

V 703

Das Geiger-Müller-Zählrohr

Timo Gräßer
timo.graesser@udo.edu

Jasper Karl Lammering
jasper.lammering@udo.edu

Durchführung: 24.5.16

Abgabe: 31.5.16

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1. Theorie	3
1.1. Fehlerrechnung	3
1.2. Einleitung und Zielsetzung	3
1.3. Aufbau und Wirkungsweise	3
1.4. Totzeit und Nachentladungen	6
1.5. Charakteristik des Zählrohrs	6
1.6. Zwei-Quellen-Methode	7
1.7. Zählrohr-Ladungsmenge pro Teilchen	8
2. Durchführung	8
2.1. Aufbau	8
2.2. Messprogramm	8
2.2.1. Zählrohrcharakteristik und Ladung pro Teilchenimpuls	8
2.2.2. Nachentladung	9
2.2.3. Messung der Totzeit	9
3. Auswertung	9
3.1. Aufnahme der Charakteristik des Zählrohrs	9
3.2. Untersuchung der Nachentladungsimpulse	10
3.3. Bestimmung der Totzeit	11
3.3.1. Oszillographische Messung	11
3.3.2. Zwei-Quellen-Methode	11
3.4. Freigesetzte Ladungsmenge	12
4. Diskussion	13
Literatur	14
A. Kopie der Originaldaten	14

1. Theorie

1.1. Fehlerrechnung

Für die Fehlerfortpflanzung bei Gleichungen mit N fehlerbehafteten Größen wird jeweils die Formel zur Gaußschen Fehlerfortpflanzung

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f(x_i)}{\partial x_i} \sigma_i \right)^2} \quad (1)$$

mit der jeweiligen Funktion $f(x_i)$, den Messgrößen x_i und den zugehörigen Fehlern σ_i verwendet. Zur Berechnung des arithmetischen Mittels von N Messwerten wird jeweils die Formel

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (2)$$

mit den Messwerten x_i benutzt. Die Standardabweichung des Mittelwerts wird jeweils mit der Gleichung

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \quad (3)$$

mit den N Messwerten x_i berechnet.

1.2. Einleitung und Zielsetzung

In der Kernphysik wird das Geiger-Müller-Zählrohr zur Messung radioaktiver Strahlung benutzt. Das Messinstrument ist in der Lage, elektrische Impulse bei Strahlungseinfall zu erzeugen, die dann mit Hilfe eines Impulszählers gemessen werden können. Im folgenden Versuch sollen die wichtigsten Kenndaten eines Geiger-Müller-Zählrohrs bestimmt werden.

1.3. Aufbau und Wirkungsweise

In Abbildung 1 ist eine Skizze für das Zählrohr abgebildet. In dem Kathoden-Zylinder aus Stahl mit dem Radius r_k befindet sich zentral ein Anoden-Draht mit dem Radius r_a und ein Gasgemisch, vorzugsweise Argon und Ethylalkohol. Um das Ansprechvermögen für eintreffende, radioaktive Strahlung zu vergrößern, ist das Eintrittsfenster aus Mylar, einer sehr dünnen Folie. Diese ist aufgrund des Unterdrucks nach innen gewölbt. Wird eine äußere Spannung zwischen Kathode und Anode angelegt, so entsteht im Zylinder ein radialsymmetrisches, elektrisches Feld mit der Feldstärke

$$E(r) = \frac{U}{r \ln(r_k/r_a)}. \quad (4)$$

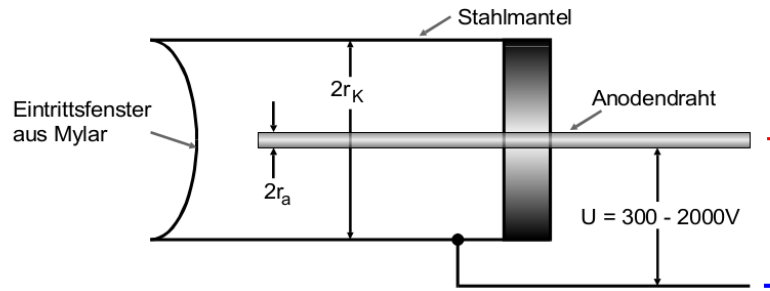


Abbildung 1: Skizze eines Endfensterzählrohrs.[1]

Energiereiche Teilchen, die durch das Eintrittsfenster in den Zylinder gelangen, bewegen sich durch das Gasgemisch und ionisieren die Argon-Atome, bis ihre Energie aufgebraucht ist. Die entstehenden Elektronen bewegen sich zum Anodendraht und können dort detektiert werden. Die Menge an detektierten Ladungen hängt von der Spannung ab. In Abbildung 2 ist diese Abhängigkeit skizziert. Im ersten Bereich, bei sehr geringer Spannung, rekombinieren die Ionenpaare unmittelbar nach ihrer Entstehung, da sie nicht genügend beschleunigt werden. Die Rekombinationswahrscheinlichkeit sinkt mit steigender Spannung schnell ab, sodass im zweiten Spannungs-Bereich bereits alle erzeugten Elektronen zum Anodendraht gelangen. In diesem Bereich sind die detektierten Ladungen proportional zur einfallenden Strahlung, sodass α - und β -Strahlung aufgrund ihrer verschiedenen Energien unterschieden werden können. Die sogenannte Ionisationskammer, die unter derartigen Spannungen arbeitet, wird allerdings nur bei hohen Strahlungsintensitäten benutzt. Im nächsten Spannungsbereich werden die entstehenden Elektronen so beschleunigt, dass sie ein anderes Atom ionisieren. Dieses Phänomen wird als Stoßionisation bezeichnet. Durch lawinenartige Zunahme der freien Elektronen kann die an der Anode gesammelte Ladung bereits als Ladungsimpuls gemessen werden. Da die Ladung Q proportional zur Energie des eintreffenden Teilchens ist, können in diesem Spannungsbereich sowohl Aussagen über Strahlungsintensität, als auch Strahlungsenergie gemacht werden. Ein Detektor, der mit dieser Spannung arbeitet, wird daher auch als Proportionalzählrohr bezeichnet. Der vierte Spannungsbereich ist der Auslöse- oder auch Geiger-Müller-Bereich. Bei der Anregung der Argonatome durch die Elektronenlawine entstehen bei dieser Spannung UV-Photonen, welche sich im Gegensatz zu den Elektronen in alle Richtungen ausbreiten können, da sie ladungsneutral sind. Die Elektronenlawinen werden so im ganzen Zählrohr ausgelöst und hängen nur noch von Spannung und Volumen und nicht mehr von der Strahlungsenergie ab. Bei dieser Spannung kann also nur die Strahlungsintensität gemessen werden, jedoch mit sehr geringem elektronischem Aufwand, da die detektierten Ladungen sehr groß sind.

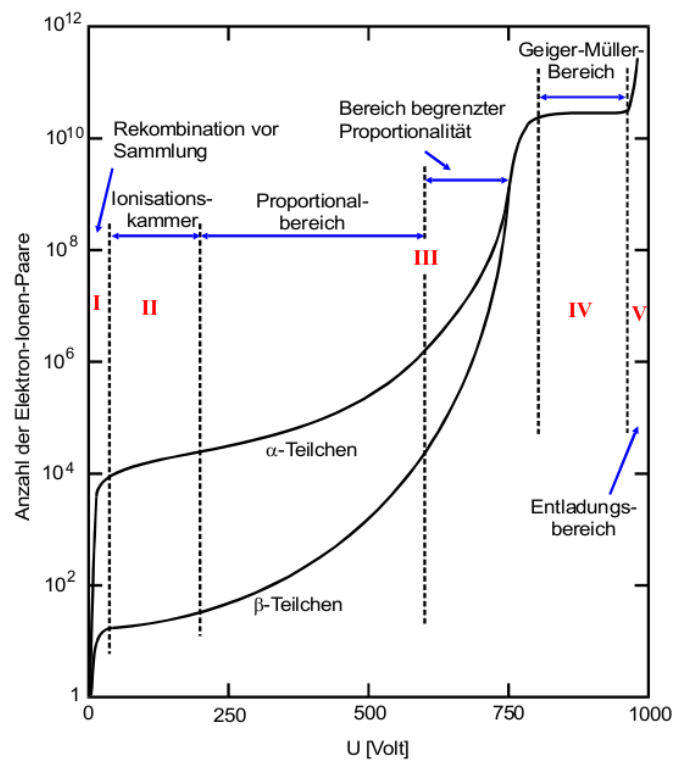


Abbildung 2: Abhängigkeit zwischen den detektierten Ladungen und der Betriebsspannung.[1]

1.4. Totzeit und Nachentladungen

Als Totzeit T bezeichnet man die Zeitspanne, in der kaum Stoßionisationen im Zählrohr stattfinden, da dort eine positive, radialsymmetrische Raumladung aufgebaut wurde. Diese entsteht, da sich die positiven Ionen, die aus der Ionisation entstehen, nur, verglichen den Elektronen, langsam zur Kathode bewegen und das elektrische Feld daher abschwächen. Mit der Zeit bewegt sich die positive Ladungswolke zur Kathode und es können wieder Teilchen detektiert werden. Die ursprüngliche Ladung Q wird allerdings erst wieder gemessen, wenn alle Kationen wieder neutralisiert wurden. Als Erholungszeit T_E wird die Zeitspanne vom Ende der Totzeit bis zur vollständigen Neutralisierung bezeichnet. In Abbildung 3 ist die Tot- und Erholungszeitkurve skizziert.

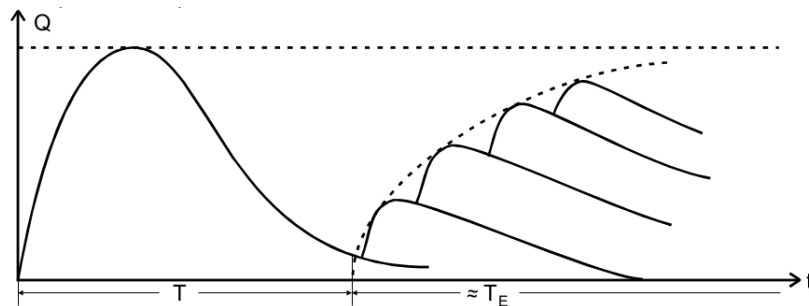


Abbildung 3: Skizze der Totzeit- und Erholungszeitkurve.[1]

Die zur Kathode wandernden Ionen können aus dem Zählrohrmantel Elektronen lösen, die dann durch das E-Feld zur Anode beschleunigt werden. Diese sogenannten Sekundärelektronen können wiederum eine Lawine auslösen, sodass weitere elektrische Impulse detektiert werden, obwohl kein neues hochenergetisches Teilchen in das Zählrohr gelangt ist. Dieses unerwünschte Phänomen wird als Nachentladung bezeichnet. Um dies zu verhindern, wird Ethylalkohol als Zusatz zum Gasgemisch hinzugefügt. Die Edelgasionen, die sich zur Kathode bewegen, stoßen mit den Alkoholmolekülen zusammen und ionisieren diese. Die Alkoholionen bewegen sich erneut nach außen, aufgrund ihrer negativen Ladung, lösen aber keine Elektronen aus dem Mantel, da die freiwerdende Energie zu niedrig ist. Dadurch entstehen keine Nachentladung und es werden nur einfliegende Teilchen vom Zählrohr detektiert.

1.5. Charakteristik des Zählrohrs

In Abbildung 4 ist die sogenannte Charakteristik des Geiger-Müller-Zählrohrs, also die registrierte Teilchenzahl N gegen die Spannung U bei konstanter Strahlungsintensität, skizziert.

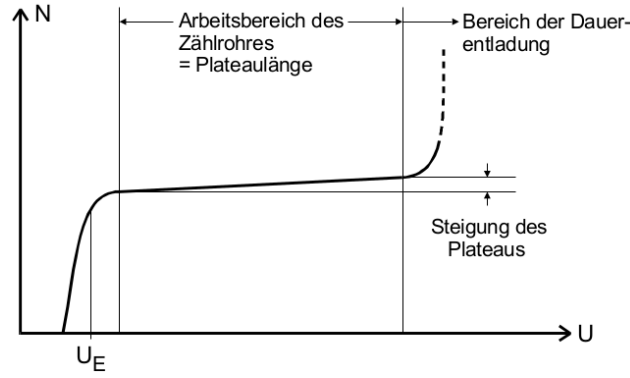


Abbildung 4: Verlauf der Charakteristik eines Zählrohrs.[1]

Der lineare Teil der Kurve, der etwa bei der Auslösespannung U_E beginnt, wird als Plateau bezeichnet. Beim idealen Zählrohr ist die Steigung dieser Geraden Null. Da aber mit steigender Spannung immer einige wenige Nachentladungen detektiert werden, hat die Gerade beim realen Zählrohr eine Steigung $m > 0$. In dem Bereich der Dauerentladung hinter der Gerade steigt die Zahl der Nachentladungen drastisch und somit auch die detektierten Impulse. Bei dieser Spannung entlädt sich das Gas selbstständig.

1.6. Zwei-Quellen-Methode

Mit Hilfe der Zwei-Quellen-Methode kann die Totzeit eines Zählrohrs bestimmt werden. Für die "wahre" Impulsrate, also die Menge an eintreffenden Teilchen pro Zeit, gilt

$$N_w = \frac{\text{Impulsrate}}{\text{Messzeit}} = \frac{N_r}{1 - TN_r} \quad (5)$$

mit der Totzeit T und der gemessenen Impulsrate N_r . Mit zwei radioaktiven Materialien werden die Zählraten N_1, N_{1+2} und N_2 bei jeweils gleichen Bedingungen gemessen. Für die wahren Impulsraten gilt

$$N_{w,1+2} = N_{w,1} + N_{w,2}, \quad (6)$$

da aber mit Totzeit gemessen wird ist

$$N_{1+2} < N_1 + N_2. \quad (7)$$

Aus Gleichung (5) folgen die Beziehungen zwischen $N_{w,1}$ und N_1 , $N_{w,2}$ und N_2 und $N_{w,1+2}$ und N_{1+2} und mit (6) ergibt sich

$$\frac{N_{1+2}}{1 - TN_{1+2}} = \frac{N_1}{1 - TN_1} + \frac{N_2}{1 - TN_2} \quad (8)$$

Aus (8) folgt die Totzeit T in Abhängigkeit von den Messwerten

$$T = \frac{1}{N_{1+2}} - \sqrt{\frac{1}{N_{1+2}^2} - \frac{N_1 + N_2 - N_{1+2}}{N_1 N_2 N_{1+2}}}. \quad (9)$$

1.7. Zählrohr-Ladungsmenge pro Teilchen

Für den mittleren Zählrohrstrom gilt

$$\bar{I} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} \frac{U(t)}{R} dt \quad \tau \gg T. \quad (10)$$

Daraus ergibt sich für die pro Zeiteinheit Δt transportierte Ladung

$$\Delta Q = \bar{I} \frac{\Delta t}{Z} \quad (11)$$

mit der registrierten Teilchzahl Z .

2. Durchführung

2.1. Aufbau

In Abbildung 5 ist der Versuchsaufbau skizziert. Durch Strahlungseinfall wird im Zählrohr die Ladung Q am Draht gesammelt. Am Widerstand R wird daraus ein Spannungsimpuls erzeugt, der dann am Kondensator C ausgekoppelt wird. Das erzeugte Signal kann über einen Verstärker mit dem Zähler oder auch am Oszillographen detektiert werden.

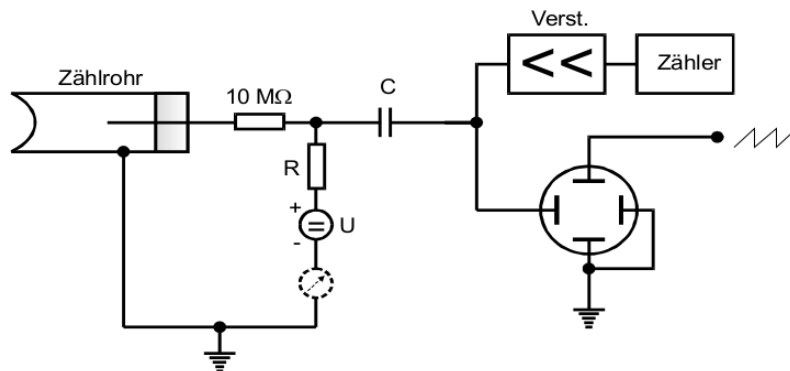


Abbildung 5: Skizze des Versuchsaufbaus.[1]

Für den gesamten Versuch wird der β -Strahler $^{204}_{81}\text{Tl}$ verwendet.

2.2. Messprogramm

Bei den Teilversuchen sollte die Betriebsspannung des Zählrohrs 720 V nicht überschreiten, da sonst Schäden entstehen könnten.

2.2.1. Zählrohrcharakteristik und Ladung pro Teilchenimpuls

1. Zunächst wird am Zähler eine Impulsrate von 10 s^{-1} eingestellt und der gegebene β -Strahler vor das Zählrohr eingespannt.

2. Es werden für insgesamt 26 verschiedene Spannungen Stromstärke und Impulse notiert, um Zählrohrcharakteristik und Ladung zu bestimmen.

2.2.2. Nachentladung

1. Bei 350 V und 700 V wird jeweils der Abstand zwischen Primär- und Nachentladungsimpuls gemessen.

2.2.3. Messung der Totzeit

1. Es wird eine Betriebsspannung von $U = 600 \text{ V}$ und eine Impulsrate von 60 s^{-1} am Zähler eingestellt.
2. Zunächst werden Totzeit und Erholungszeit des Zählrohrs am Oszilloskop gemessen und notiert.
3. Mit der Zwei-Quellen-Methode wird die Totzeit des Zählrohrs ein weiteres mal bestimmt.

3. Auswertung

3.1. Aufnahme der Charakteristik des Zählrohrs

In Tabelle 1 sind die Messwerte zu sehen. Der Fehler wird mit Formel (12) bestimmt. Die Meßzeit beträgt bei dieser Messung 10 s.

$$\Delta N = \frac{\sqrt{\text{Zählungen}}}{\text{Meßzeit}} \quad (12)$$

Die Zählungen sind hierbei die aufgenommenen Impulse in der jeweiligen Meßzeit.

In Abbildung 6 ist die aufgenommene Charakteristik des Zählrohrs abgebildet. Die ersten beiden Messwerte aus Tabelle 1 sind nicht eingetragen, da sie den Rest des Graphen schwieriger erkennen lassen würden. Zur Ausgleichsrechnung wurden die ersten und letzten drei Werte des Graphens nicht hinzugezogen, da sie nicht auf dem Plateau liegen. Die Ausgleichsrechnung ergibt eine Plateausteigung m von:

$$m = (0.10 \pm 0.02) \text{ V}^{-1}.$$

Mit m und folgender Formel ergibt sich die Steigung in %:

$$m_{\text{in}\%} = \frac{m \cdot 100 \text{ V}}{N_{\text{bei } 500 \text{ V}}} = (2.0 \pm 0.3) \text{ \%}.$$

U / V	N / s^{-1}
300	0 \pm 0
320	0 \pm 0
330	456.8 \pm 6.8
340	458.1 \pm 6.8
350	465.9 \pm 6.8
360	480.4 \pm 6.9
380	475.1 \pm 6.9
400	472.1 \pm 6.9
420	477.5 \pm 6.9
440	493.6 \pm 7.0
460	482.9 \pm 6.9
480	481.7 \pm 6.9
500	481.6 \pm 6.9
520	490.7 \pm 7.0
540	480.2 \pm 6.9
560	486.2 \pm 7.0
580	491.0 \pm 7.0
600	496.5 \pm 7.0
620	499.3 \pm 7.1
640	505.3 \pm 7.1
650	492.4 \pm 7.0
660	508.7 \pm 7.1
670	512.6 \pm 7.2
680	521.9 \pm 7.2
700	520.8 \pm 7.2
720	567.0 \pm 7.5

Tabelle 1: Messwerte zur Charakteristik des Zählrohrs.

3.2. Untersuchung der Nachentladungsimpulse

Der zeitliche Abstand zwischen Primär- und Nachentladungsimpulsen T_L kann am Oszilloskop abgelesen werden. Die Ablenkgeschwindigkeit wird

$$\Delta t = 50 \mu\text{sDIV}^{-1}$$

gewählt. Gemessen werden

$$T_L = (5 \pm 2) \text{DIV} = (250 \pm 100) \mu\text{s}.$$

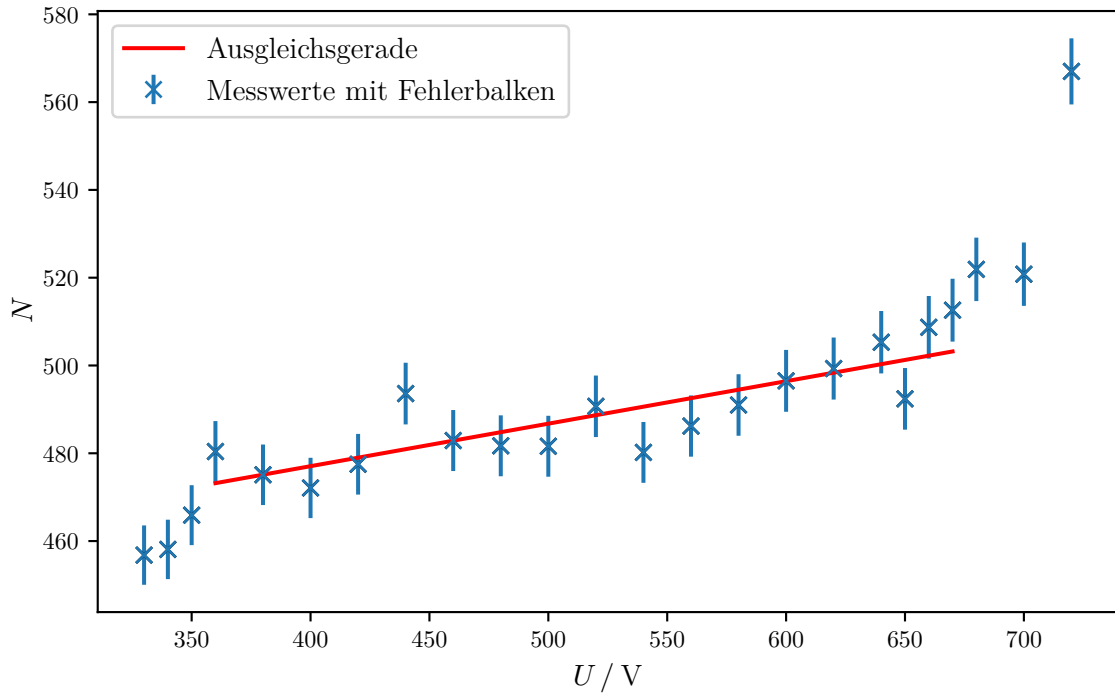


Abbildung 6: Die aufgenommene Rohrcharakteristik.

3.3. Bestimmung der Totzeit

3.3.1. Oszillographische Messung

Gemessen wird die Breite des Primärimpulses. Die Ablenkgeschwindigkeit bleibt diejenige aus Kapitel 3.2. So ergibt sich eine Totzeit von:

$$T = (2.2 \pm 0.1) \text{ DIV} = (110 \pm 5) \mu\text{s}.$$

Außerdem beträgt die Erholungszeit T_E :

$$T_E = (10 \pm 2) \text{ DIV} = (500 \pm 100) \mu\text{s}.$$

3.3.2. Zwei-Quellen-Methode

Um eine möglichst genaue Messung zu gewährleisten, werden die Impulse 60 s lang aufgenommen. Die Messwerte lauten:

$$N_1 = 401 \pm 3 \qquad N_2 = 361 \pm 3 \qquad N_{1+2} = 742 \pm 4.$$

Die Fehler wurden erneut mit Formel (12) bestimmt. Mit Formel (9) kann dann die Totzeit bestimmt werden. Das Ergebnis ist dann:

$$T = (74 \pm 18) \mu\text{s}.$$

3.4. Freigesetzte Ladungsmenge

Mit Formel (11) berechnet sich die pro einfallendem Teilchen freigesetzte Ladungsmenge. In Tabelle 2 sind die Messdaten und Ergebnisse zu sehen.

Die genutzte Naturkonstante e beträgt [2]:

$$e = (1.602\,176\,620\,8 \pm 0.000\,000\,009\,8) \cdot 10^{-19} \text{ C}. \quad (13)$$

U / V	N / s^{-1}	$I / \mu\text{A}$	$\Delta Q / 10^9 e$
300	0 ± 0	0.00	0 ± 0
320	0 ± 0	0.00	0 ± 0
330	456.8 ± 6.8	0.20	2.7 ± 0.7
340	458.1 ± 6.8	0.40	5.4 ± 0.7
350	465.9 ± 6.8	0.40	5.4 ± 0.7
360	480.4 ± 6.9	0.40	5.2 ± 0.7
380	475.1 ± 6.9	0.60	7.9 ± 0.7
400	472.1 ± 6.9	0.70	9.3 ± 0.7
420	477.5 ± 6.9	0.80	10.5 ± 0.7
440	493.6 ± 7.0	0.95	12.0 ± 0.7
460	482.9 ± 6.9	1.00	13.0 ± 0.7
480	481.7 ± 6.9	1.10	14.3 ± 0.7
500	481.6 ± 6.9	1.30	16.8 ± 0.7
520	490.7 ± 7.0	1.40	17.8 ± 0.7
540	480.2 ± 6.9	1.50	19.5 ± 0.7
560	486.2 ± 7.0	1.60	20.5 ± 0.7
580	491.0 ± 7.0	1.80	22.9 ± 0.7
600	496.5 ± 7.0	1.90	23.9 ± 0.7
620	499.3 ± 7.1	2.05	25.6 ± 0.7
640	505.3 ± 7.1	2.20	27.1 ± 0.7
650	492.4 ± 7.0	2.20	27.9 ± 0.7
660	508.7 ± 7.1	2.40	29.4 ± 0.7
670	512.6 ± 7.2	2.30	28.0 ± 0.7
680	521.9 ± 7.2	2.50	30.0 ± 0.7
700	520.8 ± 7.2	2.60	31.2 ± 0.7
720	567.0 ± 7.5	2.80	30.8 ± 0.7

Tabelle 2: Messwerte zur Bestimmung der freigesetzten Ladungsmenge mit $\Delta I = 0.05 \mu\text{A}$.

In Abbildung 7 ist die Ladungsmenge gegen die Spannung aus Tabelle 2 aufgetragen.

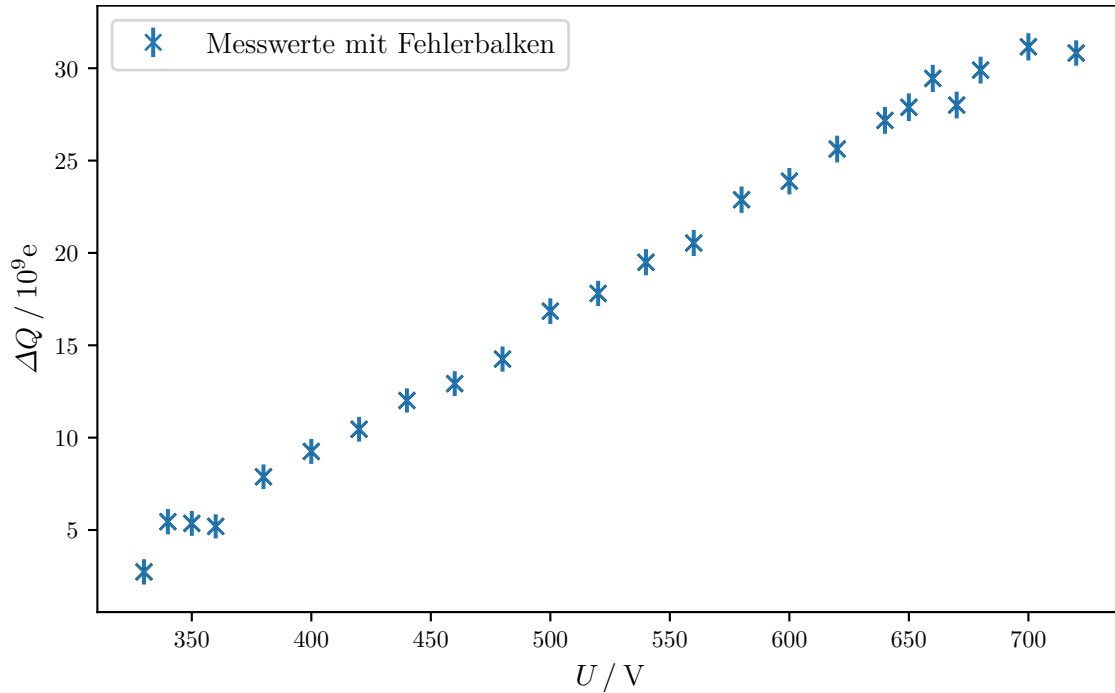


Abbildung 7: Die Ladungsmenge in Abhängigkeit von der Spannung.

4. Diskussion

Die Charakteristik ist in Abbildung 6 gut zu erkennen. Auch der Übergang zu den Phasen links und rechts vom Plateau lässt sich erahnen. Die Ausgleichsgerade läuft weitestgehend durch die Fehlerbalken der Messwerte, approximiert das Plateau also gut.

Die Untersuchung des zeitlichen Abstands zwischen Primär- und Nachentladungsimpulsen kann nur sehr ungenau erfolgen, da viele Nachentladungen in sehr vielen verschiedenen Zeitabständen auf dem Oszilloskop auftreten. Deshalb ist der Wert auch mit einem hohen Fehler versehen.

Die Totzeit konnte in beiden Verfahren auf einen ähnlichen Wert bestimmt werden. Der Fehler des Werts bei der Zwei-Quellen-Methode legt die Vermutung nahe, dass dieses Verfahren ungenauer ist.

Die Bestimmung der freigesetzten Ladungsmenge zeigt bei höherer Spannung eine höhere pro einfallendem Teilchen freigesetzte Ladungsmenge. Dies lässt sich mit der höheren Beschleunigung der ionisierten Teilchen und den vermehrt auftretenden Nachentladungen erklären. In Abbildung 7 ist ein linearer Zusammenhang zwischen Spannung und Ladungsmenge zu erkennen.

Literatur

- [1] TU Dortmund. *Das Geiger-Müller-Zählrohr*. 2016. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V703.pdf>.
- [2] NIST. *Fundamental Physical Constants*. 2016. URL: http://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?e%7Csearch_for=elecmag_in!.

A. Kopie der Originaldaten