

TU DRESDEN

FORTGESCHRITTENENPRAKTIKUM

PRAKTIKUMSBERICHT

Elektronenstrahlionenquelle

Autoren:

Toni EHMCKE
Christian SIEGEL

Betreuer:

Dr. G. ZSCHORNACK

Dresden, 4. März 2016

Durchführungstag, 22. Januar 2016

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung und Grundlagen	2
1.1	Elektrisch geladene Teilchen in einem homogenen Magnetfeld	2
2	Versuchsdurchführung und Auswertung	2
2.1	Einstellen der Betriebsparameter	2
2.2	Aufnahme und Analyse eines Übersichtsspektrums	3
2.3	Einfluss des Drucks auf die Ionenzustände im Strahlkanal . . .	5
3	Auswertung	7
4	Diskussion und Zusammenfassung	7

1 Einführung und Grundlagen

1.1 Elektrisch geladene Teilchen in einem homogenen Magnetfeld

Um später die verschiedenen elektrisch geladenen Argonionen voneinander trennen zu können, ist im Niederenergiestrahlskanal ein 90° -Dipol-Magnet verbaut, der ein homogenes Magnetfeld erzeugt und die Ionen auf eine Kreisbahn zwingt. Im Folgenden soll die Dynamik dieser Bewegung erörtert werden.

Betrachte dafür ein elektrisch geladenes Teilchen mit Ladung $Q = q \cdot e$ und Masse m . Es wurde vorher von einem elektrischen Feld mit einer Spannung U_B auf die Geschwindigkeit $\vec{v}(t=0) = v\vec{e}_x$ beschleunigt und befinde sich anschließend in einem homogenen Magnetfeld $\vec{B} = B\vec{e}_z$. In diesem erfährt es die *Lorentzkraft*:

$$\vec{F}_L(t) = Q \cdot \vec{v}(t) \times \vec{B} = QB(-v_x(t)\vec{e}_x + v_y(t)\vec{e}_y) = m \cdot \dot{\vec{v}}(t) \perp \vec{v}(t). \quad (1)$$

Die z-Komponente ändert sich dabei nicht, somit findet die Bewegung o.B.d.A. in der x-y-Ebene statt. Da die Kraft zusätzlich zu jedem Zeitpunkt t senkrecht zu der Geschwindigkeit ist, entsteht eine Bewegung auf einer Kreisbahn, deren Radius R durch das Kräftegleichgewicht zwischen Lorentzkraft (1) und der Zentrifugalkraft(2) bestimmt wird:

$$\vec{F}_Z = -\frac{m \cdot v^2}{R} \cdot \frac{\vec{F}_L}{|\vec{F}_L|} \stackrel{!}{=} -\vec{F}_L \quad (2)$$

$$\Rightarrow R = \frac{mv}{QB} = \sqrt{\frac{2U_B m}{QB^2}} \quad (3)$$

Wobei (3) aus der Ersetzung der Geschwindigkeit durch die Beschleunigungsspannung $U_B Q = mv^2/2$ erfolgte. Im Experiment ist der Radius $R = 461$ mm des Dipolmagneten vorgegeben, somit können durch Variation der Magnetflussdichte B Teilchen einer bestimmten spezifischen Ladung Q/m ausgefiltert werden. Dies wird später außerdem dazu genutzt, um Fremdionen im Übersichtsspektrum bei niedrigen Drücken identifizieren zu können, wobei die Zuordnung durch die Verhältnisbildung Masse zu Ladung nicht unbedingt eindeutig ist.

2 Versuchsdurchführung und Auswertung

2.1 Einstellen der Betriebsparameter

Um die folgenden Messungen unter möglichst günstigen Bedingungen durchführen zu können, wurden zunächst unter Anweisung des Betreuers die Betriebsparameter der Ionenfalle Überprüfung und gegebenenfalls optimiert:

- linke Potentialwand $U_0 = 11,857 \text{ kV}$
- Potentialtopf ($\hat{=}$ Beschleunigungsspannung) $U_A = 11,707 \text{ kV} = U_B$
- rechte Potentialwand $U_{B1} = 12,007 \text{ kV}$
- Extraktionszeit $t_{ext} = 20 \text{ ms}$

Da die Abhängigkeit der Argonionisationen von Arbeitsdruck und Ionisationszeit innerhalb des Strahlrohrs untersucht werden soll, werden diese in den folgenden Abschnitten genauer spezifiziert. Abbildung 1 skizziert nochmals die Potentialverhältnisse entlang der Strahlachse.

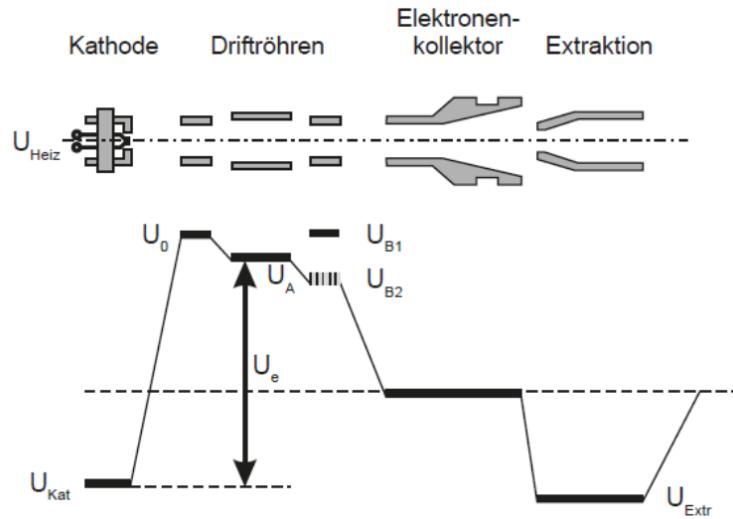


Abbildung 1: Elektrodenanordnung (oben) mit zugehörigem Potentialverlauf in der Ionenfalle.[01]

2.2 Aufnahme und Analyse eines Übersichtsspektrums

Um die einzelnen Ionisationszustände des Argons sauber voneinander trennen zu können, ist es notwendig zu wissen, wie man den Strom des 90° -Dipol-Magneten wählen muss. Im Experiment sollen die Ionen Ar^{8+} bis Ar^{18+} untersucht werden. Mit Hilfe von Formel (3) wird das Magnetfeld abgeschätzt, um die gewünschten Ionen auszufiltern. Es ergibt sich ein Messintervall von $B = 50,4 \dots 75,6 \text{ mT}$, wobei die untere Grenze den höchsten Ionisationszustand Ar^{18+} und die untere Grenze den niedrigsten Zustand Ar^{8+} herausfiltert. Die Einstellung dieser Magnetflussdichten erfolgt über die Variation des Spulenstroms von $17,3 \text{ A}$ bis $27,2 \text{ A}$. Bei der ersten Messung wurde die Ionisationszeit mit $t_{ion} = 380 \text{ ms}$ zu hoch gewählt, um damit niedrigere Ladungszustände als Ar^{13+} zu erzeugen. Dieser Effekt wird im zweiten

Versuchsteil näher erörtert. Abbildung 2 zeigt das dabei entstandene Übersichtsspektrum, welches bei mittlerem Arbeitsdruck von $p = 7 \cdot 10^{-9}$ mbar entstanden ist. Die Ladung Q wurde dabei über 5 Zyklen integriert. Um ein vollständiges Übersichtsspektrum zu erhalten, wurde die Messung am Ende des Versuchstages mit einer niedrigeren Ionisationszeit $t_{ion} = 80$ ms und einem nicht signifikant erhöhten Arbeitsdruck $p = 2 \cdot 10^{-8}$ mbar wiederholt. Diese Wahl maximiert die Häufigkeit von mittleren Ionisationszuständen um Ar^{12} und ermöglicht die Messung aller möglicher Peaks. Abbildung 3 zeigt das zugehörige Übersichtsspektrum, bei dem ebenfalls über 5 Zyklen integriert wurde.

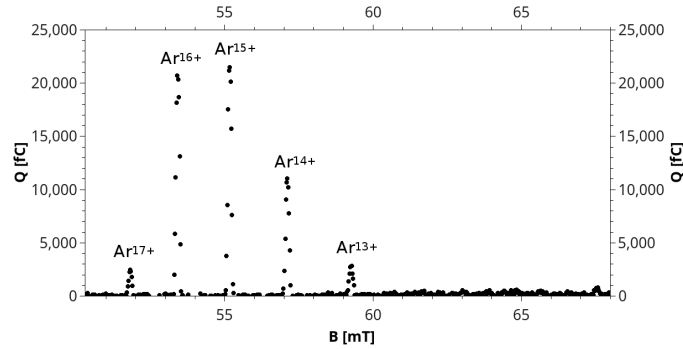


Abbildung 2: Übersichtsspektrum bei $p = 7 \cdot 10^{-9}$ mbar und $t_{ion} = 380$ ms. Die Peaks niedriger Ladungszustände verschwinden aufgrund der zu hohen Ionisationszeit.

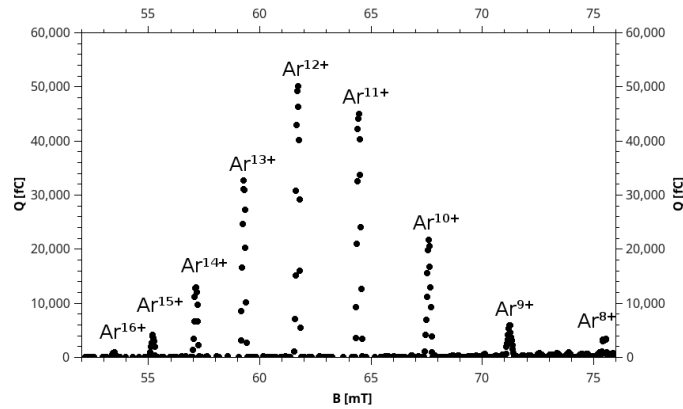


Abbildung 3: Übersichtsspektrum bei mittlerem Arbeitsdruck $p = 2 \cdot 10^{-8}$ mbar und $t_{ion} = 80$ ms. Alle gewünschten Peaks sind erkennbar, da nun mittlere Ladungszustände am häufigsten auftreten.

Durch Ermitteln der Peakpositionen erhält man die Magnetflussdichten, die

im zweiten Versuchsteil genutzt werden sollen, um die Ladungszustände zu isolieren. Um zu prüfen, ob die in Abbildung 3 eingezeichnete Zuordnung korrekt ist, wurde ein quadratischer Fit der reziproken relativen Ladung e/Q , welche nach (4) proportional zu B^2 ist, vorgenommen.

$$\frac{1}{q} = \frac{e}{Q} = \frac{r^2 e}{2U_B m_{Ar}} \cdot B^2 \simeq 21,92 \frac{1}{T^2} \cdot B^2 \quad (4)$$

Wobei $m_{Ar} = 39,9$ u die Masse von Argon ist. Abbildung 4 zeigt das Ergebnis dieses Fits mit dem Ansatz $1/q = A \cdot B^2$. Dabei wurde die Proportionalitätskonstante mit $A = (21,7 \pm 0,1)/T^2$ bestimmt, was nach (4) sehr gut zum theoretischen Wert passt.

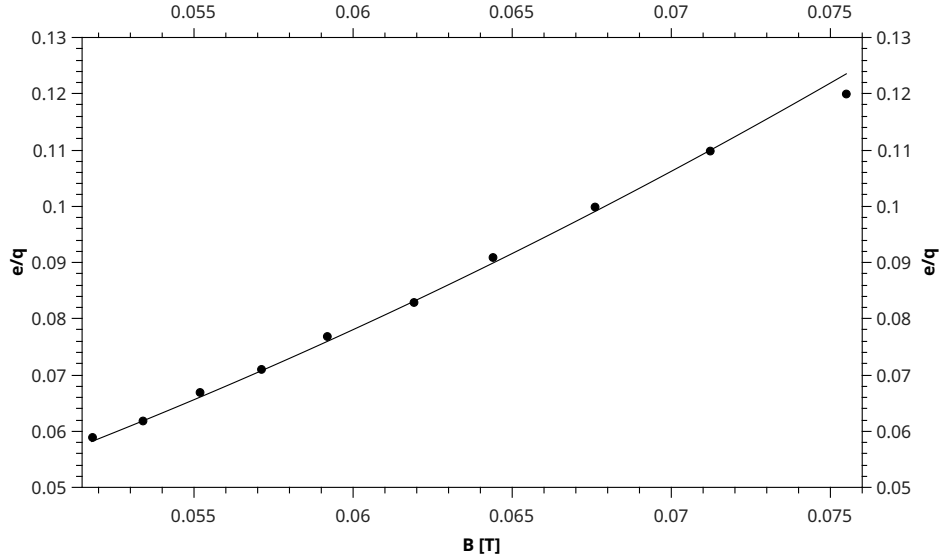


Abbildung 4: Quadratischer Fit, um Zuordnung der Peaks aus Abbildung 3 zu verifizieren.

2.3 Einfluss des Drucks auf die Ionenzustände im Strahlkanal

Um den Einfluss des Arbeitsdrucks im Niederenergiestrahlskanal zu untersuchen, wurden zwei weitere Übersichtsspektren mit gleicher Ionisationszeit von $t_{ion} = 380$ ms und Messzeit von $t_{mess} = 2000$ ms (5 Zyklen), aber mit verschiedenen Drücken aufgenommen. Abbildung 5 zeigt dabei den direkten Vergleich vom Spektrum mit niedrigem Arbeitsdruck $p_1 = 2 \cdot 10^{-9}$ mbar (rot) und hohem Arbeitsdruck $p_2 = 5 \cdot 10^{-8}$ mbar (blau). Es fällt auf, dass bei

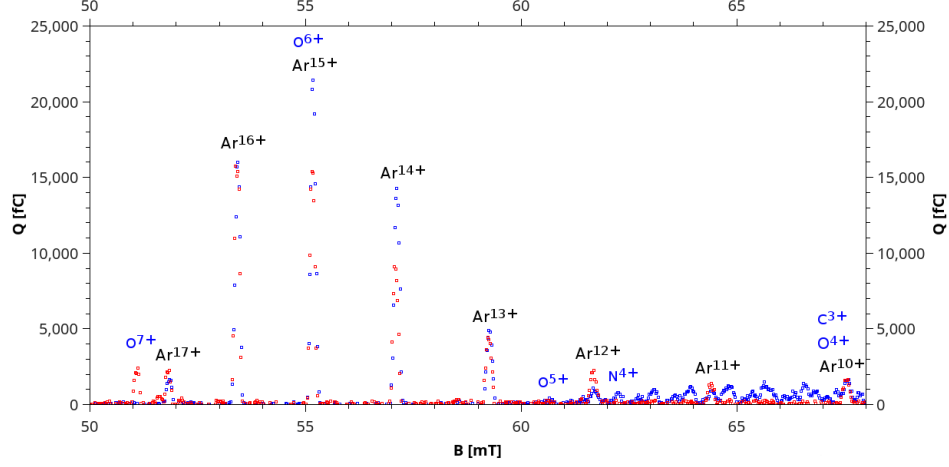
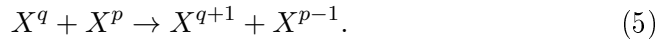


Abbildung 5: Übersichtsspektrum mit $t_{ion} = 380$ ms unter verschiedenen Drücken $p_1 = 2 \cdot 10^{-9}$ mbar (rot) und $p_2 = 5 \cdot 10^{-8}$ mbar (blau). In blau beschriftete Peaks kennzeichnen mögliche Fremdionen im Strahlkanal.

niedrigen Drücken ein viel geringerer Ionenstrom durch die Anlage fließt und somit am Faradaycup weniger Ladung pro Zeiteinheit nachgewiesen wird. Die kinetische Gastheorie liefert einen Zugang, um dies zu verstehen: Druck ist ein Maß für die Kraft, die Gasmoleküle auf die Gefäßwand ausüben. Je niedriger der Druck, desto weniger Kollisionen der Teilchen gibt es mit der Gefäßwand und auch untereinander. Dies führt zu einer geringeren mittleren Geschwindigkeit der Gasteilchen und somit zu einer geringeren Stromdichte $j = n \cdot Q \cdot v$, welche am Faradaycup als Ladung pro Zeiteinheit und Fläche nachgewiesen wird. Doch warum tritt diese Absenkung nur bei mittleren Ionenzuständen (Ar^{12+} bis Ar^{15+}) auf? Dies kann über die Verringerung des *Ladungsaustauschs* zwischen den Ionen erklärt werden. Hohe Ionisationszustände sind energetisch ungünstig für Atome, somit versuchen sie bei Zusammenstößen untereinander die Anregung gleichmäßig zu verteilen, wobei folgende Reaktion stattfindet:



Die Häufigkeit dieses Prozesses sinkt bei niedrigem Druck, wodurch hochgeladene Ionen begünstigt werden. In Abbildung 5 ist bei etwa 51 mT ein roter Peak deutlich zu sehen. Diesen könnte man naiverweise aufgrund des niedrigen Drucks dem höchst angeregten Argonzustand Ar^{18+} zuordnen. Das ist aber nicht der Fall, da der theoretische Wert des zugehörigen Magnetfeldes bei 50,4 mT liegt und dieses Teilchen somit aussortiert würde. Man kann spekulieren, ob der Peak zu einem höchst angeregten Fremdion aus dem Strahlkanal gehört. Ein Atom, bei dem diese Zuordnung hervorragend funk-

tioniert, ist Sauerstoff mit einer Masse von $m_O = 16$ u. Der Peak von O^{6+} fällt mit Argon zusammen und O^{7+} ist genau an der erwarteten Position. Bei hohem Druck ist nicht nur die mittlere Geschwindigkeit, sondern auch die Teilchenzahl und somit auch die Zahl an Fremdatomen im Strahlkanal deutlich höher. Da der Ladungsaustausch nun begünstigt wird und zudem der Ionenstrom größer ist, treten Peaks von gering angeregten Fremdionen als Untergrundrauschen vor allem im Bereich hoher Magnetfelder auf. Das führt dazu, dass mittlere Argonionisationszustände teilweise im Rauschen verschwinden. In der Abbildung wurde ein Versuch unternommen, mögliche Fremdionen mit Sauerstoff-, Stickstoff- und Kohlenstoffatomen zu identifizieren, dies ist allerdings rein spekulativ, da die Peaks nur sehr klein sind und man zu noch höheren Magnetfeldern hätte übergehen müssen. Außerdem fallen viele Peaks aufgrund gleicher spezifischer Ladung Q/m zusammen. Da die Anzahl der Ionen proportional zur am Faradaycup gemessenen Ladung ist, erhält man durch Verhältnisbildung eine grobe Abschätzung über die Anzahl der Fremdatome. Dafür sucht man Peaks, die mit keinem anderen Fremdatom zusammenfallen und die nach Möglichkeit dem am häufigsten auftretenden Ionenzustand entsprechen, z.B. von O^{7+} und Ar^{16+} .

$$\frac{N_O}{N_{Ar}} = \frac{Q(O^{7+})}{Q(Ar^{16+})} \approx 15,4 \% \quad (6)$$

3 Auswertung

4 Diskussion und Zusammenfassung

Literatur

- [01] Dr. Günter Zschornack. *Elektronenstrahlquelle EBIS-A*. Großröhrsdorf,
zuletzt geöffnet: 03.03.2016