

Fortgeschrittenenpraktikum

Elektronenstrahlionenquelle (EBIS-A)

Praktikums- beginn	Freitag ca. 8:00 Uhr
Praktikumsort	Dreebit GmbH Southwallstraße 5 01900 Großröhrsdorf
Anmeldung bei	Soela Milde Raum 1.01
oder bei	PD Dr. Günter Zschornack Raum 1.02
Kontakt	PD Dr. rer. nat. habil. G. Zschornack Tel.: 035952 - 420 201 Fax: 035952 - 420 421 Mobil: 0174 - 3281 681

Electron Beam Ion Source (EBIS)

Fortgeschrittenenpraktikum

1 Einführung

Hochgeladene Ionen haben in den letzten Jahren sowohl in der Grundlagenforschung als auch in technischen Anwendungen an Bedeutung gewonnen. Dies betrifft das Studium der Ionen-Festkörper-Wechselwirkung, die Nanostrukturierung von Materialoberflächen oder die Bestimmung von Ionisationsquerschnitten. Durch ihre hohe Neutralisationsenergie (potentielle Energie) bilden hochgeladene Ionen ein geeignetes Instrument in Anwendungsgebieten, in denen reine Oberflächeneffekte erzielt werden sollen (z. B. "soft sputtering" von Oberflächen). Die Bereitstellung solcher hochgeladenen Ionen kann durch eine Elektronenstrahlionenquelle (EBIS – Electron Beam Ion Source) erfolgen.

Mit Hilfe einer hochemissiven Glühkathode und geeigneter elektrischer Felder wird ein Elektronenstrahl erzeugt. Dieser wird durch ein äußeres Magnetfeld sehr stark verdichtet und trifft auf primär neutrale Atome. Durch Elektronenstoßionisation werden diese sukzessiv ionisiert bis sich in der Quelle ein Gleichgewicht zwischen Ionisationsprozessen auf der einen und Rekombinationsprozessen auf der anderen Seite einstellt. Um möglichst hohe Ladungszustände zu erreichen, muss gewährleistet sein, dass die Ionen möglichst lange im Bereich des Elektronenstrahls und somit im Quellvolumen eingeschlossen bleiben. Dazu besteht der zentrale Teil der EBIS aus einem Driftröhrenensemble, einer Konfiguration dreier konzentrischer Ringelektroden. Durch eine geeignete Spannungskonfiguration an den drei Elektroden wird eine axiale elektrostatische Potentialfalle (Potentialtopf) erzeugt. Üblicherweise ist das Potential der mittleren Driftröhre um ca. 100 V gegenüber den äußeren abgesenkt. Der radiale Einschluss der Ionen wird durch das negative Raumladungspotential des verdichteten Elektronenstrahls erreicht. Dieses Potential kann in Abhängigkeit vom Elektronenstrom I_e eine Tiefe von einigen zehn Volt erreichen. Die Potentialkonfiguration zum Ioneneinschluss ist schematisch in **Abbildung 1** dargestellt.

Im Falle der Dresden EBIS-A wird ein Magnetfeld von $B = 600$ mT auf der Strahlachse mit Hilfe von NdFeB-Permanentmagneten generiert. Damit wird eine Elektronenstrahldichte von einigen hundert A/cm² (Zschornack, et al., 2008) erreicht. Der Bereich der Driftröhren der EBIS hat eine Länge von $l = 6$ cm. Die Kapazität der Falle C bestimmt sich aus dem Elektronenstrom I_e , der Elektronenenergie E_e und der Fallenlänge l durch

$$C = 1 \cdot 10^{13} \frac{I_e [\text{A}] \cdot l [\text{m}]}{\sqrt{E_e [\text{eV}]}}$$

wobei

$$E_e = e \cdot U_e$$

gilt. Hierbei ist U_e die von den Elektronen zwischen Glühkathode und Driftröhren durchlaufene Potentialdifferenz und ergibt sich aus dem negativen Kathodenpotential U_{Kat} und dem positiven Driftröhrenpotential U_0 durch

$$U_e = |U_{\text{Kat}}| + U_0$$

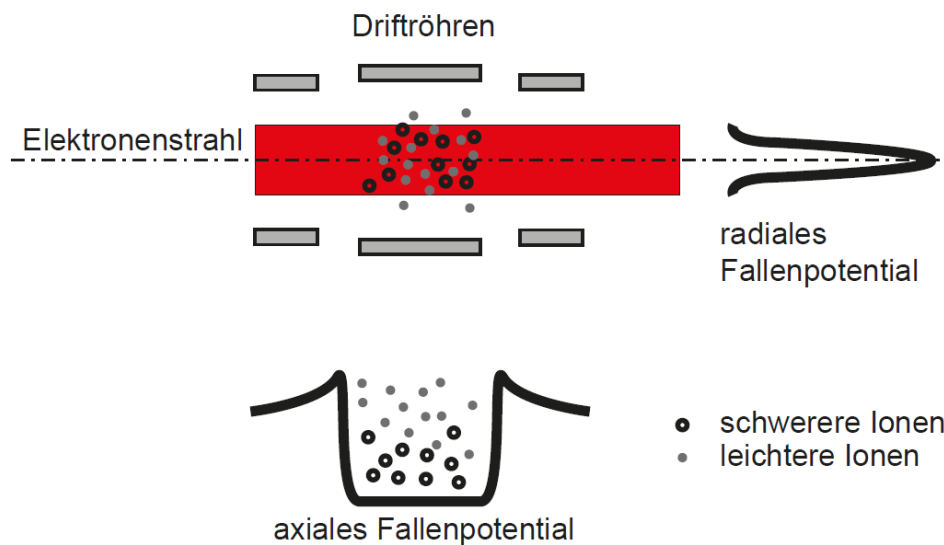


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Potentialverhältnisse im Bereich der Driftröhren einer Dresden EBIS zur Verdeutlichung des Ioneneinschlusses (axial und radial).

Zur Extraktion kontinuierlicher Ionenstrahlen aus dem Quellvolumen wird das Potential der letzten Driftröhre im Vergleich zur ersten etwas abgesenkt, wodurch die Ionen, deren thermische Energie ausreicht, die Falle einseitig in Richtung der negativen Extraktionselektrode verlassen und zu dieser hin beschleunigt werden. Die Extraktionselektrode erfüllt zwei Aufgaben:

- Formierung und Extraktion der Ionen zu einem Strahl und dessen Transport aus dem Quellvolumen
- Aufweiten und Abbremsen des Elektronenstrahls zur Neutralisation im Elektronenkollektor

Die Elektronen werden in den auf Erdpotential liegenden Elektronenkollektor geleitet. Wegen des hohen Leistungseintrags wird dieser wassergekühlt. Anschließend stehen die Ionen am Ausgang der Extraktionselektrode für Experimente zur Verfügung. Alternativ kann die Falle in wählbaren Zeitschritten vollständig geöffnet beziehungsweise geschlossen werden, wodurch eine Extraktion im gepulsten Modus realisiert wird. Die Elektrodenanordnung sowie der Potentialverlauf in einer EBIS sind in **Abbildung 2** dargestellt.

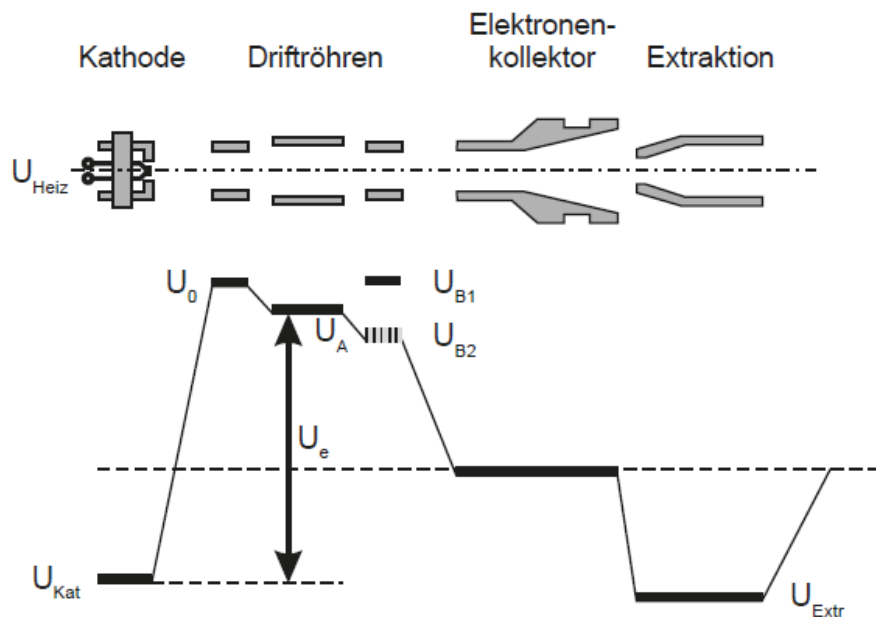


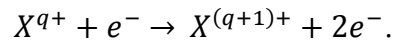
Abbildung 2: Elektrodenanordnung (oben) und Potentialverlauf (unten) in einer Dresden EBIS-A

Um möglichst hohe Ladungszustände zu erreichen, muss nicht nur für gute Einschlussbedingungen im Quellvolumen gesorgt werden, sondern es sollten auch die Raten für Wechselwirkungsprozesse hochgeladener Ionen mit Neutralteilchen so gering wie möglich gehalten werden. Aus diesem Grund sind Ultrahochvakuumbedingungen im Bereich der Driftröhren nötig. Der Arbeitsdruck einer EBIS liegt im Bereich von $p = 1 \cdot 10^{-10}$ mbar bis $p = 1 \cdot 10^{-8}$ mbar. Die

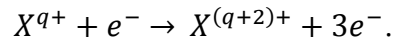
einzelnen in einer EBIS auftretenden physikalischen Wechselwirkungsprozesse werden im Folgenden kurz dargelegt.

1.1 Wechselwirkungsprozesse in einer EBIS

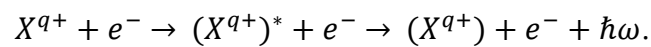
Bei der einfachen Elektronenstoßionisation wird ein Elektron eines Atoms oder Ions durch ein Elektron des Elektronenstrahls aus der Atomhülle herausgelöst



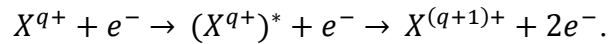
Hierbei muss die Energie des einfallenden Elektrons größer sein als die Ionisationsenergie des äußeren Hüllenelektrons. **Doppelionisation** tritt auf, wenn ein einfallendes Elektron zwei Elektronen aus der Atomhülle schlägt. Analog zur Einfachionisation muss die Energie der Elektronen größer als die Summe der Ionisationsenergien beider Hüllenelektronen sein:



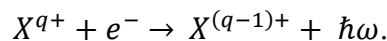
Der Wechselwirkungsquerschnitt für Doppelionisation ist dabei im Falle von Niedertemperaturplasmen wie in einer EBIS wesentlich kleiner als der Wechselwirkungsquerschnitt für die einfache **Elektronenstoßionisation**. In der theoretischen Betrachtung der Ionisationsvorgänge reicht es deshalb oftmals aus, nur die Einfachionisation einzubeziehen. Die Elektronenstoßanregung als ein weiterer Wechselwirkungsprozess zwischen Elektronen und Ionen wird für spektroskopische Untersuchungen der vorhandenen Ladungszustände innerhalb des Fallenvolumens genutzt. Bei diesem Prozess überträgt ein Elektron durch Stoß einen Teil seiner kinetischen Energie an ein Hüllenelektron eines Ions. Dieser Anteil reicht aber nicht aus, um ein Hüllenelektron vollständig aus dem Potentialfeld des Ions herauszulösen. Ion oder Atom bleiben in einem angeregten Zustand zurück und relaxieren anschließend unter Aussendung eines Photons in den Grundzustand



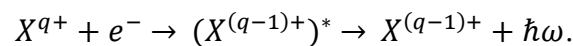
Ein mehrstufiger Prozess, bei dem sowohl Elektronenstoßanregung als auch Ionisation auftreten, ist der **Augerprozess**. Hierbei wird zunächst ein Ion durch Elektronenstoß in einen metastabilen Zustand angeregt. Das so angeregte Ion kehrt unter Aussendung eines Elektrons (Augerelektron) einer äußeren Schale in den Grundzustand zurück



Umgekehrt zu den Prozessen, die zu einer Erhöhung der Ladungszustände in der Falle beitragen, finden Rekombinationsprozesse statt, bei denen besonders die hochgeladenen Ionen wieder Elektronen einfangen. Der dominierende unter den, der Ionisation entgegen wirkenden, Prozessen ist die **strahlende Rekombination**. Hierbei wird auf direktem Weg ein Elektron aus dem Elektronenstrahl in die Hülle eines Ions eingefangen. Die dabei freiwerdende Energie, die der Summe aus kinetischer Energie und Bindungsenergie des Endzustands des Elektrons in der Hülle entspricht, wird in Form eines Photons freigegeben



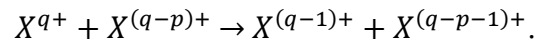
Ein weiterer Rekombinationsprozess ist die **dielektronische Rekombination**. Hierbei wird ein Elektron des Elektronenstrahls in die Hülle des Ions eingefangen. Die kinetische Energie des eingefangenen Elektrons regt ein stark gebundenes Hüllenelektron in ein höheres Niveau an. Dieses Elektron relaxiert im Anschluss strahlend in den Ausgangszustand



Dieser Prozess ist durch seine Mehrstufigkeit im Allgemeinen wesentlich weniger wahrscheinlich als die strahlende Rekombination und trägt Resonanzcharakter. Stimmt die Elektronenstrahlenergie dabei genau mit der Energiedifferenz zweier Niveaus der Atomhülle überein, kommt es zu resonanten Übergängen. Infolgedessen ist die Intensität der dabei entstehenden Strahlung im Vergleich zur strahlenden Rekombination sogar oftmals deutlich höher.

Da die Elektronenstrahlenergie bei einer EBIS mit einer Genauigkeit von wenigen Volt eingestellt werden kann, stellt die Beobachtung der Resonanzeffekte der dielektronischen Rekombination ein wichtiges Instrument für atomphysikalische Experimente und quellendiagnostische Untersuchungen dar.

Bisher wurden Wechselwirkungen zwischen Elektronen und Ionen besprochen. Im Folgenden sollen Wechselwirkungen unter den Ionen erläutert werden. Im Gleichgewichtszustand zwischen Rekombination und Ionisation tritt auch immer ein **Ladungsaustausch** zwischen den Ionen auf. Dieser Prozess wirkt, wie die Rekombinationsprozesse, dem Ionisationsvorgang entgegen. Um besonders hohe Ladungszustände zu erreichen, sollte die Stoßrate zwischen den Ionen und somit der Druck in der Quelle gering gehalten werden



Bei dem **Energieaustausch** zwischen Ionen und Neutralteilchen wird kinetische Energie von Ionen an langsame Neutralteilchen oder andere Ionen über Stöße abgegeben. Dadurch wird die Verteilung der kinetischen Energie der Ionen schmaler. Die Energie kalter Ionen wird erhöht, während hochenergetische Ionen gekühlt werden. Befinden sich verschiedene Ionenspezies mit großen Unterschieden bezüglich der Atommassen in der Falle, ergibt sich ein verstärkter Kühlungseffekt für die schweren Teilchen. Der Impulsübertrag auf leichtere Elemente ist oftmals so groß, dass die kinetische Energie der leichten Teilchen nach dem Stoß zum Verlassen der Falle ausreicht. Dadurch wird dem System kontinuierlich Energie entzogen. Der Prozess wird als Ionenkühlung (engl. evaporative cooling) bezeichnet. Die Herabsetzung der Energie führt dazu, dass die schweren Ionen länger im Bereich der Wechselwirkung mit dem Elektronenstrahl verbleiben. Die Ionen können somit über längere Zeit hinweg ionisiert werden und erreichen einen höheren Ladungszustand. Die Möglichkeit der **Ionenkühlung** durch Einlassen eines Kühlgases wurde 1991 von Penetrante et al. vorgestellt (Penetrante, Bardsley, Levine, Knapp, & Marrs, 1991). Ionenkühlung wurde unter anderem in den Anlagen des LLNL¹ eingesetzt um Ladungszustände von U^{92+} zu erzeugen. Als Kühlgas wurde dabei Neon eingelassen (Marrs, 1997).

¹ LLNL: Lawrence Livermore National Laboratory

2 Micro Beam Facility

Das Praktikum findet an der **Micro Beam Facility** (kurz **MBF**) bei der Dreebit GmbH in Großröhrsdorf statt (siehe **Abbildung 3**). Die MBF besteht aus einer [Dresden EBIS-A](#) sowie einem daran angeschlossenen Niederenergiestrahlnal. Der Strahlkanal der MBF besteht aus verschiedenen ionenoptischen Elementen wie Einzellinsen und Deflektoren. Ein Schlitzsystem dient zur Strahlbegrenzung für den nachfolgenden 90°-Dipolmagneten. Dieser Magnet dient zur Ladungszustandsseparation des Ionenstrahles. Im Anschluss an den Dipolmagneten ist eine Bremslinse installiert, welche die Möglichkeit bietet, Ionen bis auf einige Elektronenvolt abzubremesen.

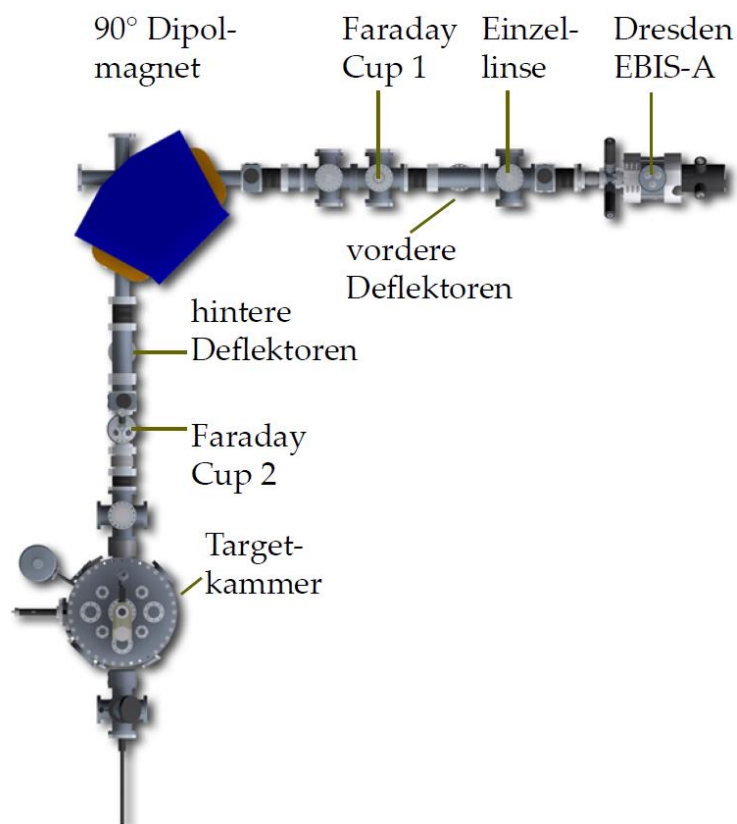


Abbildung 3: Micro Beam Facility bei der Dreebit GmbH in Großröhrsdorf
(Modell Draufsicht)

2.1 MIVOC-Methode

Die [MIVOC-Methode](#) (engl. **M**etal **I**ons from **V**olatile **C**ompounds) wurde 1994 von Koivisto et al. [(Koivisto, 1994)] vorgestellt. Die Methode wird dazu be-

nutzt Atome von Elementen in die Ionenquelle einzubringen, die nicht elementar gasförmig vorliegen. Das MIVOC-System der Dresden EBIS/T-Familie wird im Folgenden kurz vorgestellt.

Eine flüchtige Substanz (Volatile Compound) wird flüssig oder in Pulverform in ein Eppendorfggefäß gefüllt. Dieses Eppendorfggefäß wird mittels einer Halterung so in das MIVOC-Gaseinlasssystem eingebracht, dass das Eppendorfggefäß² mit der Probensubstanz im Vakuumfenster sichtbar ist **Abbildung 4**. Das MIVOC-Gaseinlasssystem wird über ein Hochvakuumfeindosierventil an eine EBIS (oder eine ECRIS) angeschlossen. Über den entsprechenden Anschluss wird das MIVOC-System mit einer Vorvakuumpumpe gekoppelt. Das MIVOC-System hat eine Vorvakuumdruckmesssonde zur Überwachung des Druckes im Vorvakuumrezipienten. Zum Einlass der leichtflüchtigen Substanz wird das MIVOC-System über die angeschlossene Pumpe unterhalb des Verdampfungsdruckes der leichtflüchtigen Substanz evakuiert. Ist dieser Druck erreicht, wird die Pumpe abgeschiebert und die Substanz beginnt im Rezipienten zu sublimieren. Das Gas wird anschließend über das Hochvakuumfeindosierventil in den Bereich des Elektronenstrahles bzw. des ECR-Plasmas eingelassen.

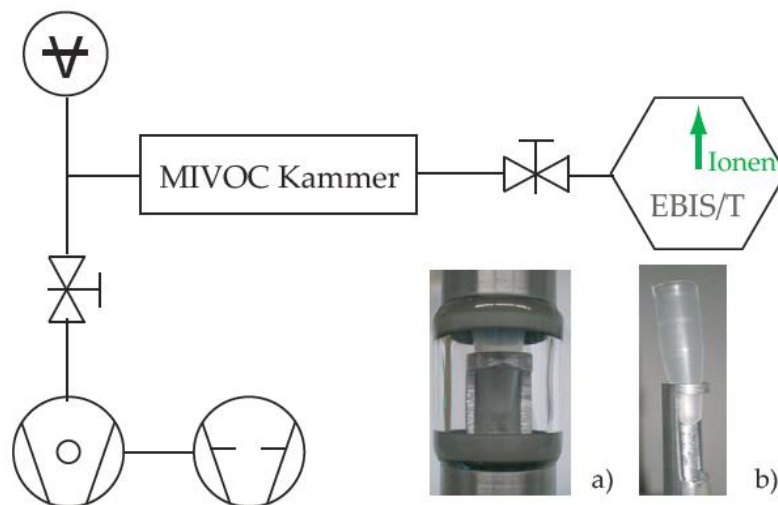


Abbildung 4: Schaltbild des MIVOC-Gaseinlasssystems der Dresden EBIS/T-Familie. Bild a) in der unteren rechten Ecke zeigt die MIVOC-Kammer des an einer Dresden EBIS 2 verwendeten MIVOC-Systems. Bild b) zeigt das Eppendorfggefäß auf der Halterung. Der grüne Pfeil gibt die Extraktionsrichtung der Ionenquelle an.

² Einmalartikel der Firma Eppendorf <http://www.eppendorf.com> zur Probenaufbewahrung und zum Umgang mit Flüssigkeiten. Das Eppendorfggefäß bietet die Möglichkeit kleine Mengen einer Substanz wiederverschließbar zu lagern.

Durch die Elektronenstöße im Elektronenstrahl bzw. im Plasma werden die Molekülbindungen aufgebrochen und das gewünschte Element steht für die Ionisation bereit. Der Nachteil der MIVOC-Methode besteht darin, dass nicht alle Elemente als leichtflüchtige Substanzen zur Verfügung stehen. Ein weiterer Nachteil ist, dass das eigentlich benötigte Element in den Molekülen nur in einem geringen stöchiometrischen Verhältnis vorkommt, und somit eine zusätzliche Gaslast an Fremdatomen eingebracht wird. Dies wirkt sich mitunter negativ auf den Arbeitsdruck und somit auf die Ausbeute an hochgeladenen Ionen aus. Im Kontext mit Ionenkühlungsprozessen kann sich der Anteil an Fremdatomen durchaus auch positiv auf die Ausbeute an hochgeladenen Ionen auswirken.

2.2 Ionenoptische Elemente

Zur Extraktion von Ionen aus der Quelle ist es notwendig, den Ionenstrahl bündeln und lenken zu können, um eine hohe Ionenausbeute zu erzielen. Hierbei kommen verschiedene ionenoptische Elemente zum Einsatz. Zum Ablenken eines Ionenstrahls in horizontaler und vertikaler Richtung können sowohl magnetische als auch elektrostatische Felder benutzt werden. Da jedoch bei magnetischen Feldern eine Impulstrennung erfolgt, sollten diese in der Regel nur bei bereits ladungsseparierten Strahlen angewendet werden.

2.2.1 Einzellinse

Bei der [Einzellinse](#) handelt es sich um eine elektrostatische Linse. Sie besteht aus drei Rohrsegmenten, wobei an dem mittleren Segment ein starkes negatives Potential anliegt, während die äußeren Segmente auf Erdpotential liegen (siehe [Abbildung 5](#)). Aus dieser Anordnung resultieren gekrümmte Äquipotentialflächen, die den Strahl in Analogie zu optischen Linsen bündeln. Durch Variation der Spannung an der mittleren Elektrode lässt sich die "Brennweite" der Linse verändern. Dadurch ist bei geeigneter Konfiguration eine Fokussierung in der Brennebene möglich.

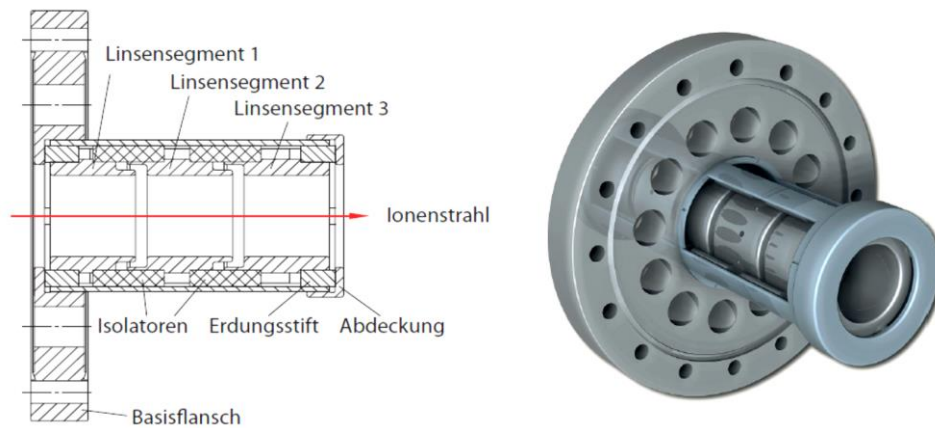


Abbildung 5: Einzellinse Micro Beam Facility

2.2.2 Deflektoren

Deflektoren (siehe **Abbildung 6**) sind schräg geschnittene Rohrsegmente innerhalb des Strahlkanals, die den Ionenstrahl durch elektrostatische Felder ablenken können. Der Vorteil gegenüber der einfacheren Variante des Plattenkondensators besteht darin, dass auch schiefe oder achsenferne Strahlen in Richtung der Strahlachse gelenkt werden. Die Ablenkung von Teilchen in transversaler Richtung geschieht analog zur planaren Geometrie. Auch in Hinblick auf den Einbau im Strahlkanal sind Deflektoren besser geeignet als Plattenpaare, da das Röhrendesign der Deflektoren den Strahlrohrquerschnitt wesentlich effektiver nutzt. Damit sind größere Apparaturen möglich, die den Einfluss störender Randfelder auf den Strahlverlauf reduzieren.

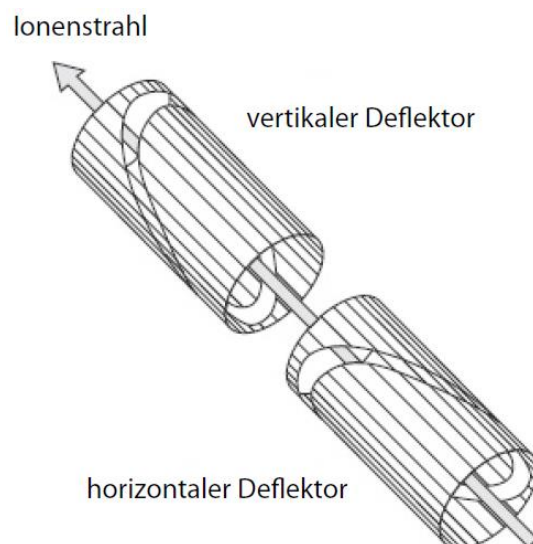


Abbildung 6: horizontale und vertikale Deflektoranordnung

2.3 Strahldiagnostik

Zur Detektion des Ionenstrahls stehen in der Praxis verschiedene technische Möglichkeiten zur Verfügung. Zum Einsatz kommen hierbei beispielsweise [Pepperpot-Emittanzmeter](#), unterschiedliche Ausführungen von Faradaycups oder auch [Gegenfeldanalysatoren](#).

Mithilfe röntgenspektroskopischer Messmethoden können auch die Verhältnisse innerhalb der Ionenquelle zeit- und energieaufgelöst dargestellt werden, um so die zeitliche Entwicklung der Ionenladungszustandsverteilung zu untersuchen.

2.3.1 Faradaycup

Detektiert werden die extrahierten Ionen in einem [Faradaycup](#). Dabei handelt es sich um einen elektrisch isolierten Metallbecher, der in den Strahl gefahren wird und so die Ionen auffangen kann. Die eingefallene Ladung kann über einen kalibrierten Widerstand oder ein Elektrometer ausgelesen werden. Zu beachten ist dabei die Sekundärelektronenemission: Treffen Ionen auf die Oberfläche des Bechers, können Sekundärelektronen freigesetzt werden. Wenn diese den Becher verlassen, wird die Ladungsmessung entsprechend verfälscht. Aus diesem Grund wird häufig ein zusätzliches elektrisches Feld verwendet, das die Elektronen am Verlassen des Bechers hindert (Unterdrückerspannung). Eine schematische Darstellung eines Faradaycups zeigt **Abbildung 7**. Gelingt es, die Ladungsverluste zu unterdrücken, so ist eine direkte Messung der eingefallenen Ladung je Zeiteinheit möglich.

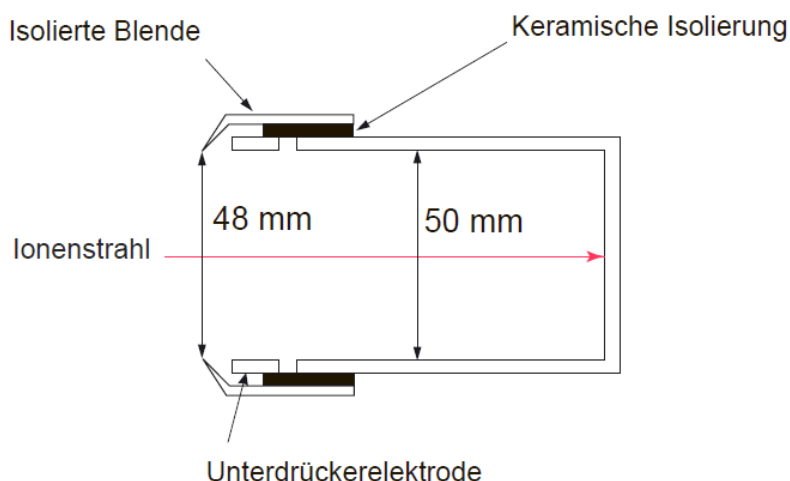


Abbildung 7: schematischer Aufbau eines Faradaycups

3 Praktikumsaufgabe

3.1 Einstellung der Betriebsparameter der EBIS-A

Zur Erzeugung der Ionen in einer EBIS-A sind die zur Elektronenstrahlformierung nötigen Betriebsparameter einzustellen. Dies erfolgt über einen Steuerrechner, von dem aus Betriebsparameter wie der Elektronenstrom I_e und das in der Quelle herrschende Vakuum kontrolliert und partiell gesteuert werden können. Für die vorgesehenen Experimente sind folgende Quellenparameter zu realisieren:

- Elektronenstrom $I_e \approx 60 \text{ mA}$
- Vakuum $p \approx 1 \cdot 10^{-9} \text{ mbar}$
- Basisspannung $U_0 \approx 15000 \text{ V}$
- Fallenpotentiale U_{B1}, U_{B2}, U_A

Unter Anleitung des Betreuers werden die erforderlichen Betriebsparameter computergestützt eingestellt und protokolliert.

3.2 Justieren des Ionenstrahls

Mit Hilfe der ionenoptischen Elemente ist der Ionenstrahl so zu optimieren, dass der Ionenstrom an den Faraday-Cups maximiert wird. Dazu muss der Ionenstrahl zunächst im Fokuspunkt des Ablenkmagneten gebündelt und anschließend eine geeignete Position der Schlitze gewählt werden. Theoretisch müsste diese Justierung nach jeder Veränderung der Quellenparameter neu vorgenommen werden, im Praktikum soll aber aus Zeitgründen darauf verzichtet werden.

3.3 Ionendetektion

Im Praktikum werden Ar-Ionen verwendet. Das Experiment erfolgt computergestützt an einem Faradaycup hinter dem Analyse magneten. Die eingefallene Ladung wird dabei mit einem Elektrometer gemessen. Der Praktikumsversuch soll mit folgenden Ionisationszeiten durchgeführt werden:

- $t_{Ion,1} = 30 \text{ ms}$
- $t_{Ion,2} = 80 \text{ ms}$
- $t_{Ion,3} = 230 \text{ ms}$
- $t_{Ion,4} = 480 \text{ ms}$

Die Extraktionszeit beträgt jeweils $t_{Ext} = 20\text{ ms}$. Die Messung der Spektren soll für jede Ionisationszeit bei drei verschiedenen Arbeitsdrücken erfolgen, welche mit dem Praktikumsleiter abzusprechen sind.

3.3.1 Teilaufgaben

Anhand eines aufzunehmenden Spektrums sollen den einzelnen Peaks die jeweiligen Ladungszustände zugeordnet werden. Die Berechnung erfolgt nach der Formel

- $\frac{q}{m} = \frac{2U}{r^2 \cdot B^2}$
- $au = 1,66057 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$
- $e = 1,60219 \cdot 10^{-18} \text{ C}$
- $r = 461 \text{ mm}$ (Radius des Magneten)

Über einen quadratischen Fit ($B^2 \propto \frac{m}{q}$) lässt sich prüfen, ob die Zuordnung richtig war. Um eine Aussage über die Güte des Vakuums in der Quelle treffen zu können, sollen zusätzlich Fremdionen (O^{q+} , N^{q+} , C^{q+} , ...) identifiziert und ihre Häufigkeit diskutiert werden.

Literatur

- Koivisto, H. J. (1994). Metal Ion Beams from an ECR Ion Source using Volatile Compunds. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B*, 94(3), 291–296.
- Marrs, R. E. (1997). Recent Results from EBIT and Super EBIT. *Physica Scripta T73*, 354–459.
- Penetrante, B. M., Bardsley, J. N., Levine, M. A., Knapp, D. A., & Marrs, R. E. (1991). Evaporative cooling of highly charged dysprosium ions in an enhanced electron-beam ion trap. *Phys. Rev. A* 43 May Nr. 9, 4873–4882.
- Zschornack, G., Kreller, M., Ovsyannikov, V. P., Großmann, F., Kentsch, U., Schmidt, M., . . . Heller, R. (2008). Compact electron beam ion sources/traps: Review and prospects. *Review of Scientific Instruments* 79, 02A703.