

Physikalisches Anfängerpraktikum
Universität Dortmund / Fachbereich Physik

Protokoll zu Versuch 703

Das Geiger-Müller-Zählrohr

am 06.12.2005

von

Christophe Cauet und Tobias Brambach

Protokoll vom 9. Dezember 2005

1 Einleitung

Eine Möglichkeit um die Intensität ionisierender Strahlung zu messen, ist das in der Kernphysik verwendete **GEIGER-MÜLLER-ZÄHLROHR**. Wird in seinem Inneren ein α - oder β -Teilchen bzw. ein γ -Quant absorbiert, so lässt sich dies als elektrischer Impuls registrieren. Es lassen sich so in geeigneter Konstellation, die pro Zeit und Flächeneinheit registrierten Teilchen (bzw. Quanten) und somit die Intensität der Strahlungsquelle in Abhängigkeit vom Abstand zum Zählrohr bestimmen. Im folgenden wollen wir die Vor- und Nachteile des GEIGER-MÜLLER-Zählrohres erläutern und seine grundsätzliche Funktionsweise sowie seinen Aufbau erklären.

2 Theorie

2.1 Aufbau und Wirkungsweise

Das GEIGER-MÜLLER-Zählrohr besteht aus einem Kathodenzylinder (siehe Abbildung 1) (Radius r_k) und einem in seinem Inneren axial verlaufenden Anodendraht (Radius r_a). Gefüllt ist das Rohr mit einem Edelgas.

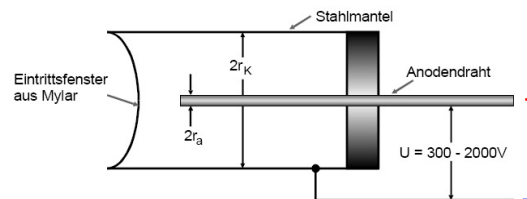


Abbildung 1: Aufbau des GEIGER-MÜLLER-Zählrohres

Wird zwischen Kathode und Anode eine äussere Spannung U (ca. 300 bis 2000 V) angelegt, bewirkt diese ein radialsymmetrisches Feld, dessen Feldstärke mit $1/r$ abfällt und sich mit

$$E(r) = \frac{U}{r \cdot \ln\left(\frac{r_k}{r_a}\right)} \quad (2.1)$$

berechnen lässt. Für genügend kleine Radien, kann die Feldstärke somit beliebig groß werden. Es stellt sich nun die Frage, was bei unterschiedlichen von außen angelegten Spannungen passiert.

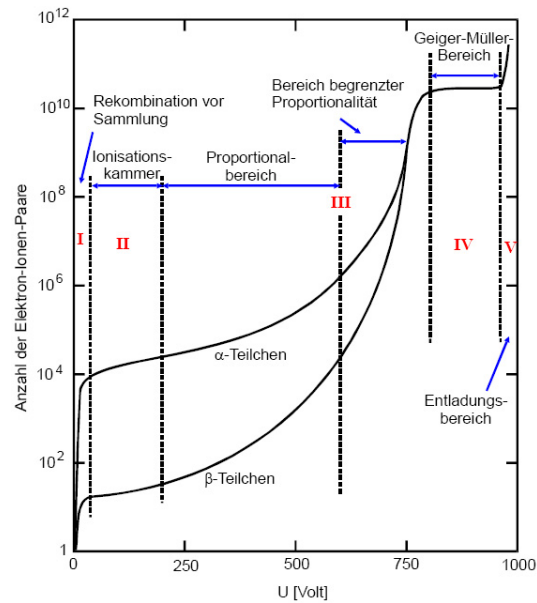


Abbildung 2: Proportionalität zwischen der Anzahl der erzeugten Elektron-Ionenpaare und der Spannung U

Im ersten Bereich des in Abbildung 2 gezeigten Diagrammes reicht die Energie der angelegten Beschleunigungsspannung noch nicht aus, um die nach der Primärionisation entstehenden Elektronen genügend zu beschleunigen. Nur wenige erreichen den Draht, die meisten gehen durch **Rekombination** verloren.

Bei höherer Feldstärke sinkt die Rekombinationswahrscheinlichkeit schnell ab. Der kontinuierlich zwischen Anode und Kathode fließende Strom ist dann proportional zur Energie und Intensität der absorbierten Strahlung. Geräte die in diesem Bereich arbeiten werden üblicherweise als **Ionisationskammer** bezeichnet.

Wird die Spannung weiter erhöht, stellt sich der sogenannte **Proportionalbereich** ein. Für diesen ist charakteristisch, dass die Feldstärke ausreicht, um die in Drahtnähe erzeugten Elektronen genügend zu beschleunigen und ihrerseits weitere Atome ionisieren zu können. Dieser Vorgang wird als **Stoßionisation** bezeichnet. Da sich die so erzeugten freien Elektronen ebenfalls an der Kettenreaktion beteiligen können, spricht man in diesem Zusammenhang auch von einer **TOWNSEND-Lawine**. Wie der Name schon suggeriert, kann der Ladungsimpuls als Maß für die Teilchenenergie genutzt werden und das Zählrohr kann neben der Intensitätsmessung weiterhin auch zur Energiemessung genutzt werden. Detektoren dieser Art werden als **Proportionalzählrohr** bezeichnet.

Im vorletzten Abschnitt von Abbildung 2 sprechen wir vom **Auslösebereich**. Die Beschleunigungsspannung liegt hier nochmals höher und die Ladung Q wird unabhängig von der Primärionisation. Aufgrund der hohen Energien entstehen jetzt neben Sekundärelektronen ausserdem in großer Zahl *UV-Photonen* in der primären Elektro-

nenlawine. Diese unterliegen nicht den Wechselwirkungen des elektrischen Feldes im Rohr und können sich auch senkrecht zum Feld ausbreiten. Das hat als direkte Konsequenz die Entstehung von weiteren Sekundärwellen im *ganzen* Zählrohrvolumen. Das GEIGER-MÜLLER-Zählrohr ist somit nicht mehr zur Energiebestimmung zu verwenden und kann nur noch zur Intensitätsmessung herangezogen werden.

2.2 Vorteile des GEIGER-MÜLLER-Zählrohres: Aufwand, Ansprechvermögen

Zu den eindeutigen Vorteilen des GEIGER-MÜLLER-Zählrohres gegenüber beispielsweise Proportionalzählrohren ist die einfache Handhabbarkeit und das hohe Ansprechvermögen sowohl auf α - als auch β -Zerfall zu nennen. Wie in Abbildung 2 ebenfalls zu erkennen, ist der Arbeitsbereich des Zählrohres sowohl für die Detektierung der Helium-Kerne, als auch der Elektronen in gleichem Maße geeignet. Aufgrund seiner Kompaktheit und geringen Anforderungen an elektronische Zusatzgeräte kann ein GEIGER-MÜLLER-Zählrohr auch im Freien und unter erschwerten Bedingungen eingesetzt werden (Unfälle etc.).

2.3 Nachteile des GEIGER-MÜLLER-Zählrohres: Totzeit, Nachentladungen

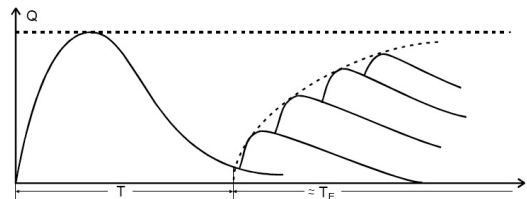


Abbildung 3: Tot- und Erholungszeit eines Zählrohres,
Darstellung im Qt -Diagramm

Ein großes Problem bei der Nutzung des GEIGER-MÜLLER-Zählrohres ist die **Totzeit**. Die beim Entladevorgang entstehenden Elektronen wandern schnell zum Draht ab, nicht jedoch die schwereren positiven Ionen. Diese bauen während ihrer Wanderung zum Rohrmantel einen radialsymmetrischen, positiven *Ionenschlauch* auf. Tritt ein Teilchen während dieser Zeit ein, wird es aufgrund der herabgesetzten Feldstärke vom Zählrohr nicht gezählt. Die so entstehende Zeitspanne der „Nicht-Detektierbarkeit“ wird allgemein hin als Totzeit bezeichnet. Wie aus Abbildung 3 weiterhin abzuleiten ist, erfolgt die Rückführung des Systems in seinen ursprünglichen Zustand nicht schlagartig, sondern kontinuierlich, bis die Ionen von einer erneuten Zündung vollständig neutralisiert werden. Diese sich an die Totzeit T anschließende Phase wird **Erho-**

lungszeit T_E genannt.

Ein weiterer unerwünschter Effekt entsteht durch hochenergetische Ionen, welche auf dem Zählrohrmantel auftreffen und neue Sekundärelektronen freisetzen. Diese werden ebenfalls registriert und ziehen verzögerte Impulse nach sich, die jedoch nicht durch neue Teilchen hervorgerufen wurden. Man bezeichnet diese Effekte als **Nachladungen** und es ist klar, dass versucht wird sie aufgrund der dadurch verfälschten Messergebnisse weitestgehend zu unterdrücken. Dies gelingt, durch Zugabe von Alkohol- oder Halogenmolekülen. Die Moleküle haben eine kleinere Ionisationsenergie als die Edelgasatome und setzen die aufgenommene Energie in Schwingungsenergie um, so dass keine weiteren Elektronen aus der Kathode gelöst werden.

2.4 Charakteristik des Zählrohres

Als **Charakteristik** eines GEIGER-MÜLLER-Zählrohres bezeichnet man die registrierte Teilchenzahl N , die bei konstanter Strahlungsintensität gegen die angelegte Spannung U aufgetragen wird.

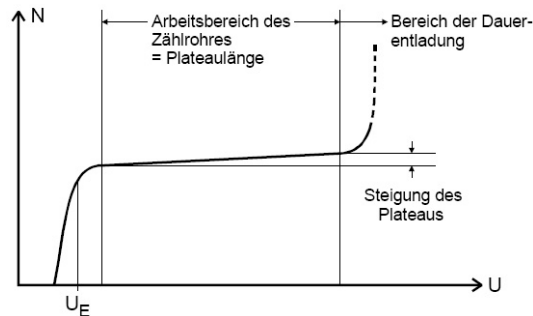


Abbildung 4: Zählrohrcharakteristik bei konstanter Spannung U

Wie in Abbildung 4 gut zu erkennen, setzt der Auslösebereich etwa bei einer Spannung von U_E ein. Der folgende lineare Abschnitt der Kurve wird als **Plateau** bezeichnet. Ein ideal arbeitendes Zählrohr sollte die Plateausteigung null besitzen. Die zu beobachtende leichte Zunahme von N mit der Spannung U , ist auf einige Nachentladungen zurückzuführen, die trotz des Alkohol- oder Halogendampfzusatzes entstehen. Eine geringe Steigung und ein langes Plateau zeichnen ein gutes Zählrohr aus.

2.5 Ansprechvermögen des Zählrohres

Die unterschiedliche Empfindlichkeit mit der Teilchen bzw. Quanten in einem Zählrohr absorbiert und somit gemessen werden wird als **Ansprechvermögen** bezeich-

net. Es zeigt sich, dass α - und β -Teilchen, wegen ihres hohen Ionisationsvermögens, ein Ansprechvermögen von nahezu 100 % besitzen, Photonen hingegen im Vergleich dazu, nur äusserst selten in Wechselwirkung treten ($\approx 1\%$). Das GEIGER-MÜLLER-Zählrohr eignet sich also nur bei hohen γ -Intensitäten sinnvoll zur Messung. Auch wenn sowohl α - als auch β -Teilchen sehr gut detektiert werden können, muss gewährleistet sein, dass sie in das Zählrohrvolumen eindringen können. Dies geschieht beispielsweise mit Endfensterzählrohren, deren Stirnseite mit einer dünnwandigen Mylar-Folie bespannt sind, welche selbst α -Teilchen durchdringen können.

3 Durchführung

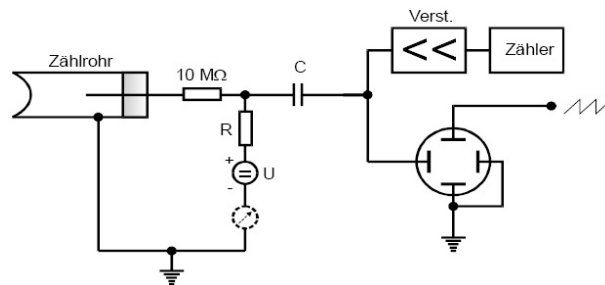


Abbildung 5: Aufbau der Versuchsanordnung

Abbildung 5 zeigt den Aufbau der Versuchsanordnung. Der erste Abschnitt des Experiments wird genutzt um die Charakteristik des zu benutzenden Zählrohres zu bestimmen. Eine β -Quelle wird hierzu vor das Fenster des Zählrohres gestellt und die Zählrate in Abhängigkeit der Betriebsspannung U gemessen. Eine Spannung von 700 V sollte nicht überschritten werden. Es soll ausserdem der zeitliche Abstand zwischen Primär- und Nachentladungsimpulsen gemessen werden. Der zweite Teil beschäftigt sich nun mit der oszillographischen Messung der Totzeit. Hierzu sorgen wir für eine ausreichend hohe Strahlungsintensität und können dann, bei bekannter Ablenkgeschwindigkeit des Kathodenstrahls, nach Abbildung 3, sowohl die Totzeit als auch grob die Erholungszeit ablesen. Eine zweite Möglichkeit zur Bestimmung der Totzeit ist die **Zwei-Quellen-Methode**. Hier wird die Impulsrate einer Quelle N_1 bestimmt, anschließend die summierte Impulsrate mit einer zweiten Probe N_2 , also $N_{1+2} = N_1 + N_2$. Danach soll noch die Rate von N_2 einzeln gemessen werden. Die gesuchte Totzeit lässt sich jetzt über

$$T \approx \frac{N_1 + N_2 - N_{1+2}}{2N_1N_2} \quad (3.1)$$

berechnen. Abschließend möchten wir noch die pro Teilchen im Zählrohr freigesetzte Ladungsmenge messen. Mit bekanntem Zählrohrstrom \bar{I} , Spannung U , Messintervall Δt und Zählrate Z lässt sich diese berechnen:

$$\bar{I} = \frac{\Delta Q}{\Delta t} Z \quad (3.2)$$

4 Auswertung

4.1 Hinweise zur Fehlerrechnung

Der absolute Fehler auf eine Messung der Anzahl N der Entladungen in einem bestimmten Zeitintervall t folgt aus

$$\Delta N = \sqrt{N}. \quad (4.1)$$

Daraus bekommt man leicht den Fehler auf die Zählrate $Z = \frac{N}{t}$

$$\Rightarrow \Delta Z = \frac{\Delta N}{t}. \quad (4.2)$$

Die weiteren Betrachtungen zur Fehlerrechnung sind bei den jeweiligen Rechnungen zu finden.

4.2 Messung der Zählrohr Charakteristik

U [V]	N [1/s]	Z [1/s]	ΔZ [1/s]	r_Z
320	12413	155.16	1.39	0.0090
360	12661	158.26	1.41	0.0089
400	13036	162.95	1.43	0.0088
440	13151	164.39	1.43	0.0087
480	12963	162.04	1.42	0.0088
520	13040	163.00	1.43	0.0088
560	13343	166.79	1.44	0.0087
600	13228	165.35	1.44	0.0087
640	13689	171.11	1.46	0.0085
680	13626	170.33	1.46	0.0086
700	13919	173.99	1.47	0.0085

Tabelle 1: Messwerte zur Bestimmung der Zählrohr Charakteristik mit
 $t = 80$ s

Eine erste Messung lieferte die in Tabelle 1 dargestellten Werte. Aufgrund der Vermutung, dass sich das Geiger Müller Plateau in etwa im Bereich zwischen 400 V und 600 V befinden muss, wurde dieser Bereich noch einmal genauer ausgemessen, um die durch die starken statistischen Schwankungen auftretenden Fehler im Rahmen zu halten. Die Messwerte aus der zweiten Messung befinden sich in Tabelle 2.

U [V]	N [1/s]	Z [1/s]	ΔZ [1/s]	r_Z
380	32199	161.00	0.90	0.0056
420	32456	162.28	0.90	0.0056
460	32670	163.35	0.90	0.0055
500	33155	165.78	0.91	0.0055
540	33218	166.09	0.91	0.0055
580	33379	166.90	0.91	0.0055
600	33178	165.89	0.91	0.0055
620	33642	168.21	0.92	0.0055

Tabelle 2: Weitere Messwerte zur Bestimmung der Zählrohr
Charakteristik mit $t = 200$ s

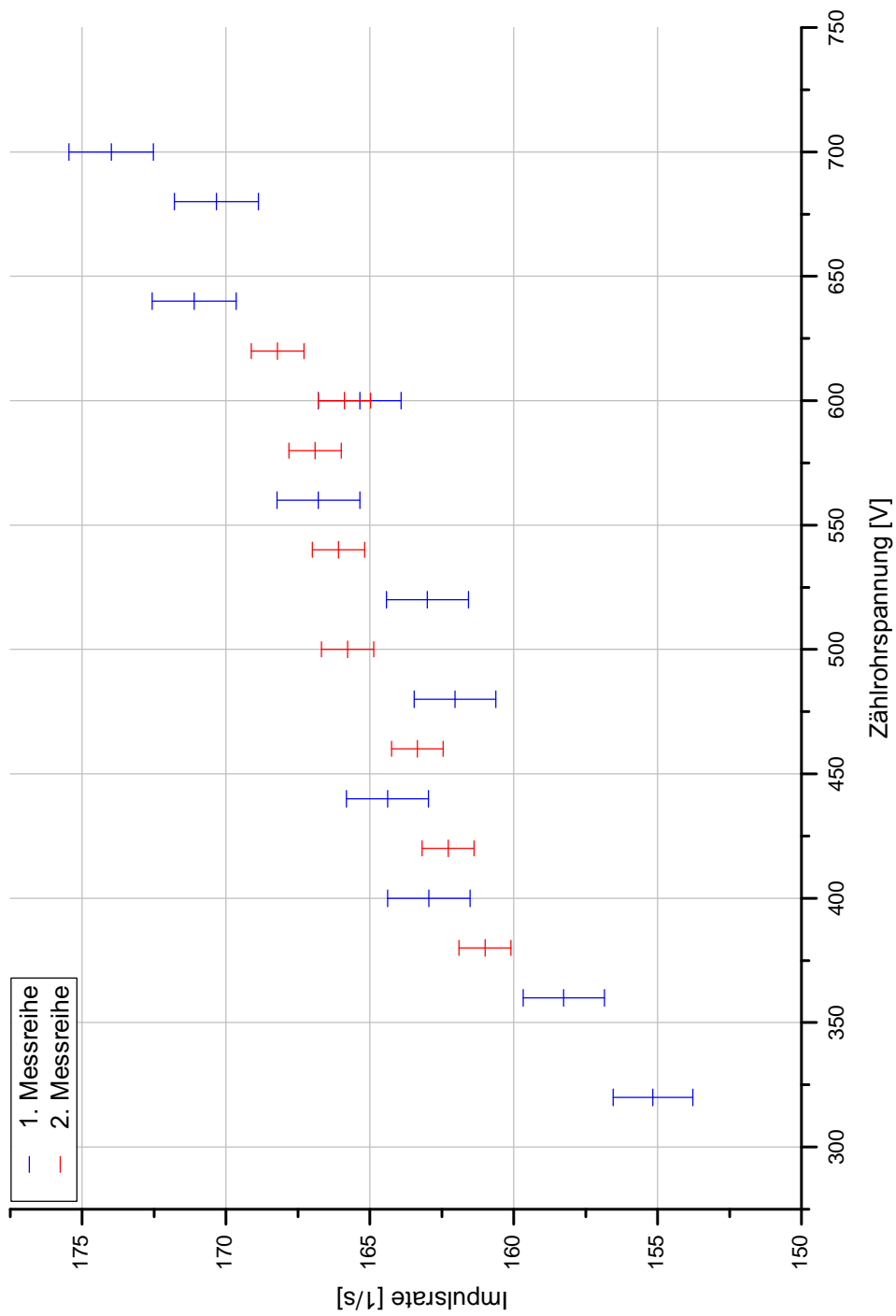


Abbildung 6: Messwerte für die Impulsrate in Abhängigkeit von der Zählrohrspannung

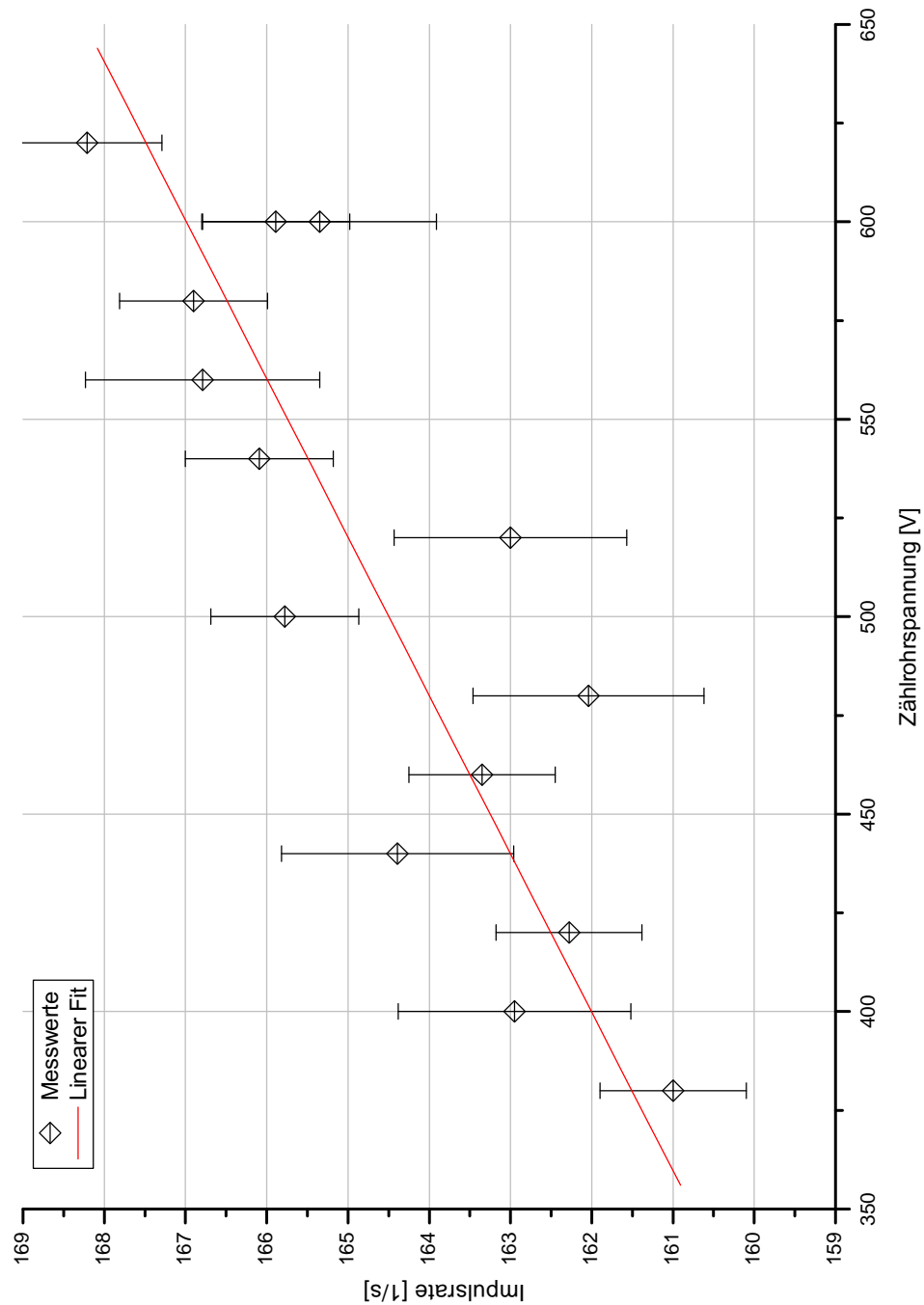


Abbildung 7: Ausgleichsrechnung zur Bestimmung der Plateausteigung

Alle Messwerte sind zur Übersicht noch einmal in Abbildung 6 graphisch dargestellt. Die Werte zwischen 400 V und 600 V zeigen erkennbar einen linearen Zusammen-

hang, aber auch die beiden Messwerte für 380 V und 620 V liegen noch gut auf einer Geraden, zumindest mit den Werten aus der genaueren Messung (rot) und sollten daher in die Ausgleichsrechnung mit einbezogen werden. Diese liefert dann eine Steigung a der Geraden von

$$\begin{aligned} a &= (0.0249 \pm 0.0036) \text{ 1/Vs} \\ &= 0.0249(1 \pm 0.14) \text{ 1/Vs} \end{aligned}$$

sowie den Y-Achsenabschnitt

$$\begin{aligned} b &= (152.04 \pm 1.83) \text{ 1/Vs} \\ &= 152.04(1 \pm 0.012) \text{ 1/Vs.} \end{aligned}$$

Der Plateauanstieg wird nun in %/100 V angegeben, wobei sich die % auf den Beginn des Plateaus beziehen. Die Gleichung für die Ausgleichsgerade (Abbildung 7) mit der Zählrate Z lautet

$$Z(U) = 0.0249 \text{ 1/Vs}U + 152.0383 \text{ 1/s.} \quad (4.3)$$

Der Fehler auf die Plateaugrenzen folgt aus der Geradengleichung

$$\Delta Z = \Delta a \cdot U + \Delta b. \quad (4.4)$$

Mit dem Plateaugrenzen von 380 V und 620 V errechnen wir für die obere und untere Zählrate Z an den Plateaurändern

$$\begin{aligned} Z_{\text{unten}} &= (161.51 \pm 3.18) \text{ 1/s} \\ &= 161.51(1 \pm 0.020) \text{ 1/s} \\ Z_{\text{oben}} &= (167.49 \pm 4.04) \text{ 1/s} \\ &= 167.49(1 \pm 0.024) \text{ 1/s.} \end{aligned}$$

Den Plateauanstieg a_P erhalten wir dann aus

$$a_P = \frac{U_{\text{oben}} - U_{\text{unten}}}{100} \cdot \left(\frac{Z_{\text{oben}}}{Z_{\text{unten}}} - 1 \right) \quad (4.5)$$

mit dem Fehler

$$r_{a_P} = \sqrt{r_{U_{\text{Anfang}}}^2 + r_{U_{\text{Ende}}}^2}. \quad (4.6)$$

Somit folgt dann für den Wert des Plateauanstiegs

$$\begin{aligned} a_P &= (1.543 \pm 0.048) \% \\ &= 1.543(1 \pm 0.031) \%. \end{aligned}$$

4.3 Nachentladungen

Bei geringer Spannung im Zählrohr $U = 350 \text{ V}$ wird die Probe so eingestellt, dass pro Strahldurchlauf am Oszilloskop nur ca. 1 Teilchen im Zählrohr absorbiert wird. Nach dem Erhöhen der Zählrohrspannung auf $U = 700 \text{ V}$ sind dann deutlich mehr Entladungen in der gleichen Zeitspanne sichtbar. Da die Anzahl der einfallenden Teilchen in etwa konstant geblieben sein muss, müssen die Entladungen durch Nachentladungen bedingt sein. Der zeitliche Abstand der Nachentladungen liegt bei etwas $\Delta t = 100 \mu\text{s}$, was ziemlich genau der Totzeit des Zählrohrs entspricht (s.u.).

4.4 Bestimmung der Totzeit

	N_1 [1/s]	N_2 [1/s]	N_{1+2} [1/s]	T [s]
Messwert	81146	7071	87584	$1.1032 \cdot 10^{-4}$
Fehler (abs.)	287	84	296	$1.70 \cdot 10^{-6}$
Fehler (rel.)	0.0035	0.0119	0.0034	0.015

Tabelle 3: Messergebnisse zur Bestimmung der Totzeit T mit $z = 200 \text{ s}$

Eine ungefähre Abschätzung mit Hilfe des Oszilloskops, liefert eine Totzeit von $T \approx 100 \mu\text{s}$. Eine genauere Bestimmung kann mit der Zwei-Quellen Methode erreicht werden. Die zugehörigen Messwerte sind in Tabelle 3.1 dargestellt. Aus der Formel (??) berechnen wir (mit $Z = \frac{N}{t}$ und t als Messdauer)

$$T \approx \frac{1}{2Z_2} + \frac{1}{2Z_1} - \frac{Z_{1+2}}{2Z_1Z_2} \quad (4.7)$$

und können dann die Totzeit mit dem Fehler

$$\Delta T = \frac{1}{\Delta Z_2} + \frac{1}{\Delta Z_1} + \sqrt{r_{Z_1}^2 + r_{Z_2}^2 + r_{Z_{1+2}}^2} \cdot \frac{Z_{1+2}}{2Z_1Z_2} \quad (4.8)$$

bestimmen.

$$\begin{aligned} T &= (1.1032 \pm 0.017) \cdot 10^{-4} \% \\ &= 1.1032(1 \pm 0.015) \cdot 10^{-4} \% \end{aligned}$$

4.5 Ladung pro einfallendem Teilchen

U [V]	\bar{I} [A]	N [$\frac{1}{s}$]	Z [$\frac{1}{s}$]	$\frac{Q}{t}$ [$\frac{C}{s} \cdot 10^{-9}$]	$\frac{Q}{Tl.}$ [$e \cdot 10^6$]	$\Delta \frac{Q}{Tl.}$ [$e \cdot 10^6$]	$r_{Q/Tl.}$
350	0.8	98240	818.67	0.98	7.148	0.023	0.0032
400	1.6	100414	836.78	1.91	13.683	0.043	0.0032
450	2.4	99997	833.31	2.88	20.696	0.065	0.0032
500	3.4	100820	840.17	4.05	28.842	0.091	0.0031
550	4.4	101807	848.39	5.19	36.605	0.115	0.0031
600	5.4	102962	858.02	6.29	43.922	0.137	0.0031
650	6.0	104090	867.42	6.92	47.751	0.148	0.0031
700	7.0	109780	914.83	7.65	50.084	0.151	0.0030

Tabelle 4: Messergebnisse für die pro einfallendem Teilchen freigesetzte Ladung ($t = 200$ s)

Die Ergebnisse der Messung sind in Tabelle 4 dargestellt. Die Werte für die pro einfallendem Teilchen ausgelöste Ladung berechnen sich mit Hilfe von (3.2). Zur Veranschaulichung findet sich eine graphische Darstellung in Abbildung (8).

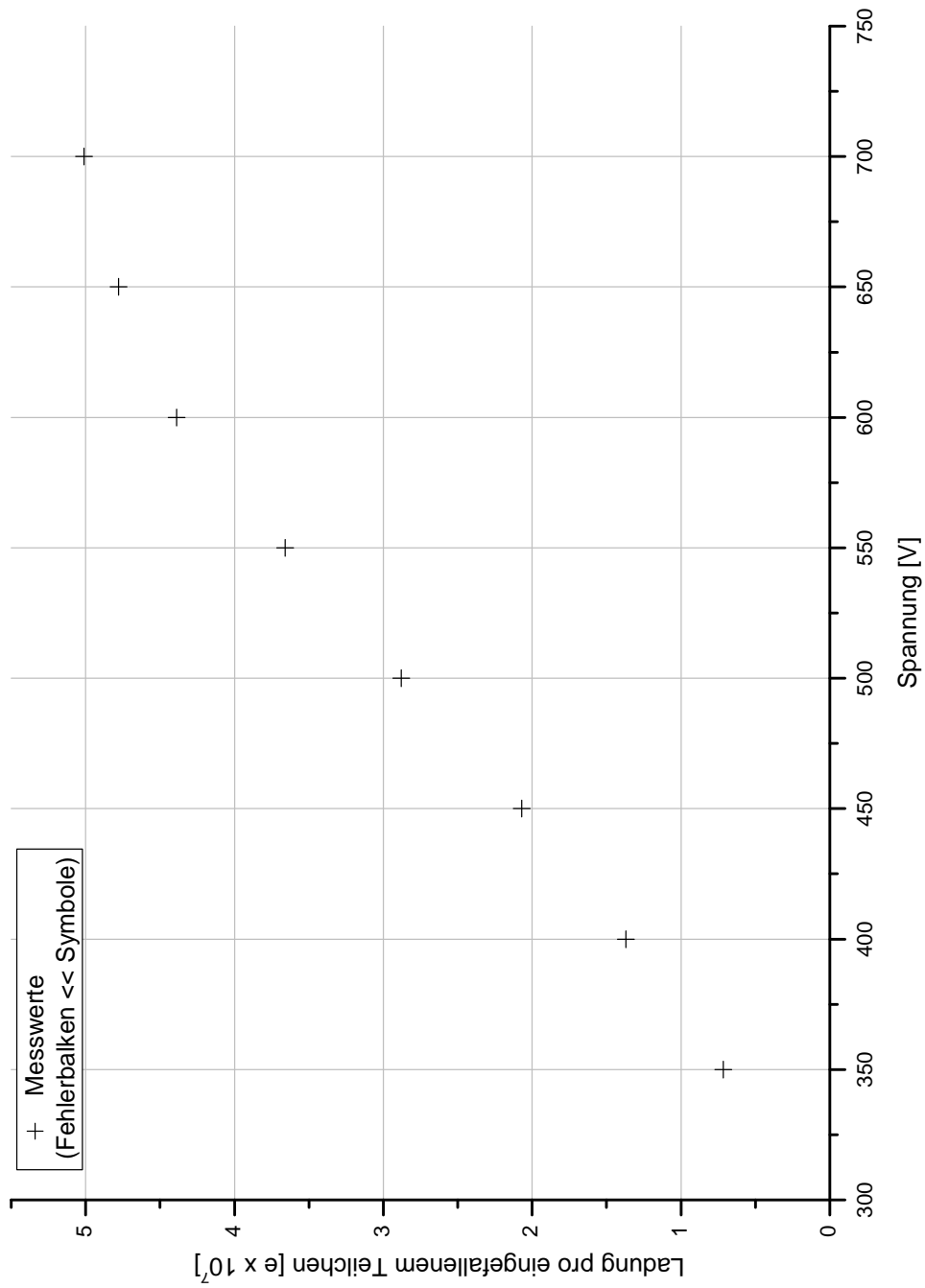


Abbildung 8: Darstellung der Messergebnisse für die pro einfallendem Teilchen freigesetzte Ladung

5 Diskussion

Bei der Durchführung der Messungen war zunächst die hohe statistische Abweichung der einzelnen Messwerte überraschend. Das zu bestimmende Plateau konnte aber trotzdem in etwa ausgemacht werden, so dass eine genauere Messung an den markanten Stellen ermöglicht wurde, die schließlich auch den auftretenden Fehler in Grenzen halten konnte.

Die Bestimmung der Totzeit mit der Zwei-Quellen-Methode lieferte ein Ergebnis, welches sehr nahe an dem auf dem Oszillographen abgeschätzten Wert liegt. Hierbei ist erwähnenswert, dass auch der zeitliche Abstand zwischen einem Impuls und einer zugehörigen Nachentladung stets in der Größenordnung dieses Wertes gelegen hat. Dies konnte man auch so erwarten, da das Zählrohr während seiner Totzeit ja nicht in der Lage ist, weitere Impulse zu registrieren.

In den Messergebnissen für die pro eingefallenem Teilchen freigesetzte Ladung scheint im Plateaubereich ein linearer Zusammenhang zwischen der Zählrohrspannung und der freigesetzten Ladung zu bestehen. Da die Stärke des elektrischen Feldes im Zählrohr proportional zu U ist, kann auch diese Beobachtung erklärt werden.

6 Literatur & Bildnachweise

Sämtliche Abbildungen in den Abschnitten 2 und 3 sind aus dem Praktikumsskript entnommen. Das Geiger-Müller Zählrohr (703)

Experimentelle Übungen für Physiker

Version vom 9. Dezember 2005

<http://berners-lee.physik.uni-dortmund.de/praktikum/>

AP-Anleitungen/freie\%20Elektronen/Versuch\%20Nr.703.pdf