Praktikumsprotokoll

Versuch Nr. 506
Die selbständige Gasentladung

Frank Hommes
und
Kilian Klug

Durchgeführt am:
22 Juni 2004

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **3**

2 Theoretische Hintergründe **3**
2.1 Die unselbständige Gasentladung 3
2.2 Die selbständige Gasentladung 3
2.3 Verhältnisse bei niedrigem Druck 6

3 Durchführung und Auswertung **7**
3.1 Strom-Spannungs-Charakteristiken 7
3.2 Bau eines Glimmstabilisators 7
3.3 Potentialverlauf 7
3.4 Lichtintensitätsmessung 8
3.5 Messung der Lichtintensität eines Kanalstrahl 8

4 Anhang **9**

1 Einleitung

Im Experiment ”Die selbständige Gasentladung” geht es um Elektrizitätsleitung in Gasen. Insbesondere soll der Zusammenhang zwischen Strom und Spannung und dessen Druckabhängigkeit untersucht, sowie eine Abschätzung der Lebensdauer angeregter Atome versucht werden.

2 Theoretische Hintergründe

Um normalerweise isolierende Gasvolumina leitfähig zu machen gibt es zwei Möglichkeiten. Entweder werden durch ionisierende Strahlung oder starke Aufheitzung Ladungsträger erzeugt. Unter Einfluss eines äußeren elektrischen Feldes bewegen sich diese auf die Elektroden zu und es kommt zur Entladung. Dabei unterscheidet man zwischen zwei Arten - der unselbständigen und der selbständigen Gasentladung.

2.1 Die unselbständige Gasentladung

Von unselbständiger Gasentladung spricht man, wenn nach entfernen des Ionisators die Entladung stoppt.

Bei niedrigen äußeren Feldstärken tritt zunächst Rekombination auf. Das bedeutet aufgrund der thermischen Bewegung der Ladungsträger treffen Elektronen und positive Ionenrümpfe zusammen und neutralisieren sich. Da sich ausserdem auch Ionen an die Gefäßwände anlagern, ist der messbare Entladungsstrom nicht unabhängig von der Spannung. Erst bei zunehmender Feldstärke tragen alle Ladungsträger zum gemessenen Strom bei, der dann unabhängig vom äußeren Feld wird. Dies nennt man Sättigungsbereich. Auch dieser Bereich endet jedoch bei einer gewissen Feldstärke und zwar dann wenn die Ladungsträger genügend stark beschleunigt werden um Stoßionisation zu bewirken. Trifft dies auch für die so erzeugten sekundären Elektronen und Ionen zu, dann bilden sich lawinenartig neue Ladungsträger und der Strom steigt sehr stark an.

2.2 Die selbständige Gasentladung

Neben der Stoßionisation tritt mit zunehmender Feldstärke ein weiterer Effekt auf: Positive Ionen können Elektronen aus der Kathode schlagen. Dadurch wird die Entladung unabhängig von äußeren Einflüssen, d.h. auch bei Entfernung des anfänglichen Ionisators bleibt der Entladungsvorgang bestehen. Auch für die selbständige Gasentladung wird also zunächst eine gewisse Zündspannung benötigt.

Nun kann es zu Leuchterscheinungen kommen anhand derer man im Gasvolumen verschiedene Bereiche unterscheidet, die in Abb.1 dargestellt sind. Für die Strukturierung entlang der Entladungsstrecke ist insbesondere der Potentialverlauf von Bedeutung.

Da die konkrete Gestalt der Leuchterscheinungen von vielen Parametern abhängt (z.B. Gasdruck, Gasart, Verunreinigungen, Gestalt des Gefäßes, Form und Material der Elektroden, etc.) sind hier beispielhaft die Verhältnisse für Luft in einem Glasgefäß, dessen Durchmesser klein gegen den Elektrodenabstand ist, bei einem Druck zwischen 0,1 und 0,5 mbar wiedergegeben.

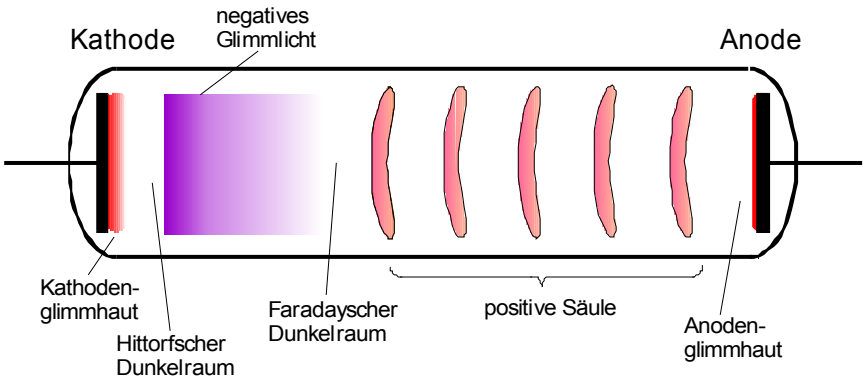


Abbildung 1: Leuchterscheinungen bei einer selbständigen Gasentladung

- Die **Kathodenglimmhaut** ist eine dünne, auf der Kathode aufliegende Schicht. Sie wird durch Ionen hervorgerufen, die dort Elektronen herausschlagen und sich gleichzeitig entladen. Diese Entladung erfolgt durch Übergang von einem angeregten in den Grundzustand, wobei das beobachtbare Licht emittiert wird.

- Im **Hittorfschen Dunkelraum** durchlaufen die von der Kathode stammenden Elektronen eine Beschleunigungspannung. Sie haben jedoch noch nicht genug Energie um nennenswerte Effekte hervorzurufen.

- Das **Negative Glimmlicht** setzt ein, sobald die beschleunigten Elektronen genug Energie haben, um Stoßionisationsprozesse auszulösen. Dabei werden laufend neue Ladungsträger erzeugt, wobei sich die Ionen aufgrund ihrer deutlich größeren Masse (und damit Trägheit) wesentlich langsamer wegbewegen als die Elektronen. Dies führt zur Ausbildung von Raumladungen, die zur Ausbildung eines starken elektrischen Feldes führen. Diese

große Potentialdifferenz bezeichnet man als Kathodenfall. Dieser hat für die selbständige Gasentladung eine essentielle Bedeutung, da durch ihn die im negativen Glimmlicht entstehenden Ionen bis zur Kathode stark genug beschleunigt werden können, um dort weitere Elektronen herauszuschlagen und so den Prozess auch ohne äußere Einflüsse aufrechtzuerhalten.

Der Bereich des negativen Glimmlichtes ist dabei an der Kathoden-Seite scharf abgegrenzt, geht jedoch auf der Anoden-Seite fließend in den nächsten Bereich über. Dies ist mit der Energieverteilung der Elektronen zu erklären, die bedingt, dass nicht alle Elektronen gleichviele Ionisationen und Anregungen ausführen können. Hinzu kommt die endliche Wahrscheinlichkeit für Zusammenstöße, da nicht alle energiereichen Elektronen auf gleicher Höhe auf Gasatome treffen.

- Der **Faradaysche Dunkelraum** beginnt fließend sobald die Ionisationswahrscheinlichkeit der Elektronen stark abnimmt. Im Bereich des Dunkelraumes bewegen sie sich nur noch relativ langsam, da ihre Energie größtenteil aufgebraucht ist.

- In der **Positiven Säule** kommt es erneut zu Leuchterscheinungen, da die Elektronen nun wieder Energie aufgenommen haben. Anders als zuvor bilden sich hier jedoch keine Raumladungen aus, so dass die Feldstärke weitgehend konstant und deutlich kleiner ist als im Bereich des Kathodenfalls; man spricht hier von einem quasineutralen Plasma. Die Ladungsträger bewegen sich hier insgesamt nur sehr langsam und driften auch zu den Gefäßwänden, was ein schwaches Radial-Feld hervorruft. Rekombinationen werden durch Stoßionisation wieder ausgeglichen. Für diese ist jedoch eine größere Beschleunigungsstrecke erforderlich.

- Der **Anodenfall** ist ein Potentialsprung, ähnlich dem Kathodenfall, er ist aber viel kleiner. Sein Ursprung liegt ganz analog in einer Raumladung die sich vor der Anode ausbildet. Diese wird durch Herausschlagen von Ionen durch auf die Anode treffende Elektronen erzeugt.

- Die **Anodenglimmhaut** ist, ebenfalls analog, eine Leuchterscheinung, die die Anode bedeckt. Sie wird durch auftreffende Elektronen erzeugt.

Die letzten Bereich sind nicht wesentlich für die Aufrechterhaltung der Gasentladung, da diese auch bestehen bleibt, wenn der Elektrodenabstand soweit verringert wird, dass sich Positive Säule und Anodenfallgebiet nicht ausbilden können.

Der Kathodenfall hingegen ist unbedingt notwendig. Man unterscheidet dabei zwischen zwei Arten - dem normalen und dem anormalen Kathodenfall:

- Vom **normalen Kathodenfall** spricht man, wenn die Kathode nur unvollständig vom Glimmlicht bedeckt ist. In diesem Fall ist sein Betrag unabhängig von der Stromstärke und dem Gasdruck. Die Strom-Spannungs-Charakteristik ist fallend. Aufgrund dieser Eigenschaften fanden Gasentladungsstrecken, bei denen der Kathodenfall dem Elektrodenabstand entspricht, früher Verwendung als Spannungsstabilisatoren.

- Der **anormale Kathodenfall** tritt bei größeren Stromstärken auf. Die Kathode ist dann vollständig vom Glimmlicht bedeckt und der Betrag des Kathodenfalls steigt mit zunehmendem Strom weiter an. Hier wird der Einfluss der Positiven Säule überkompensiert, so dass sich eine positive Strom-Spannungs-Charakteristik ergibt.

2.3 Verhältnisse bei niedrigem Druck

Die oben geschilderten Vorgänge gelten nicht bei sehr kleinen Drücken. Sinkt der Druck zu stark ab, dann ist auch die Stoßwahrscheinlichkeit kleiner und der Entladungsstrom nimmt ab. Zudem erreichen Elektronen höhere Geschwindigkeiten und können auch z.B. die Gefäßwände zum Leuchten anregen. Diese schnellen Elektronen nennt man Kathodenstrahlen.

Daneben ist auch noch eine weitere Strahlungsart zu beobachten, wenn man die Kathode mit einer Bohrung versieht. Dort treten dann positive Ionen aus, die im Hittorfschen Dunkelraum durch Stoßionisation entstanden sind und den gesamten Kathodenfall durchlaufen haben, so dass sie eine hohe Geschwindigkeit erreicht haben. Man spricht in diesem Fall vom sogenannten Kanalstrahl.

Da die Ionen sich nach der Kathode mit konstanter Geschwindigkeit bewegen und die Lichintensität exponentiell abnimmt, kann man Rückschlüsse auf die Lebensdauer der angeregten Zustände der Ionen ziehen. Unter Berücksichtigung der statistischen Eigenschaften der Zerfälle angeregter Atome folgt, dass die Verteilungsfunktion der Individuallebensdauern einer sehr großen Anzahl von Atomen einem exponentiellen Zeitgesetz genügt:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \tag{1}$$

Für die (gemittelte) Lebensdauer τ eine unendlich großen Zahl angeregter Atome ergibt sich damit

$$\tau = E \cdot t = \frac{1}{\lambda} \tag{2}$$

3 Durchführung und Auswertung

3.1 Strom-Spannungs-Charakteristiken

Zunächst nehmen wir zwei Strom-Spannungs-Charakteristiken der Gasentladungsstrecke in Luft auf. Eine, bei einem Druck von 0,1 mbar und eine bei 1 mbar. Der Abstand der Anode zur Kathode beträgt bei uns 0,3 m. Nun berechnen wir den differentiellen Innenwiderstand dU/dI mit Hilfe einer linearen Ausgleichsgeraden über die Messpunkte um den Wert von 1 mA. Dies ist in Diagramm 2 für den Druck von 0,1 mbar dargestellt und wir erhalten als Ausgleichsgerade folgende Gleichung:

$$f(x) = (170,6 \pm 4,9) \cdot x + (477,7 \pm 5,2) \tag{3}$$

Da die Steigung positiv ist, schließen wir auf den anormalen Kathodenfall.

Genauso gehen wir bei einem Druck von 1 mbar vor, wie in Diagramm 3 zu erkennen ist. Wir erhalten als Ausgleichsgerade:

$$f(x) = (-71,4 \pm 10,7) \cdot x + (840,7 \pm 11,4) \tag{4}$$

Somit liegt bei einem Druck von 1 mbar ein normaler Kathodenfall vor. Also ist

$$\frac{dU}{dI} = -71,4 \pm 10,7 \quad .$$

3.2 Bau eines Glimmstabilisators

Ein positiver Nebeneffekt des ”Normalen Kathodenfalls” ist, dass bei steigendem und fallendem Strom die Spannung gleich bleibt. Vor dem Aufkommen der Halbleitertechnologie wurden so Spannungsstabilisator gebaut, welche auch Glimmstabilisatoren gennant werden. Dazu muss der Abstand der Kathode zur Anode soweit verkleinert werden, dass die Positive Säule komplett verschwindet. Unser Abstand betrug 0,5 cm, der Druck 1 mbar. Die aus einer Messreihe erhaltenen Werte sind in Tab. 1 aufgeführt. Es ergibt sich aus diesen Diagramm 4.

Man erkennt deutlich, dass ab 0,5 mA die Spannung stabil gehalten wird. Jedoch jeweils nur für kleine Bereiche von ca. 0,4 mA.

3.3 Potentialverlauf

Weiterhin haben wir den Potentialverlauf längs der Entladungsstrecke von 0,3 m aufgenommen. Wir erhalten die Messwerte in Luft bei einem Druck von 1 mbar und einem Strom von 2 mA, welche in Tabelle 2 aufgetragen sind.

Daraus erhalten wir das Diagramm 5 und lesen eine Potentialdifferenz von 675 V zwischen Kathode und Anode ab. Die Messwerte sind leider nicht ideal,

aber man kann den Kathodenfall leicht angedeutet zwischen 325 V und 675 V erkennen. Somit ergibt er sich zu 350 V.

Die erhaltenen Werte bei einem Druck von 0,06 und einem Strom von 1,8 mA sind in Tab. 3 dargestellt.

Das zugehörige Diagramm ist 6 und befindet sich im Anhang. Den Kathodenfall lesen wir als Differenz zwischen dem ersten Wert und dem ersten lokalen Maximum ab. Damit ergibt sich der Kathodenfall zu 739 V.

3.4 Lichtintensitätsmessung

Mit einem Druck von 0,06 mbar und einen Strom von 1,8 mA soll nun der Verlauf der Lichtentensität mittels einer verschiebbaren Photodiode gemessen werden. Wir haben die Lichtintensitäten aus Tab. 4 gemessen und daraus das Digramm 7 erstellt.

Nun soll noch die Lichtintensitätsmessung mit dem Potentialverlauf jeweils bei 0,06 mbar verglichen werden. Dafür tragen wir beides zusammen in das Diagramm 8 ein.

Man erkennt, dass die beiden Kurven in gewissem Maße korrelieren. So steigt das Potential im Bereich des Kathodenfalls schnell an, um dann auf relativ konstantem Niveau zu bleiben. Die Lichtintensität ist im Gegensatz dazu nahe der Kathode am größten (Kathodenglimmhaut) und nimmt mit zunehmendem Abstand ab. Die Kurve für die Lichtintensiät weist aber zudem bei etwa 30 mm ein lokales Maximum auf (negatives Glimmlicht), sinkt danach jedoch wieder schnell ab. Genauer betrachtet ist ihr Verlauf dabei, anders als das annähernd konstante Potential, asymptotisch abnehmend. Die Schwankungen in der Spannungs-Kurve lassen sich nicht eindeutig zuordnen und sind damit wohl (zumindest teilweise) auf ungenaue Messungen zurückzuführen.

3.5 Messung der Lichtintensität eines Kanalstrahl

In diesem Teil der Versuches benutzen wir anstelle von Luft Helium, um den Effekt besser beobachten und Messen zu können! Wir messen dafür die Lichtintensität des Kanalstrahls hinter der Kathode mit einer Photodiode aus und erhalten die Tabelle 5 bei einem Druck von 0,045 mbar und einem Strom von 0,9 mA.

Um nun die gemittelte Lebensdauer τ zu erhalten, berechnen wir zuerst die Flugzeit nach:

$$\begin{aligned} \frac{1}{2}mv^2 &= eU \\ v &= \sqrt{\frac{2eU}{m}} \end{aligned}$$

Mit einer Beschleunigungsspannung von 410 V ergibt sich somit:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{\frac{2 \cdot 1,609 \cdot 10^{-19} 410}{6,645 \cdot 10^{-24}}} \\ v &= 4456 \frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}} \end{aligned}$$

Weiterhin gilt:

$$\begin{aligned} t &= \frac{s}{v} \\ t &= \frac{s}{\sqrt{\frac{2eU}{m}}} \end{aligned}$$

Somit erhalten Digramm 9 und die Wertepaare in Tab. 6.

Die Funktion der Ausgleichsgerade hat folgende Gestalt:

$$f(x) = (-3,21 \pm 0,08)x - (2,04 \pm 0,03)$$

Da die Steigung die reziproke mittlere Lebensdauer ist, ergibt sich τ zu (311 $\pm$8) ns. Weiterhin ergibt sich die mittlere Freie Weglänge bei einem Druck von 0,045 mbar nach:

$$\overline{w} = \frac{V_m p_0 T}{\sqrt{2}\pi (2r)^2 N_L p T_0} \text{ zu:} \tag{5}$$

$$\overline{w} = 5,6 \mu\mathrm{m} \tag{6}$$

4 Anhang

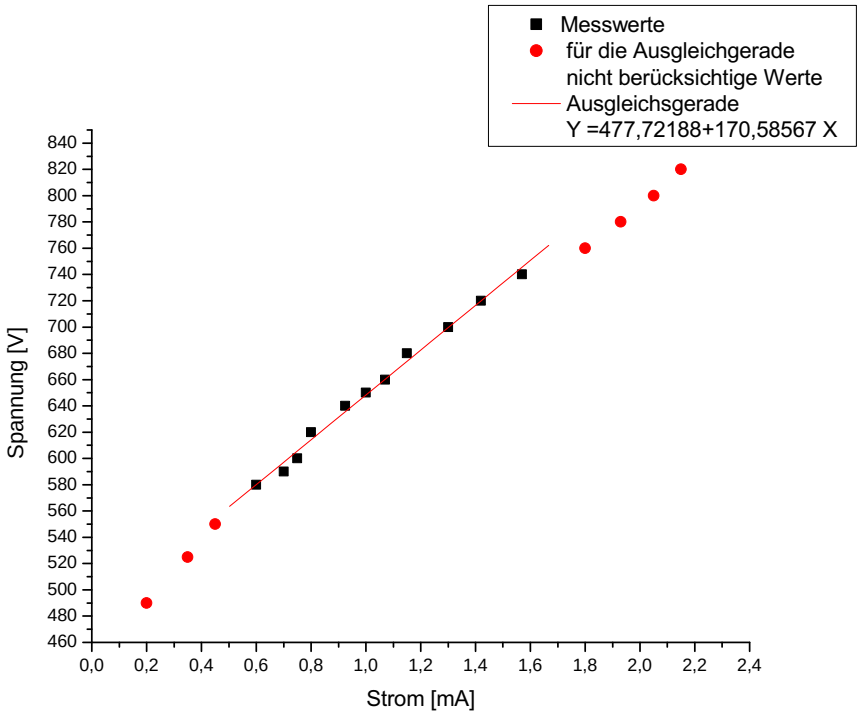


Abbildung 2: Anormaler Kathodenfall bei 0,1 mbar

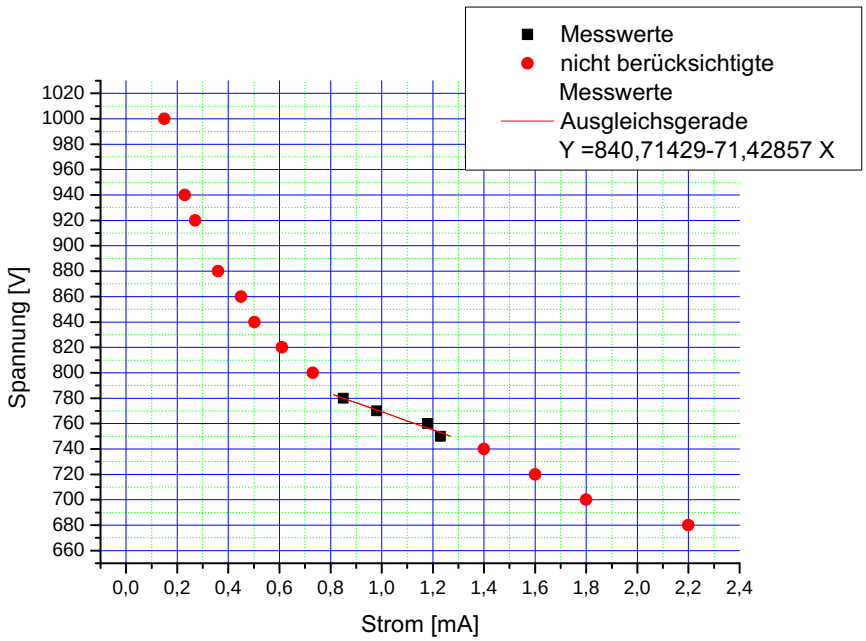


Abbildung 3: Normaler Kathodenfall bei 1 mbar

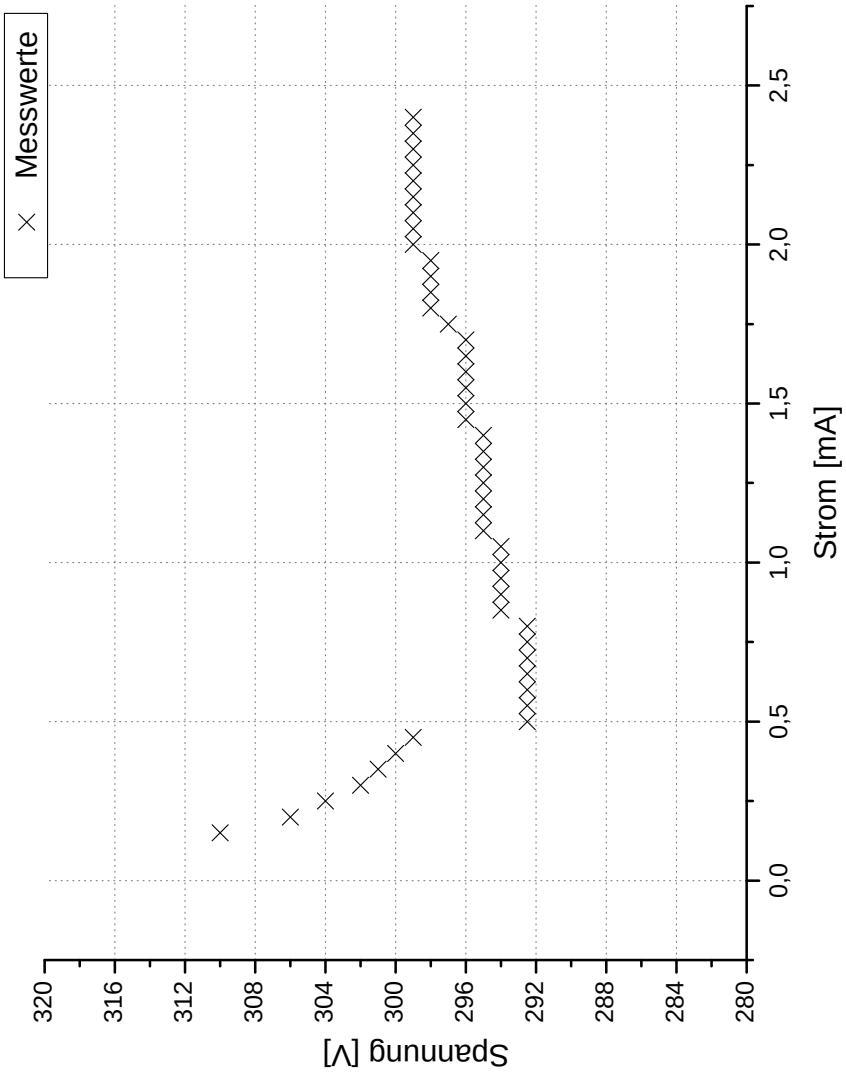


Abbildung 4: Effektivität des Glimmstabilisators

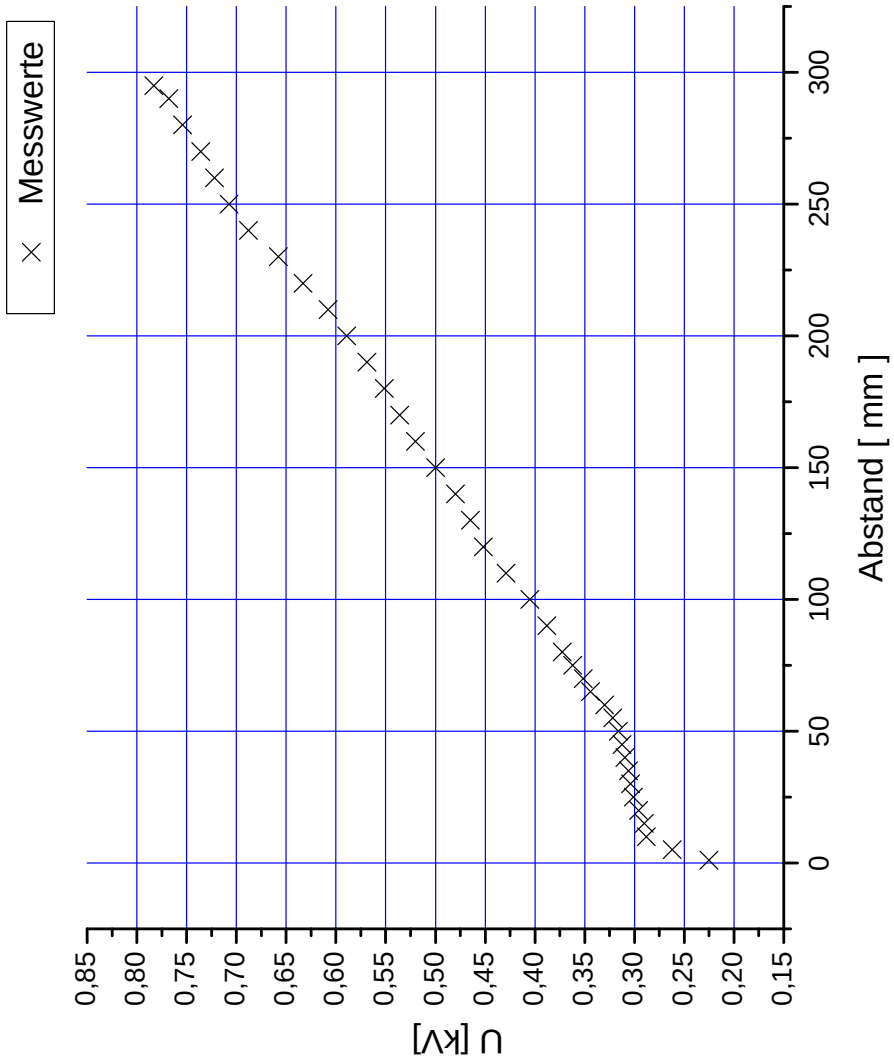


Abbildung 5: Potentialverlauf bei einem Druck von 1 mbar und einem Strom von 2 mA

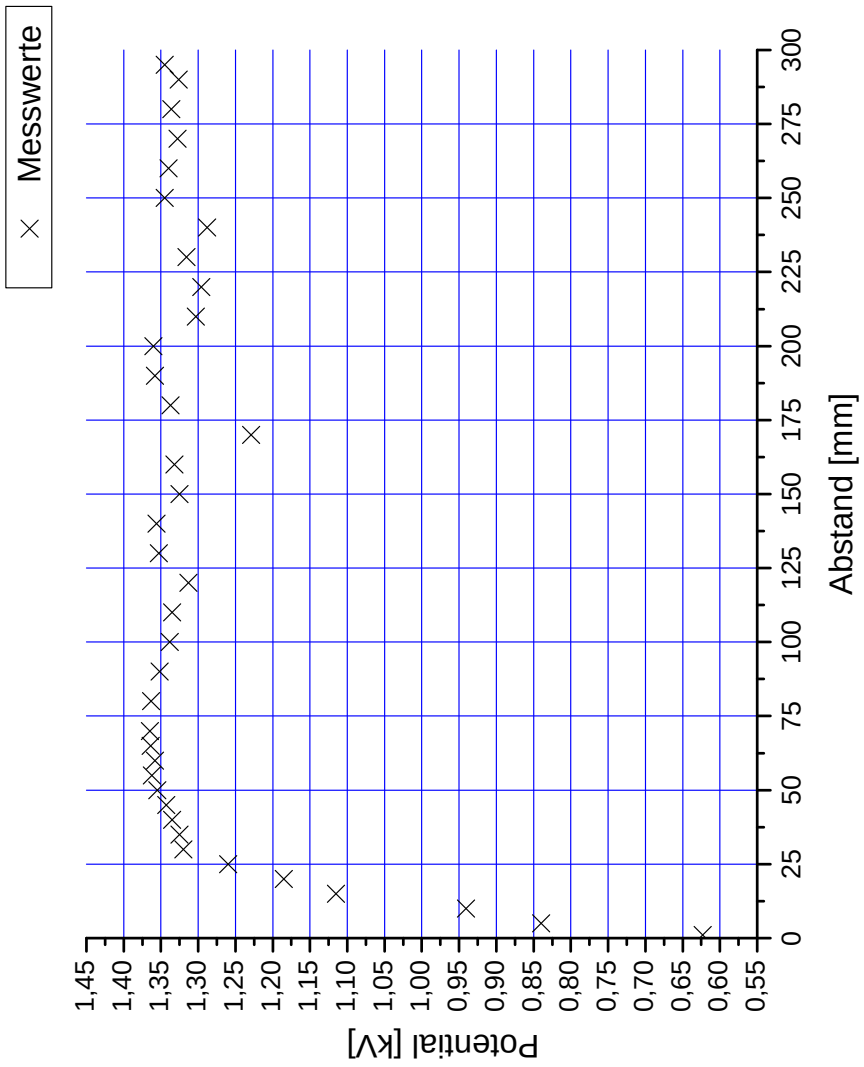


Abbildung 6: Potentialverlauf bei einem Druck von 0,06 mbar und einem Strom von 1,8 mA

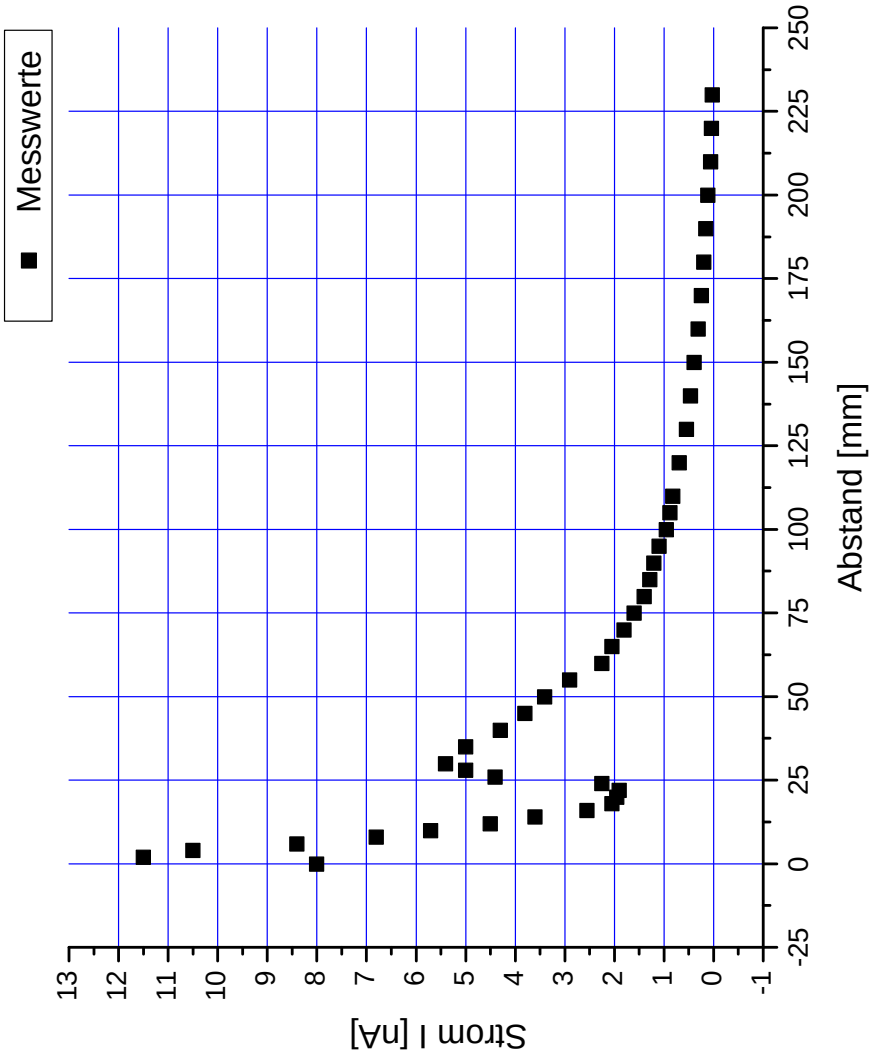


Abbildung 7: Verlauf des Photostroms

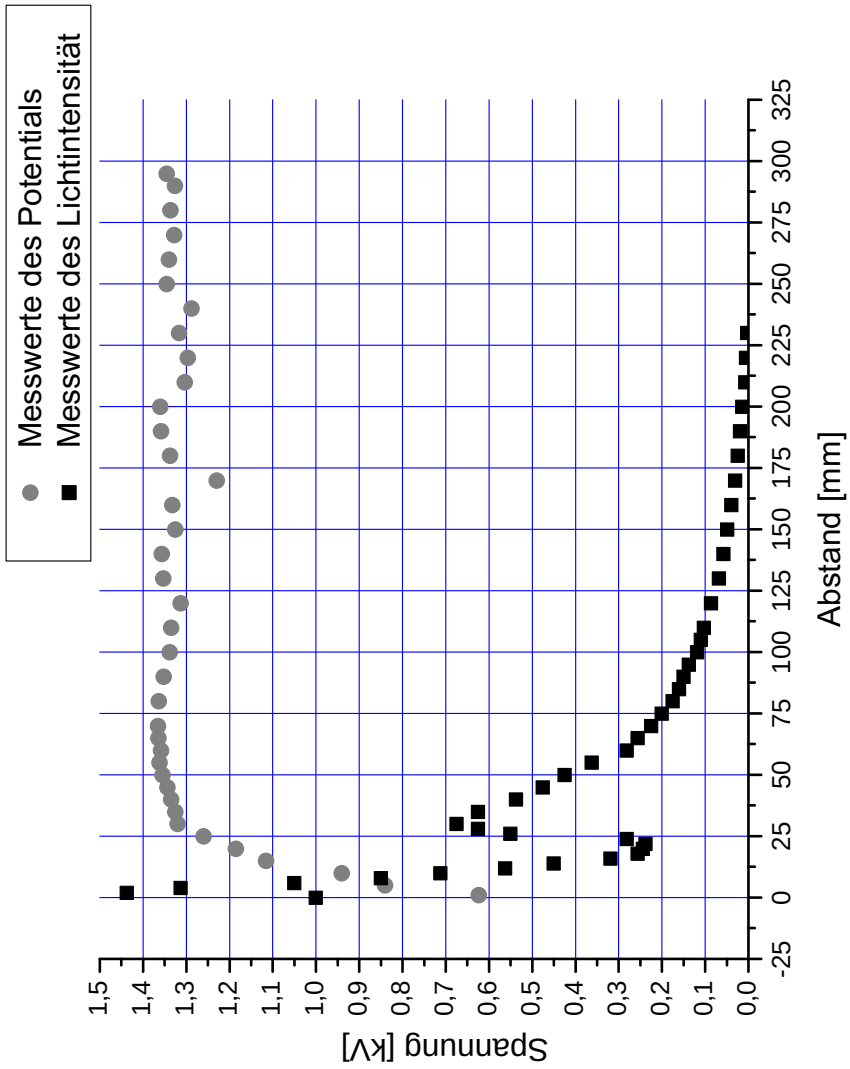


Abbildung 8: Vergleich des Photostroms mit dem Potential

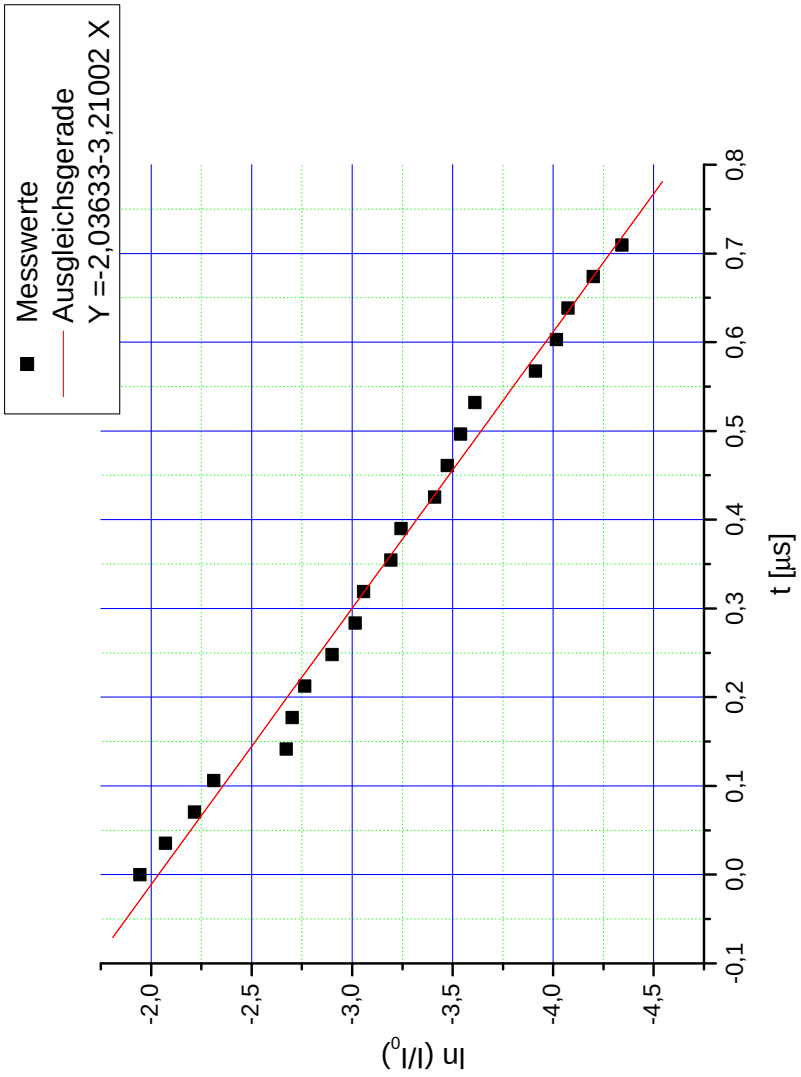


Abbildung 9: mittlere Lebensdauer der Ionen

U [V]	I [mA]	U [V]	I[mA]
310	0,15	295	1,30
306	0,20	295	1,35
304	0,25	295	1,40
302	0,30	296	1,45
301	0,35	296	1,50
300	0,40	296	1,55
299	0,45	296	1,60
292,5	0,50	296	1,65
292,5	0,55	296	1,70
292,5	0,60	297	1,75
292,5	0,65	298	1,80
292,5	0,70	298	1,85
292,5	0,75	298	1,90
292,5	0,80	298	1,95
294	0,85	299	2,00
294	0,90	299	2,05
294	0,95	299	2,10
294	1,00	299	2,15
294	1,05	299	2,20
295	1,10	299	2,25
295	1,15	299	2,30
295	1,20	299	2,35
295	1,25	299	2,40

Tabelle 1: Spannungsstabilisationsmesswerte

Abstand [mm]	U [kV]	Abstand [mm]	U [kV]
1	0,225	120	0,452
5	0,262	130	0,465
10	0,288	140	0,480
15	0,290	150	0,500
20	0,296	160	0,520
25	0,301	170	0,536
30	0,304	180	0,552
35	0,306	190	0,569
40	0,3095	200	0,589
45	0,3125	210	0,608
50	0,316	220	0,633
55	0,322	230	0,658
60	0,330	240	0,688
65	0,344	250	0,7075
70	0,3515	260	0,722
75	0,362	270	0,736
80	0,3725	280	0,754
90	0,388	290	0,768
100	0,405	295	0,783
110	0,429		

Tabelle 2: Potentialverlauf bei einem Druck von 1 mbar und einem Strom von 2 mA

Abstand [mm]	U [kV]	Abstand [mm]	U [kV]
1	0,623	120	1,313
5	0,84	130	1,353
10	0,9405	140	1,356
15	1,115	150	1,325
20	1,185	160	1,332
25	1,26	170	1,229
30	1,32	180	1,337
35	1,325	190	1,358
40	1,335	200	1,36
45	1,343	210	1,303
50	1,355	220	1,296
55	1,362	230	1,316
60	1,358	240	1,288
65	1,364	250	1,345
70	1,365	260	1,34
80	1,3635	270	1,328
90	1,352	280	1,336
100	1,338	290	1,326
110	1,335	295	1,345

Tabelle 3: Potentialverlauf bei einem Druck von 0,06 mbar und einem Strom von 1,8 mA

Abstand [mm]	Photostrom I [nA]	Abstand [mm]	Photostrom I [nA]
0	8,0	650	2,050
2	11,500	70	1,800
4	10,500	75	1,600
6	8,400	80	1,400
8	6,800	85	1,280
10	5,700	90	1,200
12	4,500	95	1,100
14	3,600	100	0,950
16	2,550	105	0,880
18	2,050	110	0,820
20	1,950	120	0,690
22	1,900	130	0,540
24	2,250	140	0,460
26	4,400	150	0,390
28	5,000	160	0,310
30	5,400	170	0,245
35	5,000	180	0,195
40	4,300	190	0,155
45	3,800	200	0,110
50	3,400	210	0,056
55	2,900	220	0,040
60	2,250	230	0,024

Tabelle 4: Messwerte zur Lichtintensitätsmessung

Abstand [mm]	Photostrom I* [nA]	Abstand [mm]	Photostrom I* [nA]
0	0,143	55	0,039
5	0,126	60	0,033
10	0,109	65	0,031
15	0,099	70	0,029
20	0,069	75	0,027
25	0,067	80	0,02
30	0,063	85	0,018
35	0,055	90	0,017
40	0,049	95	0,015
45	0,047	100	0,013
50	0,041		

Tabelle 5: Kanalstrahlintensität in Helium

*Der Photostrom ergibt sich aus dem Photostrom plus dem Dunkelstrom von 0,087 ($I + I_{dunkel}$)

Abstand [mm]	(Lichtintensität + Dunkelstrom) [nA]	Zeit [μ s]	$ln(S(s) - S_u$ s
0	0,143	0,000	-1,945
5	0,126	0,035	-2,071
10	0,109	0,071	-2,216
15	0,099	0,106	-2,313
20	0,069	0,142	-2,674
25	0,067	0,177	-2,703
30	0,063	0,213	-2,765
35	0,055	0,248	-2,900
40	0,049	0,284	-3,016
45	0,047	0,319	-3,058
50	0,041	0,355	-3,194
55	0,039	0,390	-3,244
60	0,033	0,426	-3,411
65	0,031	0,461	-3,474
70	0,029	0,497	-3,540
75	0,027	0,532	-3,612
80	0,02	0,568	-3,912
85	0,018	0,603	-4,017
90	0,017	0,639	-4,075
95	0,015	0,674	-4,200
100	0,013	0,710	-4,343

Tabelle 6: mittlere Lebensdauer der Ionen