

V703: Das Geiger-Müller-Zählrohr

Simon Schulte
simon.schulte@udo.edu

Tim Sedlaczek
tim.sedlaczek@udo.edu

Durchführung: 18.04.2017

Abgabe: 25.04.2017

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	1
2 Theorie	1
3 Durchführung	4
3.1 Versuchsaufbau	4
3.2 Versuchsablauf	4
4 Auswertung	5
4.1 Zählrohrcharakteristik und pro Teilchen im Zählrohr freigesetzte Ladung .	5
4.2 Zeitlicher Abstand zwischen Primär- und Nachentladungsimpuls	9
4.3 Messung der Totzeit mit Hilfe eines Oszilloskops und mit Hilfe der Zwei- Quellen-Methode	9
5 Diskussion	11
Literatur	11

1 Zielsetzung

In diesem Versuch wird mit Hilfe eines Geiger-Müller-Zählrohrs die Intensität ionisierender Strahlung gemessen.

2 Theorie

Das Geiger-Müller-Zählrohr dient dazu, die Intensität ionisierender Strahlung zu messen. Wenn nämlich ionisierende Strahlung in das Geiger-Müller-Zählrohr eintritt, gibt das Zählrohr einen elektronischen Impuls ab, welcher leicht von einem Impulsmesser wahrgenommen werden kann. In Abbildung 1 zu sehen ist der schematische Aufbau eines solchen Zählrohrs. Ein Zählrohr besteht aus einem Stahlmantel, in dessen Mitte sich axial ein positiv geladener Anodendraht befindet. Der Anodendraht leitet wiederum die Betriebsspannung U . Diese ist nötig, um eine Potentialdifferenz zwischen dem Mantel und dem Draht zu gewährleisten. Außerdem ist eine Mylar-Folie am linken Ende des Zählrohrs befestigt, welche als Eintrittsfenster dient. Diese gewährleistet, dass sogar α -Strahlung in das Rohr durchdringt, welche eigentlich schon von einem Stück Papier aufgehalten wird. In diesem Versuch wird allerdings nur β -Strahlung (in Form von Elektronen) betrachtet. Im Inneren des Zählrohrs ist ein Gasgemisch, welches hauptsächlich aus Argon besteht. Das Gasgemisch hat den Zweck, dass, wenn ein geladenes Teilchen durch das Eintrittsfenster dringt, sich dessen Energie durch Ionisation aufbraucht.

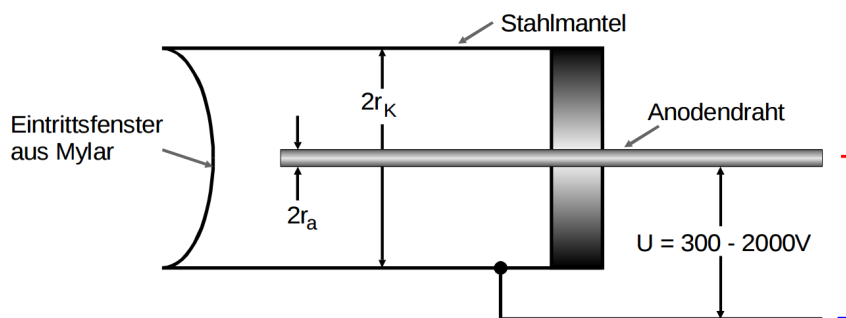


Abbildung 1: Der Querschnitt eines Endfenster-Zählrohrs [TUD17].

In Abbildung 2 zu sehen ist nun die Abhängigkeit der Anzahl der erzeugten Ionenpaare von der Spannung U bei einem Proportionalitätszählrohr. So werden bei kleinen Betriebsspannungen nur wenige Elektronen den Draht erreichen, da die meisten vorher rekombiniert werden. In der zweiten Zone, der Ionisationskammer, können aufgrund der immer größer werdenden Spannung kaum noch Elektronen rekombinieren, bevor sie den Anodendraht erreichen können. Damit kommen fast alle Elektronen am Draht an. Diese erzeugen dann einen Ionisationsstrom, der proportional zur Energie der ionisierenden Strahlung ist. In der dritten Zone, dem (begrenzten) Proportionalbereich entsteht Stoßionisation. Das heißt, dass die bei der Ionisation freigesetzten Elektronen vor dem Zusammenstoß mit einem weiteren Atom aus dem Gasgemisch hinreichend viel Energie

aufnehmen, um selbst ionisieren zu können. Da diese Elektronen selbst immer wieder ionisieren können, nimmt die Anzahl lawinenartig zu, auch Townsend-Lawine genannt. In der vierten Zone beginnt dann der Arbeitsbereich des Geiger-Müller-Zählrohrs, genannt Auslösebereich. Die Elektronenlawinen breiten sich nun nicht mehr nur, wie in Zone 3, in Feldrichtung aus, sondern sind auch in der Lage den gesamten Draht zu erreichen. Das liegt daran, dass bei der Ionisation nun auch neutral geladene UV-Strahlung entsteht, welche ebenfalls Gas ionisieren kann und nicht an die elektrischen Feldlinien gebunden ist. Dadurch entstehen elektrische Impulse, die dann groß genug sind, um sie mit einem Impulszähler zu detektieren.

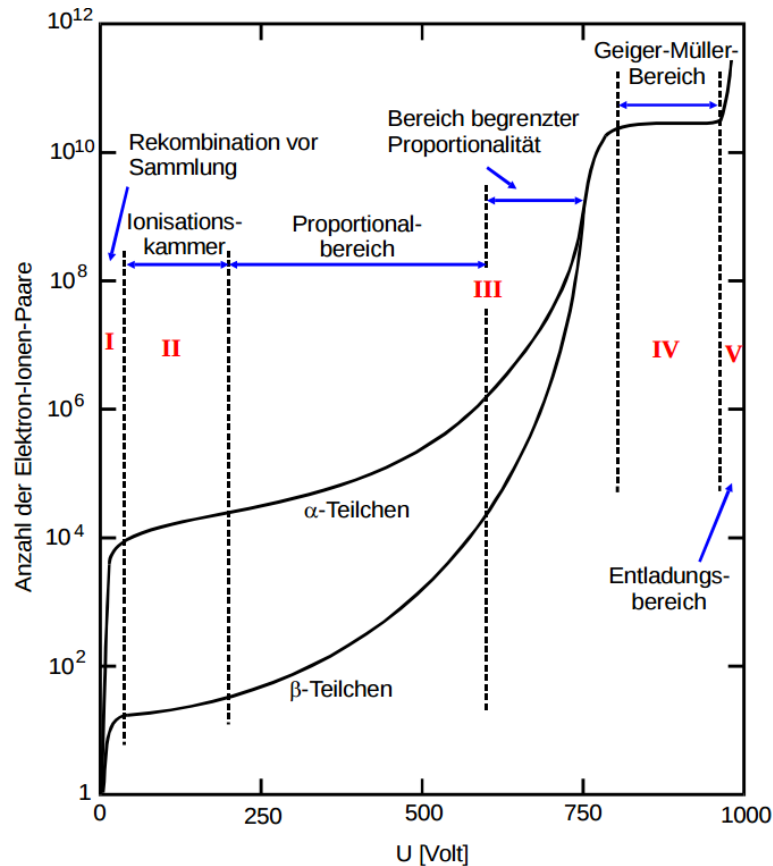


Abbildung 2: Die Anzahl der erzeugten Elektron-Ionenpaare als Funktion der Spannung U bei einem Proportionalzählrohr [TUD17].

In Abbildung 3 zu sehen ist nun die Tot- und Erholzeit des Zählrohrs, wobei die Ladung als Funktion der Zeit dargestellt wird. Da die positiven Ionen ein vielfaches der Masse der Elektronen besitzen verschwinden diese auch langsamer. So bildet sich, in dem Zählrohr, zunächst ein Ionenschlauch, welcher für ein Gegenfeld zum angelegten E-Feld sorgt. Dies führt dazu, dass das Zählrohr in der Totzeit keine weitere β -Strahlung detektiert. Nach der Totzeit stellt sich die Erholungszeit ein, in welcher wiederum die abgegebenen elektrischen Impulse des Rohrs kleiner ausfallen.

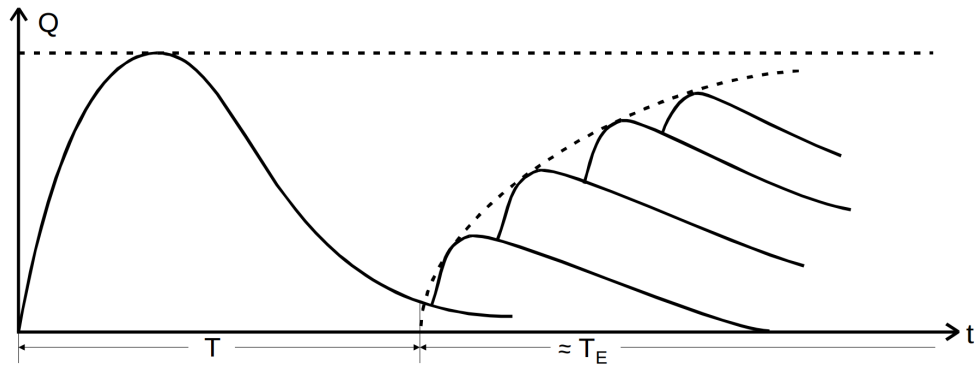


Abbildung 3: Die Tot- und Erholungszeit eines Zählrohrs, dabei wird die Ladung Q als Funktion der Zeit abgebildet [TUD17].

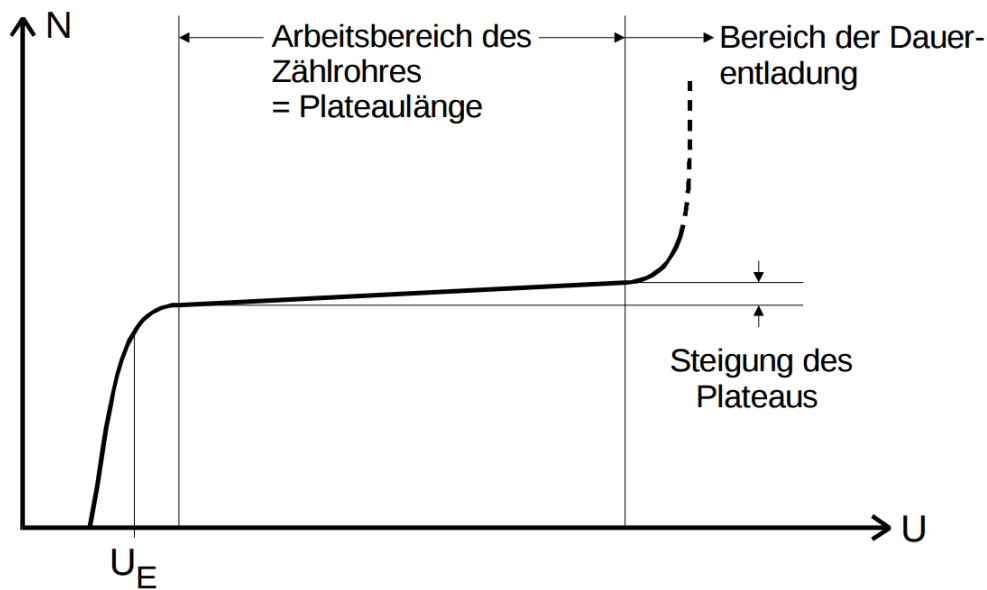


Abbildung 4: Die Charakteristik eines Zählrohrs [TUD17].

In Abbildung 4 zu sehen ist die Charakteristik eines Zählrohrs. In der Charakteristik wird die Spannung U gegen die im Zählrohr registrierte Teilchenzahl N aufgetragen. Dabei wird eine konstante β -Strahlungsquelle verwendet. Besonders interessant ist das Plateau, welches in einem idealen Zählrohr konstant wäre, aber aufgrund von Nachentladungen in der Realität leicht ansteigt. Diese Nachentladungen entstehen, wenn die positiv geladenen Ionen große Energien erreichen. Wenn sie dann an den Stahlmantel gelangen sind sie in der Lage Elektronen aus dem Stahlmantel zu lösen. Dadurch wird die Messung verfälscht. Dem wird entgegengewirkt, indem dem Zählrohrgasgemisch Alkohol hinzugegeben wird. Alkoholmoleküle sind vielkettig und die überflüssige Energie der Ionen kann somit in Form von Schwingungsenergie an die langen Alkoholmoleküle abgegeben werden. Allerdings klappt dies auch nicht einwandfrei, weshalb sich ein nicht perfektes Plateau ergibt.

3 Durchführung

3.1 Versuchsaufbau

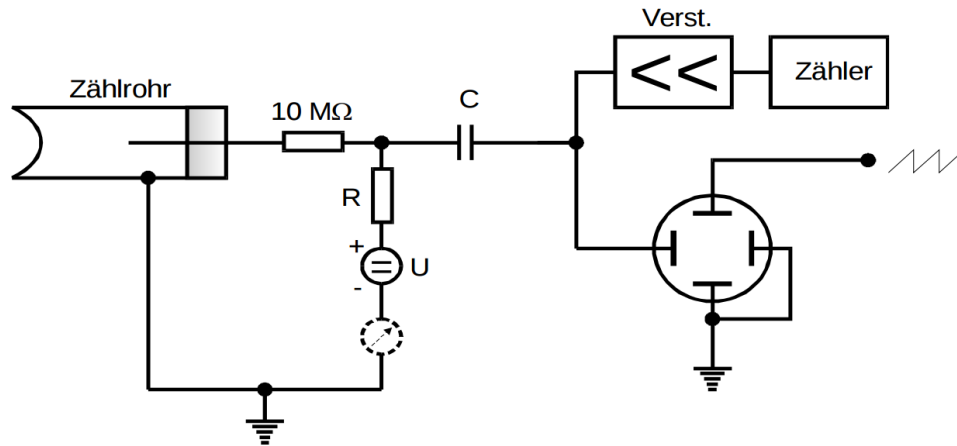


Abbildung 5: Die Skizze der Messapparatur [TUD17].

In Abbildung 5 zu sehen ist der Versuchsaufbau. Links ist das Geiger-Müller-Zählrohr, mit dem Zähldraht, der mit einem elektrischen Stromkreis verbunden ist. Die Ladungen der Elektronen werden dabei auf dem Zähldraht gesammelt, um dann über den Widerstand R zu fließen und einen Spannungsimpuls zu verursachen. Dieser wird am Kondensator ausgekoppelt und im Verstärker verstärkt. Der Zähler zählt dann die Anzahl der Ereignisse. Das Oszilloskop wird zur Visualisierung genutzt.

3.2 Versuchsablauf

Um die Aufenthaltszeit zu minimieren werden Teil a) und Teil d) gleichzeitig durchgeführt. In Teil a) soll eine Zählrohr-Charakteristik erstellt werden. Dafür wird eine β -Quelle vor dem Mylar-Eintrittsfenster platziert und für die Werte 320 V bis 700 V in Zehner Schritten jeweils für 60 Sekunden die Zählrate gemessen.

In Teil b) werden die Zeitpunkte der ersten beiden Nachentladungen für die Maximalspannung von 700 V bestimmt. Die Nachentladeimpulse werden am Oszilloskop abgelesen.

In Teil c) werden mit dem Oszilloskop die Totzeit und die Erholungszeit, für verschiedene Spannungen, bestimmt. Hierzu werden, in 20 V Abständen, Spannungen zwischen 400 V und 500 V eingestellt, die in der Mitte des Plateaus liegen. Als zweite Messmethode, um die Totzeit zu bestimmen, werden, bei einer Spannung von 450 V (Plateaumitte), die Zählraten von 2 verschiedenen β -Strahlern, einzeln und zusammen, gemessen. Hierbei ist darauf zu achten, dass sich die Positionen der Quellen zwischen den Messungen nicht verändern. Zunächst wird also die erste Quelle vermessen. Als Zweites Beide zusammen und schließlich nur die zweite Quelle. Aus den verschiedenen Zählraten lässt sich dann die Totzeit bestimmen.

In Teil d) wird der, von den Ionen erzeugte, Strom am Zählrohr gemessen und daraus, unter Verwendung der Zählrate, die Ladung, die pro Teilchen im Zählrohr freigesetzt wird, bestimmt.

4 Auswertung

4.1 Zählrohrcharakteristik und pro Teilchen im Zählrohr freigesetzte Ladung

Bei der Messung wurden die in Tabelle 1 stehenden Werte gemessen. Zunächst soll die Zählrohr-Charakteristik erstellt werden. Dafür werden die Zählraten in Ereignisse pro Sekunde umgerechnet und der Fehler Δn der einzelnen Messungen bestimmt. Der Fehler berechnet sich dabei nach

$$\Delta n = \frac{\sqrt{N}}{60 \text{ s}}. \quad (1)$$

Diese Werte stehen ebenfalls in Tabelle 1 und sind in Abbildung 6 dargestellt. Für den Bereich zwischen 370 V bis 640 V, bei dem wir das Plateau vermuten, wurde mittels Python eine Ausgleichsgerade der Form

$$f(U) = A \cdot U + B \quad (2)$$

erstellt. Als Parameter ergeben sich dafür

$$A = (0,071 \pm 0,009) \frac{1}{\text{s V}} \quad \text{und} \quad B = (437 \pm 4) \frac{1}{\text{s}} \quad (3)$$

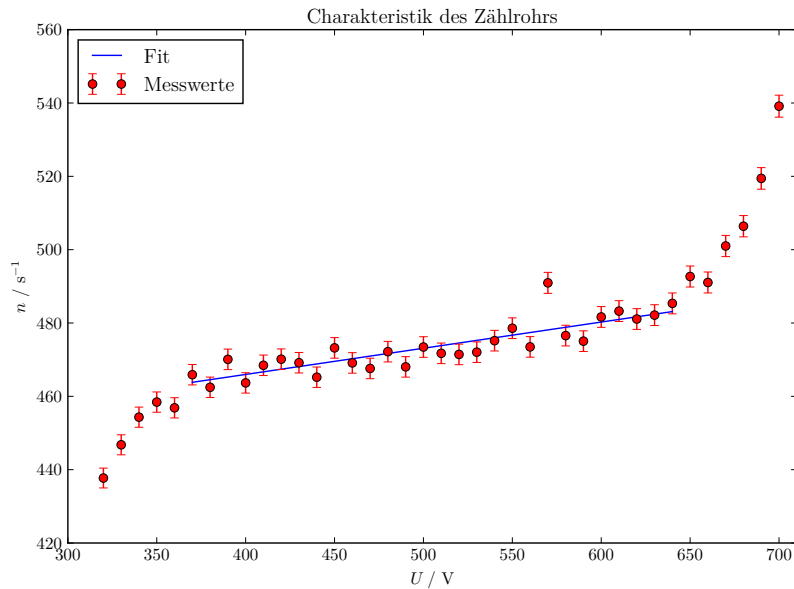


Abbildung 6: Graph der Messwerte und der Ausgleichsgeraden zum Plateau.

Tabelle 1: Zählrate und Strom bei entsprechender Spannung.

Angelegte Spannung U in V	N (pro 60 s)	n (pro s)	Δn (pro s)	Ladungsstrom I in μA
320	26 263	438	3	0,3
330	26 807	447	3	0,4
340	27 259	454	3	0,5
350	27 506	458	3	0,6
360	27 412	457	3	0,7
370	27 954	466	3	0,8
380	27 748	462	3	0,9
390	28 205	470	3	1,0
400	27 820	464	3	1,1
410	28 108	468	3	1,2
420	28 208	470	3	1,3
430	28 150	469	3	1,4
440	27 913	465	3	1,5
450	28 393	473	3	1,6
460	28 147	469	3	1,7
470	28 056	468	3	1,8
480	28 331	472	3	1,9
490	28 082	468	3	2,0
500	28 407	473	3	2,1
510	28 304	472	3	2,2
520	28 286	471	3	2,3
530	28 323	472	3	2,4
540	28 511	475	3	2,5
550	28 715	479	3	2,6
560	28 409	473	3	2,7
570	29 457	491	3	2,8
580	28 594	477	3	2,9
590	28 503	475	3	3,0
600	28 899	482	3	3,1
610	28 995	483	3	3,2
620	28 865	481	3	3,2
630	28 929	482	3	3,3
640	29 121	485	3	3,4
650	29 561	493	3	3,5
660	29 463	491	3	3,6
670	30 060	501	3	3,8
680	30 384	506	3	3,9
690	31 166	519	3	4,1
700	32 348	539	3	4,2

Zur Bestimmung der Steigung des Plateaus in % pro 100 V werden die Anfangs- und Endwerte

$$n_{370} = 463 \frac{1}{s} \quad \text{und} \quad n_{640} = 482 \frac{1}{s} \quad (4)$$

verwendet. Sie wurden mit der Ausgleichsfunktion bestimmt. Das Plateau ist etwa 270 V lang. Nach

$$A_{\%} = \frac{n_{640} - n_{370}}{n_{370}} \cdot \frac{100}{270 \text{ V}} \quad (5)$$

ergibt sich damit eine Steigung von

$$A_{\%} = 1,5 \% \text{ pro } 100 \text{ V}. \quad (6)$$

Die Stromstärke I gibt die transportierte Ladung pro Zeit an. Um die freigesetzte Ladung pro Teilchen zu bestimmen, wird sie mit dem Kehrwert der Zählrate multipliziert.

$$\Delta Q = I \cdot \frac{1}{n} \quad (7)$$

Zur Umrechnung in Vielfache der Elementarladung wird der bei Python im Paket Scientific Python enthaltene Wert der Elementarladung verwendet. Dieser beträgt $1,6021766208 \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Die Ergebnisse stehen in Tabelle 2 und sind in Abbildung 7 dargestellt.

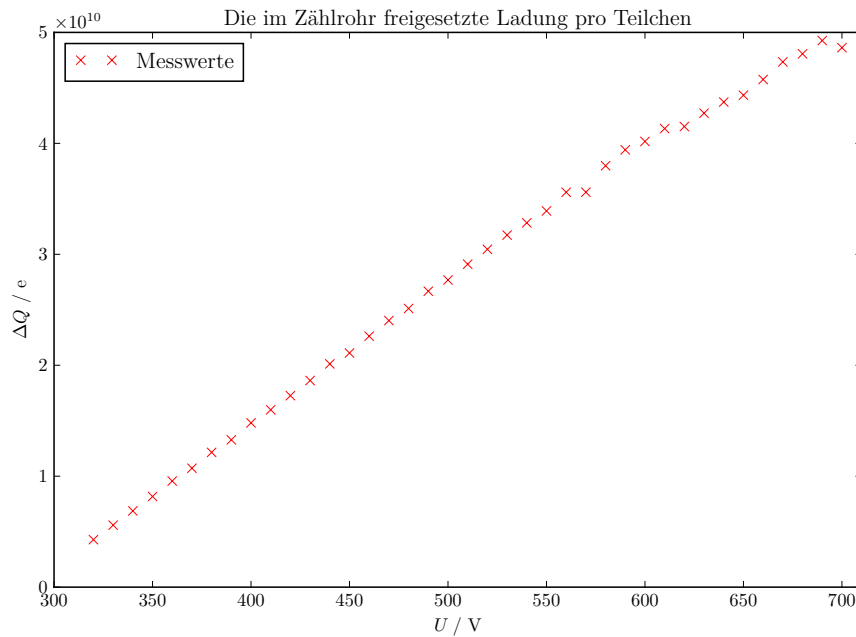


Abbildung 7: Freigesetzte Ladung bei der jeweiligen Spannung.

Tabelle 2: Freigesetzte Ladung pro Teilchen.

Angelegte Spannung U in V	n (pro s)	Ladungsstrom I in μA	Freigesetzte Ladung pro Teilchen	
			in nC	in $\cdot 10^{10}$ Elementarladungen
320	438	0,3	0,7	0,4
330	447	0,4	0,9	0,6
340	454	0,5	1,1	0,7
350	458	0,6	1,3	0,8
360	457	0,7	1,5	1,0
370	466	0,8	1,7	1,1
380	462	0,9	1,9	1,2
390	470	1,0	2,1	1,3
400	464	1,1	2,4	1,5
410	468	1,2	2,6	1,6
420	470	1,3	2,8	1,7
430	469	1,4	3,0	1,9
440	465	1,5	3,2	2,0
450	473	1,6	3,4	2,1
460	469	1,7	3,6	2,3
470	468	1,8	3,8	2,4
480	472	1,9	4,0	2,5
490	468	2,0	4,3	2,7
500	473	2,1	4,4	2,8
510	472	2,2	4,7	2,9
520	471	2,3	4,9	3,0
530	472	2,4	5,1	3,2
540	475	2,5	5,3	3,3
550	479	2,6	5,4	3,4
560	473	2,7	5,7	3,6
570	491	2,8	5,7	3,6
580	477	2,9	6,1	3,8
590	475	3,0	6,3	3,9
600	482	3,1	6,4	4,0
610	483	3,2	6,6	4,1
620	481	3,2	6,7	4,2
630	482	3,3	6,8	4,3
640	485	3,4	7,0	4,4
650	493	3,5	7,1	4,4
660	491	3,6	7,3	4,6
670	501	3,8	7,6	4,7
680	506	3,9	7,7	4,8
690	519	4,1	7,9	4,9
700	539	4,2	7,8	4,9

4.2 Zeitlicher Abstand zwischen Primär- und Nachentladungsimpuls

Die Nachentladeimpulse waren am Oszilloskop sichtbar. Der erste Nachentladeimpuls fand $125\,\mu\text{s}$ nach dem Primärimpuls statt. Zum zweiten Nachentladeimpuls kam es $200\,\mu\text{s}$ nach dem Primärimpuls.

4.3 Messung der Totzeit mit Hilfe eines Oszilloskops und mit Hilfe der Zwei-Quellen-Methode

Mit dem Oszilloskop wurden die in Tabelle 3 stehenden Werte für die Totzeit und die Erholungszeit bestimmt.

Tabelle 3: Tot- und Erholungszeit bei entsprechender Spannung.

Angelegte Spannung U in V	Totzeit T in μs	Erholungszeit T_E in μs
400	125	1600
420	125	1500
440	125	1000
460	125	1400
480	125	1500
500	125	1400

Für die Erholungszeit wird der Mittelwert und der Standardfehler des Mittelwerts bestimmt. Die Formel für den Standardfehler lautet:

$$\Delta\overline{T_E} = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (T_{E,i} - \overline{T_E})^2}. \quad (8)$$

Damit ergibt sich eine mittlere Erholungszeit von $(1400 \pm 90)\,\mu\text{s}$.

Mit der Zwei-Quellen-Methode wurden zunächst die in Tabelle 4 stehenden Zählraten gemessen. Die angelegte Spannung beträgt $450\,\text{V}$ und die Fehler berechnen sich nach $\Delta N = \sqrt{N}$.

Tabelle 4: Gemessene Zählraten bei der Zwei-Quellen-Methode.

Quelle	Zählrate N pro 60 s	Fehler ΔN
1	19 262	139
2	513	23
1+2	19 539	140

Mit der Anleitung [TUD17] war für diese Methode die Formel

$$\frac{N_{1+2}}{1 - TN_{1+2}} = \frac{N_1}{1 - TN_1} + \frac{N_2}{1 - TN_2} \quad (9)$$

gegeben. Durch Umformen und Lösen der quadratischen Gleichung ergibt sich:

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

Das negative Vorzeichen vor der Wurzel führt zu keinem sinnvollen Ergebnis. Daher wird es im Folgenden weggelassen. Der Fehler dieser Größe wird mit Hilfe von Python über Fehlerfortpflanzung bestimmt. Die Formel dafür ist:

$$\Delta T = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial N_1} \cdot \Delta N_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial N_2} \cdot \Delta N_2 \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial N_{1+2}} \cdot \Delta N_{1+2} \right)^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial T}{\partial N_1} = \frac{\frac{1}{N_1^2 N_{1+2}} - \frac{1}{N_1^2 N_2}}{2 \sqrt{\frac{1}{N_{1+2}^2} - \frac{1}{N_1 N_{1+2}} - \frac{1}{N_2 N_{1+2}} + \frac{1}{N_1 N_2}}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial T}{\partial N_2} = \frac{\frac{1}{N_2^2 N_{1+2}} - \frac{1}{N_1 N_2^2}}{2 \sqrt{\frac{1}{N_{1+2}^2} - \frac{1}{N_1 N_{1+2}} - \frac{1}{N_2 N_{1+2}} + \frac{1}{N_1 N_2}}} \quad (13)$$

$$\frac{\partial T}{\partial N_{1+2}} = \frac{\frac{1}{N_1 N_{1+2}^2} + \frac{1}{N_2 N_{1+2}^2} - \frac{2}{N_{1+2}^3}}{2 \sqrt{\frac{1}{N_{1+2}^2} - \frac{1}{N_1 N_{1+2}} - \frac{1}{N_2 N_{1+2}} + \frac{1}{N_1 N_2}}} - \frac{1}{N_{1+2}^2} \quad (14)$$

Schließlich ergibt sich darüber eine Totzeit von

$$T = (89 \pm 13) \text{ s.} \quad (15)$$

5 Diskussion

Die Messmethode mit dem Geiger-Müller-Zählrohr wirkt zuverlässig.

In Teil a) ergibt sich ein insgesamt lineares Plateau mit leichten Schwankungen, die allerdings überwiegend im Rahmen der Messfehler liegen.

Bei Teil b) konnten Nachentladungen nachgewiesen werden, die für die Steigung des Plateaus verantwortlich sind.

In Teil c) wurde mit dem Oszilloskop eine Totzeit von $125\mu\text{s}$ bestimmt während bei der Zwei-Quellen-Methode sich eine Totzeit von $(89 \pm 13)\mu\text{s}$ ergab. Die Totzeiten von Geiger-Müller-Zählrohren liegen in der Regel im Bereich von $100\mu\text{s}$ [Wik17]. Zu unserer Messung ist zu erwähnen, dass die Totzeit, am Oszilloskop, anhand vom ersten Peak (dem ersten Nachentladungs-Peak) bestimmt wurde. Tatsächlich ist, wie in Abbildung 3 zu sehen ist, die Totzeit etwas kleiner. Der Wert der Zwei-Quellen-Methode passt ebenfalls sehr gut, wobei das Ergebniss schnell abgefälscht werden kann, wenn die Positionen der Quellen ein wenig verändert werden. Richtig ausgeführt ergibt sich bei beiden Methoden eine gute Näherung für die Totzeit.

Bei Teil d) ergeben sich freigesetzte Ladungen in der Größenordnung von 10^{10} . Das Passt zu den Werten, die Abbildung 2 entnommen werden können.

Literatur

- [TUD17] TU-Dortmund. *Versuch 703: Das Geiger-Müller-Zählrohr*. 24. Apr. 2017. URL: <http://129.217.224.2/HOMEPAGE/PHYSIKER/BACHELOR/AP/SKRIPT/V703.pdf>.
- [Wik17] Wikipedia.org. *Zählrohr*. 24. Apr. 2017. URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A4hlrohr>.