

Geiger-Müller-Zählrohr

David Gutnikov
david.gutnikov@tu-dortmund.de

Abgabe am 25.05.2020

Inhaltsverzeichnis

1	Zielsetzung	3
2	Theorie	3
2.1	Funktionsweise und Aufbau des Zählrohrs	3
2.1.1	Aufbau	3
2.1.2	Abhängigkeit der Ladungsimpulse von der Spannung . . .	3
2.1.3	Einfluss positiver Ionen auf Prozesse im Zählrohr	5
2.1.4	Charakteristik des Zählrohrs	6
2.1.5	Ansprechvermögen des Zählrohrs	6
2.1.6	Totzeitmessung mit der Zwei-Quellen-Methode	6
3	Durchführung	7
3.1	Messung zur Bestimmung der Charakteristik des Zählrohrs . . .	7
3.2	Bestimmung der Ladung pro einfallendem Teilchen	7
3.3	Messung zur Bestimmung der Totzeit	8
4	Auswertung	9
4.1	Charakteristik des Zählrohres	9
4.2	Bestimmung der Totzeit	9
4.2.1	Oszilloskop	9
4.2.2	Zwei-Quellen-Methode	10
4.3	Bestimmung der Ladung pro einfallendem Teilchen	10
5	Diskussion	12
6	Daten	13
7	Literaturverzeichnis	14

1 Zielsetzung

Es werden bei diesem Versuch die Charakteristik und die Totzeit eines Geiger-Müller-Zählrohrs bestimmt. Außerdem wird in Abhängigkeit von der Zählrohrspannung bestimmt wie viel Ladung pro einfallendem Teilchen freigesetzt wird.

2 Theorie

2.1 Funktionsweise und Aufbau des Zählrohrs

Das Geiger-Müller-Zählrohr wird verwendet um die Intensität von ionisierender Strahlung zu messen. Unter diesem Begriff wird α , β und γ -Strahlung verstanden. Dabei haben α -Teilchen das größte und γ -Quanten das kleinste spezifische Ionisationsvermögen. Je höher das spez. Ionisationsvermögen, desto mehr Ion-Elektron-Paare werden bei Durchgang durch ein Gas durch Stoßionisation pro zurückgelegte Strecke ionisiert (dazu später mehr). Bei Absorption der Strahlung durch das Gas werden elektrische Impulse erzeugt, welche dann gemessen werden.

2.1.1 Aufbau

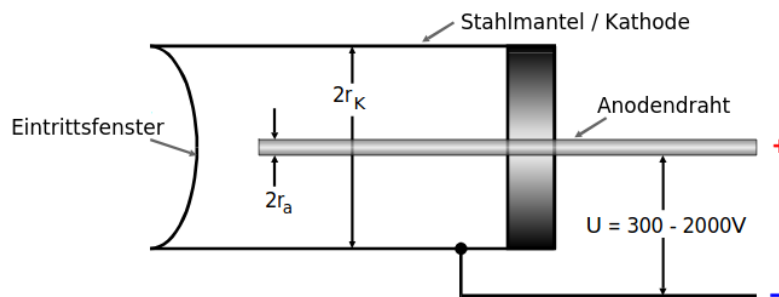


Abbildung 1: Schematische Darstellung eines Geiger-Müller-Zählrohrs.

Innerhalb des Stahlmantels wird ein radialsymmetrisches elektrisches Feld aufgebaut, für das im Abstand r vom Anodendraht gilt:

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

mit der angelegten Spannung U , dem Radius des Stahlzylinders r_k und dem Radius des Anodendrahtes r_a .

2.1.2 Abhängigkeit der Ladungsimpulse von der Spannung

Kommt die Strahlung in das Zählrohr, trifft sie auf die Edelgasatome im Zylinder und ionisiert diese, sodass ein Elektron und ein positives Ion entstehen. Da die zur Erzeugung eines Ion-Elektron-Paares im Durchschnitt benötigte Energie 26 eV beträgt im Gegensatz zur Teilchenenergie in der Größenordnung von 100 keV sehr klein ist, ist die Anzahl der primär erzeugten Paare proportional zur Energie

des einfallenden Teilchens. Die daraus weitergehenden Ionisierungsprozesse sind dahingegen stark von der Spannung abhängig. Deshalb kommt es in Abbildung 2 zur Unterteilung in verschiedene Bereiche.

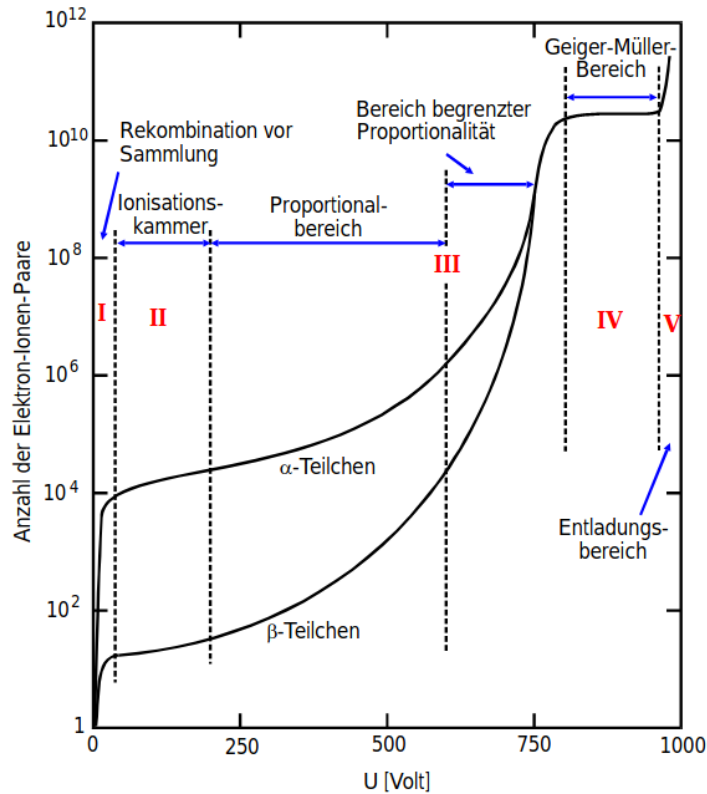


Abbildung 2: Die Anzahl der erzeugten Ion-Elektron-Paare gegen die angelegte Spannung aufgetragen.

Bereich I: Nur ein kleiner Teil der erzeugten Paare kommt am Anodendraht an, da sich der Rest wieder zu neutralen Atomen zusammenfügen. (Rekombination)

Bereich II: Die Rekombinationswahrscheinlichkeit sinkt, weswegen jetzt fast alle erzeugten Elektronen am Draht ankommen. Der Ionisationsstrom ist proportional zur Energie und Intensität der einfallenden Strahlung. Doch da die Ladungsimpulse pro einfallendem Teilchen und damit der Ionisationsstrom sehr gering ist, ist das Gerät nur bei hohen Intensitäten oder bei sehr hoch energetischer Strahlung von Nutzen. Ein Aufbau mit dieser Spannung wird Ionisationskammer genannt und ist die Vorstufe zum Zählrohr.

Bereich III: Bei dieser Spannung nehmen die erzeugten Elektronen genug Energie auf um mindestens ein weiteres Atom auf ihrem Weg zum Anodendraht zu ionisieren (Stoßionisation). Je höher die Spannung, desto mehr können die primär erzeugten Elektronen, die sekundär erzeugten Elektronen usw. ionisieren.

Da dieser Anstieg der Anzahl an Paaren exponentiell geschieht wird dieser Bereich als Townsend-Lawine bezeichnet.

Die durch ein einziges Primärteilchen erzeugte Ladung kann als ein Ladungsimpuls gemessen werden. Auch hier ist die Ladung Q proportional zur Energie und Intensität der einfallenden Strahlung (Proportionalitätszählrohr).

Bereich IV: In der primären Elektronenlawine entstehen, durch Anregung der Gasatome durch Elektronstöße, Photonen mit hohen Energien (UV-Photonen). Diese können sich auch parallel zum Draht ausbreiten, da sie keine Ladung haben und lösen weitere Lawinen im ganzen Zählrohr aus. Da die Stoßionisation nicht mehr in einem Ort beschränkt ist, sondern im ganzen Gasraum passiert, ist der Ionisationsstrom / die Ladung nicht mehr von der Energie der Primärstrahlung abhängig. Anzahl der erzeugten Paare ist nur noch vom Volumen des Zählrohrs und der Intensität der einfallenden Strahlung abhängig.

Bereich IV: Im Dauerentladungsbereich führt die starke Feldstärke zu so großen Nachentladungen, dass auch ohne einfallende Teilchen sehr viele Ion-Elektron-Paare entstehen.

2.1.3 Einfluss positiver Ionen auf Prozesse im Zählrohr

Ionen sind nicht so leicht ablenkbar wie Elektronen, weshalb sie länger im Gasraum verbleiben. Dadurch entsteht eine positive Raumladung (Ionenschlauch). Sie wirkt der durch die Spannung erzeugten Feldstärke entgegen und verringert sie so sehr in Drahtnähe, dass fast keine Stoßionisation mehr passiert. Deshalb können für eine Zeit, die Totzeit T , keine neu einfallenden Teilchen registriert werden.

Nach der Totzeit gibt es eine Erholungszeit T_E in der die Ladungsimpulse kleiner sind während die gesammelten Ionen neutralisiert werden, die Feldstärke aus Gleichung 1 wieder hergestellt wird und damit die sich die Ladungsimpulse wieder normalisieren und ihre vorherige Höhe erreichen.

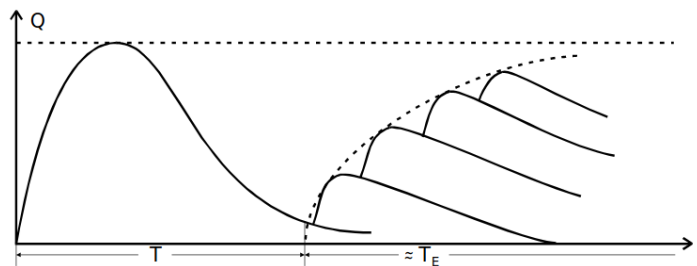


Abbildung 3: Die Ladungsimpulse gegen die Zeit aufgetragen, um die Tot- und Erholungszeit darzustellen.

Kommen die Ionen am Zählrohrmantel / der Kathode an, so wird bei ihrer Neutralisation genug Energie frei, dass sie Elektronen aus der Kathode lösen können. Durch die dadurch erzeugten Sekundärelektronen entstehen mehrere zeitlich versetzte Ladungsimpulse, die Nachentladungen genannt werden. Diese

täuschen ein einfallendes Teilchen vor und verfälschen somit die Messung. Um dies zu vermeiden werden Alkoholdämpfe zum Edelgas in den Stahlzylinder gemischt. Die Alkoholmoleküle haben eine geringere Ionisierungsenergie als die Gasatome, weshalb bei Zusammenstößen miteinander die Ersteren ionisiert werden. Die Alkoholmoleküle bewegen sich anstelle der Gasatome zur Kathode wo sie neutralisiert werden. Die dadurch freigesetzte Energie reicht nicht mehr aus um Elektronen aus der Kathode zu entfernen, da die Energie von den Schwingungen der vielatomigen Alkoholmoleküle verbraucht wird. Somit ist das Problem der Nachentladung gelöst.

2.1.4 Charakteristik des Zählrohrs

Wenn bei konstanter Intensität die Anzahl der registrierten Teilchen N gegen die Spannung U aufgetragen wird kann die Charakteristik eines Geiger-Müller-Zählrohrs bestimmt werden. Der Auslösebereich fängt bei der Spannung U_E an. Danach gibt es einen linearen Teil: das Plateau. Bei einem idealen Zählrohr wäre die Steigung des Plateaus gleich null. In der Realität lassen sich jedoch nicht alle Nachentladungen vermeiden, die mit steigender Spannung zunehmen. Deswegen hat das Plateau eine Steigung. Je geringer die Steigung und je länger das Plateau, desto qualitativ hochwertiger ist das Zählrohr.

Nach dem Plateau nehmen die Nachentladungen sehr stark zu, was zu einer Dauerentladung führt.

2.1.5 Ansprechvermögen des Zählrohrs

Darunter wird die Wahrscheinlichkeit verstanden, dass ein einfallendes Teilchen im Zählrohr registriert wird. Aufgrund des hohen Ionisationsvermögens der α - und β -Teilchen werden sie so gut wie zu 100% detektiert. Anders sieht es bei den γ -Quanten aus. Da Photonen nicht geladen sind und hochenergetische Photonen nur sehr wenig mit Materie wechselwirken liegt das Ansprechvermögen bei ca. 1%. Deshalb ist es nur sinnvoll das Geiger-Müller-Zählrohr einzusetzen, wenn die γ -Strahlung niederenergetisch ist und/oder eine hohe Intensität hat.

2.1.6 Totzeitmessung mit der Zwei-Quellen-Methode

Die Totzeit ist die Zeit in der nach einem registrierten Ereignis keine weiteren Ereignisse registriert werden können. Die Totzeitkorrektur ist dann anzuwenden, wenn die Zählrate n groß im Vergleich zur Totzeit T ist. Dann gilt für die wahre Zählrate n^* vereinfachend:

$$n^* = \frac{n}{1 - tn} \quad (2)$$

Bei der Zwei-Quellen-Methode werden, wie der Name schon sagt, zwei radioaktive Präparate benutzt. Es werden nacheinander erst die Zählrate eines Präparates n_1 , die Zählrate des Anderen n_2 und die Zählrate beider Präparate zusammen n_{1+2} aufgenommen. Dabei sollen die Präparate einen eigenen Platz relativ zum Zählrohr haben der während der Messungen gleich bleibt. Theoretisch sollte ohne Totzeit $n_{1+2} = n_1 + n_2$ gelten. Doch mit der Totzeit gilt, da beide Präparate

gemeinsam eine höhere Intensität und deshalb die Totzeit öfter ausgelöst wird:
 $n_{1+2} < n_1 + n_2$.

Mit Gleichung 2 für n_1^* , n_2^* und n_{1+2}^* und $n_{1+2}^* = n_1^* + n_2^*$ gilt nach Umformung T näherungsweise:

$$T \approx \frac{n_1 + n_2 - n_{1+2}^*}{2n_1 n_2} \quad (3)$$

3 Durchführung

Es wird ein Versuchsaufbau wie in ?? verwendet. Dabei fließt der Ionisationsstrom über den Anodendraht ab und erzeugt einen Spannungsimpuls, welcher über den Kondensator abgekoppelt wird, wenn nötig vergrößert wird und mit einem Zählgerät registriert wird.

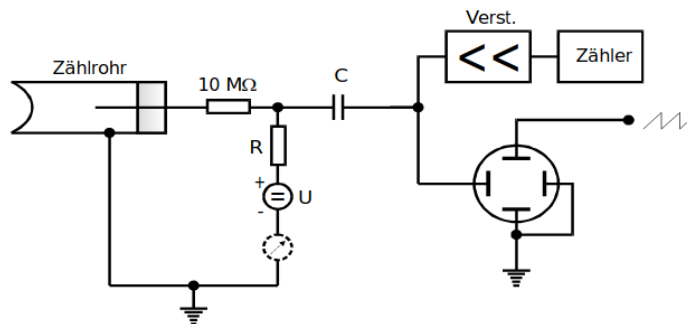


Abbildung 4: Ein schematischer Versuchsaufbau, um die nötigen Messwerte aufzunehmen.

3.1 Messung zur Bestimmung der Charakteristik des Zählrohrs

Eine β -Quelle wird vor das Eintrittsfenster des Zählrohrs gestellt und es wird die Anzahl der registrierten Teilchen in Abhängigkeit der Betriebsspannung in 10V Schritten gemessen. Dabei soll die Intensität der Strahlung niedrig sein / die Zählrate sollte nicht größer als 100/s sein, um die Totzeitkorrektur zu vermeiden, da diese nur bei, im Vergleich zur Totzeit, großen Zählraten Sinn macht.

Da die Plateau Steigung sehr gering ist müssen die Messwerte auch sehr genau sein. Es wird eine so lange Interaktionszeit (in diesem Fall $T = 60s$) genommen, dass der relative statistische Fehler jedes Messwertes unter 1% liegt. Damit ist die Anzahl der registrierten Teilchen relativ hoch.

3.2 Bestimmung der Ladung pro einfallendem Teilchen

Während der Aufnahme der Kennlinie wird der Zählstrom / Ionisationsstrom in 50V Schritten gemessen. Die Ablesegenauigkeit am Amperemeter ist $\Delta I = 0,05\mu s$.

3.3 Messung zur Bestimmung der Totzeit

Mit der Zwei-Quellen-Methode: Um die Intensität und damit die Zählrate zu steigern, um eine sinnvolle Totzeitkorrektur durchzuführen werden die beiden Quellen nah an das Zählrohr plziert. Um die Messung möglichst genau zu machen, beträgt die Integrationszeit $T = 120\text{s}$.

Mithilfe des Oszilloskopen: Hierbei werden wie schon vorher erwähnt, die Ladungsimpulse am Oszilloskopen gegen die Zeit aufgetragen, damit nach Abbildung 6 die Totzeit abgelesen werden kann.

4 Auswertung

4.1 Charakteristik des Zählrohres

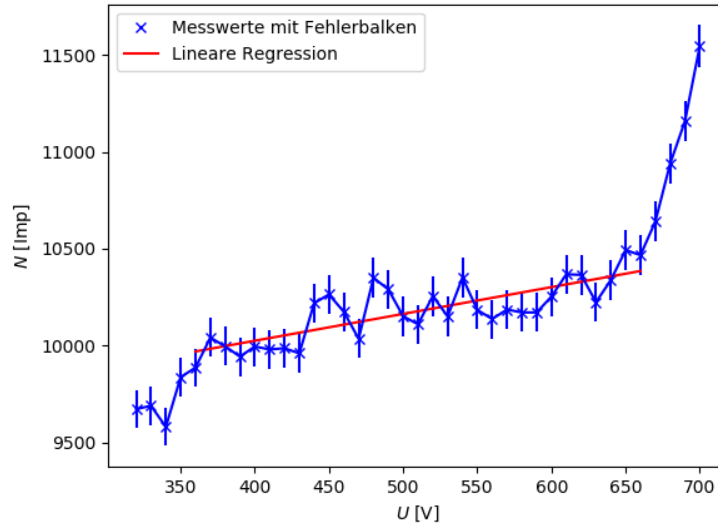


Abbildung 5: Die Zählrate gegen die Zählrohrspannung aufgetragen.

Da die Zählraten Poisson verteilt sind, gilt für die Messunsicherheiten der Werte der Kennlinie $\Delta n = \sqrt{n}$. Durch die Messpunkte des Plateaus wird eine Gerade mit der Steigung m und dem y-Achsenabschnitt b durchgeführt: $n(U) = m \cdot U + b$. Die Steigung der Geraden beträgt:

$$m = 1,39 \pm 0,04 \frac{1}{V} \quad (4)$$

Hiermit wird die PlateauSteigung S in % pro 100V bestimmt. Dazu werden zwei Spannungen mit 100V Differenz im Plateau ausgewählt wie z.B. $U_a = 400V$ und $U_e = 500V$. Mit diesen Werten wird dann anhand folgender Formel die Steigung berechnet.

$$S = \frac{n(U_e) - n(U_a)}{n(U_e)} \cdot 100\% \quad (5)$$

Oder es wird die etwas umgeschriebene Form von Gleichung 5 benutzt:

$$S = 100V \cdot \frac{m}{n(U_e)} \cdot 100\% = 1,36 \pm 0,04\% \quad (6)$$

4.2 Bestimmung der Totzeit

4.2.1 Oszilloskop

Hierbei wird die Zeit zwischen dem ersten und zweiten Impuls so gut wie möglich abgelesen.

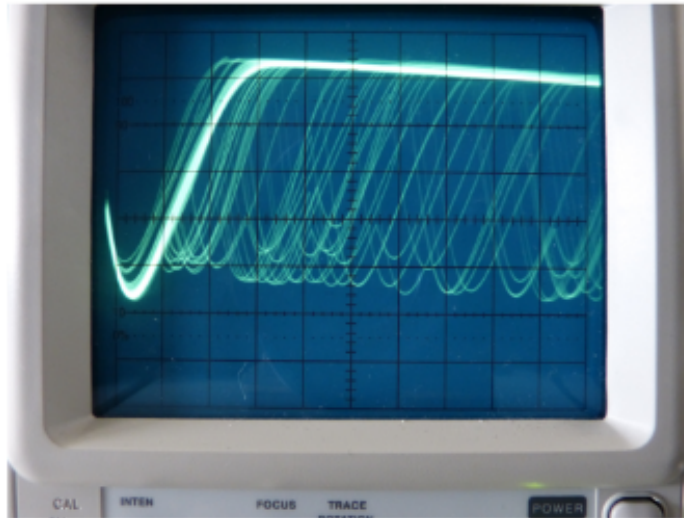


Abbildung 6: Eine Momentaufnahme eines Oszilloskops der Ladung gegen die Zeit aufgetragen. Ein Kästchen sind dabei $100\mu s$.

Die abgelesene Totzeit beträgt ca. $T = 100\mu s$.

4.2.2 Zwei-Quellen-Methode

Für der erste Präparat, das zweite Präparat und für beide Präparate zusammen wurden die folgenden Zählraten gemessen:

$$N_1 = 96041 \pm 310 \text{ Imp}$$

$$N_2 = 76518 \pm 277 \text{ Imp}$$

$$N_{1+2} = 158479 \pm 398 \text{ Imp}$$

Zuerst werden die Anzahlen der Ladungsimpulse anhand von $n = N/60s$ in Zählraten umgewandelt:

$$n_1 = 1601 \pm 5 \text{ Imp/s}$$

$$n_2 = 1275 \pm 5 \text{ Imp/s}$$

$$n_{1+2} = 2641 \pm 7 \text{ Imp/s}$$

Mit Gleichung 3 wird dann die Totzeit

$$T \approx (115 \pm 5) \mu s$$

berechnet.

4.3 Bestimmung der Ladung pro einfallendem Teilchen

Hier wird anhand folgender Formel

$$Z = \frac{I}{e \cdot n}$$

wo I der Ionisationsstrom, e die Elementarladung, n die Zählrate und Z die pro einfallendem Teilchen freigesetzte Ladung ist.

Tabelle 1: Hier sind die Messwerte der Spannung U , der Zählrate n , der pro einfallendem Teilchen freigesetzter Ladung Z und ihre Messunsicherheiten dargestellt.

I [nA]	n [1/s]	Z [$e \cdot 10^{10}$]
300 ± 50	164 ± 2	$1,14 \pm 0,19$
400 ± 50	167 ± 2	$1,50 \pm 0,19$
700 ± 50	171 ± 2	$2,55 \pm 0,18$
800 ± 50	169 ± 2	$2,95 \pm 0,19$
1000 ± 50	170 ± 2	$3,68 \pm 0,19$
1300 ± 50	171 ± 2	$4,75 \pm 0,19$
1400 ± 50	175 ± 2	$5,00 \pm 0,18$
1800 ± 50	192 ± 2	$5,84 \pm 0,17$

Jetzt wird die pro einfallendem Teilchen freigesetzter Ladung gegen die Spannung aufgetragen

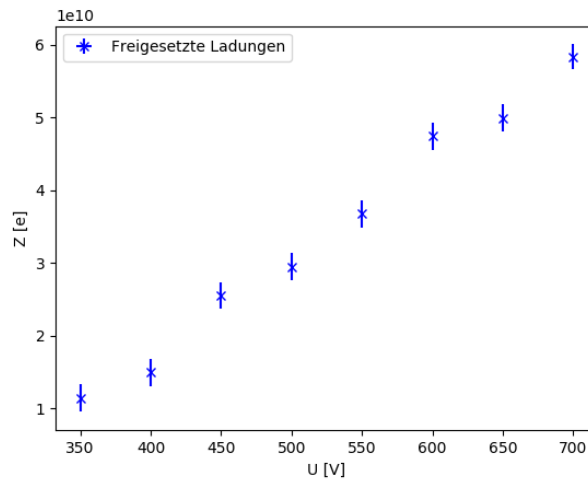


Abbildung 7: Die pro einfallendem Teilchen freigesetzter Ladung gegen die Spannung aufgetragen.

und es ist erkennbar, dass es einen linearen Zusammenhang zwischen den beiden Größen gibt.

5 Diskussion

Bei der Analyse des Plateaus wurde eine Plateauabnahme von $S = 1,36 \pm 0,04\%$ bestimmt. Außerdem ist es am Graphen abzulesen, dass der Plateaubereich von ca. 350V bis 650V geht. Darüber liegt der zuvermeidende Entladungsbereich und darunter der Proportionalbereich.

Die mit den beiden Methoden bestimmten Totzeiten liegen in der erwarteten Größenordnung von $100\mu\text{s}$.

Die pro einfallendem Teilchen freigesetzte Ladung ist, wie es an Abbildung 7 zu erkennen ist proportional zur Spannung.

Alles in allem wurden die theoretisch erwarteten Eigenschaften des Geiger-Müller-Zählrohr durch die Messungen bestätigt.

6 Daten

Tabelle 2: Das sind die Messwerte der Zählrate bei einer Integrationszeit von 60s, ihrer Unsicherheit und der Spannung.

U [V]	n [Imp/60s]	U [V]	n [Imp/60s]
320	9672 ± 99	520	10255 ± 102
330	9689 ± 99	530	10151 ± 101
340	9580 ± 98	540	10351 ± 102
350	9837 ± 100	550	10184 ± 101
360	9886 ± 100	560	10137 ± 101
370	10041 ± 101	570	10186 ± 101
380	9996 ± 100	580	10171 ± 101
390	9943 ± 100	590	10171 ± 101
400	9995 ± 100	600	10253 ± 102
410	9980 ± 100	610	10368 ± 102
420	9986 ± 100	620	10365 ± 102
430	9960 ± 100	630	10224 ± 102
440	10219 ± 102	640	10338 ± 102
450	10264 ± 102	650	10493 ± 103
460	10174 ± 101	660	10467 ± 103
470	10035 ± 101	670	10640 ± 104
480	10350 ± 102	680	10939 ± 105
490	10290 ± 102	690	11159 ± 106
500	10151 ± 101	700	11547 ± 108
510	10110 ± 101		

7 Literaturverzeichnis

- [1] *Versuchsanleitung V703 - Das Geiger-Müller-Zählrohr*. TU Dortmund, 2020
- [2] Physical Measurement Laboratory: *X-Ray Transition Energies Database* 10. Mai 2020 <https://physics.nist.gov/PhysRefData/XrayTrans/Html/search.html>
- [3] The NIST Reference on Constants, Units and Uncertainty: *Fundamental Physical Constants* 10. Mai 2020 https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?ecomwl|search_for=atomnuc!