

Geiger-Müller-Zählrohr

Lasse Sternemann
lasse.sternemann@udo.edu

Bearbeitet am 23.05.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Theoretische Grundlagen des Geiger-Müller-Zählrohrs	3
1.1	Aufbau	3
1.2	Funktionsbereiche des Zählrohrs	3
1.3	Totzeit, Erholungszeit und Nachentladungen	5
1.4	Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs	7
1.5	Anodenstrom	8
2	Durchführung	9
2.1	Messschaltung	9
2.2	Charakteristik	9
2.3	Totzeit-Bestimmung	10
2.4	Freigesetzte Ladungen	12
3	Auswertung	13
3.1	Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs	13
3.2	Totzeit-Bestimmung	14
3.3	Freigesetzte Ladung	15
3.4	Diskussion	17
4	Literaturverzeichnis	18

1 Theoretische Grundlagen des Geiger-Müller-Zählrohrs

1.1 Aufbau

Das Geiger-Müller-Zählrohr besteht zunächst aus einer zylindrischen Kammer, die mit einem Gasgemisch gefüllt ist. In der Mitte dieser Kammer befindet sich ein Draht, der als Anode fungiert. Die innere Wand der Kammer bildet die zugehörige Kathode. Zwischen der Kathode und der Anode liegt eine Spannung von 200 bis 3000 V an, sodass ein elektrisches Feld entsteht, das aufgrund der zylindrischen Form der Kammer radialsymmetrisch zur Ausrichtung des Drahts verläuft. Während der eine Deckel der Kammer abgeschlossen ist, ist auf der Seite, die bei der Nutzung auf die Quelle gerichtet ist, ein Mylarfenster eingebaut, das die ionisierende Strahlung in die Kammer einfallen lässt, da dieses Material eine sehr geringe Massendichte besitzt.

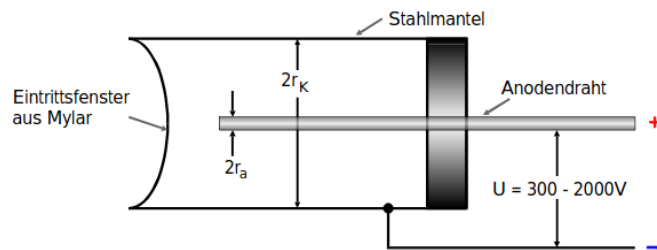


Abbildung 1: In der Abbildung ist der Aufbau eines Geiger-Müller-Zählrohrs schematisch skizziert.[1]

1.2 Funktionsbereiche des Zählrohrs

Da die Wechselwirkung von Photonen mit Materie mit ca. 1% sehr gering ist die Nutzung eines Geiger-Müller-Zählrohrs nur bei hohen Intensitäten sinnvoll. Die massebehafteten α - und β -Teilchen wechselwirken jedoch beinahe zu 100% mit den Gasatomen. Hier ist die Messung bei allen Intensitäten möglich. Daher wird diskutiert, was passiert, wenn ein geladenes Teilchen in die Kammer einfällt. Solch ein geladenes in die Kammer einfallendes Teilchen ionisiert Atome des enthaltenden Gasgemisches, bis die Energie des einfallenden Teilchens nicht mehr zur Ionisation eines weiteren Atoms genügt. Die dabei frei werdenden Elektronen werden durch das radialsymmetrische Feld zur Anode hinbeschleunigt und dort als elektroneischer Impuls gemessen. Pro Ionisation wird bei Argon eine Energie von 26 eV benötigt. So lässt über die entstandenen Impulse die Energie des einfallenden Teilchens berechnen, da diese proportional zu der Anzahl der Ionisationen ist. Die Anzahl der letztendlich gemessenen Impulse hängt jedoch stark von der angelegten Spannung ab, die sich in 5 Bereiche unterteilen lässt.

Bereich I

Bei einer geringen angelegten Spannung von bis zu 50 V ist das elektrische Feld in der Kammer so gering, dass die durch Ionisation freigesetzten Elektronen zumeist Rekombinieren, bevor sie die Anode erreichen. So lässt sich die Intensität oder Energie der einfallenden Teilchen nicht messen.

Bereich II

Wenn die angelegte Spannung zwischen 50 und 230 Volt liegt, ist das Feld stark genug, um die Rekombination von freigesetzten Elektronen beinahe komplett zu verhindern. Daher erreichen fast alle freigesetzten Elektronen die Anode und es kann ein Strom gemessen werden, der proportional zur Energie des einfallenden Teilchens ist. Dieser Spannungsbereich wird in Ionisationskammern verwendet, die zwar nur bei hohen Intensitäten funktionieren, aber dafür eine Bestimmung der Teilchenenergie erlauben. Die hohen Intensitäten sind nötig, da der entstehende Strom sonst zu gering zur Messung wäre.

Bereich III

Der nächsthöhere Bereich von 230 bis 770 Volt zeichnet sich dadurch aus, dass das elektrische Feld die freigesetzten Elektronen so stark beschleunigt, dass diese wieder genug Energie besitzen, um weiter Atome zu ionisieren. Diese Stoßionisation vervielfacht die Anzahl der Elektronen immens, sodass am Ende von einer Townsend-Lawine an Elektronen gesprochen wird. Die hohe Anzahl an zur Anode wandernden Elektronen ermöglicht nun die Messung eines Ladungsimpulses pro einfallendem Teilchen. Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, steigt die Anzahl der Ionisationen mit der Spannung, da stärker beschleunigte Elektronen mehr weitere Ionisationen bewerkstelligen. Trotz der Vervielfältigung der Elektronen ist die Anzahl der Ausgangselektronen und somit auch die Gesamtanzahl der Elektronen proportional zur Energie des einfallenden Teilchens und diese kann weiterhin bestimmt werden. Die immernoch vorhandene Proportionalität gibt Geräten, die diesen Spannungsbereich verwenden den Namen Proportionalitätszählrohr.

Bereich IV

Der darauf folgende Bereich von 770 bis 970 Volt wird als Auslösebereich beschrieben und ist der von Geiger-Müller-Zählrohren verwendete Bereich. Die Proportionalität zwischen Ionisationen und Energie des einfallenden Teilchens ist nicht mehr gegeben. Dies liegt daran, dass die freigesetzten Elektronen nun vielfach die Atome anregen, sodass diese ultra-violette Photonen abgeben. Deren Energie genügt, um weiter Atome zu ionisieren. Da sie jedoch ungeladen sind, ionisieren sie Atome in allen Bereichen der Kammer, sodass nicht mehr eine Townsend-Lawine, sondern eine Vielzahl dieser in der gesamten Kammer entstehen. Also hängt die Anzahl der Ionisationen von der Größe der Kammer und nicht der Energie des einfallenden Teilchens ab. Das Wegfallen der Proportionalität zwischen Energie des einfallenden Teilchens und Ionisationen verhindert die Energiebestimmung des einfallenden Teilchens. Die Intensität kann weiterhin gemessen werden.

Bereich V

Im sogenannten Entladungsbereich ist die angelegte Spannung so groß, dass bereits durch ein geladendes Teilchen eine fortlaufende Ionisation hervorgerufen werden kann, die zur Dauerentladung führt. Dabei fallen so viele Elektronen auf die Anode, dass die hohe Stromstärke das Messgerät zerstören kann.

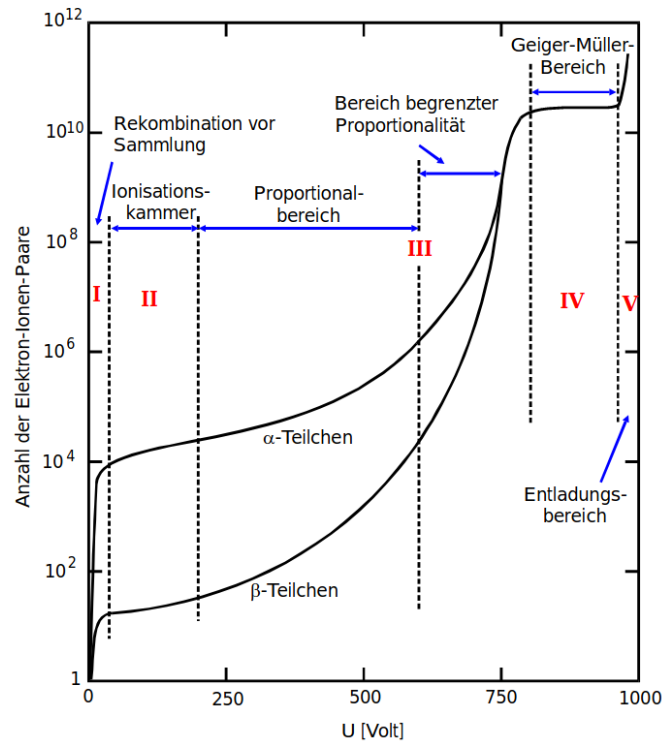


Abbildung 2: In der Abbildung sind die 5 Spannungsbereiche einer Zählkammer dargestellt. Dazu wird die Anzahl der Elektron-Ion-Paare, die der Anzahl der Ionisationen entspricht, gegen die zwischen Kathode und Anode anliegende Spannung aufgetragen. [1]

1.3 Totzeit, Erholungszeit und Nachentladungen

Totzeit

Sobald ein Atom ionisiert worden ist, wandert das Elektron zum Anodendraht und das ionisierte Atom zum Kathodenmantel. Während das Elektron sehr schnell die Anode erreicht, benötigt das Ion aufgrund seiner höheren Masse weitaus länger. Bis das Ion den Kathodenmantel erreicht hat, besitzt es ein positives elektrisches Feld. Diese elektrische Feld wirkt dem des Anodendrahts entgegen, sodass die freigesetzten Elektronen nicht die zur Stoßionisation nötige Beschleunigung erfahren und so auf dem Anodendraht keine Ladungsimpulse gemessen werden können. Daher ist in der Zeitspanne, in der

sich die Ionen noch nah am Anodendraht befinden, keine Messung eines einfallenden Teilchens möglich. Diese Zeitspanne wird als Totzeit T betitelt und ist in Abbildung 8 zu erkennen. Aufgrund dieser Totzeit ist die gemessene Intensität immer etwas geringer als die eigentlich Einfallende, da das Zählrohr zu Beginn nicht alle einfallenden Teilchen registriert. Die tatsächlich einfallende Intensität N_w berechnet sich über folgende Formel, die die gemessene Intensität N_r und einen Anteil der Integrationszeit TN_r , in der das Zählrohr einfallende Teilchen nicht registriert.

$$N_w = \frac{N_r}{1 - TN_r}$$

Wenn nun die Impulsraten von zwei verschiedenen Quellen N_1, N_2 und deren gemeinsame Impulsrate N_{1+2} gemessen wird, kann über die drei Formeln der wahren Impulsraten N_{w_1}, N_{w_2} und $N_{w_{1+2}}$ und der Annahme $T^2 N^2 \gg 1$ eine Gleichung für die Totzeit gebildet werden.

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

Erholungszeit

Während die Ionen nach außen zum Kathodenmantel wandern, sinkt der Einfluss ihres Feldes auf das der Anode mit steigendem Abstand zum Anodendraht. Daher werden die Elektronen wieder stark genug beschleunigt, um zumindest in geringerem Umfang Stoßionisationen durchzuführen. Da die Beschleunigung jedoch noch immer nicht der Beschleunigung des unbeeinflussten elektrischen Feldes der Anode entspricht, wird auf dem Anodendraht eine geringere Ladungsmenge gemessen. Die gemessene Ladungsmenge steigt an, bis die Ionen den Kathodenmantel erreichen und die freigesetzten Elektronen wieder die Beschleunigung des uneingeschränkten E-Feldes der Anode erfahren. Die Zeitdauer bis zu diesem Moment wird als Erholungszeit beschrieben und ist ebenfalls in Abbildung 8 zu sehen.

Nachentladungen

Die notwendige Neutralisation der Ionen am Kathodenmantel geht mit der Freisetzung eines Elektrons aus dem Kathodenmantel aufgrund von überschüssiger Energie bei der Neutralisation einher. Dieses freigesetzte Elektron wandert nach Verstreichen von Tot- und Erholungszeit zum Anodendraht und erzeugt so den Anschein eines einfallenden Teilchens. Da dies die Messung der Intensität verfälschen würde, muss dieser Prozess verhindert werden. Dazu wird dem Gas ein Alkohol hinzugegeben, auf dessen Moleküle die Ionen treffen und sie ionisieren, während sie sich an ihnen entladen. Nun wandern statt der Gasionen die ionisierten Alkoholmoleküle zum Kathodenmantel. Wenn sie sich an diesem Neutralisieren wird die überschüssige Energie durch Schwingungen des Alkoholmoleküls aufgenommen und so die Freisetzung eines Elektrons verhindert.

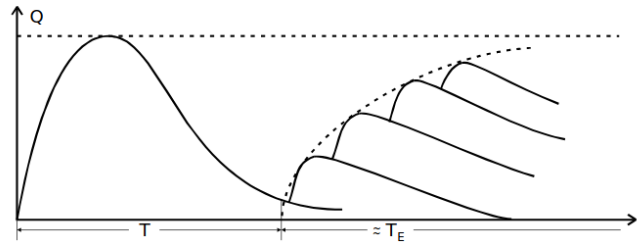


Abbildung 3: In der Abbildung sind die Totzeit T und Erholungszeit T_E schematisch dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, wie der Einfluss des E-Feldes der Gasionen mit der Zeit abnimmt und so die gemessene Ladungsmenge auf dem Anodendraht wieder auf das anfängliche Niveau steigt. [1]

1.4 Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs

Das Geiger-Müller-Zählrohr arbeitet in Bereich IV der Spannung. Dieser zeichnet sich durch eine konstante Intensität bei steigender Spannung aus. Dieser Bereich konstanter Intensität wird als Plateau bezeichnet und charakterisiert die Güte eines Geiger-Müller-Zählrohrs. Die Güte ist perfekt, wenn die Steigung des Plateaus null und das Plateau möglichst lang ist. Da trotz des hinzugefügten Alkohols noch immer geringfügig Nachentladungen auftreten, die zur Intensität hinzugezählt werden, ist das Plateau in der Praxis nicht konstant, sondern weist eine leichte Steigung auf. Während das Plateau dem Arbeitsbereich des Geiger-Müller-Zählrohrs entspricht, muss der sich anschließende Bereich strikt gemieden werden, da sonst wie bereits beschrieben hohe Ströme das Zählrohr beschädigen.

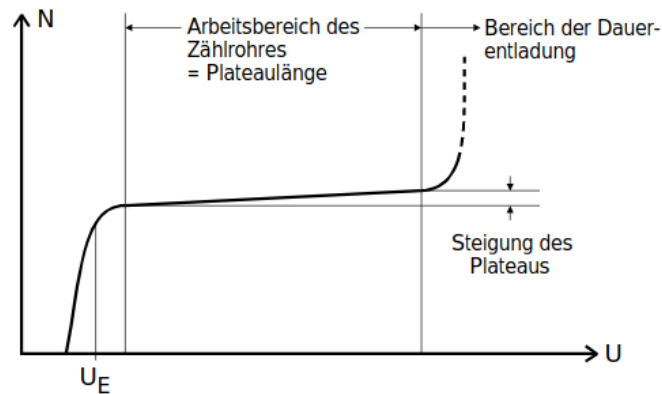


Abbildung 4: In der Abbildung ist Spannungsbereich IV und der Beginn von Spannungsbereich V detailliert dargestellt. Das eingezeichnete Plateau markiert den tatsächlichen Arbeitsbereich eines Geiger-Müller-Zählrohrs. Der sich anschließende Bereich V stellt aufgrund hoher Stromstärken eine Gefahr für das Zählrohr dar.[1]

1.5 Anodenstrom

Über den an der Anode anfallenden Strom kann bei gemessener Impulsrate die Menge an freigesetzter Ladung pro einfallendem Teilchen Z berechnet werden. Dazu muss der momentane Anodenstrom I durch den zugehörigen Rate der einfallenden Teilchen N geteilt werden. Um die Menge der freigesetzten Ladung in Einheiten der Elementarladung anzugeben, muss zudem noch mit dem Kehrwert der Elementarladung e multipliziert werden, sodass sich folgende Formel ergibt.

$$Z = \frac{I}{eN} \quad (2)$$

2 Durchführung

2.1 Messschaltung

Das hier zu untersuchende Messrohr ist mit Argon gefüllt und es wird ein Thallium-204-Präparat als Strahlungsquelle genutzt. Zur Untersuchung des Geiger-Müller-Zählrohrs wird folgende Schaltung genutzt:

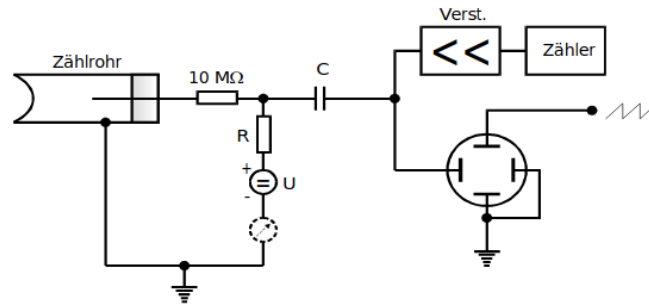


Abbildung 5: In der Abbildung ist die Schaltung zur Untersuchung des Geiger-Müller-Zählrohrs skizziert.[1]

Neben der klassischen Schaltung zur Erzeugung des elektrischen Feldes ist auch die Schaltung zur Messung und Visualisierung der Ladungsimpulse zu sehen. Der über die freien Elektronen aufgenommene Strom fließt aus dem Anodendraht zum Widerstand und erzeugt so aus dem Ladungsimpuls einen Spannungsimpuls, der über einen Kondensator aus dem linken Stromkreis separiert wird. Der separierte Spannungsimpuls wird entweder verstärkt und gezählt oder in einem Oszilloskop graphisch dargestellt.

2.2 Charakteristik

Um die Charakteristik des verwendeten Geiger-Müller-Zählrohrs zu bestimmen wird eine konstante Intensitätsquelle in Form eines β -Strahlers vor dem Zählrohr platziert und dann unter variierender Spannung im Bereich von 230 bis 700 Volt die Intensitätsrate bei einer Integrationszeit von 120 Sekunden gemessen. Es darf nicht über 700 V gegangen werden, da dann die Dauerentladung einsetzt und das Gerät beschädigt wird.

2.3 Totzeit-Bestimmung

Die Bestimmung der Totzeit des verwendeten Geiger-Müller-Zählrohrs kann über zwei Methoden durchgeführt werden.

Oszilloskop

Eine graphische Möglichkeit der Auswertung wird über ein Oszilloskop durchgeführt, auf dem die vom Anodendraht ankommenden Spannungsimpulse visualisiert werden. Die Totzeit lässt sich über den zeitlichen Abstand zwischen dem ersten und zweiten Impuls ablesen.

Zwei-Quellen-Methode

Eine genauere Bestimmung der Totzeit ist über die Zwei-Quellen-Methode möglich. Dazu wird zunächst eine Quelle vor den Zähler gestellt und die Intensität gemessen. Dann wird eine weitere Probe neben der bereits platzierten Probe platziert und die gemeinsame Intensität gemessen. Zuletzt wird die zuerst einzeln gemessene Probe entfernt und die Intensität der, als zweites hinzugefügten, Probe gemessen. Aus diesen drei gemessenen Intensitäten kann die Totzeit über Formel 1 berechnet werden.

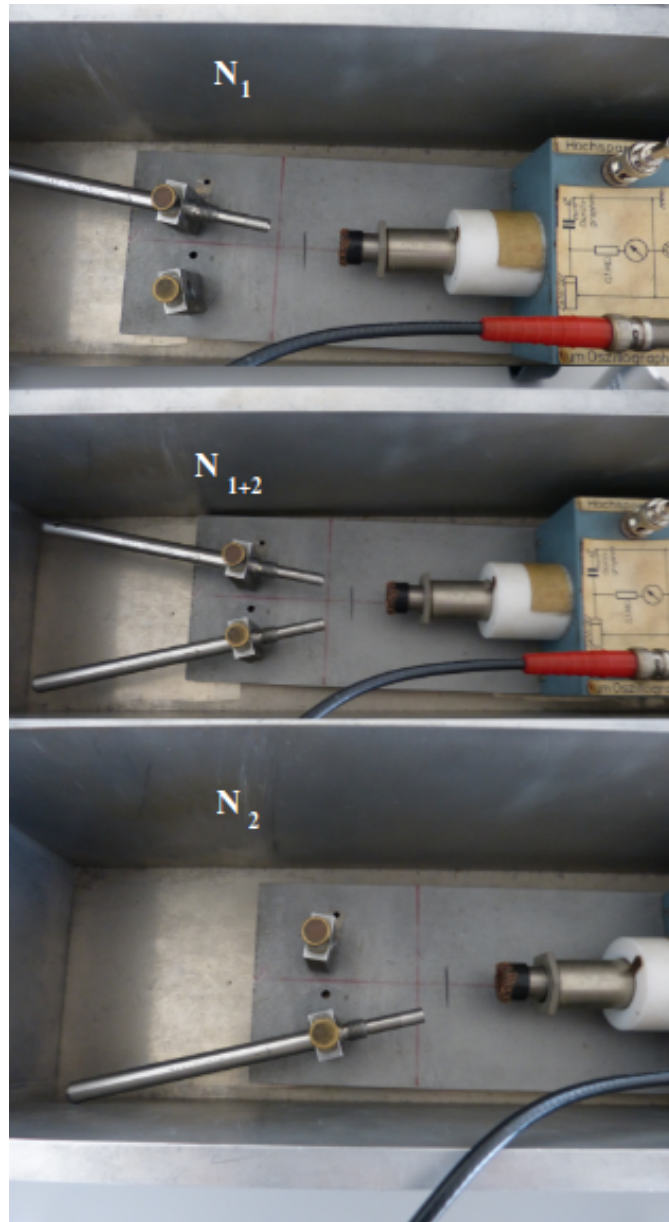


Abbildung 6: In der Abbildung sind die 3 verschiedenen Aufbaue zur Messung der Totzeit über die Zwei-Quellen-Methode dargestellt. [1]

2.4 Freigesetzte Ladungen

Um die Menge der pro einfallendem Teilchen freigesetzte Ladung zu bestimmen wird der Zählrohrstrom bei verschiedenen Paaren von Spannung und Intensität gemessen. Die Messungen wird im Bereich von 350 bis 700 V in 50 V Schritten durchgeführt. Dabei wird eine Integrationszeit von 60 Sekunden verwendet.

3 Auswertung

3.1 Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs

Zur Untersuchung der Charakteristik wird zunächst die gemessene Intensität gegen die Betriebsspannung des Geiger-Müller-Zählrohrs bei einer Integrationszeit von 60 s (Tabelle 2) in einer Grafik aufgetragen. Da die gemessenen Impulse N poisson-verteilt sind, kann deren Fehler wie folgt berechnet werden:

$$\Delta N = \sqrt{N}$$

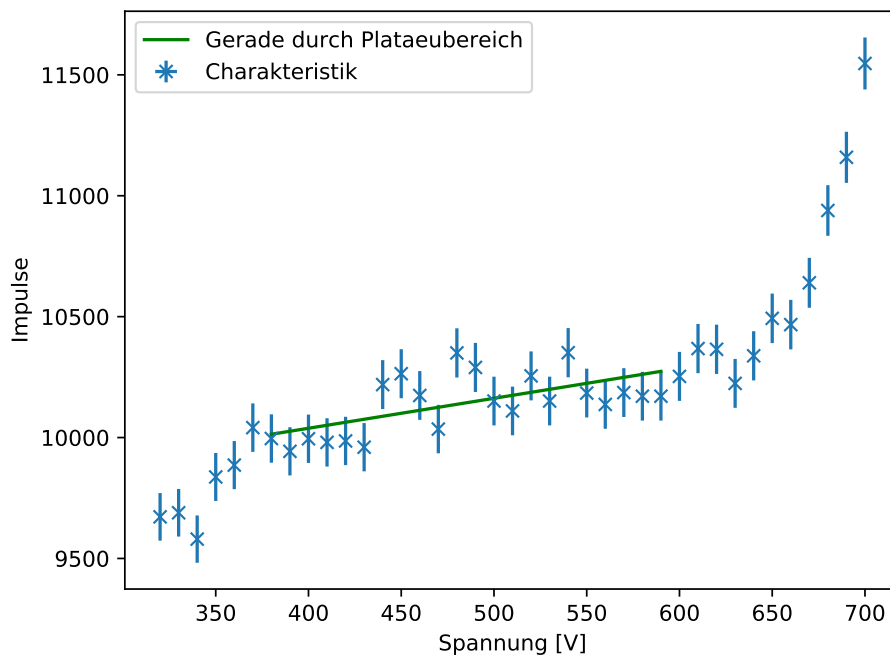


Abbildung 7: In der Grafik sind die gemessenen Impulse N gegen die Betriebsspannung U des Geiger-Müller-Zählrohrs aufgetragen. Zudem wurde eine lineare Ausgleichsgerade durch den Plateaubereich gelegt, um die Güte des Geiger-Müller-Zählrohrs zu bestimmen.

Aus Grafik 7 wird der Plateaubereich, in dem das Geiger-Müller-Zählrohr arbeitet zwischen folgenden Spannungen ermittelt:

$$\text{Plateaubereich: } 380 \text{ V} - 590 \text{ V} \quad (3)$$

Über diesen Plateaubereich wird eine Ausgleichsgerade zur Ermittlung der Steigung im Plateaubereich gelegt. Die lineare Regression mit der scipy-Funktion `curvefit` liefert folgende Parameter:

$$\begin{aligned}
N &= mU + b \\
m &= (1,2386 \pm 0,3774) \frac{1}{V} \\
b &= (9543,0095 \pm 182,5730)
\end{aligned}$$

Die Güte des Geiger-Müller-Zählrohrs wird über die Steigung des Plateaubereichs M angegeben. Da diese in Zunahme in % pro 100 V angegeben wird, kann sie wie folgt über die berechnete lineare Regression bestimmt werden:

$$M = 1 - \frac{(m \cdot 400V + b)}{(m \cdot 500V + b)} = (1,2 \pm 0,35) \% \text{ pro } 100 \text{ V} \quad (4)$$

$$\text{mit } \Delta M = \sqrt{\left(\frac{1}{(m \cdot 500V + b)} \cdot \Delta(m \cdot 400V + b)\right)^2 + \left(\frac{(m \cdot 400V + b)}{(m \cdot 500V + b)^2} \cdot \Delta(m \cdot 500V + b)\right)^2} \quad (5)$$

3.2 Totzeit-Bestimmung

Zwei-Quellen-Methode

Zunächst wird die Messung für die zwei Quellen Methode durchgeführt und es ergeben sich folgende Impulsraten deren Fehler aufgrund der Poisson-Verteilung wieder über die Wurzel der Werte berechnet werden.

$$N_1 = \frac{(96941 \pm 310)}{60} \quad N_2 = \frac{(76518 \pm 277)}{60} \quad N_{1+2} = \frac{(158479 \pm 399)}{60} \quad (6)$$

Über Formel 1 wird aus den obigen Werten die Totzeit ausgerechnet.

$$T_2 \approx (115 \pm 5) \mu s \text{ mit } \Delta T = \sqrt{\left(\frac{N_{1+2} - N_1}{2N_1N_2^2} \cdot \Delta N_2\right)^2 + \left(\frac{N_{1+2} - N_2}{2N_2N_1^2} \cdot \Delta N_1\right)^2 + \left(-\frac{1}{2N_1N_2} \cdot \Delta N_{1+2}\right)^2} \quad (7)$$

Visuelle Methode

Zur Bestimmung der Totzeit muss der Abstand zwischen dem Ersten Großen und ersten kleineren Peak in der visuellen Darstellung der Spannungsimpulse durch das Oszilloskop abgelesen werden. Dieser zeitliche Abstand entspricht gemäß Grafik 8 der Totzeit. Aus Abbildung 8 lässt sich die Totzeit T_{vis} ablesen.

$$T_{\text{vis}} \approx 100 \mu s \quad \text{mit} \quad 1 \text{ Kästchen} \equiv 100 \mu s$$

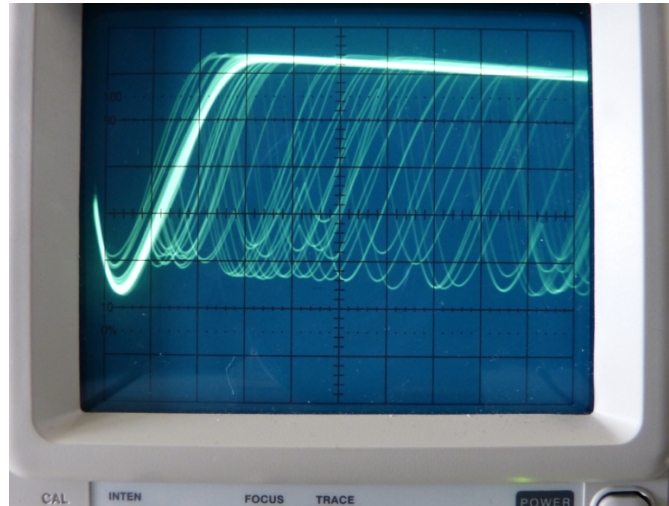


Abbildung 8: In der Abbildung ist eine Aufnahme des Oszilloskopbildes zur Visualisierung der Spannungsimpulse auf dem Anodendraht. Ein Kästchen entspricht dabei einem zeitlichen Abstand von $100 \mu s$. [1]

3.3 Freigesetzte Ladung

Die Menge der freigesetzten Ladung pro einfallendem Teilchen wird über Formel 2 und folgendem Fehler berechnet.

$$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{1}{eN} \cdot \Delta I\right)^2 + \left(\frac{-I}{eN^2} \cdot \Delta N\right)^2}$$

Aus den Messwerten ergeben sich folgende Werte,

Tabelle 1: In der Tabelle sind Wertepaare aus Anodenstrom und Impulsrate, sowie die daraus berechnete freigesetzte Ladung pro einfallendem Teilchen eingetragen.

I [nA]	Impulsrate [1/s]	Z [$e \cdot 10^{10}$]
300 ± 50	164 ± 2	$1,14 \pm 0,19$
400 ± 50	167 ± 2	$1,50 \pm 0,19$
700 ± 50	171 ± 2	$2,55 \pm 0,18$
800 ± 50	169 ± 2	$2,95 \pm 0,19$
1000 ± 50	170 ± 2	$3,68 \pm 0,19$
1300 ± 50	171 ± 2	$4,75 \pm 0,19$
1400 ± 50	175 ± 2	$5,00 \pm 0,18$
1800 ± 50	192 ± 2	$5,84 \pm 0,17$

die zudem in einem ZI-Diagramm aufgetragen werden.

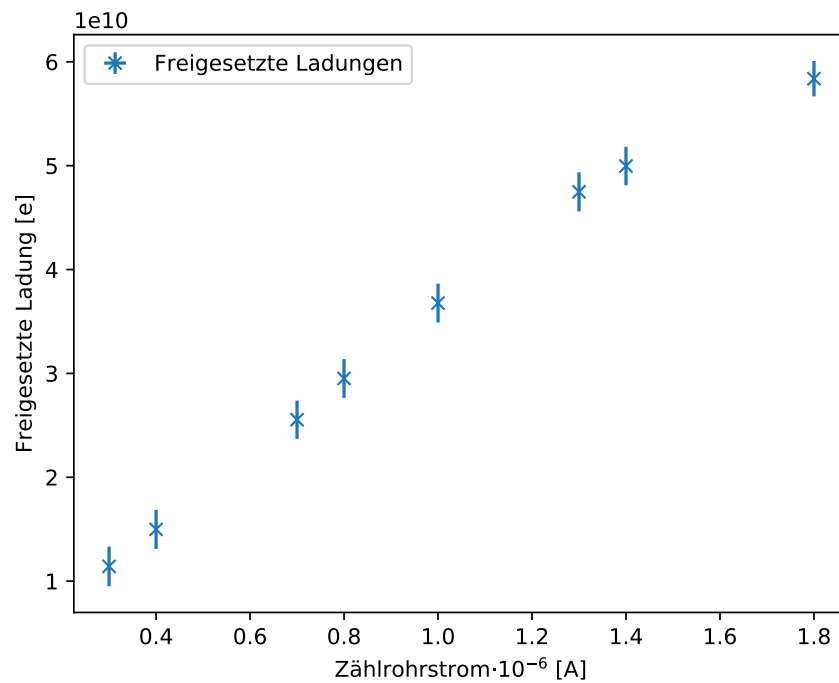


Abbildung 9: In der Grafik sind die berechneten freigesetzten Ladungen in Einheiten der Elementarladung e gegen die zugehörigen Stromstärken des Anodenstroms aufgetragen.

Diese Grafik gibt einen linearen Zusammenhang zwischen freigesetzten Ladungen pro einfallendem Teilchen und dem Anodenstrom wieder.

3.4 Diskussion

Die Untersuchung der charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs konnte folgende Eigenschaften des Zählrohrs ermitteln.

Platauebereich: 380 V – 590 V

Plataeusteigung/100 V: $(1,2 \pm 0,35) \%$

Zudem ist aus Grafik 7 zu erkennen, dass Betriebsspannung über 650 V vermieden werden müssen, da hier der Bereich der Selbstentladung einsetzt und Betrieb unter dieser Spannung das Zählrohr beschädigen würde.

Die Werte der beiden Totzeiten

$$T_{\text{vis}} \approx 100 \mu s \quad T_2 \approx (115 \pm 5) \mu s$$

weichen um nicht mehr als 15 % voneinander ab und liegen beide in der für Geiger-Müller-Zählrohre typischen Größenordnung von $100 \mu s$. Die zuletzt berechneten freigesetzte Ladung pro einfallendem Teilchen 1 sollte proportional zur auf der Anode gemessenen Stromstärke sein. Dies lässt sich über Grafik 9 bestätigen.

Insgesamt hat die Untersuchung des Zählrohrs die typischen Eigenschaften und Parameter eines Geiger-Müller-Zählrohrs bestätigt.

4 Literaturverzeichnis

- [1] *Versuchsanleitung V703 - Das Geiger-Müller-Zählrohr*. TU Dortmund, 2020

Tabelle 2: In der Tabelle sind Wertepaare aus Betriebsspannung des Zählrohrs U und gemessenen Impulsen bei einer Integrationszeit von 120 Sekunden eingetragen.

U [V]	Impulse
320	9672 ± 99
330	9689 ± 99
340	9580 ± 98
350	9837 ± 100
360	9886 ± 100
370	10041 ± 101
380	9996 ± 100
390	9943 ± 100
400	9995 ± 100
410	9980 ± 100
420	9986 ± 100
430	9960 ± 100
440	10219 ± 102
450	10264 ± 102
460	10174 ± 101
470	10035 ± 101
480	10350 ± 102
490	10290 ± 102
500	10151 ± 101
510	10110 ± 101
520	10255 ± 102
530	10151 ± 101
540	10351 ± 102
550	10184 ± 101
560	10137 ± 101
570	10186 ± 101
580	10171 ± 101
590	10171 ± 101
600	10253 ± 102
610	10368 ± 102
620	10365 ± 102
630	10224 ± 102
640	10338 ± 102
650	10493 ± 103
660	10467 ± 103
670	10640 ± 104
680	10939 ± 105
690	11159 ± 106
700	11547 ± 108