

Versuch 703

Das Geiger-Müller-Zählrohr

Jonah Nitschke
lejonah@web.de

Sebastian Pape
sepa@gmx.de

Durchführung: 25.04.2017

Abgabe: 02.05.2017

1 Theorie

1.1 Zielsetzung

Mithilfe des Geiger-Müller-Zählrohrs kann in der Kernphysik die Intensität von ionisierter Strahlung gemessen werden. Der folgende Versuch behandelt die Funktionsweise eines Geiger-Müller-Zählrohrs und seine Charakterisierung über verschiedene Messungen, um die Kenndaten des vorliegenden Gerätes zu ermitteln.

1.2 Aufbau und Wirkungsweise

Das Geiger-Müller-Zählrohr besteht im Wesentlichen aus einem Kathodenzyylinder mit einem axial verlaufenden Anodendraht (siehe Abb. 1). Um die später genauer beschriebenen Nachentladungseffekte gering zu halten, ist das Zählrohr zusätzlich mit einem alkoholhaltigem Gasgemisch gefüllt. Wird eine äußere Spannung angelegt, so entsteht zwischen Kathode und Anode ein radialsymmetrisches elektrisches Feld. Dringt nun ein Teilchen in das Zählrohrvolumen ein, so werden abhängig von der angelegten Spannung nach der Primärisation verschiedene Effekte hervorgerufen (siehe Abb. 2).

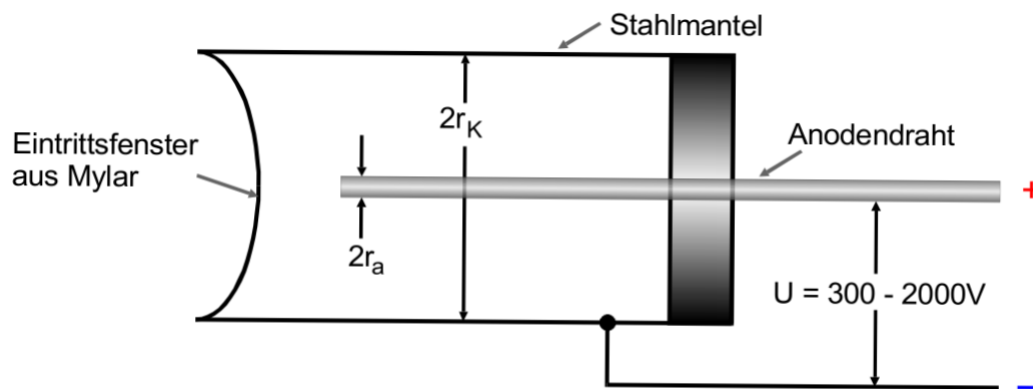


Abbildung 1: Aufbau des Geiger-Müller-Zählrohrs.

Bei einer geringen Spannung gelangen durch Rekombination bedingt nur sehr wenige Elektronen an die Anode (Bereich I, Abb. 2). Wird die angelegte Spannung weiter erhöht, gelangen aufgrund der höheren Feldstärke nahezu alle Elektronen an die Anode und die Rekombinationswahrscheinlichkeit nimmt stark ab. Geräte die in diesem Spannungsbereich eingesetzt werden, werden als Ionisationskammern bezeichnet (Bereich II, Abb. 2). In dem bezeichneten Bereich ist der Ionisationsstrom proportional zu Energie bzw. Intensität der einfallenden Strahlung.

Wird die Feldstärke weiter erhöht können die freigesetzten Elektronen genügend Energie aufnehmen um ihrerseits ionisieren zu können. Bei einer hinreichend hohen angelegten Spannung wird durch die Stoßionisation die Zahl der freigesetzten Elektronen stark

erhöht, dieser Vorgang wird als Townsend-Lawine bezeichnet. Die gesammelte Ladung Q ist aber immer noch proportional zur Primärteilchenenergie, weshalb in diesem Bereich arbeitende Detektoren auch als Proportionalitätszählrohr bezeichnet werden (Bereich III, Abb. 2).

Bei einer erneuten Erhöhung der Betriebsspannung gelangt man in den Auslösebereich, welcher den eigentlichen Arbeitsbereich des Geiger-Müller-Zählrohrs klassifiziert (Bereich IV, Abb. 2). Hier breitet sich die Entladung aufgrund von vielzählig freigesetzten UV-Photonen im gesamten Zählrohrvolumen aus. Die gesammelte Ladung ist nun nicht mehr von der Primärionisation abhängig, sondern nur noch von dem Zählrohrvolumen und der angelegten Betriebsspannung.

Der sich an den Auslösebereich anschließende Bereich wird als Entladungsbereich bezeichnet (Bereich V, Abb. 2). Die Nachentladungen sind in diesem Bereich so groß, dass von einer eigenständigen Gasentladung gesprochen wird. Ein einzelnes ionisierendes Teilchen kann eine Dauerentladung hervorrufen. Das Messgerät wird in diesem Bereich schnell zerstört, weshalb die Betriebsspannung diesen Bereich nicht erreichen sollte.

1.3 Einfluss der positiven Ionen

Die freigesetzten positiven Ionen bauen mit der Zeit im Zählrohr eine positive Raumladung auf, welche einige Störeffekte hervorruft. Einerseits wird die Feldstärke zwischenzeitlich so stark gesenkt, dass eintreffende Teilchen vom Zählrohr nicht mehr registriert werden. Diesen Zeitraum nennt man auch Totzeit T .

Nach Auflösen bzw. Abwandern der positiven Raumladung wird stufenweise wieder eine Lawinenbildung möglich, bis nach vollständiger Neutralisierung der Ionen nach der Erholungszeit t_{Erholung} wieder Ladungsimpulse in ihrer ursprünglichen Höhe erreicht werden.

Ein weiterer Störeffekt sind die Nachentladungen. Diese entstehen wenn im Zählrohrmantel auftreffende Ionen Elektronen aus der Metalloberfläche freisetzen, wodurch mehrere zeitlich versetzte Ausgangsimpulse erzeugt werden. Dieser Effekt ist höchst unerwünscht, da er das Auftreffen von ionisierten Teilchen vortäuscht. Er kann aber durch die anfangs erwähnten Alkoholdämpfe im Zählrohr reduziert werden. Die frei werdende Energie bei Stößen führt hier nicht zur Emission eines Elektrons sondern regt lediglich die Schwingung eines vielatomigen Alkoholmoleküls an. Die Nachentladungen können nicht vollständig verhindert werden, sondern werden lediglich reduziert.

1.4 Charakteristik des Zählrohrs

Die Charakteristik eines Zählrohrs erhält man, wenn die registrierte Teilchenzahl N gegen die angelegte Spannung bei konstanter Strahlungsintensität aufgetragen wird.

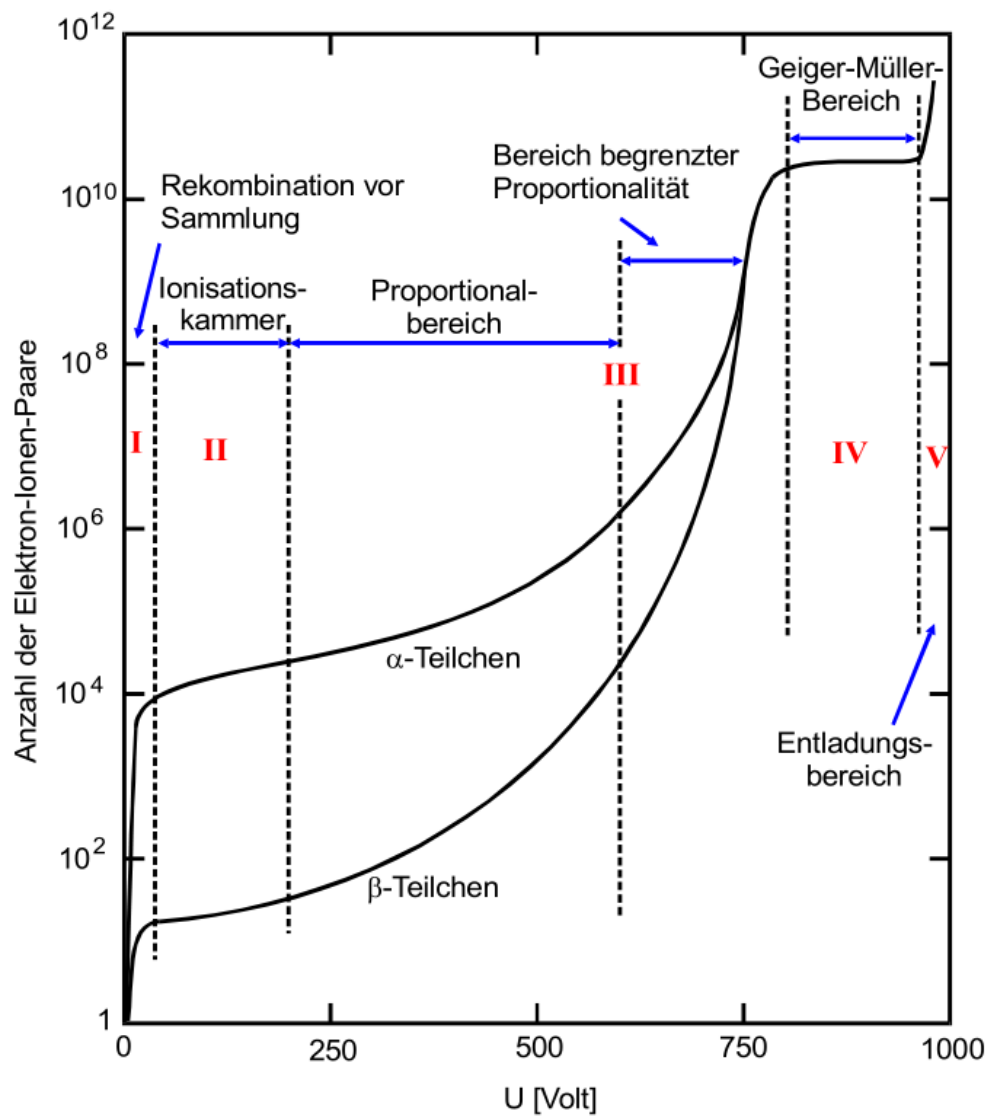


Abbildung 2: Die verschiedenen Bereiche im Bezug auf die angelegte Betriebsspannung.

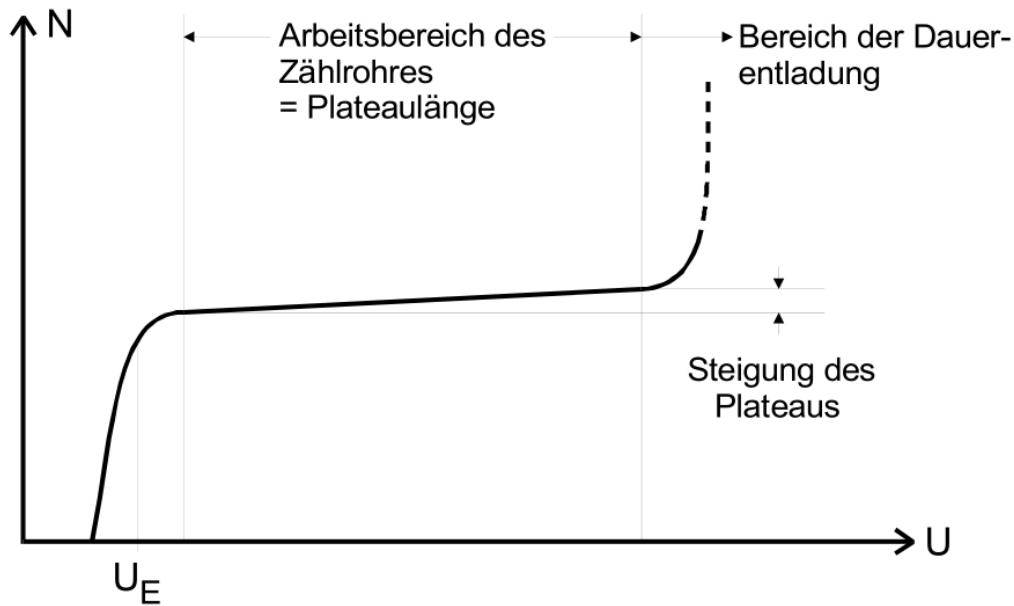


Abbildung 3: Zählrohrcharakteristik bei konstanter Strahlungsintensität.

Der lineare Teil der in Abb. 5 zu sehenden Kurve heißt Plateau. Durch Betrachtung der Plateau-Steigung sowie Spannungsmäßigen Ausdehnung lässt sich eine Aussage über die Qualität des verwendeten Zählrohrs treffen, da im Idealfall die Steigung Null sein sollte und die Ausdehnung möglichst groß. Aufgrund der Nachentladungen wird jedoch eine geringe Zunahme von N erkennbar sein. Bei zu hoher Spannung wird die Zahl der Nachentladungen so groß, dass der Entladungsbereich erreicht wird (Bereich V, Abb. 2).

1.5 Ansprechvermögen des Zählrohrs

Unter dem Ansprechvermögen wird die Wahrscheinlichkeit, dass ein in den Detektor einfallendes Teilchen im Zählrohr nachgewiesen wird, verstanden. Das Ansprechvermögen für geladene Teilchen wie α - und β -Teilchen ist nahezu bei 100 %. Jedoch werden sie im metallischen Zählrohrmantel vollständig absorbiert. Um das Zählrohr dennoch abschließen zu können, wird bei den Endfensterzählrohren an der Stirnseite eine Mylar-Folie angebracht. Diese besteht aus Atomen niedriger Ordnungszahl und lässt die Teilchen dennoch passieren. Selbst α -Teilchen werden von der Folie nicht absorbiert und können diese durchdringen. Aufgrund des Unterdruckes ist die Folie leicht nach Innen gewölbt (Abb. 1).

Das Ansprechvermögen von Photonen ist begründet durch ihre fehlende Ladung äußerst gering, sodass eine Messung mit einem Geiger-Müller-Zählrohr lediglich bei sehr hoher γ -Intensität sinnvoll ist.

2 Aufbau und Durchführung

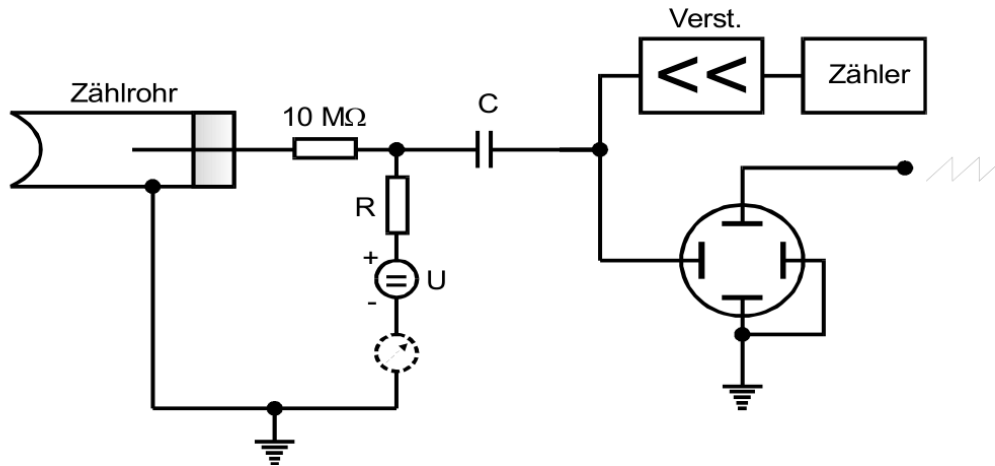


Abbildung 4: Aufbau der verwendeten Messapparatur.

Bei den folgenden Experimenten wird ein Aufbau gemäß Abbildung 4 verwendet. Dabei fließt die auf dem Zählrohr gesammelte Ladung Q über den Widerstand R ab. Der entstehende Spannungsimpuls wird über einen Kondensator ausgekoppelt, im Verstärker vergrößert und im Zählgerät registriert oder auf einem Oszilloskop sichtbar gemacht.

Im ersten Teil des Experimentes wird bei einer Probe die Abhängigkeit von gemessener Teilchenzahl und Ionisierungsstrom von der angelegten Spannung gemessen. Dafür wird am Anfang eine Spannung von 300V angelegt, die dann in 10V Schritten bis auf 700V erhöht wird. Dabei werden nach jedem Schritt der Ionisierungsstrom, sowie die in einem Zeitintervall von $t = 60s$ auftreffenden Teilchen notiert.

Im nächsten Teil des Experimentes werden auf dem Oszilloskop die Totzeit und die Erholungszeit bei einer Spannung von $U = 450V$ ausgemessen. Zudem werden die Nachentladungen sichtbar gemacht und beobachtet.

Zum Abschluss wurde mit dem Zählrohr noch die eintreffende Teilchenzahl der Probe N_1 , der Proben N_1 und N_2 kombiniert sowie der Probe N_2 alleine bei einer Spannung von $U = 450V$ gemessen. Auf diese, unter dem Namen Zwei-Quellen-Methode bekannte Methode wird in der Auswertung verschärft eingegangen.

3 Auswertung

Im Folgendem werden die erhobenen Messdaten ausgewertet und abschließend bezüglich ihrer Genauigkeit diskutiert.

3.1 Zählrohr-Charakteristik

Anhand der gemessenen Teilchenanzahl und der zugehörigen Spannung kann die Charakteristik des verwendeten Geiger-Müller-Zählrohres.

Die Charakteristik ergibt sich aus den Messdaten, die in Tabelle 3 dargestellt sind. Die Messungen sollten von 300 V bis 700 V vollzogen werden, jedoch ergaben die Messungen bei 300 V und 310 V eine registrierte Teilchenanzahl von Null. Dies erscheint unrealistisch und wurde aus diesem Grund von der Auswertung ausgeschlossen. Aus diesem Grund wurde die Messung aus dem Wertebereich von 320 V bis 700 V in 10 V-Schritten durchgeführt.

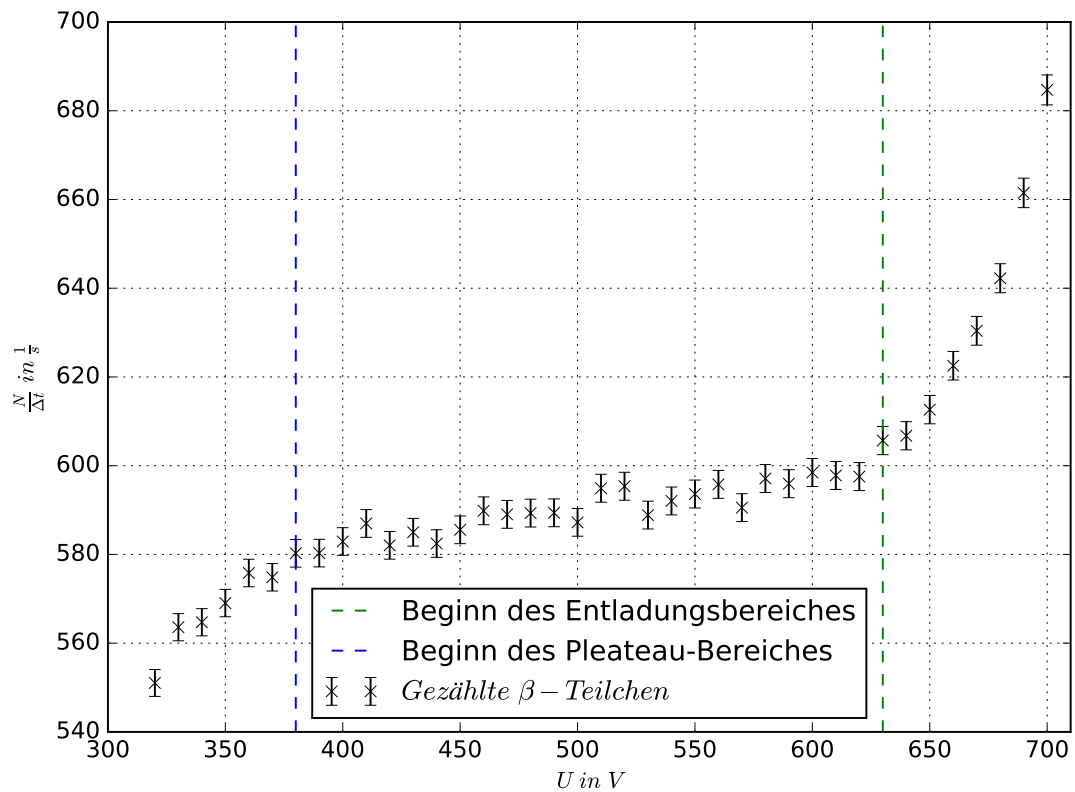


Abbildung 5: Charakteristik des verwendeten Geiger-Müller-Zählrohres, $\Delta t = 60$ s

Die in 5 dargestellte Charakteristik zeigt die verwendete Apparatur bei einer Betriebsspannung zwischen 320 bis 700 V.

Die Plateau-Ebene ist deutlich zu erkennen, da in diesem Bereich das Verhältnis zwischen registrierter Teilchenanzahl pro Minute und der Spannung nahezu konstant ist. Die Plateau-Ebene beginnt bei ca. 380 V und endet bei ca. 630 V.

Die Regressionsgeraden an den Plateau-Bereich hat ungefähr die folgenden Daten.

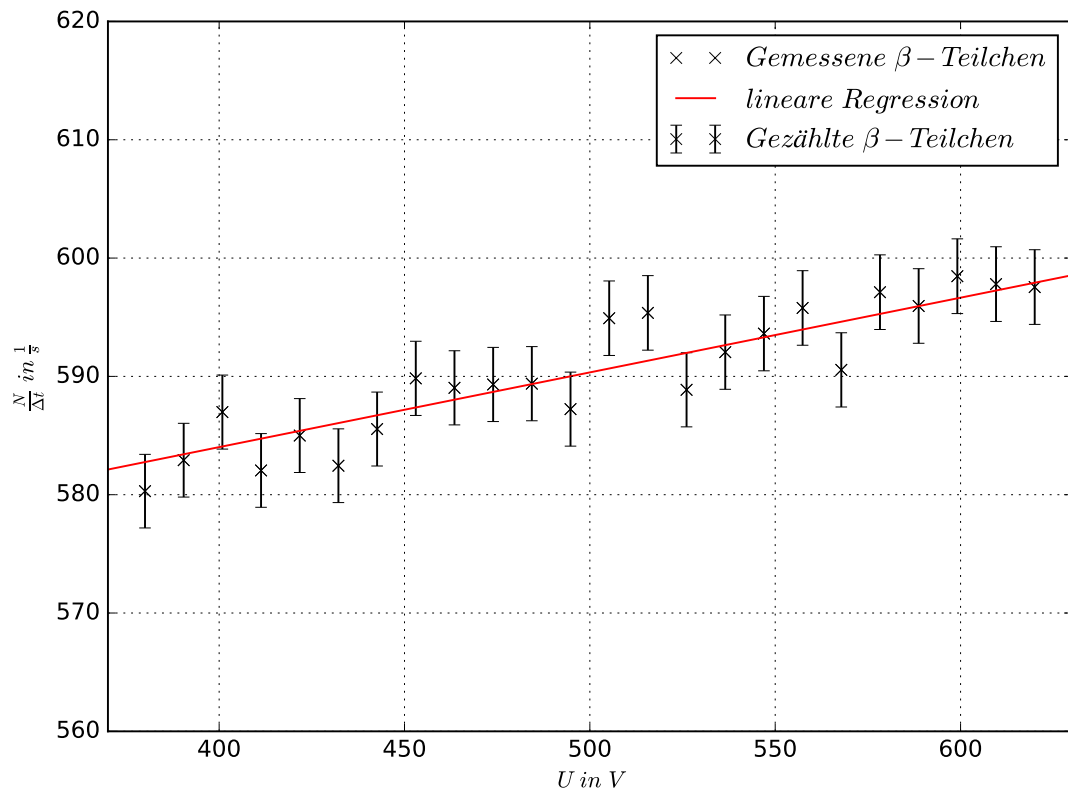


Abbildung 6: Plateau-Ebene des Messgerätes mit linearer Regression

$$\frac{N}{\Delta t}(U) = 6315 \cdot 10^{-5} \frac{1}{V \cdot s} \cdot U + 5587 \cdot 10^{-1} \frac{1}{s} \quad (1)$$

Vor der Plateau-Ebene ist der Proportionalitätsbereich von 320 V bis 380 V vermessen worden.

An den Plateau-Bereich schließt sich der Entladungsbereich an, der bis 700 V gemessen wurde. In diesem Bereich nimmt die Steigung der registrierten Teilchenanzahl pro Minute im Bezug auf die angelegte Spannung exponentiell zu.

3.2 Qualitative Bestimmung der Totzeit

Die Nachentladungen konnten bei dem Messvorgang der Totzeit T , über das Oszilloskop deutlich beobachtet werden. Es wurden insgesamt fünf Messungen bei unterschiedlicher Anodenspannung genommen.

Tabelle 1: Qualitativ bestimmte Totzeit

Spannung in V	Totzeit in μs
400	180
450	190
500	200
550	210
600	215

Aus den Daten der Tabelle 1 wurde der Mittelwert mit zugehöriger Standardabweichung bestimmt. Es ergibt sich der Wert $T = (2,39 \pm 0,08) \mu s$.

Gleichzeitig wurde auch die Erholungszeit qualitativ bestimmt. Die Messergebnisse sind in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Qualitativ bestimmte Totzeit

Spannung in V	Erholungszeit in ms
400	2,3
450	2,3
500	2,4
550	2,45
600	2,5

Für die Erholungszeit ergibt sich der Wert $t_{\text{Erholung}} = (2,39 \pm 0,08) \text{ ms}$.

3.3 Bestimmung der Totzeit mithilfe der Zwei-Quellen-Methode

Die wahre Impulsrate N_w unterscheidet sich aufgrund der Totzeit T von der gemessenen Impulsrate N_r um den Faktor $\frac{1}{1-TN_r}$.

Aus diesem Grund wird die Zwei-Quellen-Methode verwendet, bei der zuerst die Impulsrate einer einzelnen Quelle gemessen wird. Daraufhin wird eine weitere Quelle hinzugefügt, die eine unterschiedliche Strahlungsrate besitzt. Im letzten Schritt wird die erste Quelle aus der Apparatur entnommen.

Aufgrund der genommenen Messwerte kann die Totzeit für $T^2 N_i^2 \ll 1$ ($i = 1, 2, 1 + 2$) durch die Formel (2) approximiert werden.

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

Die Messung ergaben die folgenden Werte.

$N_1 : 25692$

$N_2 : 1109$

$N_{1+2} : 26775$

Dabei sind die N_i ($i = 1, 2, 1 + 2$) in registrierten Teilchen pro Minute bestimmt.

Aus den Messwerten ergibt sich mit der Formel (2) T zu $(3 \pm 24) \cdot 10^{-5}$ s.

3.4 Messung der pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzten Ladungsmenge

In dem Versuch wurde der vom Zählrohr freigesetzte Strom in Abhängigkeit von der angelegten Spannung gemessen. Die Messung wurde in 10 V Schritten von 320 V bis 700 V durchgeführt. Die Messdaten sind in Tabelle 3 dargestellt. Zwischen der Zählrate und der gemessenen Stromstärke besteht ein linearer Zusammenhang der wie folgt dazustellen ist.

$$I = \Delta Q \cdot N$$

Deshalb lässt sich die freigesetzte Ladung pro Teilchen im Zählrohr über eine lineare Regression aus den Daten der Tabelle 3 ermitteln. Dafür wurde die gemessene Stromstärke der registrierte Teilchenanzahl pro Minute gegenübergestellt.

Die Ausgleichsgerade hat ungefähr die folgenden Daten.

$$I(N) = (144 \pm 13) \cdot 10^{-1} \mu\text{As} \cdot N - (82,577 \pm 0,008) \text{ C} \quad (3)$$

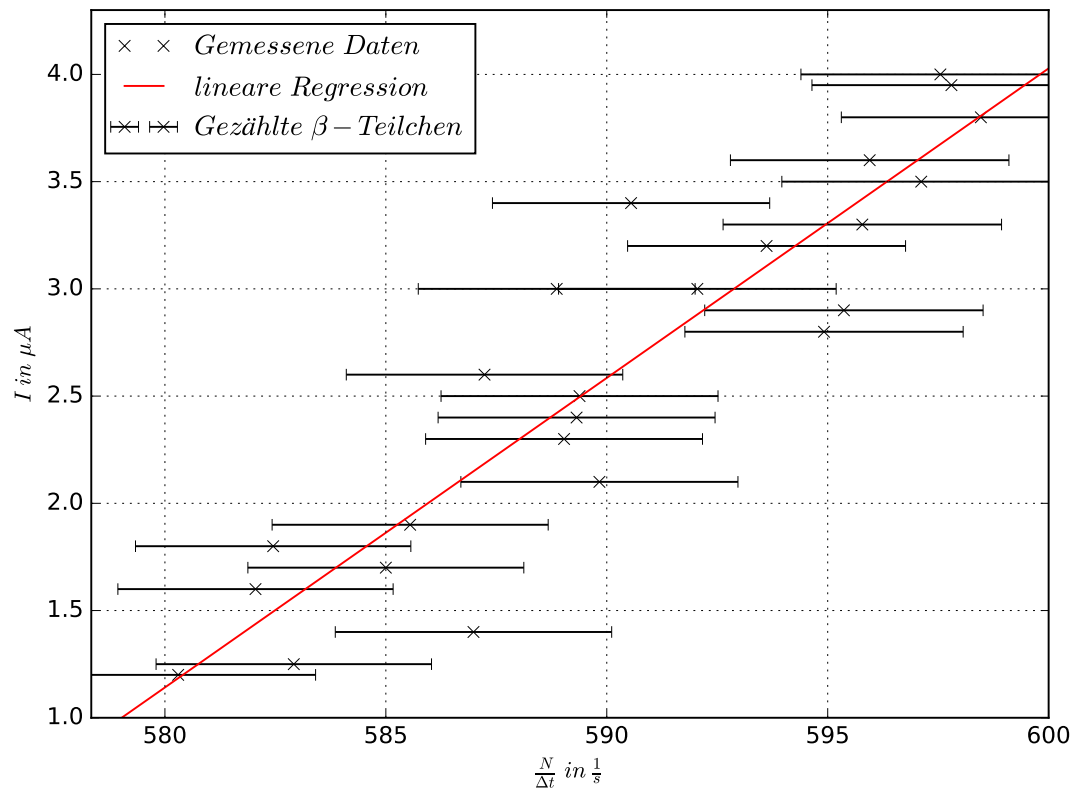


Abbildung 7: Gemessenen Stromstärke gegenüber der Teilchenanzahl pro Minute mit linearer Regression

Die Ladung pro Teilchen ist ungefähr gleich der Steigung der Ausgleichsgeraden. Damit wird jedem Teilchen eine freigesetzte Ladungsmenge von $\approx 144 \cdot 10^{-1} \text{ C}$ zugeordnet. Dies entspricht ca. $9 \cdot 10^{17}$ Elementarladungen.

Zudem wurde die Stromstärke bei steigender Spannung gemessen. Das Messintervall erstreckt sich über den selben Spannungsbereich wie bei Bestimmung der Charakteristik.

Eine Grafik dieses Diagrammes ist in Abb. 8 dargestellt.

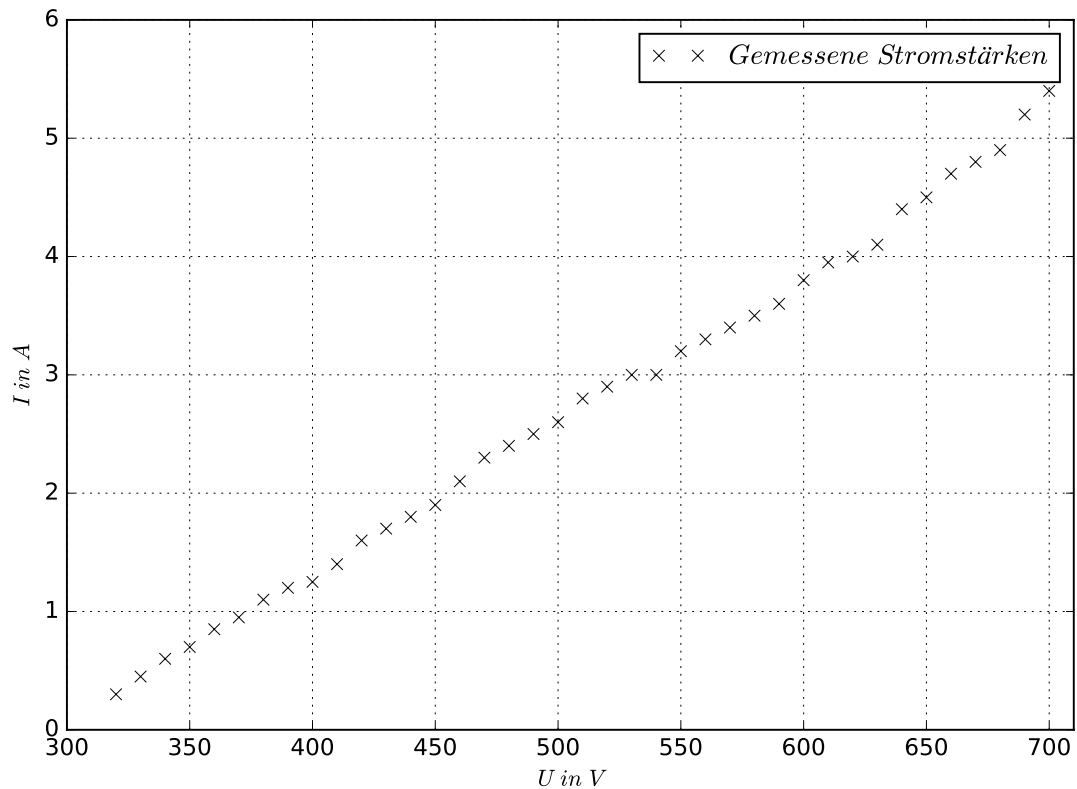


Abbildung 8: Gemessenen Stromstärke gegenüber der Spannung

Anhand der Abb. 8 wird ersichtlich, dass die Stromstärke mit zunehmender Spannung ebenfalls zunimmt. Der Zusammenhang scheint linear.

4 Diskussion

Die Steigung der Regressionsgeraden, die an die Plateau-Ebene angelegt wurde besitzt eine sehr geringe Steigung (vgl. 1). Damit ist das Verhältnis zwischen registrierter Teilchenanzahl und Spannung im Rahmen der Messgenauigkeit als konstant anzusehen.

Insgesamt werden an der aufgenommenen Charakteristik die grundsätzlichen Merkmale eines Geiger-Müller-Zählrohres deutlich ersichtlich.

Die Totzeit konnte an der verwendeten Apparatur nicht über die Zwei-Quellen-Methode bestimmt werden, da die Probenhalterung beim Einlegen der zweiten Quelle verwackelt ist, sodass keine zuverlässigen Messwerte erhoben werden konnten. Die verwendeten Messdaten entstammen den Messungen der parallel arbeitenden Gruppe Steven D. Becker und Stefan G. Grisard. Deshalb ist der Vergleich zwischen den Methoden zur Bestimmung der Totzeit nicht sinnvoll. Es wird angenommen, dass die qualitativ bestimmte Totzeit tatsächlich die Totzeit der Apparatur genügend gut beschreibt.

Die Messung der pro Teilchen vom Zählrohr freigesetzten Ladungsmenge wurde mithilfe einer linearen Regression bewerkstelligt. Dies ist sinnvoll, da ein linearer Zusammenhang zwischen der registrierten Teilchenanzahl pro Minute und der währenddessen gemessenen Stromstärke besteht. Der Proportionalitätsfaktor zwischen den beiden Größen ist die freigesetzte Ladung. Es wurde lediglich der Plateau-Bereich betrachtet, da davon auszugehen ist, dass dort die Nachentladungen vernachlässigbar gering sind und die freigesetzte Ladungsmenge lediglich von dem eingehenden ionisierendem Teilchen stammt. Damit lässt sich dann die freigesetzte Ladungsmenge pro Teilchen möglichst präzise bestimmen. Die gefundene freigesetzte Ladungsmenge pro Teilchen erscheint, unter Betrachtung der Townsend-Lawine realistisch.

5 Messdaten

In diesem Kapitel sind die Messdaten der Messung der Charakteristik dargestellt.

Tabelle 3: Messdaten der Charakteristik

Spannung in V	Zählrate in N in $\frac{1}{\text{min}}$	Stromstärke in mA
320	33062 \pm 182	0,30
330	33816 \pm 184	0,45
340	33883 \pm 184	0,60
350	34142 \pm 185	0,70
360	34549 \pm 186	0,85
370	34491 \pm 186	0,95
380	34815 \pm 187	1,10
390	34818 \pm 187	1,20
400	34975 \pm 187	1,25
410	35219 \pm 188	1,40
420	34923 \pm 187	1,60
430	35100 \pm 187	1,70
440	34947 \pm 187	1,80
450	35133 \pm 187	1,90
460	35390 \pm 188	2,10
470	35342 \pm 188	2,30
480	35359 \pm 188	2,40
490	35363 \pm 188	2,50
500	35234 \pm 188	2,60
510	35695 \pm 189	2,80
520	35722 \pm 189	2,90
530	35332 \pm 188	3,00
540	35523 \pm 188	3,00
550	35617 \pm 189	3,20
560	35747 \pm 189	3,30
570	35433 \pm 188	3,40
580	35827 \pm 189	3,50
590	35757 \pm 189	3,60
600	35908 \pm 189	3,80
610	35868 \pm 189	3,95
620	35853 \pm 189	4,00
630	36340 \pm 191	4,10
640	36405 \pm 191	4,40
650	36758 \pm 192	4,50
660	37352 \pm 193	4,70
670	37824 \pm 194	4,80
680	38535 \pm 196	4,90
690	39689 \pm 199	5,20
700	41082 \pm 203	5,40