

VERSUCH V703

Das Geiger-Müller-Zählrohr

Jannis Vornholt
jannis.vornholt@tu-dortmund.de

Alfredo Manente
alfredo.manente@tu-dortmund.de

Durchführung: 19.01.2021

Abgabe: 26.01.2021

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Aufbau	3
2.2	Totzeit und Nachentladung	4
2.3	Charakteristik des Zählrohres	6
2.4	Ansprechvermögen	6
2.5	Zwei-Quellen-Methode zur Bestimmung der Totzeit	6
2.6	Freigesetzte Ladungsmenge pro Teilchen	7
3	Versuchsaufbau	8
4	Durchführung	8
5	Messwerte	10
6	Auswertung	11
6.1	Zählrohr-Charakteristik	11
6.2	Totzeit des Zählrohrs bestimmt durch ein Oszilloskop	12
6.3	Totzeit des Zählrohrs bestimmt durch die Zwei-Quellen-Methode	12
6.4	Freigesetzte Ladungen pro eingefallenem Teilchen	13
7	Diskussion	15
	Literatur	15

1 Zielsetzung

Das Ziel des Versuchs 703 "Das Geiger-Müller Zählrohr" ist die Bestimmung verschiedener Parameter, welche die Eigenschaften und Funktionsweise eines Geiger-Müller Zählrohrs definieren.

2 Theorie

Das Geiger-Müller Zählrohr wird in der Kernphysik zur Intensitätsmessung ionisierender Strahlung verwendet. Es erzeugt elektrische Impulse bei der Absorption eines α - oder β -Teilchens oder γ - bzw. Röntgen-Quants.

2.1 Aufbau

Das Geiger-Müller Zählrohr besteht aus einem Zylinder, welcher mit einem Gasgemisch gefüllt ist und einem darin axial verlaufenden Draht. Dabei nimmt der Zylinder die Rolle einer Kathode und der Draht einer Anode an. Durch das Anlegen einer äußeren Spannung U entsteht ein radialsymmetrisches elektrisches Feld.

Wenn ein geladenes Teilchen in dem Zählrohr absorbiert wird, führt die Strahlung zur Ionisation des Gasgemisches. Die Atome des Gasgemisches, welche durch ein Strahlungsteilchen getroffen werden, spalten sich in Elektronen und positive Ionen ab. Dies geschieht bis die Energie des Strahlungsteilchens durch die Ionisationsakte aufgebraucht wird. Diese Primäriionisation ist proportional zu der Energie des einfallenden Teilchens. Konsequentielle Vorgänge der Primäriionisation sind abhängig von der außen angelegten Spannung U . Diese Abhängigkeit wird in Abbildung 1 graphisch dargestellt. Abhängig davon kann das Geiger-Müller Zählrohr verschiedene Funktionen abdecken, welche im Folgenden beschrieben werden.

Rekombination Bei kleinen Spannungen U geht der Großteil der Ionen durch Rekombination verloren und nur ein geringer Anteil der Elektronen erreicht den Anodendraht.

Ionisationskammer Bei höherer Feldstärke sinkt die Rekombinationsrate stark ab. Der Großteil der Elektronen erreicht den Anodendraht, wobei der Ionisationsstrom proportional zur Energie und zur Intensität der einfallenden Strahlung ist. Diese Außenspannung kann nur bei hohen Strahlungsintensitäten benutzt werden.

Proportionalzählrohr Bei noch höherer Spannung ist die Feldstärke groß genug, so dass bei Zwischenstößen mit den Gas-Atomen Elektronen freigesetzt werden, welche genug Energie beinhalten um selber ionisieren zu können. Die Anzahl der freigesetzten Elektronen nimmt lawinenartig an. Diesen Vorgang nennt man Townsend-Lawine. Die am Anodendraht ankommenden Ladungen Q können nun als Ladungsimpulse gemessen werden, jedoch sind diese weiterhin proportional zur Energie der einfallenden Strahlung.

Damit ist bei diesem Spannungsbereich eine Strahlungsintensitätsmessung sowie eine Energiemessung möglich. Man nennt dies Proportionalzählrohr, aufgrund der Proportionalität der Ladung Q zur Strahlungsteilchenenergie.

Auslösebereich Wird die Spannung über den Proportionalitätsbereich erhöht, ist die entstehende Ladung Q unabhängig von der Primärionisation. Dieser Auslösebereich ist der Spannungsbereich des Geiger-Müller Zählrohrs. Die Entladung beschränkt sich nun nicht mehr auf lokalisierte Lawinen, sondern es entstehen UV-Photonen, welche sich aufgrund derer Ladungsneutralität im gesamten Zählrohrvolumen bewegen und freie Elektronen abgeben. Daraus entstehen weitere Elektronenlawinen. Die Ladung am Anodendraht hängt damit ausschließlich vom Zählrohrvolumen und der Betriebsspannung ab. Es ist in Folge nur noch eine Intensitätsmessung möglich. Die freigesetzte Ladung ist nun mit geringem elektrischem Aufwand messbar. Außerdem ist der Ladungsimpuls wie in Abbildung 1 sichtbar nicht mehr vom Ionisationsvermögen der Strahlung abhängig.

Entladungsbereich Wird die außen angelegte Spannung jenseits des Auslösebereiches gebracht, entstehen selbstständige Gasentladungen. Jetzt führt die einzelne Absorption eines ionisierenden Teilchens zu einer Dauerentladung, welche schnell das Zählrohr zerstören kann, aufgrund der hohen auftretenden Stromdichten.

2.2 Totzeit und Nachentladung

Bei der Entladung werden die Elektronen schnell zum Draht transportiert im Vergleich zu den entstandenen positiven Ionen. Dadurch wird eine positive Raumladung gebildet. Es ist dadurch während der Totzeit T keine Stoßionisation mehr möglich. Eintreffende Teilchen werden nicht vom Zählrohr registriert. Es schließt sich die Erholungszeit T_E an, in der eine Ionisation wieder möglich ist, aber die Ladungsimpulse nicht ihre ursprüngliche Höhe erreichen. Dies geschieht, weil die positiven Ionen noch nicht komplett den Kathodenmantel erreicht haben. Die positive Raumladung ist dann noch nicht komplett neutralisiert. Am Zählrohrmantel können jedoch Elektronen aus der Metalloberfläche von den positiven Ionen befreit werden. Diese nun freigesetzten Elektronen können erneut eine Entladung verursachen, sodass beim Durchgang eines einzelnen Teilchens mehrere zeitlich versetzte Ausgangsimpulse gemessen werden. Diese nennt man Nachentladungen. Ihr zeitlicher Abstand T_L entspricht der Laufzeit der Ionen von dem Entstehungsort zur Zählrohrwand. T_L ist größer als T , womit die Nachentladungen den Durchgang von ionisierenden Teilchen vortäuschen. Um Nachentladungen zu vermeiden werden Alkoholdämpfe in das Zählrohrgas hinzugefügt. Dabei werden dann die Alkoholmoleküle nochmal durch die Edalgasionen ionisiert. Wenn die ionisierten Alkoholmoleküle an der Kathode neutralisiert werden, werden Schwingungen der Alkoholmoleküle angeregt, anstatt das Elektronen abgegeben werden. Dadurch werden Nachentladungen fast vollständig verhindert.

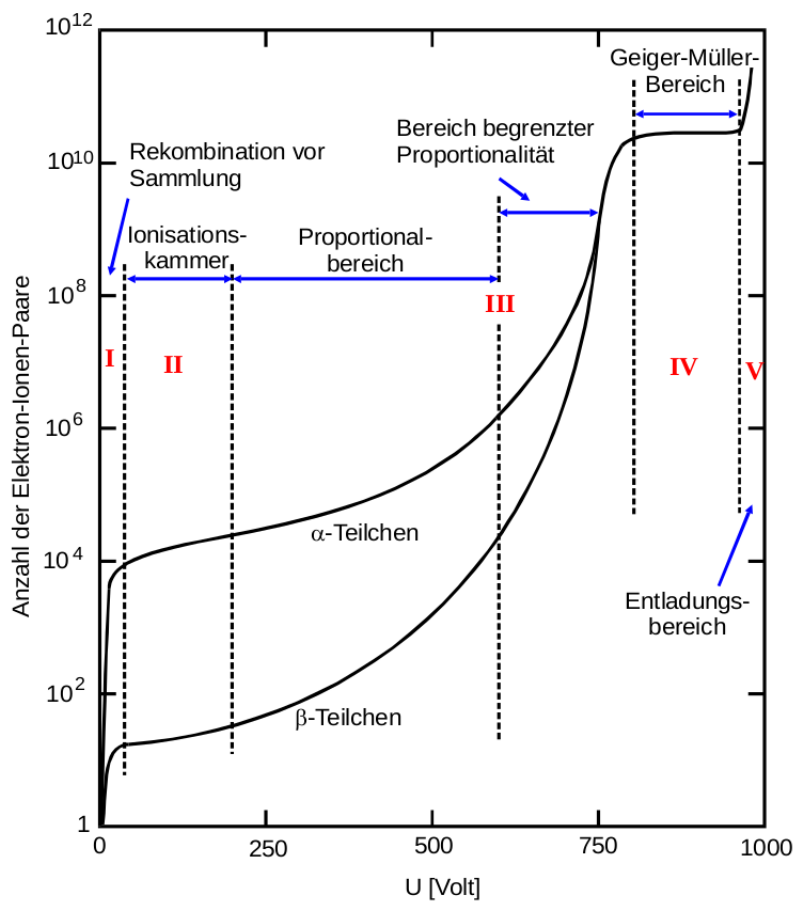


Abbildung 1: Anzahl der erzeugten Elektronen-Ionenpaare in Abhängigkeit zur Spannung U [1].

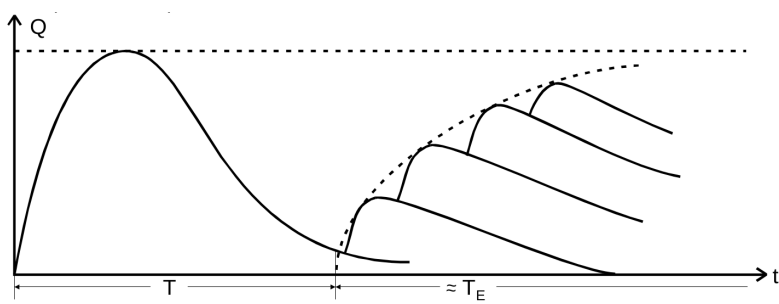


Abbildung 2: Tot- und Erholungszeit [1].

2.3 Charakteristik des Zählrohres

Bei konstanter Strahlungsintensität werden die registrierten Teilchen N in Abhängigkeit zur angelegten Spannung U gemessen, womit man die Charakteristik in Abbildung 5 des Geiger-Müller Zählrohrs erhält. Bei angelegter Spannung U_E fängt der Auslösebereich des Geiger-Müller Zählrohrs an. Der lineare Teil der Kurve ist das Plateau, welches im Idealfall eine Steigung von Null besitzt. Nach dem Plateau kann eine einzelne Entladung zu einer Dauerentladung im Zählrohr führen und dieses zerstören.

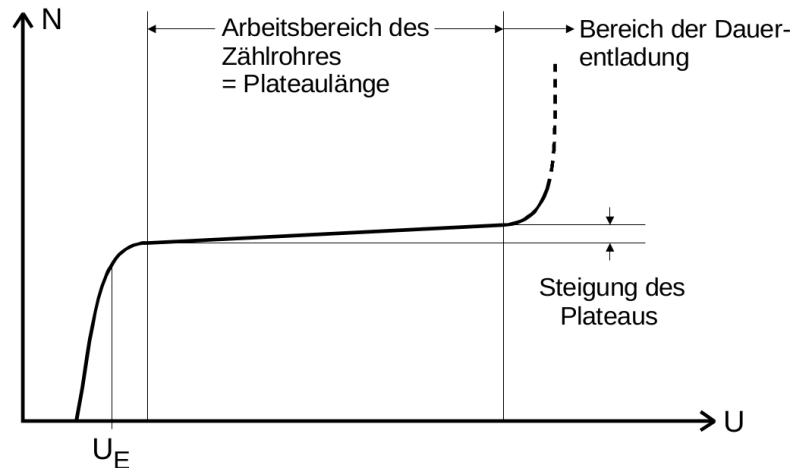


Abbildung 3: Charakteristik eines Geiger-Müller Zählrohrs [1].

2.4 Ansprechvermögen

Man nimmt Endfensterzählrohre, wo die Stirnseite mit einer dünnwandigen Mylar-Folie bedeckt ist, welche aus Materialien mit niedriger Ordnungszahl bestehen und Massenbelegungen von bis zu 1mg/cm^2 erreichen. Dies ermöglicht das Eindringen von α - und β -Teilchen in das Zählrohr. Mit dem Ansprechvermögen wird die Wahrscheinlichkeit beschrieben, womit ein einfallendes Teilchen erkannt wird. Bei α - und β -Teilchen liegt es nahezu bei 100%. Bei Photonen ist das Ansprechvermögen deutlich geringer, sodass nur Messungen von hochintensiven γ -Strahlen sinnvoll ist.

2.5 Zwei-Quellen-Methode zur Bestimmung der Totzeit

Aufgrund der Totzeit T ist die registrierte Impulsrate N_r kleiner als die wahre Anzahl N_w der in das Zählvolumen pro Zeiteinheit absorbierten Teilchen. Es gilt

$$N_w = \frac{N_r t}{(1 - TN_r) t} = \frac{N_r}{1 - TN_r}. \quad (1)$$

Mithilfe von 2 Präparaten kann die Formel (1) experimentell umgesetzt werden, mit den Anzahlen der registrierten Impulse N_1 , N_2 der beiden Präparate, wenn sie einzeln

vor das Zählrohr positioniert werden und N_{1+2} während beide Präparate, in den gleichen Positionen wie einzeln, positioniert werden. Dann gilt für die Totzeit T approximativ

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

2.6 Freigesetzte Ladungsmenge pro Teilchen

Durch ein Strommessgerät lässt sich der mittlere Zählrohrstrom \bar{I} messen. Wenn die Anzahl der Impulse pro Zeiteinheit bekannt sind lässt sich die pro Teilchen freigesetzte Ladung ΔQ berechnen durch

$$\Delta Q = \frac{\bar{I} \Delta t}{Z}. \quad (3)$$

Wobei zu beachten ist, dass hier ΔQ von der außen angelegten Zählrohrspannung U abhängig ist.

3 Versuchsaufbau

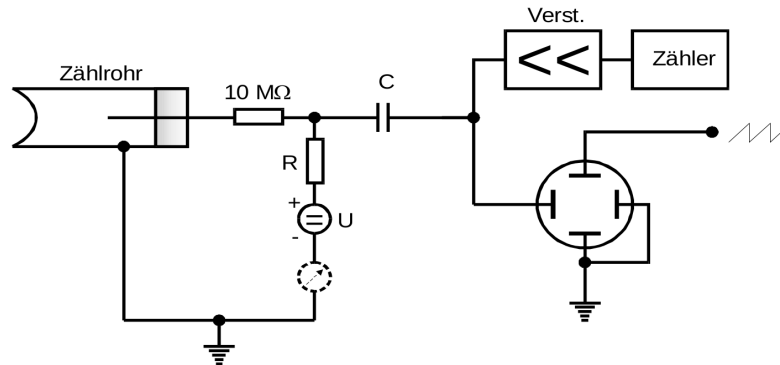


Abbildung 4: Schema der im Versuch 703 verwendeten Messapparatur.

Die Messapparatur besteht aus einem Geiger-Müller Zählrohr, welches an einem Gleichstromkreis angeschlossen ist. Die am Anodendraht aufgenommene Ladung Q fließt über den Widerstand R ab. Es entsteht dann ein Spannungsimpuls, welcher über den Kondensator C ausgekoppelt, im Verstärker vergrößert und im Zähler registriert wird. Weiterhin ist ein Oszillograph an den Kondensator C angeschlossen. Als Strahlungsquelle wird eine ^{204}Tl -Quelle genutzt, wobei sie so platziert wurde, dass bei einer mittleren Zählrohrspannung eine Zählrate von 100Imp/s nicht überschritten wird. Dies wird gemacht, damit die Auswirkungen der Totzeit T und der Erholungszeit T_E gering gehalten werden.

4 Durchführung

Aufnahme der Charakteristik In Schritten von $\Delta U = 10\text{V}$, für die äußere Betriebsspannung, wird die Anzahl der Zerfälle pro Zeitintervall $t = 60\text{s}$ gemessen. Das Zeitintervall wird so gewählt, dass die Zählrate in der Größenordnung von $N = 10000\text{Imp/s}$ liegt, damit auch hier Totzeit T und die Erholungszeit T_E möglichst geringe Auswirkungen haben. Außerdem dient diese Beschränkung besonders bei den höheren Betriebsspannungen dazu Nachentladungen und daraus resultierenden Elektronenlawinen zu minimieren.

Zwei-Quellen Methode Nun wird die ^{204}Tl -Quelle näher als zuvor an das Zählrohr gestellt um eine Totzeitkorrektur zu erhalten. Die Messzeit wird für höhere Genauigkeit auf $t = 120\text{s}$ erhöht. Nun wird die ^{204}Tl -Quelle als Präparat 1 alleine vor das Zählrohr gestellt und es wird N_1 gemessen. Ohne das Präparat 1 zu verstellen wird eine weitere ^{204}Tl -Quelle als Präparat 2 dazu gestellt und die resultierende Anzahl N_{1+2} gemessen. Zum Schluss wird das Präparat 1 entfernt, auch ohne Verstellen des Präparat 2, und die Anzahl N_2 gemessen.

Oszillographische Totzeitbestimmung Hier wird nur eine ^{204}Tl -Quelle verwendet. Die ansteigenden Ladungsimpulse führen nun dazu, dass die Zeitablenkung im Oszillographen

ausgelöst werden. Auf dem Oszillographen kann nun die Totzeit T abgelesen werden, mithilfe der Kenntnis der Ablenkgeschwindigkeit des Kathodenstrahls. Die Erholungszeit T_E lässt sich nicht ablesen.

Zählrohrstrom Während der ersten Messung der Zählraten 4 wird für die Schritte $\Delta U = 50V$ der Zählrohrstrom mit einem Amperemeter abgelesen.

5 Messwerte

Tabelle 1: Messwerte für die Geiger-Müller-Charakteristik mit $\Delta t = 60s$

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

Tabelle 2: Mittlerer Zählerstrom I in Abhängigkeit von der Spannung U

U[V]	I [mu A]		U[V]	I [mu A]
350	0,3		550	1,0
400	0,4		600	1,3
450	0,7		650	1,4
500	0,8		700	1,8

Tabelle 3: Messwerte der Zwei-Quellen-Methode

N	Imp/120s
1	96041
1+2	158479
2	76518

6 Auswertung

6.1 Zählrohr-Charakteristik

Graphik 5 zeigt die Charakteristik des verwendeten Geiger-Müller Zählrohrs, mitsamt der Ausgleichsgeraden $f(x)$, welche das Geiger-Plateau nähert. Die Messwerte sind im regelmäßigen Abstand von 10V angeordnet und geben je die gemessenen Zerfälle N für $t = 60s$ an. Die Messunsicherheiten dieser Werte sind gegeben durch $\Delta N = \sqrt{N}$, da die Zählraten Poisson verteilt sind [S.1, 2]. Das Plateau geht in etwa von 370V bis 630V, hat also eine "Länge" von ca. 260V. Die Regressionsgerade, die das Plateau darstellt, ist gegeben durch

$$f(x) = mx + b. \quad (4)$$

Daraus folgt [3]

$$f(U) = 1,1378 \frac{1}{V} U + 9590,7346. \quad (5)$$

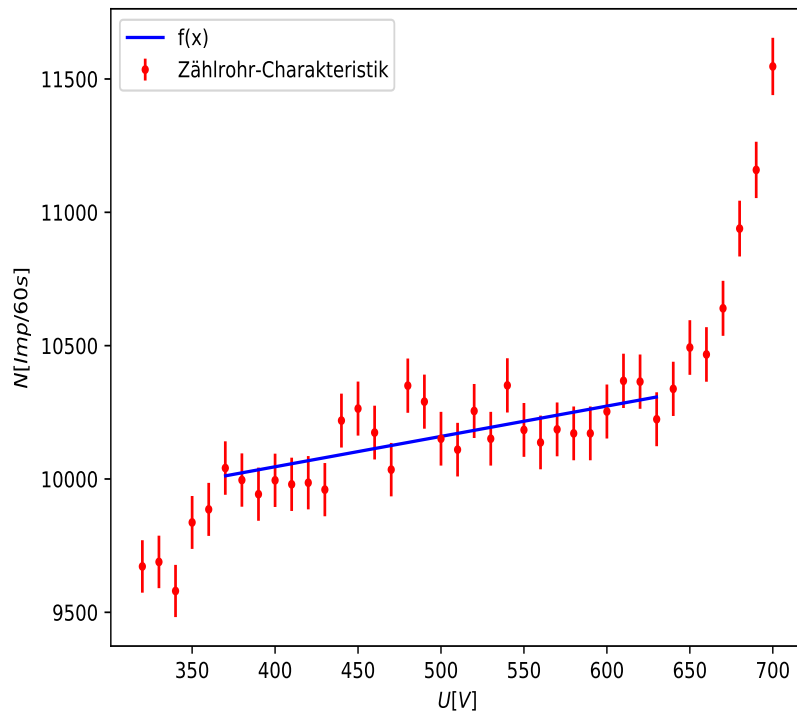


Abbildung 5: Zählrohrcharakteristik mit Messunsicherheiten und Regressionsgerade

Die in % pro 100V angegebene Steigung S des Plateaus ist gegeben durch

$$S = \left(\frac{f(U_2)}{f(U_1)} - 1 \right) \frac{10000}{U_2 - U_1}, \quad (6)$$

hier

$$S = \left(\frac{f(630V)}{f(370V)} - 1 \right) \frac{10000}{630 - 370} = 1,14\%. \quad (7)$$

6.2 Totzeit des Zählrohrs bestimmt durch ein Oszilloskop

Die Totzeit durch ein Oszilloskop zu bestimmen, ist eine relativ ungenau Methode. Bild 6 zeigt den Bildschirm des angeschlossenen Oszilloskops, mit der Zeitachse $100\mu s/DIV$. Die erste Entladung beginnt ganz Links, also beim "nullten Zeitstrich", der Beginn der zweiten Entladung, ist in etwa beim fünften Zeitstrich zu erkennen. Daraus folgt bei bereits erwähnten $100\mu s/DIV$, also $100\mu s$ bei fünf Strichen, etwa $100\mu s$ für die Totzeit T .

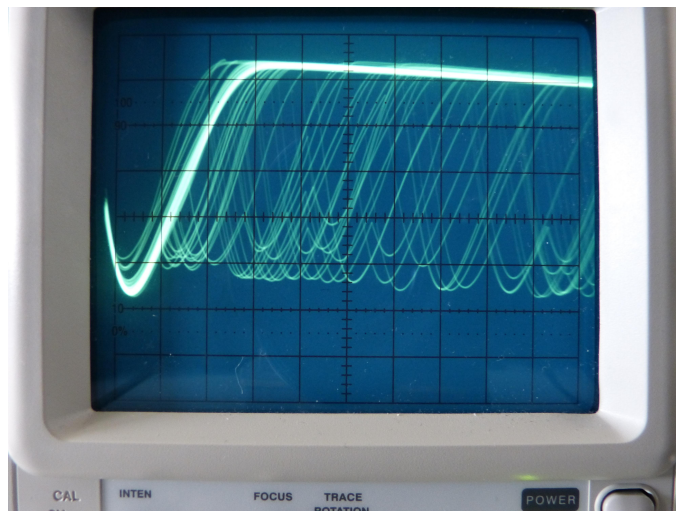


Abbildung 6: Bildschirm des Oszilloskops.

6.3 Totzeit des Zählrohrs bestimmt durch die Zwei-Quellen-Methode

Für die Totzeitbestimmung durch die Zwei-Quellen-Methode werden die Daten aus Tabelle 3 benutzt. Wenn Formel (8)

$$T^2 N_i^2 \ll 1, \quad (8)$$

erfüllt ist (Siehe Tabelle 4), kann Formel (2) benutzt werden, um die Totzeit T zu bestimmen. Die Messunsicherheit wird anhand der Gaußschen Fehlerfortpflanzung [3]

$$\Delta f = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x} \right)^2 \cdot (\Delta x)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial y} \right)^2 \cdot (\Delta y)^2 + \dots + \left(\frac{\partial f}{\partial z} \right)^2 \cdot (\Delta z)^2}, \quad (9)$$

mit $\Delta N = \sqrt{N}$, bestimmt. Deshalb gilt für die Messunsicherheit von T

$$\Delta T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial N_1}\right)^2 \cdot (\Delta N_1)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial N_2}\right)^2 \cdot (\Delta N_2)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial N_{1+2}}\right)^2 \cdot (\Delta N_{1+2})^2} \quad (10)$$

$$\Delta T = \sqrt{\frac{N_{1+2}}{4N_1^2 N_2^2}}. \quad (11)$$

Gleichung (12) zeigt die berechnete Totzeit mit der entsprechenden Unsicherheit und Tabelle 4 zeigt die Kontrolle der Bedingung für Formel (2).

$$T \approx 1,15 \cdot 10^{-4} s \pm 3,56 \cdot 10^{-5} s. \quad (12)$$

Tabelle 4: Kontrolle der Bedingung für Gleichung (2)

i	$T^2 N_i^2$
1	$8,4648 \cdot 10^{-3}$
1+2	$2,3059 \cdot 10^{-2}$
2	$5,3732 \cdot 10^{-3}$

6.4 Freigesetzte Ladungen pro eingefallenem Teilchen

Die pro einfallendem Teilchen im Zählrohr frigesetzten Ladungen Z werden mit Hilfe des gemessenen Zählerstroms I und der Zählrate N bestimmt:

$$Z = \frac{I}{e_0 N}, \quad (13)$$

mit der Elementarladung eines Elektrons $e_0 = 1,602 \cdot 10^{-19} C$ [4]. Die Messunsicherheit von N liegt immernoch bei $\Delta N = \sqrt{N}$, die von I ist gegeben durch $\Delta I = 0,05 \mu A$. Daraus ergibt sich nach Gauß [3]

$$\Delta Z = \sqrt{\left(\frac{1}{e_0 N}\right)^2 (0,05 \mu A)^2 + \left(-\frac{I}{e_0 N^2}\right)^2 N}. \quad (14)$$

Tabelle 5 zeigt die Ergebnisse für Z , ebenso wie Graphik 7.

Tabelle 5

$U[V]$	Z	Fehler
350	$1,14 \cdot 10^{10}$	$\pm 2,10 \cdot 10^9$
400	$1,50 \cdot 10^{10}$	$\pm 2,20 \cdot 10^9$
450	$2,55 \cdot 10^{10}$	$\pm 2,67 \cdot 10^9$
500	$2,95 \cdot 10^{10}$	$\pm 2,92 \cdot 10^9$
550	$3,68 \cdot 10^{10}$	$\pm 3,37 \cdot 10^9$
600	$4,75 \cdot 10^{10}$	$\pm 4,07 \cdot 10^9$
650	$5,00 \cdot 10^{10}$	$\pm 4,18 \cdot 10^9$
700	$5,84 \cdot 10^{10}$	$\pm 4,51 \cdot 10^9$

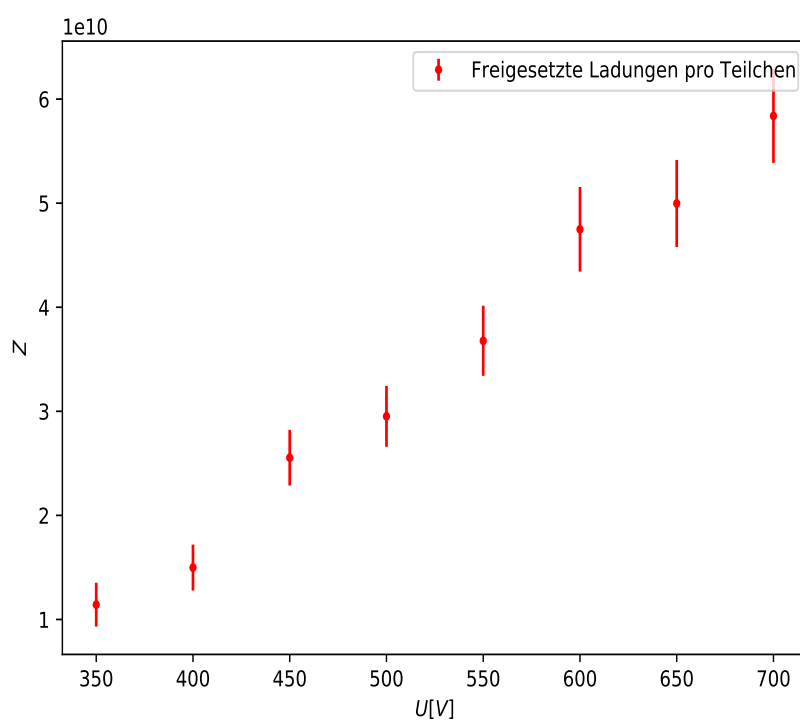


Abbildung 7: Freigesetzte Ladungen pro Teilchen

7 Diskussion

Das untersuchte Zählrohr hat mit einer Plateau-Länge von 260V, bei einer maximalen Spannung von 700V, einen relativ großen Geiger-Müller-Bereich von etwa 37% des gesamten Arbeitsbereiches. Ebenso ist die Plateau steigung mit 1,14% relativ gering, wenn auch nicht ideal, was allerdings zu erwarten war. Die Totzeit beträgt laut Zwei-Quellen-Methode $T \approx 115\mu s \pm 35.6\mu s$ und laut Oszillographischer Messung $T \approx 100\mu s$. Der Unterschied der beiden Messungen beträgt etwa $15\mu s$, was komplett innerhalb der Messunsicherheit der Zwei-Quellen Methode ist. Daher kann angenommen werden, dass die Messungen der Totzeit in etwa stimmen, auch wenn aufgrund der Ungenauigkeit der oszillographischen Methode lieber die Zwei-Quellen-Methode genutzt werden wollte. Die freigesetzten Ladungen pro einfallendem Teilchen reicht von $1,14 \cdot 10^{10}$ bei 350V bis $5,84 \cdot 10^{10}$ bei 700V. Die Messungenauigkeit liegt dabei zwischen $2,10 \cdot 10^9$ und $4,51 \cdot 10^9$, also etwa eine Größenordnung kleiner als das eigentliche Ergebnis. Mit Sicht auf Graphik 7, sieht es so aus, als wenn die pro Teilchen freigesetzten Ladungen, linear mit der Spannung ansteigen, was bedeutet, dass der gemessene Bereich von 350V bis 700V genähert der Plateau-Bereich ist, was ganz grob auch mit der bestimmten Zählrohrcharakteristik übereinstimmt. Allgemein erscheinen die bestimmten Werte als gut.

Literatur

- [1] *Anleitung zu Versuch Nr. 703: Das Geiger-Müller-Zählrohr*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2021.
- [2] *Daten Hinweise Geiger Mueller*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2021.
- [3] *Formelsammlung zur Berechnung von Messunsicherheiten*. Fakultät Physik, TU Dortmund. 2021.
- [4] Wikipedia. *Elementarladung*. 2021. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Elementarladung> (besucht am 25.01.2021).