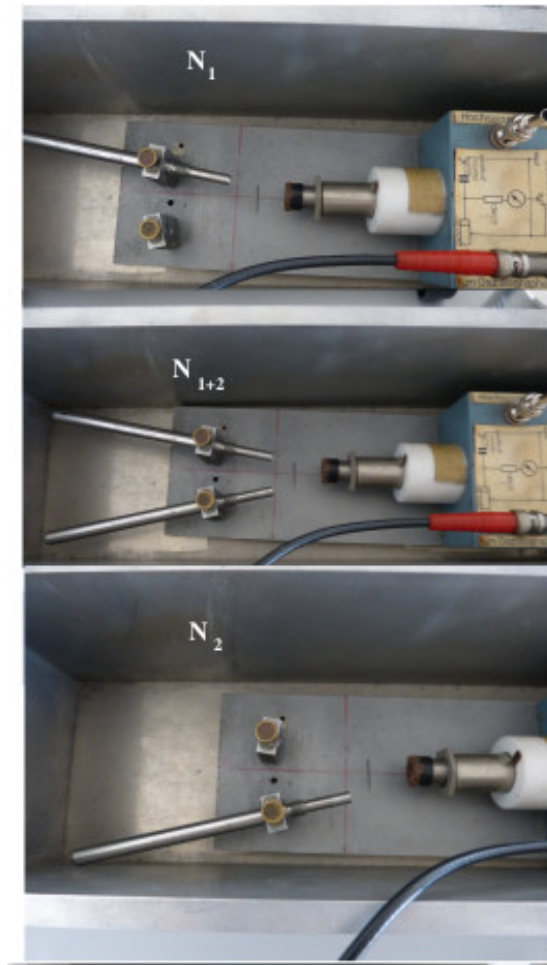


Abbildung 6: Aufbau der Zwei-Quellen-Methode [1]. Im obersten Bild wird die erste Quelle N_1 gemessen. Dabei befindet sich rechts von der Quelle das Geiger-Müller-Zählrohr. Im mittleren Bild werden danach beide Quelle N_1 und N_2 zusammen gemessen. Im letzten Bild wird die erste Quelle entfernt und nur die zweite Quelle N_2 gemessen.

Im zweiten Schritt wird wie auf dem mittleren Bild gezeigt eine zweite Quelle in die Messung eingebracht, ohne die Position der Ersten zu verändern, und dann erneut die Impulsrate gemessen. Zuletzt wird noch die erste Strahlungsquelle entfernt und die Zweite alleine gemessen.

4 Auswertung

Für diese Auswertung wird eine ^{204}Tl -Quelle verwendet. Sie ist so platziert, dass eine Zählrate von 100 Imp/s nicht überschritten wird. Alle Plots in der Auswertung werden mit matplotlib [2] erstellt und alle Fehler werden mit uncertainties [4] berechnet.

4.1 Aufnahme der Charakteristik des Zählrohrs

Für die Messungen der Charakteristik wird in 10 V-Schritten bei einer Integrationszeit von 60 s gemessen. Die Messwerte befinden sich dabei in der folgenden Tabelle:

Tabelle 1: Messwerte für die Charakteristik des Zählrohrs. Die Messung ist in Abständen von 10 V durchgeführt worden und der Fehler bei N kommt von der Poisson-Verteilung $\Delta N = \sqrt{N}$.

U / V	$N / Imp/60s$	U / V	$N / Imp/60s$	U / V	$N / Imp/60s$
320	9672 ± 98	450	$10\,264 \pm 101$	580	$10\,171 \pm 101$
330	9689 ± 98	460	$10\,174 \pm 101$	590	$10\,171 \pm 101$
340	9580 ± 98	470	$10\,035 \pm 100$	600	$10\,253 \pm 101$
350	9837 ± 99	480	$10\,350 \pm 102$	610	$10\,368 \pm 102$
360	9886 ± 99	490	$10\,290 \pm 101$	620	$10\,365 \pm 102$
370	$10\,041 \pm 100$	500	$10\,151 \pm 101$	630	$10\,224 \pm 101$
380	9996 ± 100	510	$10\,110 \pm 101$	640	$10\,338 \pm 102$
390	9943 ± 100	520	$10\,255 \pm 101$	650	$10\,493 \pm 102$
400	9995 ± 100	530	$10\,151 \pm 101$	660	$10\,467 \pm 102$
410	9980 ± 100	540	$10\,351 \pm 102$	670	$10\,640 \pm 103$
420	9986 ± 100	550	$10\,184 \pm 101$	680	$10\,939 \pm 105$
430	9960 ± 100	560	$10\,137 \pm 101$	690	$11\,159 \pm 106$
440	$10\,219 \pm 101$	570	$10\,186 \pm 101$	700	$11\,547 \pm 107$

Die Fehler der Anzahl der Zerfälle N sind dabei Poisson verteilt, wodurch jeder Wert einen Fehler von

$$\Delta N = \sqrt{N} \quad (1)$$

ergibt. Für den Graphen ergibt sich dementsprechend:

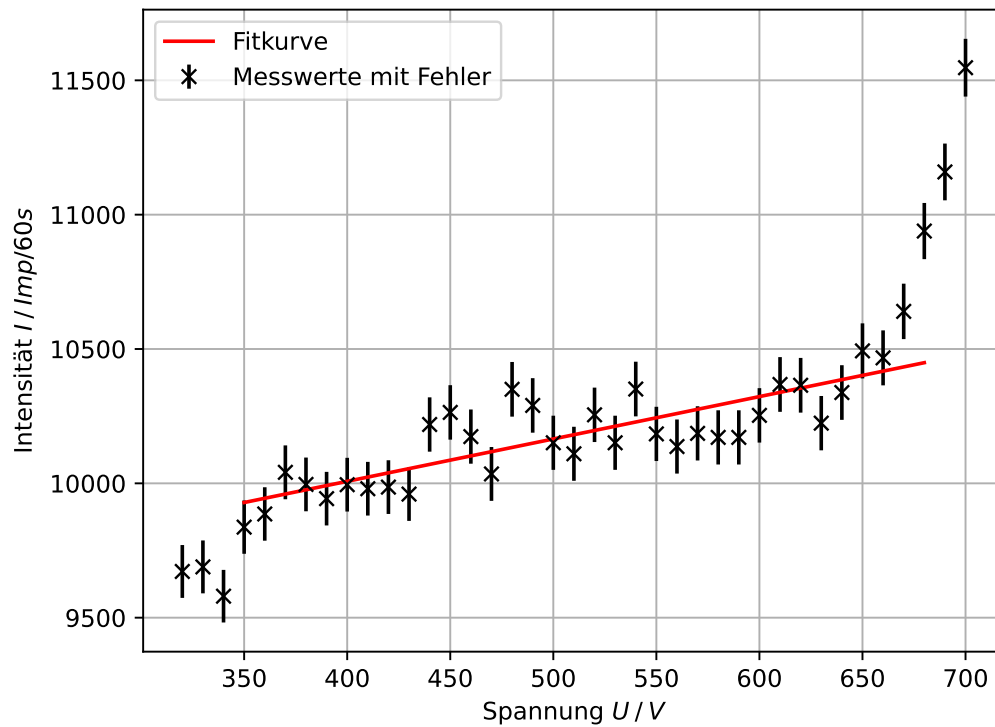


Abbildung 7: Graph der Kennlinie [2]. Aufgetragen ist hier die Intensität, gemessen bei einer Integrationszeit von 60 s, gegenüber der Spannung U . Die Gerade ist mit Werten aus dem Bereich von 320-670 V erstellt und zeigt das Plateau des Geiger-Müller-Zählrohrs. Der Fehler der Messwerte kommt von der Poissonverteilung der Anzahl der Zerfälle.

Die Parameter für die Ausgleichsgerade im Plot werden mit der Funktion `polyfit` aus SciPy [3] bestimmt. Ihre Werte ergeben:

$$N = aU + b \quad (2)$$

$$a = (2,63 \pm 0,32) \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ V}^{-1} \quad (3)$$

$$b = (156,3 \pm 1,6) \text{ s}^{-1} . \quad (4)$$

Dabei wird bei der Berechnung der Ausgleichsgeraden nur der Wertebereich des Plateaus, welcher sich hier von 350-670 V erstreckt, berücksichtigt. Ausgedrückt als prozentuale Steigung ergibt sich für das Plateau

$$m = (1,51 \pm 0,18) \% / 100 \text{ V} . \quad (5)$$

4.2 Bestimmung der Totzeit

Für die Zwei-Quellen-Methode wird eine Totzeit von 120s eingestellt. Für die drei Zählraten N_1 , N_2 und N_{1+2} werden die Werte

$$N_1 = (96\,041 \pm 310) \text{ Imp}/120\text{s} \quad (6)$$

$$N_2 = (76\,518 \pm 277) \text{ Imp}/120\text{s} \quad (7)$$

$$N_{1+2} = (158\,479 \pm 398) \text{ Imp}/120\text{s} \quad (8)$$

gemessen. Daraus lässt sich die Totzeit über die Formel

$$T \approx \frac{N_1 + N_2 - N_{1+2}}{2N_1N_2} [1] \quad (9)$$

$$T \approx (115,0 \pm 4,3) \mu\text{s} \quad (10)$$

abschätzen.

Die Abschätzung der Totzeit über das Oszilloskop wird mit der Abbildung vorgenommen:

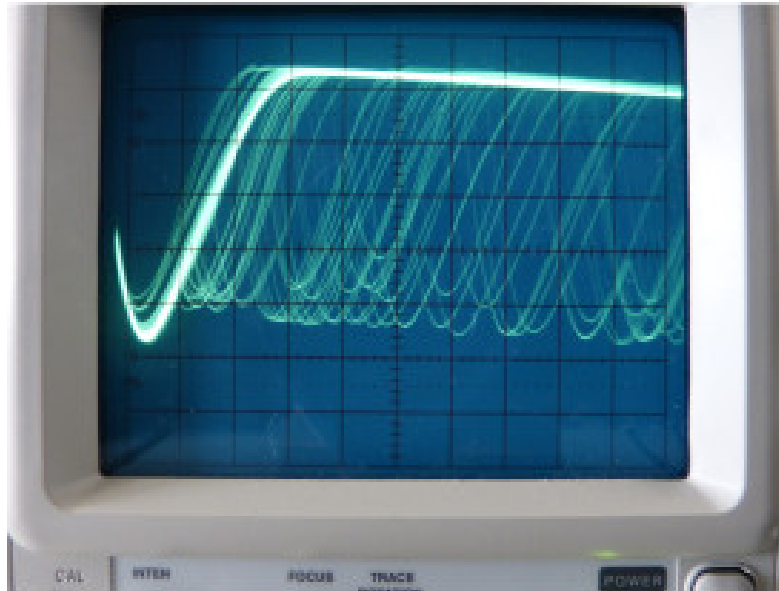


Abbildung 8: Momentaufnahme der Totzeit auf einem Oszilloskop[2]. Die Zeitachse des Oszilloskops ist auf $100 \mu\text{s}/\text{DIV}$ eingestellt.

Bei diesem Bild vom Oszilloskop ist die Zeitachse auf $100 \mu\text{s}/\text{DIV}$ eingestellt. Für die Zeitkorrektur ergibt sich hieraus ein Wert von

$$T \approx 40 \mu\text{s}. \quad (11)$$

4.3 Pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzten Ladungsmenge

Das bei der Messung verwendete Amperemeter hat eine Ablesegenauigkeit von

$$\Delta I = 0,05 \mu\text{A}. \quad (12)$$

Die Messwerte für die Bestimmung der freigesetzten Ladungsmenge sind in der Tabelle

Tabelle 2: Messwerte für die Zahl der freigesetzten Ladungen pro eingefallenem Teilchen.

Alle 50 V ist die Stromstärke I mit einem Amperemeter gemessen worden. Die Messungenauigkeit der Stromstärke folgt durch die Ablesegenauigkeit des Amperemeters. Die pro Teilchen freigesetzte Ladungsmenge wird mit der Formel (13) berechnet.

U / V	$N / Imp/60s$	$I / \mu A$	$Z / 10^8$
350	9837 ± 99	$0,3 \pm 0,05$	$1,90 \pm 0,32$
400	9995 ± 100	$0,4 \pm 0,05$	$2,50 \pm 0,31$
450	$10\,264 \pm 101$	$0,7 \pm 0,05$	$4,26 \pm 0,31$
500	$10\,151 \pm 101$	$0,8 \pm 0,05$	$4,92 \pm 0,31$
550	$10\,184 \pm 101$	$1,0 \pm 0,05$	$6,13 \pm 0,31$
600	$10\,253 \pm 101$	$1,3 \pm 0,05$	$7,91 \pm 0,31$
650	$10\,493 \pm 102$	$1,4 \pm 0,05$	$8,33 \pm 0,31$
700	$11\,547 \pm 107$	$1,8 \pm 0,05$	$9,73 \pm 0,29$

dargestellt. Aus diesen Werten wird die freigesetzte Ladung pro einfallendem Teilchen Z über die Formel

$$Z = \frac{I}{e_0 N} [1] \quad (13)$$

berechnet. Hierbei ist e_0 die Elementarladung, dessen Wert aus SciPy [3] entnommen wird. In der nachfolgenden Graphik sind die berechneten Z 's gegen die Stromstärke aufgetragen.

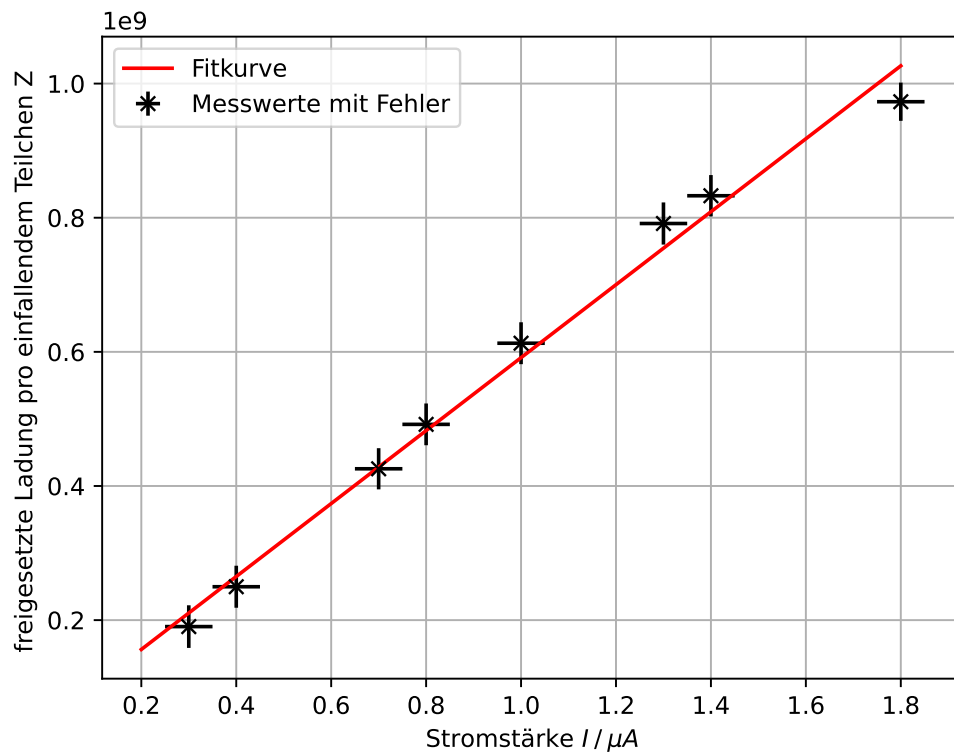


Abbildung 9: Freigesetzte Ladung pro einfallendem Teilchen $Z[2]$

In diesem Graphen ist die Anzahl freigesetzter Ladungen pro einfallendem Teilchen gegenüber der Stromstärke I aufgetragen.

Die Ausgleichsgerade wird mit der Funktion polyfit aus SciPy [3] erstellt. Die Funktionsparameter zu der Geraden

$$Z = aI + b \quad (14)$$

lauten

$$a = (5,44 \pm 0,23) \cdot 10^{14} \text{ A}^{-1} \quad (15)$$

$$b = (4,7 \pm 2,5) \cdot 10^7 . \quad (16)$$

5 Diskussion

Die wichtigsten Werte für die Diskussion sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst.

Tabelle 3: Zusammenfassung aller für die Diskussion relevanter Werte

	Messwerte
m	$(1,51 \pm 0,18) \text{ \%}/100\text{V}$
b_{Plateau}	$(156,3 \pm 1,6) \text{ s}^{-1}$
T_{Messung}	$(115,0 \pm 4,3) \text{ }\mu\text{s}$
T_{Oszi}	$40 \text{ }\mu\text{s}$

Bei der Messung der Charakteristik ist bewusst darauf geachtet worden, dass die Impulszahl ungefähr in der Größenordnung von 10000 liegt. Der Grund dafür ist, dass der statistische Fehler möglichst unter einem Prozent liegen sollte, dafür müssen genug Messungen vorliegen. Zudem dürfen die Impulse nicht zu hoch sein, da der Alkoholdampf in der Zylinderkathode begrenzt ist und zu viele Impulse dann zu Nachentladungen führen. Die Abbildung 7 entspricht der theoretischen Vorstellung der Abbildung 4. Die Steigung entsteht durch die Nachentladungen und zeigt einen geringen Wert auf, was für einen guten Geiger-Müller-Zähler spricht. Bei der Auswertung des Graphen für das Plateau sind nicht alle Messwerte berücksichtigt worden, da bei den letzten Werten der Übergang zum fünften Bereich stattfindet und zusätzlich Nachentladungen die Messung verfälschen.

Der Vergleich der Totzeiten von der direkten Messung und dem Oszilloskop zeigt eine große Diskrepanz zueinander auf. Das kommt von der sehr schlechten Qualität des Oszilloskop-Bildes. Es ist kaum zu erkennen, wo die Totzeit sich befindet und was der die beiden Impulse sind.

Die Abbildung 9 verdeutlicht den erkennbaren linearen Zusammenhang zwischen der pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzten Ladungsmenge und der Stromstärke I . Dadurch zeigt sich, wie dominant die Townsend-Lawine sich mit steigender Stromstärke und gleichzeitig steigender Spannung verhält.

Literatur

- [1] TU Dortmund. Versuchsanleitung zu Versuch Nr.703 Das Geiger-Müller-Zählrohr. 2020.
- [2] 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/>.
- [3] 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/>.
- [4] Eric O. Lebigot. Uncertainties: a Python package for calculations with uncertainties. Version 2.4.6.1. URL: <http://pythonhosted.org/uncertainties/>.