

D703

Das Geiger-Müller-Zählrohr

Katharina Popp

katharina.popp@tu-dortmund.de

Nicolai Weitkemper

nicolai.weitkemper@tu-dortmund.de

Abgabe: 26.01.2021

TU Dortmund – Fakultät Physik

Inhaltsverzeichnis

1 Zielsetzung	3
2 Theorie	3
2.1 Aufbau des Zählrohrs	3
2.2 Wirkungsweise	3
2.3 Totzeit und Nachentladung	6
3 Durchführung	8
3.1 Aufbau der Messapparatur	8
3.2 Geiger-Müller-Zählrohr Charakteristik	8
3.3 Zählrohrstrom	8
3.4 Totzeit und Nachentladung	8
4 Auswertung	10
4.1 Aufnahme der Geiger-Müller-Charakteristik	12
4.2 Bestimmung der Totzeit	12
4.2.1 Zwei-Quellen-Methode	12
4.2.2 Oszilloskop	13
4.3 Bestimmung der pro Teilchen freigesetzten Ladungen	14
5 Diskussion	16
Literatur	17

1 Zielsetzung

Das Ziel dieses Versuches ist es, mithilfe eines Geiger-Müller-Zählrohrs die Intensität ionisierender Strahlung einer ^{204}Tl -Quelle in Halogengas zu bestimmen.

2 Theorie

Im Folgenden sollen die theoretischen Grundlagen des Geiger-Müller-Zählrohrs erläutert werden.

2.1 Aufbau des Zählrohrs

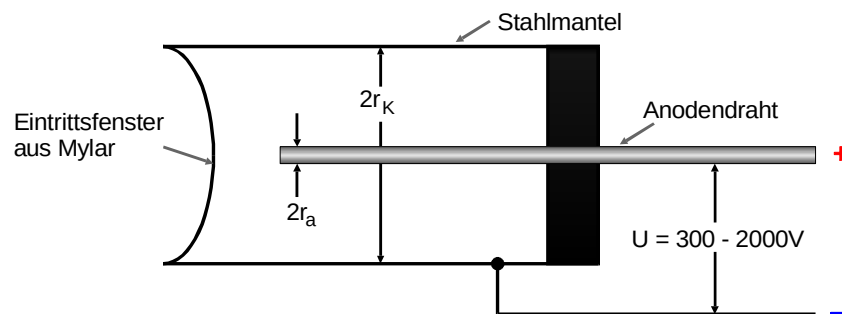


Abbildung 1: Aufbau des Geiger-Müller-Zählrohrs [2].

Das Geiger-Müller-Zählrohr besteht aus einem zylinderförmigen, negativ geladenen Rohr mit Radius r_k , in dessen Mitte sich ein positiv geladener Draht mit Radius r_a befindet. Der Zylindermantel stellt eine Kathode dar und der Draht eine Anode. Zwischen Anode und Kathode befindet sich ein elektrisches Feld, welches aufgrund der Symmetrie des Zählrohrs radialsymmetrisch vom Draht nach außen gerichtet ist. Für die elektrische Feldstärke ergibt sich

$$E(r) = \frac{U}{r \ln \left(\frac{r_k}{r_a} \right)}. \quad (1)$$

An den Zylindermantel und den Draht ist die Spannung U angeschlossen. Durch ein Eintrittsfenster im Deckel der Röhre können Teilchen in das Innere des Zylinders gelangen, welches mit einem Gasgemisch, in diesem Fall Halogen, gefüllt ist.

2.2 Wirkungsweise

Das Geiger-Müller-Zählrohr wird zur Bestimmung der Intensität ionisierender Strahlung genutzt.

Wenn ein geladenes Teilchen durch das Eintrittsfenster, welches aus einem sehr durchlässigen Material besteht, in das Innere des Zylinders gelangt, ionisiert es Gasatome. Dieser Vorgang wird Primärionisation genannt. So entstehen freie Elektronen, welche sich zum

positiv geladenen Draht in der Mitte bewegen und durch diesen abfließen. Es entsteht ein Ionisationsstrom.

In Abhängigkeit der Spannung kommt es zu verschiedenen Reaktionen. In Abbildung 2 sind diese in verschiedene Bereiche von **I** bis **V** unterteilt.

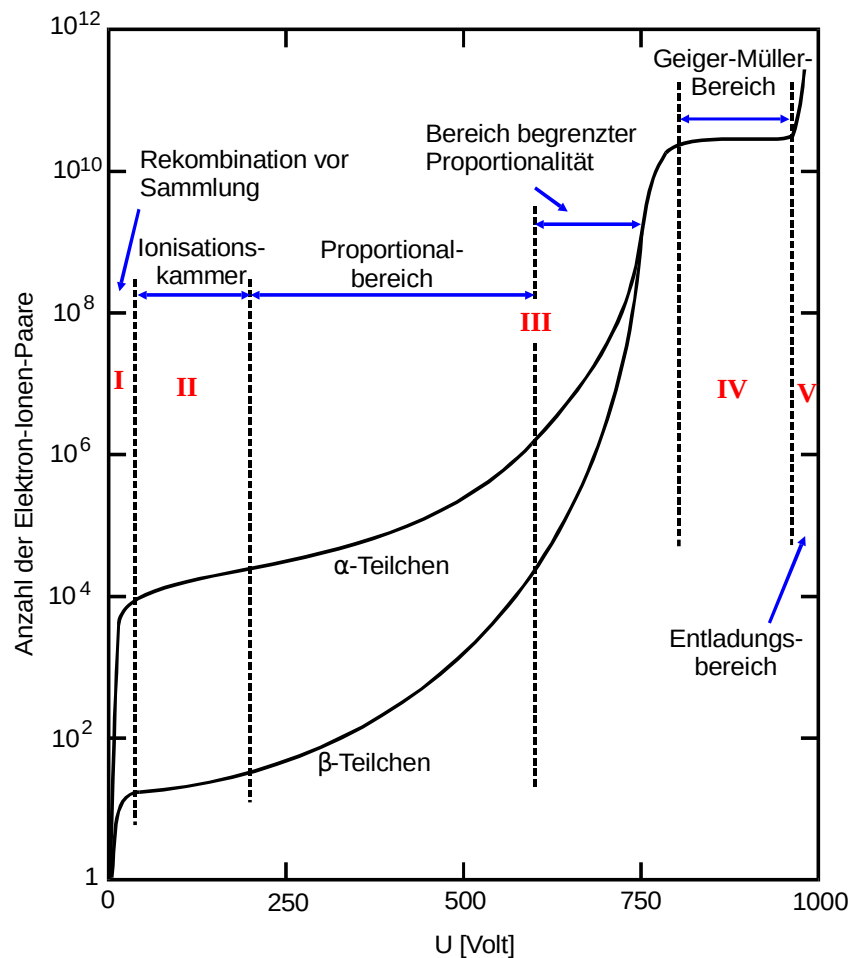


Abbildung 2: Anzahl der erzeugten Elektron-Ionenpaare in Abhängigkeit der Spannung mit eingezeichneten Bereichen [2].

Wenn die Spannung klein ist, findet im Bereich **I** Rekombination statt, und nur ein Teil der freien Elektronen gelangt zum Draht. In diesem Bereich steigt die Zahl der Elektronen-Ionen-Paare sehr stark an.

Im Bereich **II** ist die Spannung etwas größer und damit auch die elektrische Feldstärke, sodass alle freien Elektronen aus der Primärionisation zum Draht gelangen. In diesem Bereich operierende Geräte werden *Ionisationskammern* genannt.

Der Bereich **III** wird in *Proportionalitätsbereich* und *Bereich begrenzter Proportionalität* aufgeteilt. Die Spannung nimmt weiter zu, sodass die freien Elektronen genug Energie haben, um die Gasatome anzuregen. Es folgt die Stoßionisation, bei der weitere freie Elektronen mit ausreichend hoher Energie freigesetzt werden, sodass eine Lawine an freien Elektronen entsteht. Anhand der Ladungsimpulse, die beim Auftreffen der Elektronen auf dem Draht entstehen, kann mit der Proportionalitätsbeziehung zur Energie eine Abschätzung für die Teilchenzahl getroffen werden. Je höher jedoch die Spannung steigt, desto mehr Teilchen treffen auf den Draht und die Proportionalität wird begrenzt. In diesem Bereich steigt die Zahl der Elektronen-Ionen-Paare wieder stark an.

Der eigentliche Arbeitsbereich des Geiger-Müller-Zählrohrs ist Bereich **IV**. Die Spannung ist jetzt so groß, dass bei der Ionisation zusätzlich zu Elektronen auch UV-Photonen entstehen, welche sich unbeeinträchtigt vom elektrischen Feld bewegen können. Es entstehen Elektronenlawinen im gesamten Zählrohr. Der Ladungsimpuls, welcher am Anodendraht gemessen wird, ist nun unabhängig vom einfallenden Teilchen. Zu diesem Zeitpunkt bleibt die Zahl der Elektronen-Ionen-Paare nahezu konstant. Entsprechend wird dieser Bereich *Plateau* genannt. Dieses ist in der Charakteristik in Abbildung 3 zu sehen, welche den Bereich **IV** aus Abbildung 2 vergrößert darstellt.

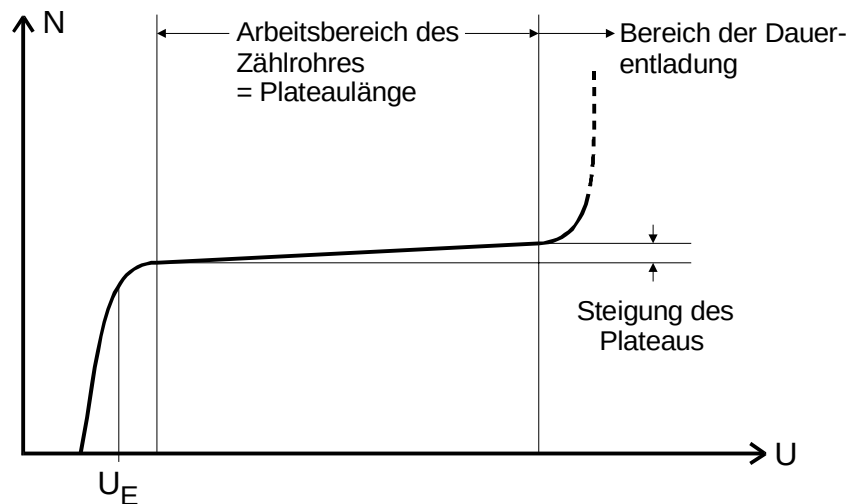


Abbildung 3: Vergrößerte Darstellung des Plateau-Bereichs [2].

Wenn die Spannung noch höhere Werte annimmt, kommt es in Bereich **V** zu einer Dauerentladung, welche eine hohe Stromdichte hervorruft. In diesem Bereich wird das Geiger-Müller-Zählrohr zerstört.

Der mittlere Zählrohrstrom, also die Ladungsmenge, die beim Auftreffen der Teilchen

auf dem Draht freigesetzt wird, kann durch

$$\bar{I} \approx \frac{1}{\tau} \int_0^\tau \frac{U(t)}{R} dt \quad (2)$$

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

berechnet werden. Dabei ist ΔQ die Ladungsmenge, welche in einer Zeit Δt von Z Teilchen übertragen wurde. Für Z gilt

$$Z = \frac{I}{e_0 N} . \quad (4)$$

2.3 Totzeit und Nachentladung

Die positiven Ionen, die bei den Reaktionen eines einfliegenden Teilchens mit den Gasatomen entstehen, fließen nicht durch den Draht ab. Es baut sich ein Ionenschlauch auf, also ein Gebiet positiver Raumladung, welche das elektrische Feld so beeinflusst, dass für eine Zeit T keine Stoßionisation stattfindet. Diese Zeit T wird Totzeit genannt. Während dieser Zeit wird ein eintreffendes Teilchen nicht registriert. Nach der Totzeit folgt eine Erholungszeit T_E , in der schwächere Ausgangsimpulse registriert werden (vgl. Abbildung 4).

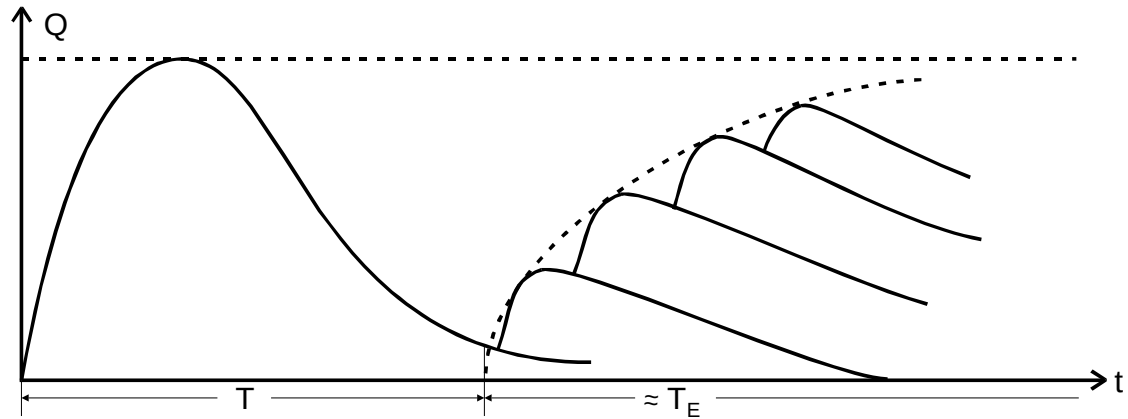


Abbildung 4: Tot- und Erholungszeit eines Zählrohrs, dargestellt im Ladungs-Zeit-Diagramm [2].

Die Totzeit kann näherungsweise mithilfe der Gleichung

$$T \approx \frac{N_1 + N_2 - N_{1+2}}{2N_1N_2} \quad (5)$$

berechnet werden, wenn $T^2 N_i^2 \ll 1$ gilt. N_1 bezeichnet die Zählrate, die für ein erstes Präparat gemessen wird, N_{1+2} die Zählrate, die gemessen wird, wenn ein zweites Präparat hinzugefügt wird, und N_2 die Zählrate für das zweite Präparat, nachdem das erste entfernt

wurde.

Die positiven Ionen werden zur negativ geladenen Kathode gezogen, wodurch sich der Ionenschlauch auflöst und wieder Stoßionisation möglich ist. Wenn die Ionen auf der Kathode auftreffen, lösen sie Elektronen, sogenannte Sekundärelektronen, aus dem Material. Dieser Vorgang wird Nachentladung genannt und sorgt dafür, dass mehrere Ausgangsimpulse entstehen, wenn ein Teilchen durch die Röhre geflogen ist, welche im zeitlichen Abstand T_L voneinander liegen. Diese Zeit T_L ist länger als die eigentliche Totzeit. Um die Nachentladung zu minimieren, werden zum Gasgemisch Alkoholdämpfe hinzugefügt, welche bei Ionisation eine zu geringe Energie haben, um ihrerseits ionisieren zu können.

Im Übergang von Bereich **IV** zu **V** nimmt die Zahl der Nachentladungen stark zu, welche die Ursache für die Dauerentladung des Geiger-Müller-Zählrohrs sind.

3 Durchführung

3.1 Aufbau der Messapparatur

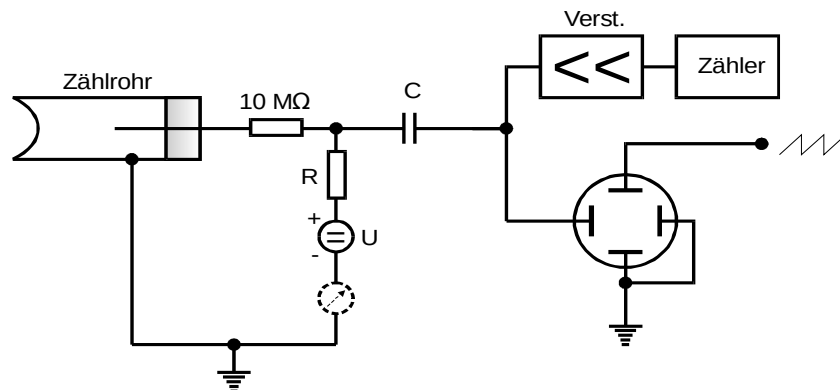


Abbildung 5: Skizze der Messapparatur [2].

In Abschnitt 2 der theoretischen Grundlagen wurde der Aufbau des Geiger-Müller-Zählrohrs erklärt. In Abbildung 5 ist nun der Aufbau einer Messapparatur gezeigt, mit der weitere Untersuchungen der gemessenen Impulse durchgeführt werden können.

Die an der Anode im Inneren des Zählrohrs auftretenden Elektronen mit der gesammelten Ladung Q fließen durch den Draht über einen Widerstand R ab. Infolge dessen wird ein Spannungsimpuls erzeugt, der über einen Kondensator ausgekoppelt und in einem Zählgerät gemessen wird.

3.2 Geiger-Müller-Zählrohr Charakteristik

Um die Zählrate zu messen, wird eine ^{204}Tl -Quelle vor das Eingangsfenster des Geiger-Müller-Zählrohrs gestellt. Die maximale Impulsrate der auftreffenden Elektronen sollte bei maximal 100/s liegen. Für die Messung wird die anliegende Spannung U in Schritten von $\Delta U = 10 \text{ V}$ über eine Zeit von $t = 60 \text{ s}$ erhöht, wobei das Maximum des Zählrohrs bei 700 V liegt, um eine Dauerentladung zu vermeiden. Zusätzlich wird der Zählrohrstrom I gemessen, welcher durch die freien Elektronen entsteht, mit einer Ablesegenauigkeit von $\Delta I = 0,05 \mu\text{A}$.

3.3 Zählrohrstrom

Um die Teilchenzahl Z zu bestimmen, kann der bei der Erstellung der Zählrohr-Charakteristik gemessene Zählrohrstrom I verwendet werden. Es gilt Gleichung 4.

3.4 Totzeit und Nachentladung

Die Totzeit kann bei hoher Strahlungsintensität auf einem Oszillographen abgelesen werden, weshalb die ^{204}Tl -Quelle näher an die Zählröhre gestellt wird. Zusätzlich wird

über eine Zeit von $t = 120\text{ s}$ gemessen.

Zur Bestimmung der Totzeit wird die Zwei-Quellen-Methode verwendet. Diese funktioniert so, dass zuerst die Zählrate N_1 eines ersten Präparates im Geiger-Müller-Zählrohr gemessen wird. Dann wird ein zweites Präparat hinzugefügt, ohne das erste zu entfernen, und misst die Zählrate N_{1+2} . Anschließend wird das erste Präparat entfernt und die Zählrate N_2 des zweiten gemessen. Die Totzeit kann mit Gleichung 5 bestimmt werden und ist auf einem Oszillographen sichtbar.

Für die Messung der Nachentladung wird die Strahlungsintensität verringert. Die Ablenkgeschwindigkeit des Kathodenstrahls liegt bei $50\text{ }\mu\text{s/cm}$. Die verwendete Spannung U liegt zu Anfang bei 350 V und wird zur Messung auf 700 V geregelt. Es wird der zeitliche Abstand zwischen Primär- und Nachentladungsimpuls gemessen.

4 Auswertung

In Tabelle 1 sind sämtliche zur Verfügung gestellten Messwerte aufgelistet. Der (gerundete) Fehler der Zählrate Z , der sich aus \sqrt{N} berechnet, wurde ebenfalls angegeben. Die Ablesegenauigkeit des Amperemeters ist konstant $\Delta I = 0,05 \mu\text{A}$.

Tabelle 1: Übersicht aller aufgenommenen Messwerte.

U / V	$N / \text{Imp}/60\text{s}$	$I / \mu\text{A}$
320	9672 ± 98	-
330	9689 ± 98	-
340	9580 ± 98	-
350	9837 ± 99	0,3
360	9886 ± 99	-
370	$10\,041 \pm 100$	-
380	9996 ± 100	-
390	9943 ± 100	-
400	9995 ± 100	0,4
410	9980 ± 100	-
420	9986 ± 100	-
430	9960 ± 100	-
440	$10\,219 \pm 101$	-
450	$10\,264 \pm 101$	0,7
460	$10\,174 \pm 101$	-
470	$10\,035 \pm 100$	-
480	$10\,350 \pm 102$	-
490	$10\,290 \pm 101$	-
500	$10\,151 \pm 101$	0,8
510	$10\,110 \pm 101$	-
520	$10\,255 \pm 101$	-
530	$10\,151 \pm 101$	-
540	$10\,351 \pm 102$	-
550	$10\,184 \pm 101$	1,0
560	$10\,137 \pm 101$	-
570	$10\,186 \pm 101$	-
580	$10\,171 \pm 101$	-
590	$10\,171 \pm 101$	-
600	$10\,253 \pm 101$	1,3
610	$10\,368 \pm 102$	-
620	$10\,365 \pm 102$	-
630	$10\,224 \pm 101$	-
640	$10\,338 \pm 102$	-
650	$10\,493 \pm 102$	1,4
660	$10\,467 \pm 102$	-
670	$10\,640 \pm 103$	-
680	$10\,939 \pm 105$	-
690	$11\,159 \pm 106$	-
700	$11\,547 \pm 107$	1,8

4.1 Aufnahme der Geiger-Müller-Charakteristik

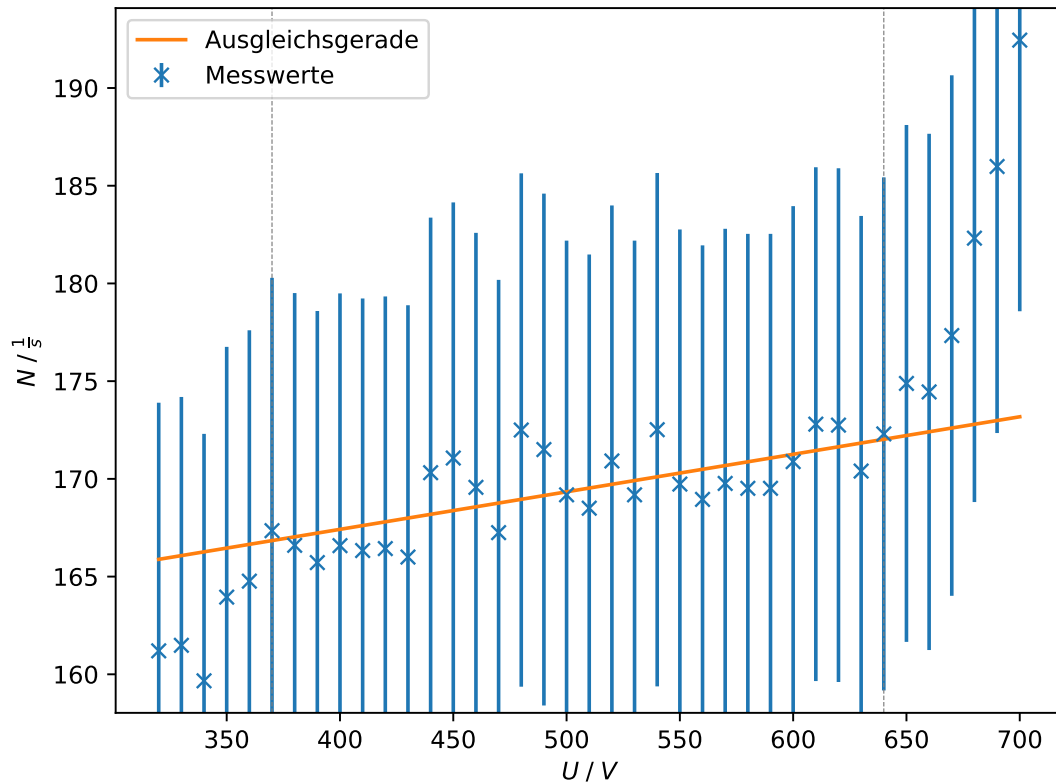


Abbildung 6: Impulsrate in Abhängigkeit der Spannung.

Weil die Zählraten Poisson-verteilt sind, sind die Messunsicherheiten durch $\Delta N = \sqrt{N}$ gegeben. Das Plateau liegt in etwa zwischen 370 V und 640 V und ist in Abbildung 6 durch gestrichelte Linien begrenzt. Die Plateaulänge beträgt also ungefähr 270 V. Für diesen Bereich wurde der Plateauanstieg durch eine Regressionsgerade zu $(19,198 \pm 3,727) \text{ Imp/s/kV}$ bestimmt.

4.2 Bestimmung der Totzeit

4.2.1 Zwei-Quellen-Methode

Bei einer Messzeit von $t = 120 \text{ s}$ wurden folgende Zählraten gemessen:

$$\begin{aligned}
N_1 &= 96\,041 \text{ Imp}/120\text{s} \\
N_{1+2} &= 158\,479 \text{ Imp}/120\text{s} \\
N_2 &= 76\,518 \text{ Imp}/120\text{s}
\end{aligned}$$

Nach Gleichung 5 ergibt sich daraus eine Totzeit von $T \approx (115 \pm 4) \mu\text{s}$. Die Messunsicherheit wurde mit dem Python-Paket *uncertainties* berechnet.

4.2.2 Oszilloskop

Die Zeitachse am Oszilloskop bemisst sich auf $100 \mu\text{s}/\text{DIV}$, sodass jeder Strich $20 \mu\text{s}/\text{DIV}$ entspricht.

Es wurde nun die Totzeit als Zeit zwischen dem ersten und zweiten Puls abgelesen, wie in Abbildung 7 dargestellt ist. Diese ergab sich zu $T \approx (110 \pm 20) \mu\text{s}$, wobei die Unsicherheit als der Abstand zwischen zwei Strichen abgeschätzt ist.

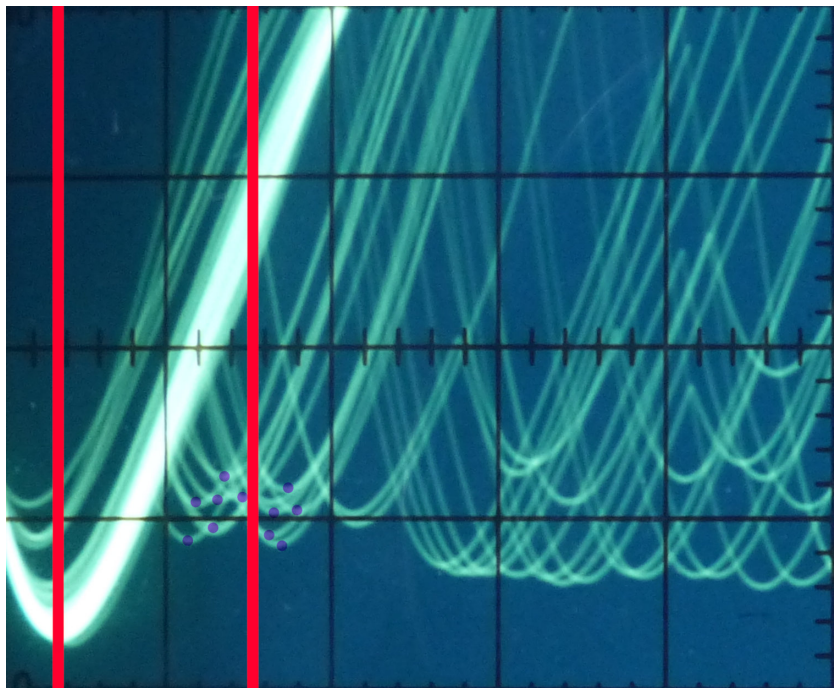


Abbildung 7: Momentaufnahme des Oszilloskops mit eingezeichneten Extrema und Zeiten [1].

4.3 Bestimmung der pro Teilchen freigesetzten Ladungen

Gemäß Gleichung 4 lässt sich aus der Anzahl eingefallener Teilchen und dem Zählerstrom auf die Anzahl der freigesetzten Ladungen pro einfallendem Teilchen schließen. In Abbildung 8 ist dieses Verhältnis gegen die anliegende Spannung aufgetragen. Die Messunsicherheit wurde wieder mit *uncertainties* berechnet.

Im Mittel ergibt sich $Z = (3,43 \pm 0,06) \cdot 10^{10}$.

Tabelle 2: Zahl der pro einfallendem Teilchen freigesetzten Ladungen.

U / V	$N / \text{Imp}/120\text{s}$	$I / \mu\text{A}$	$Z[10^{10}]$
350	163,9	$0,3 \pm 0,05$	$1,14 \pm 0,19$
400	166,6	$0,4 \pm 0,05$	$1,50 \pm 0,19$
450	171,1	$0,7 \pm 0,05$	$2,55 \pm 0,18$
500	169,2	$0,8 \pm 0,05$	$2,95 \pm 0,18$
550	169,7	$1,0 \pm 0,05$	$3,68 \pm 0,18$
600	170,9	$1,3 \pm 0,05$	$4,75 \pm 0,18$
650	174,9	$1,4 \pm 0,05$	$5,00 \pm 0,18$
700	192,4	$1,8 \pm 0,05$	$5,84 \pm 0,16$

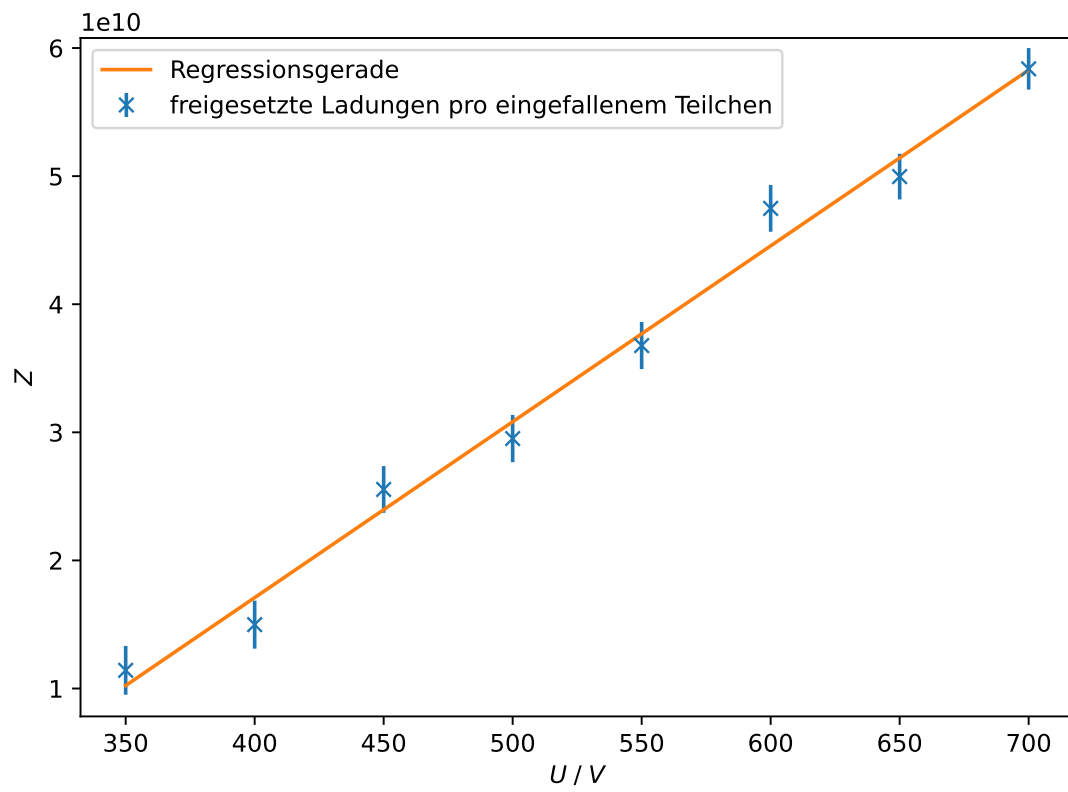


Abbildung 8: Zahl der freigesetzten Ladungen pro eingefallenem Teilchen in Abhängigkeit der Spannung.

5 Diskussion

Die gemessene Kennlinie des Zählrohrs (siehe Abbildung 6) ist deutlich unregelmäßiger als die Theoriekurve (siehe Abbildung 3). Entsprechend ungenau sind der abgelesene Plateaubereich und die Plateaulänge. Der Plateauanstieg von $(19,198 \pm 3,727)$ Imp/s/kV weist ebenfalls eine relativ große Unsicherheit auf. Diese ermittelten Kennzahlen jedoch in etwa den zu erwartenden Werten.

Die nach Zwei-Quellen-Methode und mit Oszilloskop bestimmten Totzeiten von (115 ± 4) μ s bzw. (110 ± 20) μ s stimmen (unter Berücksichtigung der ohnehin geringeren Genauigkeit bei der Bestimmung mit Oszilloskop) sehr gut überein.

Die berechneten freigesetzten Ladungen pro einfallendem Teilchen unterscheiden sich von der Regressionsgerade um wenig mehr als ihre Standardabweichung, weshalb die Messung für relativ gut befunden wird.

Literatur

- [1] *Daten und Hinweise zum Versuch 703: Das Geiger-Müller-Zählrohr.* Das Originalbild wurde bearbeitet. TU Dortmund.
- [2] *Versuchsanleitung zum Versuch 703: Das Geiger-Müller-Zählrohr.* TU Dortmund.