

Optische Spektroskopie von Argonionen in einer Elektronenstrahlionenfalle



Kooperation zwischen
dem Hector-Seminar und
dem Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg

Diese Arbeit wurde von Max González Sáez-Díez
ausgeführt im Jahr 2016/2017

Max-Planck-Institut für Kernphysik
unter der Betreuung von
Priv.-Doz. Dr. José Ramón Crespo López-Urrutia

Inhaltsverzeichnis

1	Max-Planck-Institut für Kernphysik	3
2	Abstract	4
3	Einleitung	5
4	Theoretische Grundlagen	6
4.1	Was sind Atome?	6
4.2	Ionen	8
4.3	Ionisationsprozesse	10
4.3.1	Ionisation durch Elektronenstoß	10
4.3.2	Anregung durch Elektronenstoß	11
4.3.3	Ionisation durch Photonen	11
4.3.4	Anregung durch Photonen	12
5	Elektronenstrahlionenfalle	13
5.1	Idee der Elektronenstrahlionenfalle	13
5.2	Elektronenkanone	15
5.3	Vakuum	16
5.4	Aufbau des Magnetsystems	17
5.5	Vakuumkammer	17
5.6	Kollektor	18
5.7	Anwendungen von Elektronenstrahlionenfallen	18
6	Optische Spektroskopie	19
6.1	Optische Elemente	21
6.1.1	Spiegel und Linsen	21
6.1.2	Gitter	21

<i>INHALTSVERZEICHNIS</i>	2
6.2 Czerny-Turner-Spektrometer	22
7 Projektarbeit	24
7.1 Aufgabenstellung und Ausgangssituation	24
7.2 Erste Probemessungen	24
7.3 Aufbau des Spiegelsystems	25
7.4 Messungen	29
7.4.1 Erste Bilder mit dem Gitter in der Nullten Ordnung	29
7.4.2 Testmessungen und erstes Abbilden der Ionen	30
7.4.3 Entfernen von Cosmics	34
7.4.4 Optimieren von Parametern	38
7.4.5 Aufnahme eines Übersichtsspektrums	38
7.4.6 Kalibration	39
7.4.7 Auswertung	40
7.4.8 Fehleranalyse	48
8 Zusammenfassung und Ausblick	50
9 Danksagung	52
10 Quellen	53
10.1 Literatur	53
10.2 Internetquellen	53

1 Max-Planck-Institut für Kernphysik

Die vorliegende Arbeit wurde in Kooperation mit dem Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) in Heidelberg angefertigt. Das MPIK ist Teil der Max-Planck-Gesellschaft (MPG, gegründet im Jahr 1948) zur Förderung der Wissenschaft e.V. und besteht aus 83 Instituten und Forschungseinrichtungen. Die MPG hat sich der Grundlagenforschung verpflichtet. Das MPIK wurde im Jahr 1958 von Wolfgang Gentner aufgebaut und gegründet. Ursprünglich wurde am MPIK kernphysikalische Grundlagenforschung betrieben. Heute konzentrieren sich die Aktivitäten des Instituts auf die Forschung im Bereich der Astroteilchen und der Quantendynamik. Derzeit arbeiten über 450 Personen (darunter 130 Wissenschaftler und über 100 Doktoranden) am MPIK. Zudem unterhält das Institut enge Beziehung zu anderen Forschungseinrichtungen wie der PTB und Petra III.

Die Gruppe, in der ich während meiner Zeit am Institut gearbeitet habe, wird von Priv.-Doz. Dr. José Ramón Crespo López-Urrutia geleitet. Sie untersucht unter anderem die Struktur und Dynamik von hochgeladenen Ionen in Electron Beam Ion Traps (EBITs). Die Funktionsweise dieser Ionenfallen wird in dieser Arbeit ausführlich dargestellt.

Betreut haben diese Arbeit der Post-Doktorand Dr. Sven Bernitt und der Doktorand Steffen Kühn. Bereits im Voraus soll ihnen und der gesamte Gruppe von Priv.-Doz. Dr. José Ramón Crespo López-Urrutia ein großer Dank ausgesprochen werden. Sie haben diese Arbeit nach allen Kräften unterstützt und erst möglich gemacht. Dank ihres Einsatzes konnte ich in meiner 6-monatigen Arbeit viele neue Erfahrungen machen und mein physikalisches und technisches Wissen enorm erweitern.

2 Abstract

Geladene Ionen spielen eine fundamentale Rolle in der modernen Astrophysik. Thema der vorliegenden Arbeit ist die optische Spektroskopie an geladenen Ionen. Dafür wurde am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg im Rahmen des Kooperationsprojektes des Hector-Seminars an der PolarX-EBIT ein optisches Spektrometer aufgebaut und in Betrieb genommen. Das umfasst den Bau des Gerüsts und des Spiegelsystems sowie das Testen und Optimieren des Spektrometers. Des Weiteren wurde ein Übersichtsspektrum für Argon (Ar) im sichtbaren Bereich aufgenommen, ausgewertet und die Energiedifferenzen zwischen einigen Orbitalen ermittelt.

Charged ions play a fundamental role in the modern astrophysics. Subject of the present work was to carry out spectroscopic measurements in the visible range for ions. The research project was performed in the Labs of the Max-Planck's institute of nuclear physics in Heidelberg using the PolarX-EBIT. An optical spectrometer was put into operation. This encloses the construction of the scaffolding that holds the spectrometer in its position, the lens system and the testing and optimizing of the spectrometer. The results are an overview spectrum in the visible range for Argon (Ar). This spectrum was analyzed and the energy differences between some orbitals determined.

3 Einleitung

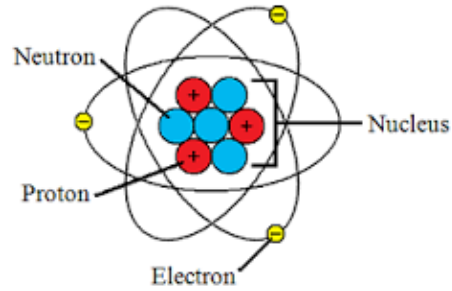
Seit Jahrhunderten und Jahrtausenden lebt der Mensch in einer Welt voller komplexer Prozesse und Abläufe, die er nicht versteht. Seit Beginn der Menschheit versucht er, diese Entwicklungen zu hinterfragen und zu verstehen. Das wohl beste Beispiel hierfür ist der Nachthimmel. Zu Beginn bestand er nur aus leuchtenden Punkten und da sie unerklärbar waren, wurden sie Göttern oder anderen übernatürlichen Dingen zugeschrieben. Doch mit zunehmender Entwicklung gab sich der Mensch nicht mit diesen „einfachen“ Erklärungen zufrieden. Dank Technik und Fortschritt gelang es ihm, ein weiteres und tieferes Bild des Himmels und der Himmelskörper zu erlangen. Diese Entwicklung dauert bis heute an. Dank neuen Erfindungen und Methoden versteht der Mensch den Nachthimmel viel besser als noch vor einigen Jahrhunderten. Doch nicht nur das Große hat den Menschen fasziniert. Genau wie am Beispiel des Himmels, hat der Fortschritt auch dazu beigetragen, die Abläufe zu verstehen, die in einem viel kleineren Maßstab ablaufen, als das menschliche Auge sie erfassen kann. Heutzutage wissen wir woraus wir aufgebaut sind und was die Objekte auf molekularer Ebene voneinander unterscheidet. Verschiedene Modelle wie das Dalton-Modell oder das Rutherford'sche Atommodell haben sich immer mehr der Wirklichkeit angenähert und unser Verständnis von den kleinsten Bausteinen der Materie erweitert. Wir sprechen von den Atomen.

4 Theoretische Grundlagen

4.1 Was sind Atome?

Atome sind die Grundlage der Materie wie wir sie kennen. Sie bestimmen, wie sich Körper verhalten und wie sie mit anderen wechselwirken und reagieren. Nach heutigem Wissenstand sind Atome aus einem Kern und einer Hülle aufgebaut. Im Kern befinden sich die Protonen, die einfach positiv geladen sind. Zusätzlich findet man im Kern sogenannte Neutronen. Sie besitzen keine Ladung (elektrisch neutral) und tragen „nur“ zur Masse des Atomkerns bei. Protonen und Neutronen besitzen ungefähr die gleiche Masse und werden auch mit dem Begriff „Nukleonen“ (Kernbausteine) bezeichnet. Sie tragen den Hauptteil zur Masse eines Atoms bei.

In der bereits erwähnten Atomhülle befinden sich die Elektronen. Sie sind das elektrische „Gegenstück“ der Protonen, denn ihre Ladung ist einfach negativ. Generell ist ein Atom im „Normalzustand“ ungeladen, woraus sich die gleiche Anzahl an Protonen wie Elektronen ergibt. Diese Elektronen bewegen sich auf Kreisbahnen beziehungsweise auf „Schalen“ um den Atomkern. Dabei hat jede dieser Schalen ein unterschiedliches Energieniveau. Elektronen, die sich näher am Kern befinden, werden stärker von ihm angezogen, als die, welche sich auf einer höheren Schale befinden. Daraus folgt auch: Je weiter ein Elektron vom Kern entfernt ist, desto geringer ist seine Bindungsenergie zum Atomkern.



1

Abbildung 1: Schematische Darstellung des Lithium-Atoms. ^[1]

Ein einzelnes Atom kann mehr als nur ein Proton im Kern haben. Dadurch unterscheiden sich die einzelnen Elemente voneinander. Wasserstoff als das einfachste Atom besitzt ein Proton im Kern, Helium zwei Protonen, Lithium drei Protonen und so weiter. Im Periodensystem der Elemente ist die Anzahl der Protonen im Atomkern durch die sogenannte Ordnungszahl, oder auch Kernladungszahl, angegeben. Da ein Atom elektrisch neutral ist, gibt die Ordnungszahl auch die Anzahl der Elektronen in der Atomhülle wieder.

¹<https://d2gne97vdumgn3.cloudfront.net/api/file/mBmExKQTjm02HJYmCUvw>

[1] Die Größenverhältnisse sind falsch dargestellt. In Wirklichkeit ist der Abstand der Elektronen zum Kern um ein Vielfaches größer.

4.2 Ionen

Ein einzelnes Atom oder ein Molekül (eine chemische Verbindung die aus Atomen besteht) kann elektrisch geladen sein. Normalerweise besitzen ungeladene Atome die gleiche Anzahl an Protonen, wie auch an Elektronen. Verliert ein neutrales Atom ein Elektron, so ist es einfach positiv geladen und wird positiv geladenes Ion genannt. Im umgekehrten Falle (ein neutrales Atom nimmt ein zusätzlich Elektron auf) spricht man von einem negativen Ion.

Jedes Elektron besitzt eine Bindungsenergie zum Kern. Wird genügend Energie (Ionisationsenergie) aufgebracht, kann ein einzelnes oder sogar mehrere Elektronen die Atomhülle verlassen. Das Atom wurde somit ionisiert.

Ein Gemisch aus positiven Ionen und freien Elektronen heißt Plasma. Dieser Zustand wird auch als der vierte Aggregatzustand bezeichnet, da die Materie nun eine Vielzahl neuer Eigenschaften besitzt. In diesem Zustand ist die Materie aufgrund der freien Ladungsträger (Elektronen und Ionen) elektrisch leitfähig aber in der Gesamtheit trotzdem „neutral“, da meistens eine annähernd gleiche Anzahl von Ionen und Elektronen vorliegt. Materie in diesem Zustand ist im Universum deutlich häufiger anzutreffen als die für uns „gewöhnlichen“ Aggregatzustände fest, flüssig und gasförmig. Beispiel hierfür sind die Sonne und Sterne im Allgemeinen, denn sie bestehen aus eben diesem Plasma. Auch im Sonnenwind oder in den Blitzen, die wir auf der Erde bei einem Gewitter sehen, lassen sich Plasmen finden. Mehr als 99% der sichtbaren Materie des Universums liegt in diesem Aggregatzustand vor.

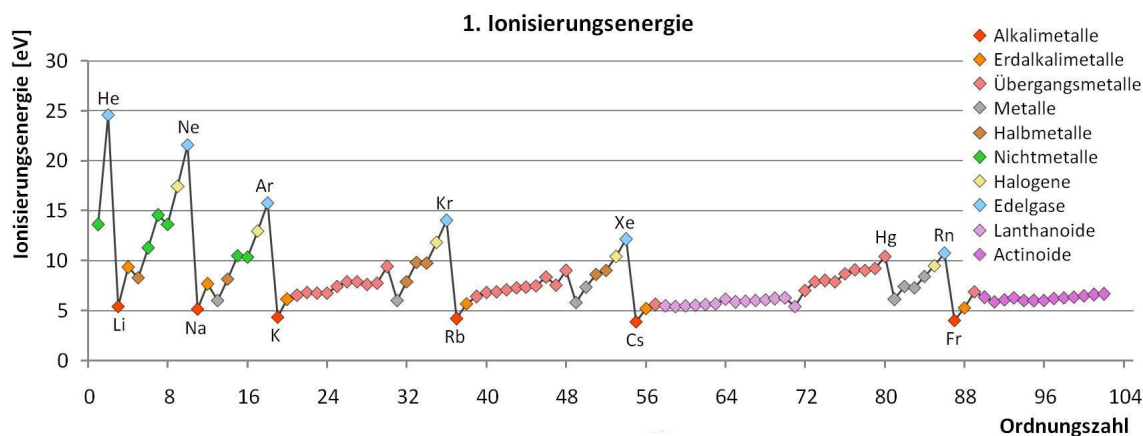
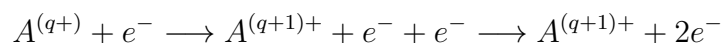
Da sich also fast die gesamte sichtbare Materie in diesem Zustand befindet, ist es elementar, die Vorgänge in einem solchen Plasma zu verstehen. Grundlegend hierfür ist also ein tieferes Verständnis von Ionen und hochgeladenen Ionen (HCI, highly charged ions). Die Vorgänge, bei denen Ionen eine Rolle spielen (zum Beispiel in der Sonnenkorona) sind oft weit von der Erde entfernt und können aus diesem Grund nur

begrenzt Daten über die Eigenschaften der Ionen an sich, liefern. Um diese Eigenschaften zu analysieren und zu verstehen, ist es von großem Vorteil, solche Ionen auf der Erde produzieren und fangen zu können. Dieser Aufgabe widmet sich ein Teil des Max-Planck Instituts für Kernphysik. Mithilfe von EBITs (Electron Beam Ion Traps) werden hochgeladene Ionen erzeugt, gefangen und gleichzeitig untersucht.

4.3 Ionisationsprozesse

4.3.1 Ionisation durch Elektronenstoß

Wird ein Elektron in einem elektrischen Feld beschleunigt, erhält es einen Energiebetrag, der in Elektronenvolt (eV) angegeben werden kann. Dabei ist 1 eV umgerechnet $1,6 \cdot 10^{-19}$ Joule. Wird ein Elektron hinreichend beschleunigt, kann die kinetische Energie größer sein als die Ionisationsenergie eines gebundenen Elektrons. Kommt es zum Stoß, kann das freie Elektron das gebundene aus seiner Bahn entfernen. Das Atom besitzt im Vergleich zum vorherigen Zustand ein Elektron weniger und ist einfach positiv geladen. Dies nennt man Elektronstoßionisation.



2

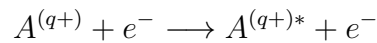
Abbildung 2: Ionisierungsenergie für neutral geladene Atome mit der Ordnungszahl

$Z = 1$ bis $Z = 104$. Es ist deutlich schwieriger ein Atom zu ionisieren, welches eine volle äußere Schale besitzt (Edelgase) als eines, bei dem sich nur ein einzelnes Elektron in dieser Schale befindet.

²https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/e/e1/Erste_Ionisierungsenergie_PSE_color_coded.png/800px-Erste_Ionisierungsenergie_PSE_color_coded.png

4.3.2 Anregung durch Elektronenstoß

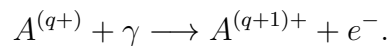
Reicht die kinetische Energie des Elektrons nicht aus, um das Atom zu ionisieren, kann das gebundene Elektron angeregt werden. Fällt es danach in seinen ursprünglichen Zustand zurück, emittiert es ein Photon einer exakt definierten Wellenlänge.



Die Energie des Photons beträgt: $\Delta E = E_A - E_N$, wobei E_A die Energie des Elektrons im angeregten und E_N die Energie des Elektrons im Normalzustand ist.

4.3.3 Ionisation durch Photonen

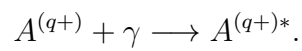
Ähnlich wie durch Elektronen kann ein Atom auch durch Photonen ionisiert werden. Zu Klärung soll kurz darauf eingegangen werden, was Photonen eigentlich sind: Licht (oder allgemeiner elektromagnetischen Strahlung) kann sowohl als Welle als auch als Teilchen aufgefasst werden (Welle-Teilchen-Dualismus). Die Lichtteilchen nennt man Photonen. Sie sind unteilbar, d.h. sie können als Energieportionen aufgefasst werden, die nur als Ganzes z.B. auf ein Atom übertragen werden können. Die Größe einer solchen Energieportion berechnet man mit der Formel $E = \frac{h \cdot c}{\lambda}$, wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum, c die Lichtgeschwindigkeit und λ die Wellenlänge des Lichtes bezeichnet. Trifft ein Photon auf ein Atom, dann kann es bei ausreichender Energie des Photons zur Ionisation kommen. Eventuell vorhandene überschüssige Energie des Photons wird als kinetische Energie des Atoms freigesetzt:



4.3.4 Anregung durch Photonen

Reicht die Photonenenergie für eine Ionisation nicht aus, kann es stattdessen wiederum zu einer Anregung des Atoms kommen. Dies ist allerdings ein resonanter Prozess, der nur dann stattfindet, wenn die Energie des Photons genau der Energie des Übergangs entspricht.

Für die Absorption des Photons gilt:



Die Anregungsenergie kann beim Zurückfallen des Atoms in den Ausgangszustand wieder in Form eines Photons abgegeben werden.

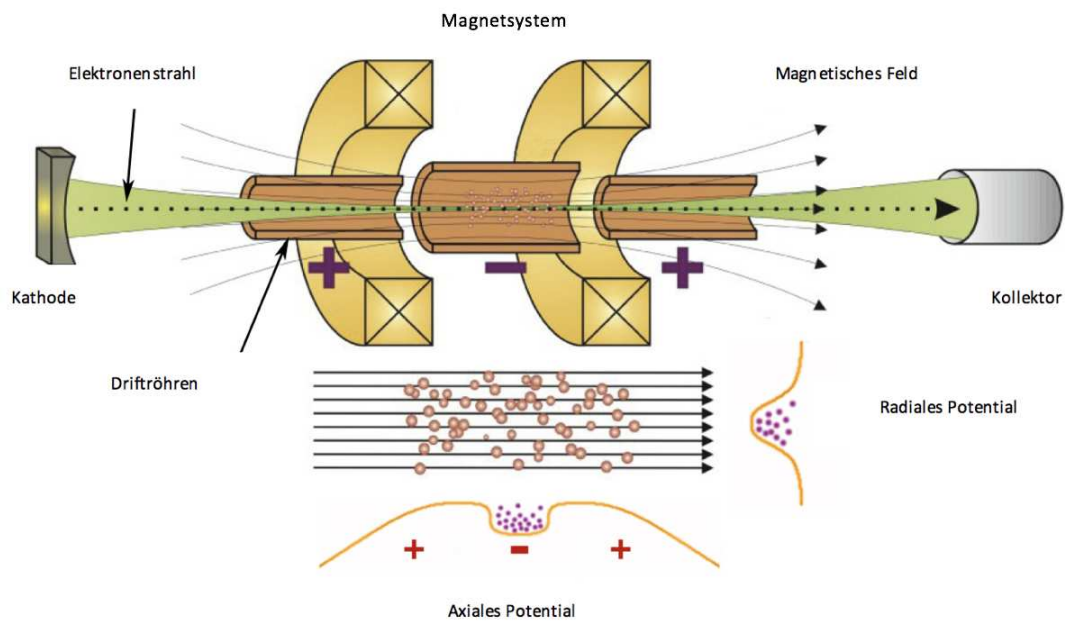
5 Elektronenstrahlionenfalle

5.1 Idee der Elektronenstrahlionenfalle

Wie bereits erwähnt, werden Ionen am Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) in sogenannten Elektronenstrahlionenfallen (*englisch*: Electron Beam Ion Traps (EBIT)) gefangen und untersucht. Solche experimentellen Aufbauten erfordern bestimmte Eigenschaften und Voraussetzungen, um die hochgeladenen Teilchen erzeugen und speichern zu können. Im Folgenden soll die Funktionsweise einer EBIT und deren grundlegende Prinzipien näher erläutert werden.

Eine EBIT besteht im Wesentlichen aus einer Elektronenkanone, den Driftröhren im Fallenzentrum und einem Kollektor. Die Elektronenkanone einer EBIT emittiert einen Elektronenstrahl, der die Driftröhren durchläuft und dort die zu untersuchende Substanz ionisiert. Am Kollektor wird der Elektronenstrahl aufgefangen und abgeführt. Das Prinzip der EBIT ist, dass mithilfe eines stark gebündelten Elektronenstrahls die Elektronen in der Hülle der Atome durch Stoßionisation entfernt werden. So entsteht ein positiv geladenes Teilchen. Zur Speicherung der Ionen ist eine rücktreibende Kraft notwendig, die immer dann auftritt, wenn sich diese von ihrer Sollposition entfernen. Axial wird dies durch das elektrostatische Potential der Driftröhren erreicht. Auf diese Art und Weise sind die Ionen entlang der Längsachse der EBIT gefangen und können nur noch radial entfliehen. Das wird durch den Elektronenstrahl selbst verhindert. Aufgrund seiner negativen Raumladung zieht er die positiv geladenen Ionen an und hält sie nahe des Fallenzentrums fest.

Die Ionen sind somit in allen drei Raumrichtungen eingefangen.



3

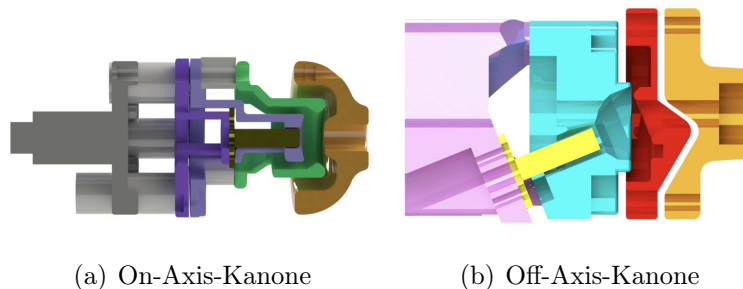
Abbildung 3: Schematische Darstellung einer EBIT. Links zu sehen ist der emittierte Elektronenstrahl, im Zentrum das angelegte elektrostatische Potential der Driftröhren und rechts der Kollektor, der den Strahl abfängt und abführt.

³http://web-docs.gsi.de/~stoe_exp/laboratory/environment/ebit/ebit_schema2_eng.jpg

5.2 Elektronenkanone

Der Elektronenstrahl der EBIT wird dabei in einer Kanone produziert. Diese besteht aus mehreren Einzelteilen: der Kathode, einer Fokuselektrode und einer Anodenelektrode. Die Kathode ist zusammengesetzt aus einer Mischung aus Bariumoxid und Wolfram und hat eine Betriebstemperatur von ungefähr 1000° C. Durch geeignete Spannungen zwischen Kathode, Anode und Fokussierelektrode werden die Elektronen beschleunigt und zu einem Strahl gebündelt, der in Richtung des Fallenzentrums geführt wird. Das Besondere der im Rahmen dieser Arbeit benutzten EBIT ist, dass eine Off-Axis-Kanone zum Einsatz kommt. Dieser Aufbau unterscheidet sich von der meistens benutzten Konstruktion („On-Axis-Kanone“), bei der sich die Kathode auf gleicher Höhe befindet wie Ionenfalle und Kollektor. Die Elektronen werden geradlinig auf der Hauptachse der EBIT geschossen.

Bei der hier verwendeten Methode befindet sich die Kanone unterhalb der Achse des Elektronenstrahls. Damit die Elektronen auf ihre Sollbahn kommen, werden sie mithilfe von elektrostatischen Feldern auf ihre eigentlich vorhergesehene Bahn gelenkt.



4

Abbildung 4: Vergleich beider Kanonentypen. Im rechten Bild ist gut sichtbar, dass die Kathode zur Achse der EBIT geneigt ist. Der Neigungswinkel beträgt 22°

⁴Masterarbeit Steffen Kühn S.30, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Heidelberg.

Nachteil ist, dass der Aufbau und die Inbetriebnahme etwas komplizierter wird, da die Potentialfelder genau angepasst werden müssen, um die Elektronen richtig auf die Bahn zu lenken. Ist das E-Feld falsch angelegt, kann es dazu kommen, dass der Elektronenstrahl weder die injizierten Atome ionisiert, noch den Kollektor trifft.

Der Aufbau der Off-Axis-Kanone ist neuartig und wurde an der verwendeten EBIT zum ersten Mal vom Betreuer dieser Arbeit gebaut und integriert. Für weitere Information über diesen Kanontyp wird an dieser Stelle auf weiterführende Literatur verwiesen.

5.3 Vakuum

Zur Inbetriebnahme einer EBIT muss im Experiment ein Ultrahochvakuum herrschen. Bei Betrieb werden Drücke zwischen 10^{-7} und 10^{-10} mbar erreicht. Dieses Ultrahoch-Vakuum ist notwendig um die Experimente durchführen zu können. Steigt der Druck, so gibt es mehr Teilchen im Innenraum der EBIT. Somit steigt die Wahrscheinlichkeit, dass der Elektronenstrahl auf diese Teilchen trifft. Folge ist eine Ablenkung des Strahls. Die Elektronen treffen dann gegen die Innenwände der EBIT. Dies führt nicht nur zu Materialschäden, sondern auch dazu, dass die injizierten Atome nicht mehr richtig ionisiert werden können. Verantwortlich für den guten Druck in der EBIT ist ein System aus mehreren Pumpen. Wird die EBIT belüftet (beispielsweise für Reparaturen), so dringt Luft in diese ein. Die Pumpen benötigen dann bis zu mehreren Wochen, um wieder den Idealdruck zu erreichen.

5.4 Aufbau des Magnetsystems

Die Funktion des Magnetsystems ist es, den Elektronenstrahl zu komprimieren. Dabei wird die Elektronendichte vergrößert. Dies ist notwendig, damit der Strahl die injizierten Atome mit einer hohen Rate trifft und ionisiert. Wäre der Strahl nicht komprimiert, könnten sich die Ionen in einem größerem Bereich bewegen, da sie aufgrund der geringeren Raumladung nicht so stark vom Elektronenstrahl angezogen würden.

Normalerweise besitzen EBITs supraleitende Magnete, die ein sehr starkes Feld erzeugen können. An dieser EBIT wurde allerdings ein System aus Permanentmagneten eingebaut. Dies hat den Vorteil, dass keine Wartung und keine Kühlung mit flüssigem Helium erforderlich ist und somit Kosten eingespart werden können.

5.5 Vakuumkammer

Die eigentliche Falle ist in einem metallischen Würfel eingebaut. Für spektroskopische Untersuchungen sind mehrere optische Zugänge angebracht. Im Inneren dieses Würfels befindet sich der Driftröhrenaufbau, der das Fallenzentrum bildet. In diesem werden die Ionen gefangen und ionisiert. Sie sind, verglichen mit dem gesamten Aufbau, relativ klein und haben eine Länge von ungefähr 10 cm. Man kann an diesen Driftröhren an verschiedenen Stellen elektrostatische Potentiale anlegen. In Abb. 5 sind diese Stellen gut sichtbar. Die Potentiale werden an den Elektroden aus Titan angelegt. Dabei werden die innersten auf ein etwas niedrigeres Potential gelegt, als die äußeren. So entsteht die vorher erwähnte Potentialmulde, in der die Ionen gefangen und untersucht werden. Der Elektronenstrahl verläuft dabei im Inneren der abgebildeten Driftröhren.

5.6 Kollektor

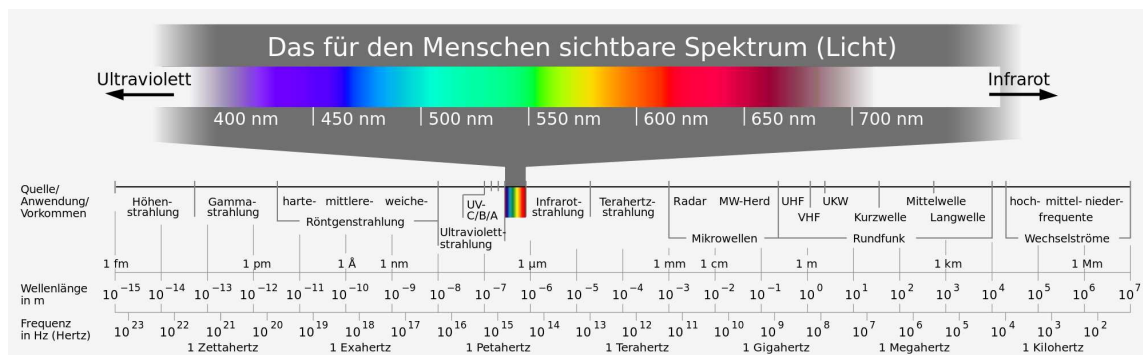
Der Kollektor ist ein weiterer elementarer Bestandteil einer EBIT. Er ist dazu da, die ankommenden Elektronen abzufangen und kontrolliert abzuführen. Der Kollektor wird dauerhaft mit Wasser gekühlt, um eine Überhitzung zu vermeiden. Beim Abführen der ankommenden Elektronen wird zudem der Strom mithilfe eines Strommessgeräts gemessen. Man vergleicht dabei den am Kollektor ankommenden Strom mit dem, der die Kanone verlässt. Das Verhältnis der beiden Werte nennt man Transmission. Man spricht von der Transmission. Idealerweise sollte sie 100% betragen. Dies wird im Experiment aber selten erreicht. Gute Transmissionswerte sind dabei ab 95% und aufwärts. Ist die Transmission zu niedrig, bedeutet das, dass irgendwo die Elektronen verloren gehen beziehungsweise nicht am Kollektor ankommen. Dies kann unter Umständen zu einer Druckerhöhung führen. Meistens kann ein solches Problem aber durch leichtes Verschieben der Kanonen gelöst werden (Die Kanonen und somit die Kathode lässt sich in Mikrometerschritten in alle drei Raumrichtungen bewegen).

5.7 Anwendungen von Elektronenstrahlionenfallen

Ebits werden in der Grundlagenforschung in verschiedenen Wissenschaftsfeldern eingesetzt. Sie werden dazu verwendet, die Bedingungen zu untersuchen, die in den extrem heißen Plasmen von Sternatmosphären herrschen. Des weiteren lassen sich mithilfe der HCI die Vorhersagen der Quantenelektrodynamik überprüfen. Auch in der Nanotechnologie und in der Medizin gibt es potentielle Einsatzmöglichkeiten, z.B. bei der Erzeugung von hochgeladenen Kohlenstoffionen für die Krebstherapie.

6 Optische Spektroskopie

Das Ziel optischer Spektroskopie ist es, das sichtbare Licht zu analysieren. Für den Menschen ist nur ein ganz spezieller Wellenlängenbereich sichtbar. Dieser liegt zwischen 390 nm und 750 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ Meter}$). Dabei ist das Licht mit kürzerer Wellenlänge energiereicher und hat für uns eine bläuliche Farbe. Langwelliges Licht mit einer Wellenlänge von über 700 nm sehen wir Menschen als rotes Licht. Dieses ist energieärmer als das blaue, kurzwellige Licht. Trifft eine Mischung von Licht aller Wellenlängen des sichtbaren Bereiches auf das menschliche Auge (wie sie z.B. von der Sonne ausgesandt wird), so entsteht ein weißer Farbeindruck.



5

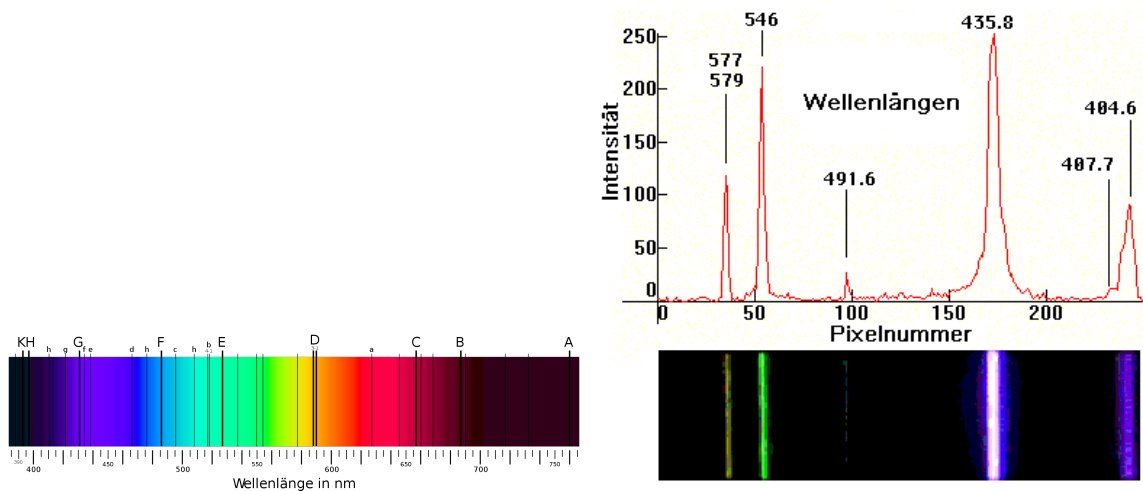
Abbildung 5: Gesamtes elektromagnetisches Spektrum. Hervorgehoben ist der für den Menschen sichtbaren Bereich

Durchgeführt werden die Experimente mit sogenannten Spektroskopen oder Spektrometern.

Bei der Aufnahme von Spektren differenziert man zudem zwischen Emissionsspektrum und Absorptionsspektrum. Bei Ersterem wird das emittierte Licht einer Probe

⁵https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/1/15/Electromagnetic_spectrum_c.svg/2000px-Electromagnetic_spectrum_c.svg.png

analysiert. Beim Zweiten wird Licht aller Wellenlängen durch das Untersuchungsobjekt geleitet. Dabei wird von der Probe (z.B. Atmosphäre) Licht einer bestimmten Wellenlänge absorbiert. Der Rest des Spektrums bleibt unverändert. Sichtbar sind auf der Aufnahme dann für die Probe typische dunkle beziehungsweise schwarze Linien. Sie befinden sich genau bei der Wellenlänge, dessen Licht die Probe absorbiert hat. Ein sehr bekanntes Absorptionsspektrum kann man im Sonnenlicht beobachten. In Abbildung 8a sind die charakteristischen schwarzen Linien (Fraunhofer'sche Linien) zu sehen. An der Position der Linien kann man ablesen, aus welchen Stoffen die Sonnenatmosphäre zusammengesetzt ist. Das Absorptionsspektrum bildet das Gegenteil zum Emissionsspektrum, bei dem die einzelnen Linien, die sichtbar sind, die Wellenlänge des Lichts darstellen, die die Probe emittiert hat.



(a) Absorptionsspektrum des Sonnenlichts (b) Emissionsspektrum einer Quecksilberlampe

6

Abbildung 6: Vergleich eines Absorptions- und eines Emissionsspektrums

⁶https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7d/Fraunhofer_lines_DE.svg/2000px-Fraunhofer_lines_DE.svg.png und https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/a/af/Hg_Niederdruck_Spektrum.png

6.1 Optische Elemente

Da während der Arbeit ein optischer Aufbau entwickelt wurde, sollen die wichtigsten Objekte kurz vorgestellt werden.

6.1.1 Spiegel und Linsen

Das Licht der Ionen, das aus der EBIT kommt, kann aufgrund der Bauweise des Gerätes nicht direkt in ein Spektrometer geführt werden. Daher wird das Licht mithilfe von Spiegel und Linsen in das Spektrometer geleitet.

Spiegel haben die Eigenschaft das Licht zu reflektieren. Die meisten Spiegel sind aber keine perfekten Spiegel in dem Sinne, dass sie 100% des einfallenden Lichts reflektieren können. Die meisten, auch die im Versuchsaufbau beschriebenen Spiegel, reflektieren weniger als 100% des Lichts. Je mehr Spiegel also für das Drehen und Leiten des Ionenlichts verwendet werden, desto mehr Licht geht verloren. Deshalb ist es wichtig, für den Aufbau so wenig optische Elemente wie möglich zu verwenden, damit die Intensität des Lichtes, das am Spektrometer ankommt, maximal ist.

Linsen bündeln das Licht im Gegensatz zu Spiegeln auf einen Brennpunkt. Jede Linse hat dabei eine spezifische Brennweite. Auch sie absorbieren einen Teil des ankommenden Lichts.

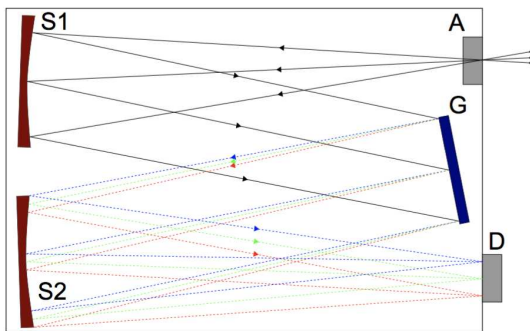
6.1.2 Gitter

Um das von den Ionen ausgesandte Licht in seine verschiedenen Wellenlängen zu zerlegen, wurde ein „optisches Gitter“ (oder kurz „Gitter“) verwendet. Einerseits wirkt das Gitter wie ein gewöhnlicher Spiegel, d.h. es reflektiert das Licht unabhängig von

seiner Wellenlänge, dabei ist der Ausfallswinkel gleich dem Eintrittswinkel. Zusätzlich zu dieser sogenannten 0. Ordnung sind beim Gitter aufgrund von Beugung und Interferenz jedoch noch weitere Ausfallswinkel möglich, bei denen der „Reflexionswinkel“ nicht nur vom Eintrittswinkel, sondern auch von der Wellenlänge des Lichtes abhängt.

6.2 Czerny-Turner-Spektrometer

Beim benutzten Spektrometer handelt es sich um ein sogenanntes Czerny-Turner-Spektrometer, welches aus zwei Kollimatorsiegeln und einem Gitter besteht (siehe Bild). Es ist eine Erweiterung der Littrowanordnung.



(a) Schema Czerny-Turner-Spektrometer



(b) Czerny-Turner-Spektrometer

7

Abbildung 7: Vergleich Schema und reales Czerny-Turner-Spektrometer

⁷Masterarbeit Michael A. Blessenohl ausgeführt am Max-Planck-Institut für Kernphysik, Optische Spektroskopie an hochgeladenen Bismut-Ionen und Konstruktion eines hochauflösenden VUV-Gitterspektrometers *und* eigenes Bild

Im Spektrometer wird der Eintrittsspalt auf den CCD-Detektor abgebildet. Zunächst lenkt der Spiegel S1 das vom Eintrittsspalt kommende Licht auf das Gitter, dabei entsteht ein Bündel paralleler Strahlen. Vom Gitter wird dieses parallele Lichtbündel reflektiert, wie oben erwähnt ist dabei der Reflexionswinkel für verschiedene Wellenlängen leicht unterschiedlich. Das vom Gitter reflektierte Licht trifft auf den Spiegel S2, der es auf die CCD lenkt. Dort entsteht ein Bild des Eintrittsspalt, dessen Position jedoch nun abhängig von der Wellenlänge des Lichtes ist. Die CCD registriert die Lichtintensität in Abhängigkeit von der Position (Kanal-Nummer). Mithilfe von Kalibrationsdaten kann jede Position (jeder Kanal) in die zugehörige Wellenlänge umgerechnet werden. So werden die von der CCD gelieferten Daten mit einer Auswertungssoftware in ein Spektrum umgerechnet, welches dann am Computer dargestellt weiterverarbeitet werden kann.

7 Projektarbeit

Im Folgenden soll beschrieben werden wie das Projekt verlaufen ist, was die Ziele waren und ob diese erreicht worden sind.

7.1 Aufgabenstellung und Ausgangssituation

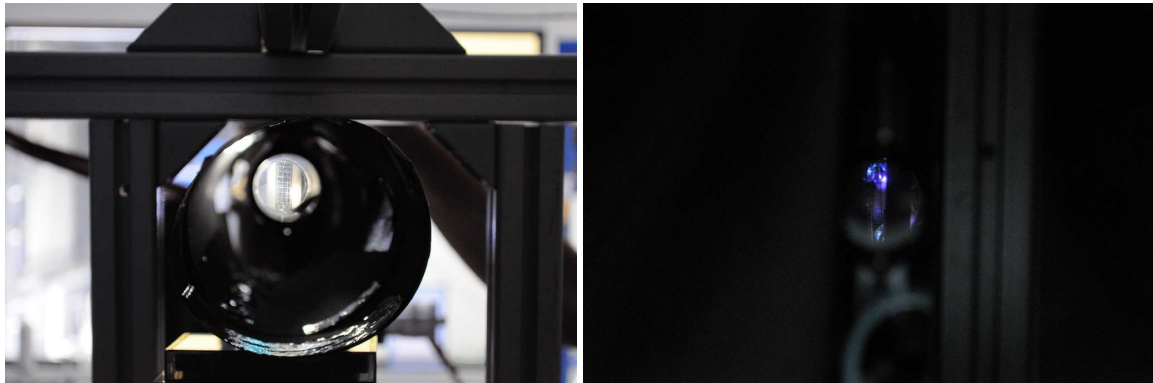
Das Projekt begann im Dezember 2016 am Max-Planck-Institut für Kernphysik. Dank der Unterstützung von Seiten des Hector-Seminars war es möglich die Kooperationsphase des Hector-Seminars am genannten Institut durchzuführen.

Ziel war es, ein optisches Spektrometer in Betrieb zu nehmen, es mit der PolarX-EBIT zu verbinden und mit diesem Aufbau, die optischen Spektren hochgeladener Ionen zu untersuchen. Dieses Projekt war insofern etwas Neues, da an dieser EBIT in der Vergangenheit nur röntgen- und laserspektroskopische Untersuchungen durchgeführt wurden. Neben Anschaffung und Inbetriebnahme des optischen Spektrometers musste auch die Lichtführung zwischen EBIT und Spektrometer ganz neu konzipiert, aufgebaut und getestet werden. Erst danach konnte mit den eigentlichen Messungen begonnen werden.

7.2 Erste Probemessungen

Erste Messungen zeigten schnell, dass es Probleme mit störenden Lichtblitzen gab, die von den Driftröhren herrührten. Dort gab es Überschläge zwischen den Elektroden, die zu Funken führten (siehe Abbildung). Diese Funken waren zuvor nie aufgefallen, da sie bei der Röntgenspektroskopie nicht stören. Es war jedoch zu erwarten,

dass sie aufgrund ihrer hohen Intensität im sichtbaren Bereich das zu untersuchende Spektrum der Ionenwolke vollkommen überdecken würden.



(a) Driftröhren in der EBIT

(b) Funken in den Driftröhren der EBIT

Zur Lösung dieses Problems musste die EBIT stillgelegt, belüftet und in ihre einzelnen Bestandteile zerlegt werden. Allein der Zusammenbau nach der Reparatur nahm 2 bis 3 Wochen in Anspruch, eine weitere Woche dauerte es, bis die Pumpen das nötige Vakuum wieder hergestellt hatten. Erst dann konnte die Arbeit an den optischen Komponenten wieder aufgenommen werden.

7.3 Aufbau des Spiegelsystems

Mit einem System aus Spiegeln und Linsen sollte die Ionenwolke auf den Eintrittsspalt des Spektrometers abgebildet werden. Zusätzlich muss eine Strecke von ein bis zwei Metern überwunden werden. Die Abmessungen von Ionenwolke und Eintrittsspalt liegen beide in der Größenordnung Millimeter. Da eine Messung mehrere Stunden dauern kann, muss ein sehr stabiler Aufbau gewählt werden, der auch z.B. durch Umherlaufen im Labor nicht beeinträchtigt wird.

Der eigentliche Aufbau besteht aus zwei Linsen und einem Spiegel. Die erste Lin-

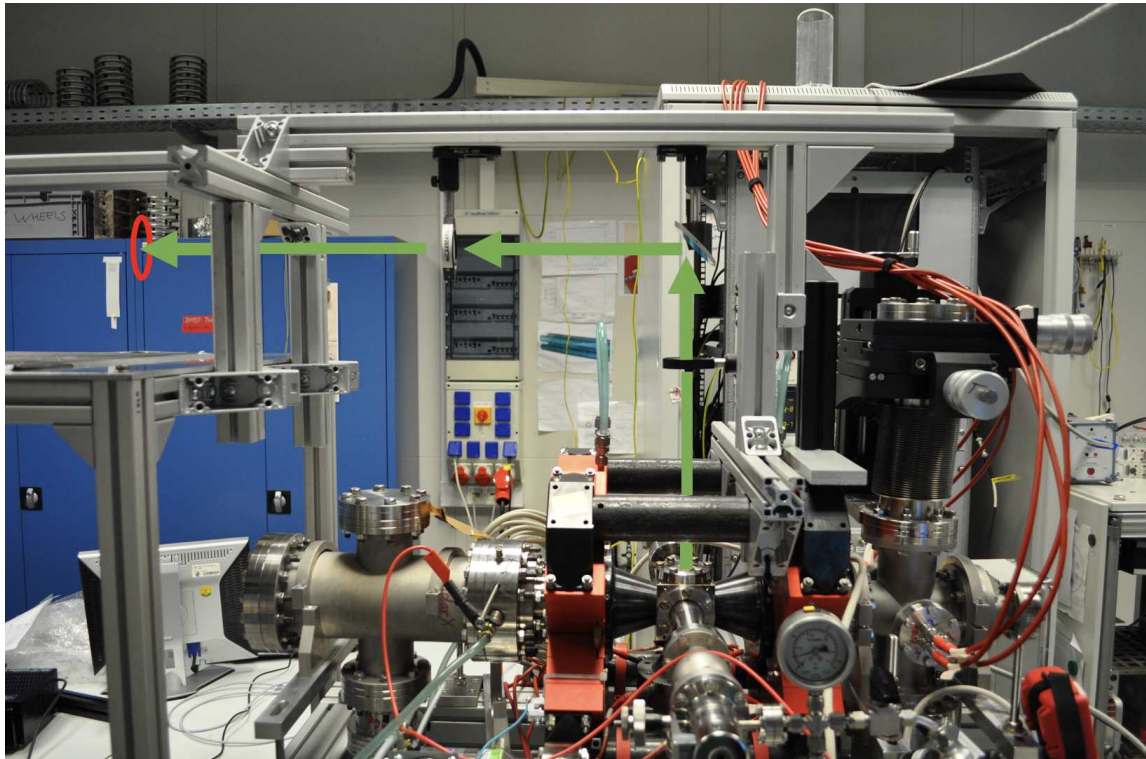


Abbildung 8: Aufbau des Spektrometers

se parallelisiert das von den Driftröhren stammende Licht. Dieses Licht trifft dann auf den Spiegel der im 45° Grad Winkel zum eintreffenden Licht steht und leitet es in Richtung des Spektrometers, welches auf einem metallischen Konstrukt steht. Eine zweite Linse fokussiert das Licht auf den Eintrittsspalt des Spektrometers. Die Brennweiten beider Linsen betragen einmal 15 cm und einmal 40 cm. Für eine scharfe Abbildung muss deshalb der Abstand zwischen Ionenwolke und der ersten Linse genau 15 cm und der zwischen zweiter Linse und Eintrittsspalt genau 40 cm betragen. Bei Aufnahmen werden die Spiegel zuerst mit gebauten „Kartonröhren“ und danach mit mehreren schwarzen Tüchern überdeckt. Diese haben die Funktion Streulicht von außen zu absorbieren und zu verhindern, dass eben dieses nicht durch den Eintrittsspalt des Spektrometers dringen und die Messwerte verfälschen kann. Zusätzlich wird das Raumlicht ausgeschaltet, um weiteres Störlicht zu minimieren. Das ist un-

bedingt notwendig, da das Licht der Ionen derart schwach ist, dass alle zusätzlichen Lichtquellen die Messung beeinflussen würden. Bevor das Spektrometer auf das dafür vorgesehene Gerüst aufgebaut und ausgerichtet wurde, wurde zunächst einmal versucht, die Driftröhren auf einer Kamera abzubilden. Der erste Schritt ist, die Driftröhren mit Raumlicht über den Spiegel und die beiden Linsen scharf fotografieren zu können. Ist dies erreicht, weiß man, dass diese optischen Komponenten korrekt ausgerichtet sind.

Danach wird in einem zweiten Schritt das optische System abgedeckt und die EBIT in Betrieb genommen. Nun kann die rötlich leuchtende Kathode fotografiert werden. Damit in einem dritten Schritt auch der vergleichsweise schwach leuchtende Elektronenstrahl erkennbar wird, muss die Belichtungszeit auf mindestens 30 Sekunden erhöht werden. Nach mehreren Versuchen konnte ein gutes Bild bei langer Belichtungszeit der Kamera aufgenommen werden (siehe nächste Seite). Sehr gut sichtbar ist die Kathode, welche rötliches Licht emittiert; auch der Elektronenstrahl ist erkennbar. Bei genauerer Betrachtung lassen sich zudem blaue Punkte auf dem Elektronenstrahl erahnen. Dies sind die Ionen, an denen Spektroskopie betrieben werden soll.

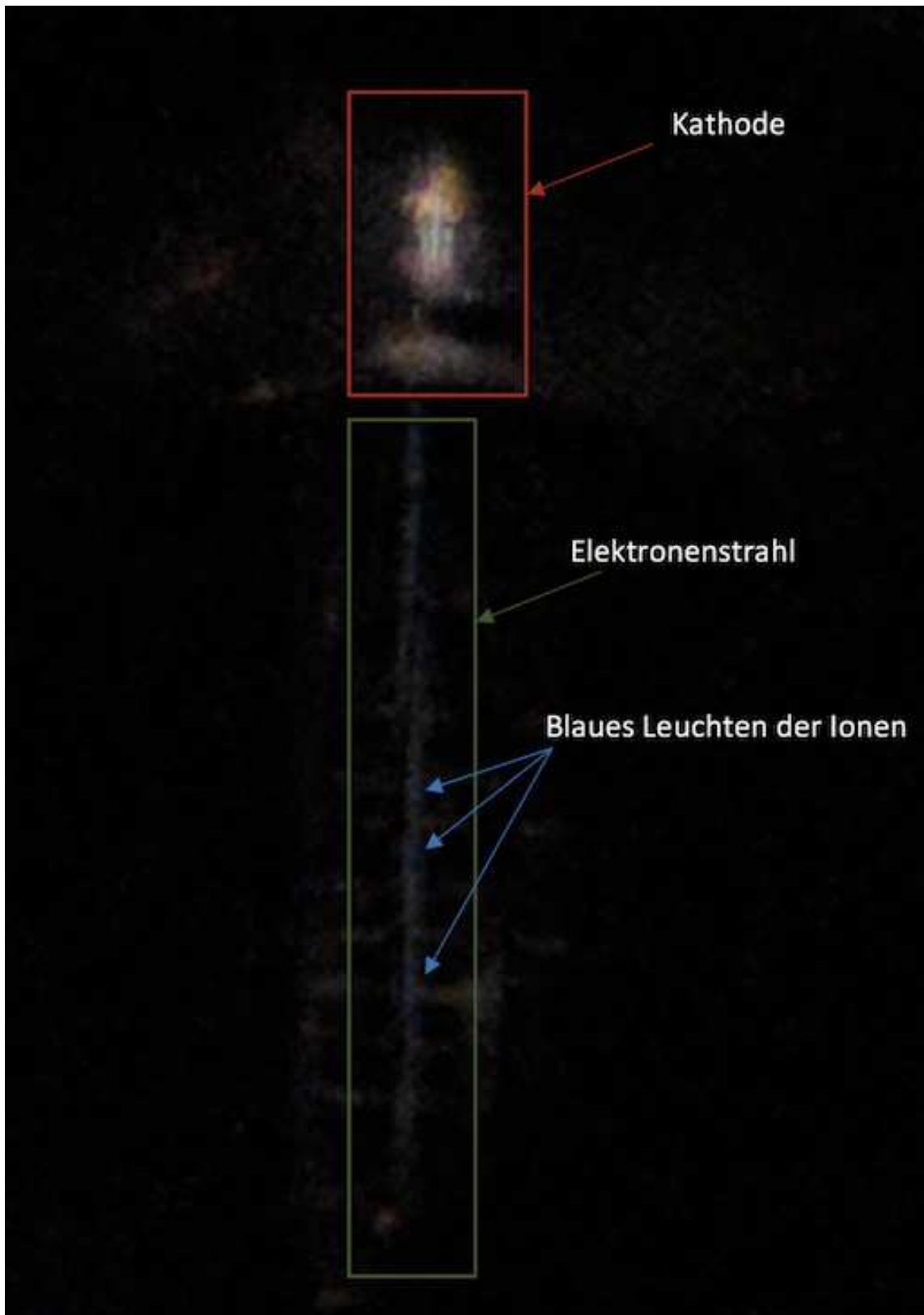


Abbildung 9: Kathode, Elektronenstrahl und Ionen

7.4 Messungen

7.4.1 Erste Bilder mit dem Gitter in der Nullten Ordnung

Die optischen Komponenten müssen nun so justiert werden, dass das Bild der leuchtenden Ionen genau auf den Eintrittsspalt fällt. Die Schwierigkeit dieser Aufgabe wird klar, wenn man bedenkt, dass der in Abbildung 9 im grünen Rechteck dargestellte Bereich in der Ebene des Eintrittsspalt es insgesamt nur 1 mm breit ist. Er muss mit dem Eintrittsspalt von 2 mm Breite zur Deckung gebracht werden. Nun muss man das Licht dieser Ionen über Spiegel auf den Eintrittsspalt fokussieren, denn genau dann liefert das Spektrometer, dass am besten aufgelöste Bild. Ob das Spektrometer richtig ausgerichtet ist, sieht man anhand des CCD- (Kamera) Bildes. Dieses bildet in der Nullten Ordnung genau den Eintrittsspalt ab. Wie bereits erklärt ist die Ausrichtung nicht leicht zu realisieren. Nach anfänglichen Fehlschlägen, wurde durch leichtes Drehen des Spiegels mehr und mehr Licht auf der CCD registriert.

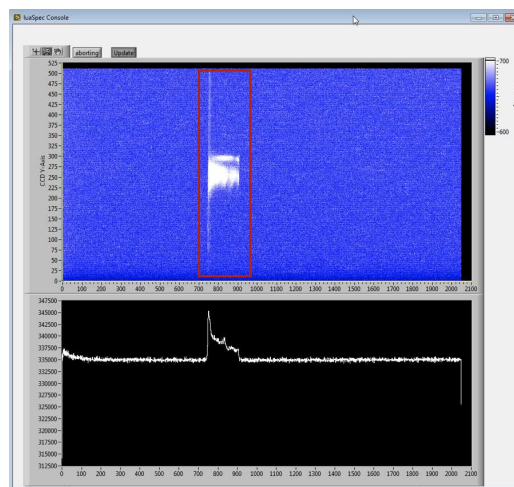


Abbildung 10: Aufnahme der CCD mit Gitter in der nullten Ordnung

Dies wurde so lange durchgeführt, bis das Maximum gefunden war. Bei dieser Po-

sition trifft das meiste Licht aus den Driftröhren in das Spektrometer. Anzumerken ist noch, dass dies nicht nur das Licht der Ionen ist. Auch die Kathode strahlt Licht ab. Dieses ist sogar so stark, dass das Licht detektiert wird (heller „Block“ in Abbildung 10), zum größten Teil von der Kathode stammt. Wie das von den Ionen emittierte Licht herausgefiltert werden kann, wird später noch erläutert.

7.4.2 Testmessungen und erstes Abbilden der Ionen

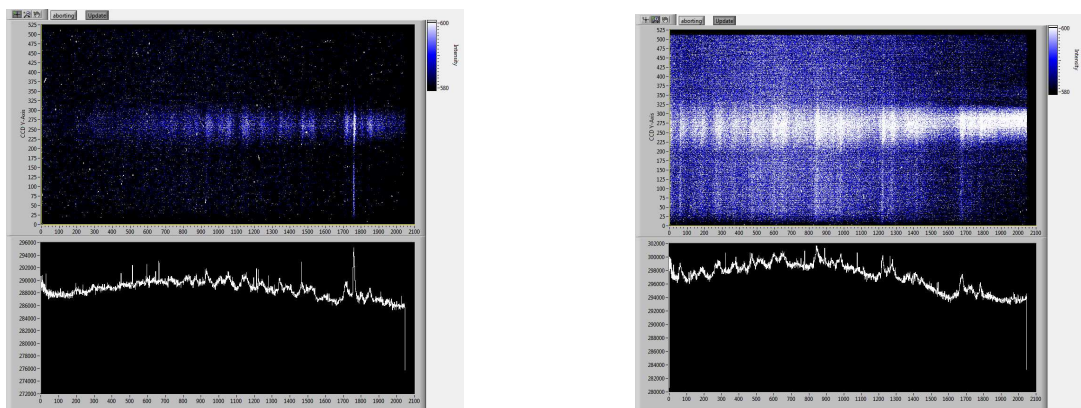
Nach erfolgreichem Ausrichten der optischen Komponenten ist das erste Aufnehmen des von den Ionen abgestrahlten Lichts der nächste Schritt. Dafür muss das Gitter von der nullten in die erste Ordnung umgestellt werden. Außerdem benötigt man Anhaltspunkte wie bekannte, besonders starke Linien des zu untersuchenden Elements. Werden diese detektiert, weiß man, dass der Aufbau, die EBIT und das Spektrometer korrekt funktionieren. An dieser Stelle wurde Argon als das zu untersuchende Element gewählt, da in Dr. Crespos Gruppe bereits Erfahrung mit diesem Element gesammelt worden war.

Nach einigen Messungen ohne Ergebnis konnte schließlich bei ungefähr 540 Nanometern eine relativ starke Linie gefunden werden. Oben wurde bereits ein Bild gezeigt, wie das Spektrometer die Information einer Messung ausgibt.

Diese Ausgabe ist in zwei Teile unterteilt. Der obere Teil stellt das von der CCD registrierte Bild dar. Es besteht aus 2048 Pixel mal 512 Pixel. Jedes einzelne dieser Pixel nimmt dabei während der Messung Licht auf und wandelt dieses in ein elektrisches Signal um. Zu sehen sind helle und dunkle Bereiche. Je mehr Licht auf die CCD gefallen ist, desto heller wird der jeweilige Pixel im oberen Bereich des Auswertungsbildschirms dargestellt.

Der untere Teil zeigt das eigentliche Spektrum, d.h. eine Darstellung von Wellenlängen auf der x-Achse und Intensität auf der y-Achse. Dieses Spektrum wird aus

der oberen Darstellung durch spaltenweises Zusammenfassen der Pixel berechnet, da diese Pixel (bei Einstellung des Gitters auf die erste Ordnung) alle Licht registriert haben, das dieselbe Wellenlänge hat.



(a) Messung von Argon bei 540 nm

(b) Messung ohne Argoninjektion bei 540 nm

Abbildung 11: Vergleich Messung mit Argon und ohne Argoninjektion.

Um den Beitrag von Argon in dem Spektrum zu identifizieren, muss zusätzlich noch eine Dunkelmessung durchgeführt werden. Sie läuft genauso ab wie die erste Messung, mit dem einzigen Unterschied, dass in diesem Fall kein Argon injiziert wird. Dies dient zur Korrektur des Untergrundes. Er besteht aus dem unerwünschten Licht der Kathode und der Umgebung. Da diese Rahmenbedingungen sich nicht ändern sollten, kann danach die zweite Messung von der ersten abgezogen werden. Dieses Untergrundspektrum wird pixelweise vom ersten Spektrum subtrahiert. So erhält man ein Spektrum, das lediglich die Argonemission enthält. Dieses Vorgehen ist in Abbildung 11 dargestellt. Dabei ist zu beachten, dass starke Belichtung hier in rot, mittlere in grün und schwache in blau dargestellt ist. In den vorangegangenen Bildern war die Farbgebung mit weiß (starke), blau (mittlere) und schwarz (schwache Belichtung) anders.

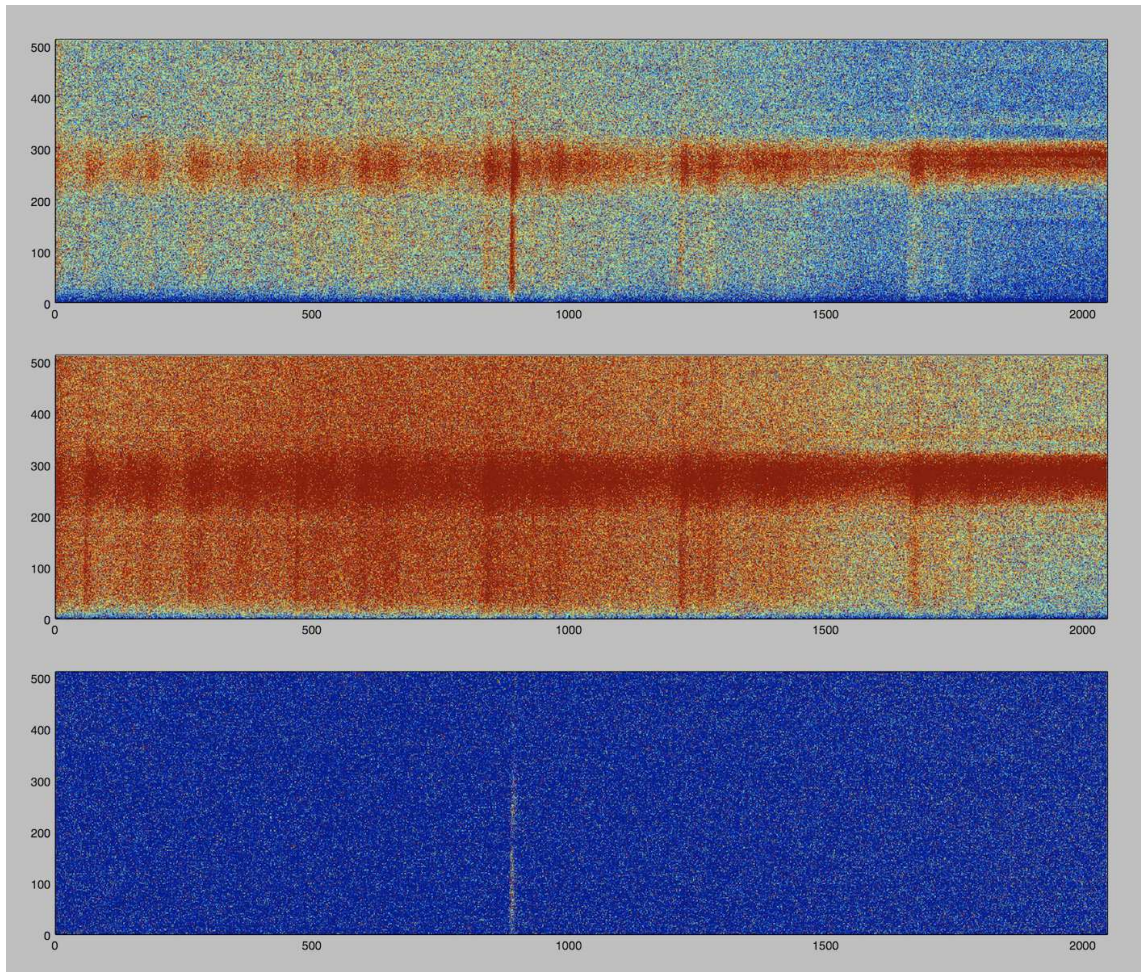


Abbildung 12: Verarbeitung der CCD-Bilder. Oben: CCD-Bild mit Argon, Mitte: Untergrund (ohne Argon), unten: CCD-Bild mit korrigiertem Untergrund

Im oberen Drittel von Abbildung 12 ist die Messung mit Argoninjektion zu sehen, das im Bild darunter zeigt die entsprechende Dunkelmessung ohne Argon. Man sieht sehr deutlich, dass einige der Linien, die im oberen Bild zu sehen sind, auch im zweiten Bild erkennbar sind. Diese Linien entsprechen Licht in der EBIT, welches *nicht* von den Argonionen stammt. Die Lichtemission stammt von anderen, ebenfalls in der EBIT zu findenden Elementen wie Stickstoff, Sauerstoff oder Aluminium. Jetzt wird erkennbar, wie wichtig die Dunkelmessung wird. Man zieht diese von der ersten

ab und erhält so das untere und letzte Bild. Dieses zeigt nun viel weniger Linien als die ersten beiden Bilder, im konkreten Fall nur eine einzige. Man kann diese Linie nun Argon zuweisen.

Der horizontale Streifen entspricht dem von der Kathode emittierten Licht. Da in beiden Fällen (mit und ohne Argon) bei gleichen Bedingungen gemessen wurde, wird, wie im dritten Bild sichtbar, dieses Störlicht sauber abgezogen. Nun kann man das Ergebnis (wie bereits gezeigt) mithilfe eines Pythonscripts in ein durch spaltenweises Aufsummieren in ein Spektrum umrechnen. Der aus den Messdaten entstehende Graph enthält eine Argonlinie bei ungefähr 540 nm Nanometer (siehe Abbildung 12). Wie erwartet ist neben diesem starken Peak, ein relativ gleichmäßiger Untergrund zu erkennen. Aus diesem Ergebnis lässt sich schließen, dass es in der EBIT Argonionen gibt, welche sichtbares Licht der Wellenlänge von etwa 540 nm abstrahlen. Welchen Ladungszustand diese Ionen haben, und welche Übergänge zu der Lichtemission geführt haben, lässt sich aus den reinen Messdaten und dem Peak allerdings noch nicht sagen. Um dies sicher sagen zu können sind weitere Bearbeitungsschritte notwendig.

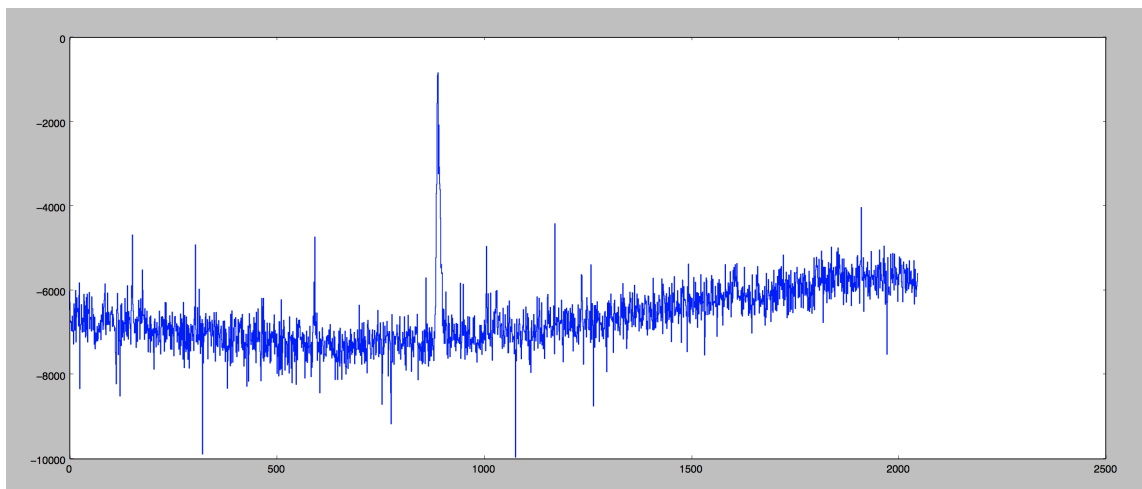


Abbildung 13: Spektrum, das aus den Daten in Abbildung 11 berechnet wurde. Argon-Emissionslinie bei bei 540 nm

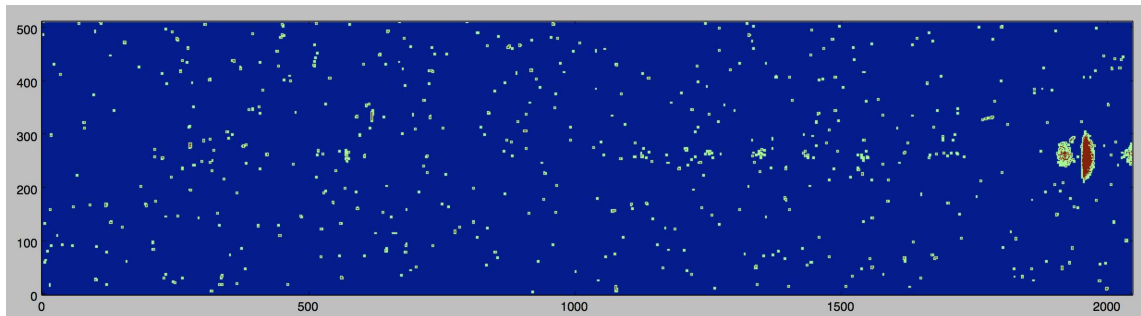
7.4.3 Entfernen von Cosmics

Ein weiterer essenzieller Schritt beim Bearbeiten der Messdaten ist das Entfernen von sogenannten „Cosmics“. Hierbei handelt es sich um hochenergetische kosmische Strahlung, welche aus dem Weltall stammt. Deren Bestandteile sind hauptsächlich Sekundärteilchen wie zum Beispiel Photonen oder Elektronen. Auf die äußeren Schichten der Atmosphäre gelangen pro Quadratmeter mehrere hundert bis hin zu tausend Teilchen pro Sekunde. Viele dieser Teilchen erreichen dabei die Erdoberfläche. Deshalb kommt auch die CCD mit dieser Strahlung in Kontakt. Sie äußert sich in der Aufnahme des Spektrums als weiße Punkte: Die Pixel reagieren nämlich sehr empfindlich auf diese hochenergetischen Teilchen und werden voll angesteuert. Im geplotteten Graph erscheinen die Cosmics als sehr dünne und scharfe Peaks. Sie beeinflussen somit das Aussehen des finalen Spektrums und aus diesem Grund ist es wichtig, sie bereits früh aus den Messdaten zu entfernen. An dieser Stelle wird ein im Laufe des Projekts entwickeltes Programm benutzt. Das Programm durchläuft folgende Punkte um das aufgenommene Spektrum zu bearbeiten:

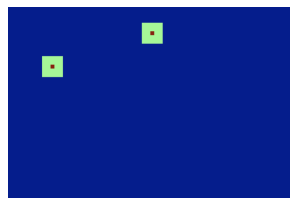
1. Zunächst einmal werden die aufgenommenen Werte eingelesen.
2. Als zweites sucht das Programm nach den sogenannten Cosmics . Dabei untersucht es die Helligkeit eines Pixels im Vergleich zu den umliegenden Pixel (Dabei wird davon ausgegangen, dass das Cosmic die einzelnen Pixel „voll“ oder gar nicht trifft). Diese sollten im Normalfall keine große Intensitätsabweichung (nach oben) vom untersuchten Pixel aufweisen. Tun sie das, so wird dieses Pixel markiert und sein Wert gelöscht beziehungsweise auf 0 gesetzt. Das bedeutet, für diesen Pixel wäre im Versuch an dieser Stelle gar kein Licht aufgenommen worden. Wie stark sich das eigentliche Pixel von den umliegenden unterscheiden muss, um als Cosmic gekennzeichnet zu werden, hängt von einem einstellbaren

Parameter ab. Gute Ergebnisse wurden mit einem Wert von 4 Standardabweichungen erzielt.

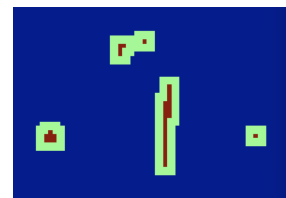
3. Nächster Schritt ist es, diesem „genullten“ Pixel einen neuen, möglichst genauen Wert zuzuordnen. Dieser sollte im Idealfall der Wert der eigentlichen Messung ohne das aufgenommene Cosmic sein. Da man aber nicht weiß, wie viel Licht die CCD ohne das Cosmic aufgenommen hätte, muss dies rekonstruiert werden. Um das „Loch“ zu füllen, wird dem Cosmicpixel der Mittelwert der umgebenden Pixel zugeordnet.
4. Es kommt allerdings oft zu dem Fall, dass ein Cosmic nicht nur ein Pixel der Kamera, sondern mehrere, nebeneinanderliegende Pixel trifft (siehe Bild nächste Seite). Das Problem liegt darin, dass die umgebenden Pixel ebenfalls genullt und somit in den Mittelwert des zu rekonstruierenden Pixels eingerechnet werden (In Wirklichkeit besitzen diese Pixel ohne Cosmics einen gewissen Intensitätswert, der sich allerdings wie bereits erwähnt nicht berechnen, sondern nur schätzen lässt.). Um den Konflikt zu lösen, wird der Vorgang der bei 2. beschrieben wird, sehr häufig (je nach Belieben 20 bis 100 Mal) wiederholt.
5. Auf diese Art und Weise bekommen zuerst die äußeren Pixel einen Wert zugeordnet und dann Schritt für Schritt, da die äußeren Werte rekonstruiert wurden, auch die inneren.



(a) CCD-Bild mit markierten Cosmics . Die eigentlichen Cosmics werden mit der Farbe rot markiert, die umgebenden Pixel, die für den Mittelwert benutzt werden, mit der Farbe grün.

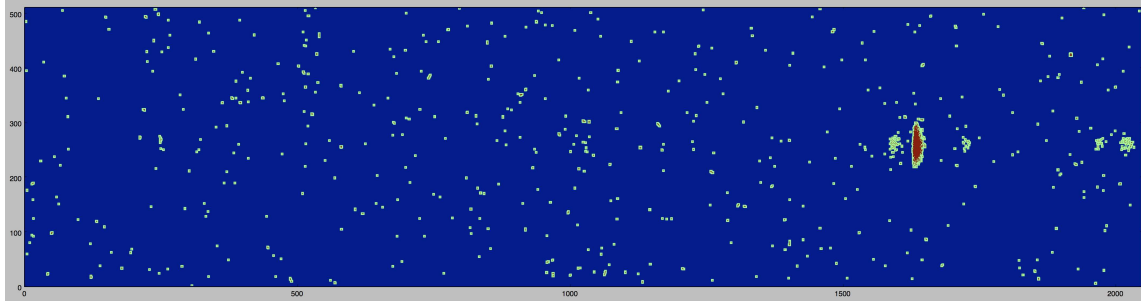


(b) Cosmic trifft nur 1 Pixel

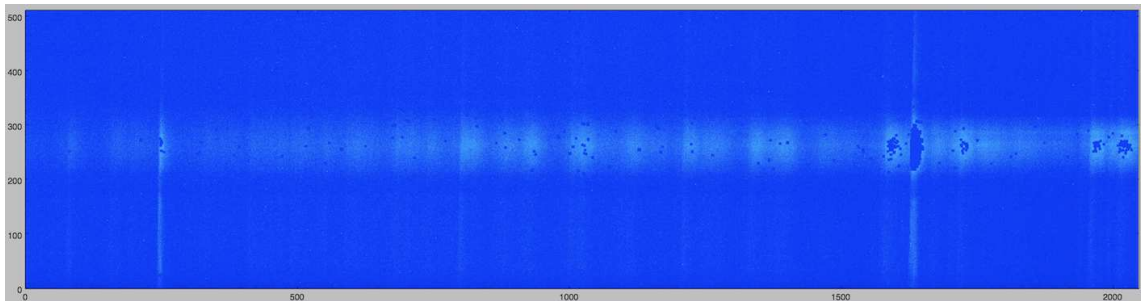


(c) Cosmic trifft mehrere Pixel

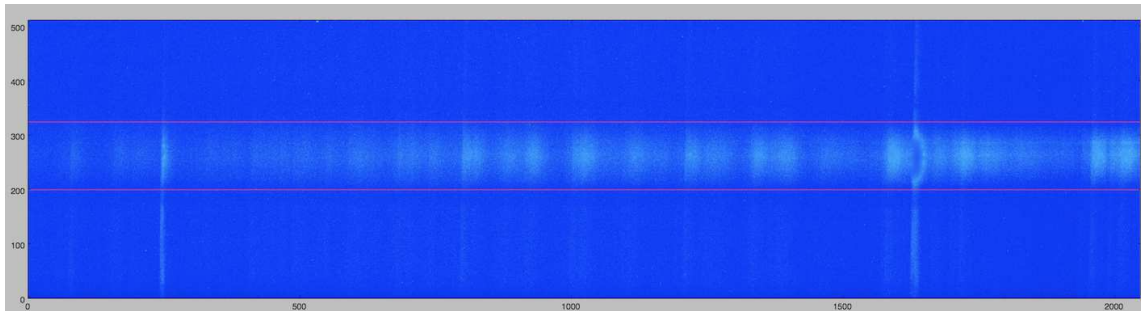
Wie beschrieben lässt sich so ein Bild von kosmischer Strahlung bereinigen. Es muss allerdings klargestellt werden, dass dieses Verfahren mit einer gewissen Unsicherheit behaftet ist. Den betroffenen Pixeln wird lediglich ein Näherungswert zugewiesen. Das Messergebnis, das ohne Cosmics registriert worden wäre, wird so bestmöglich abgeschätzt.



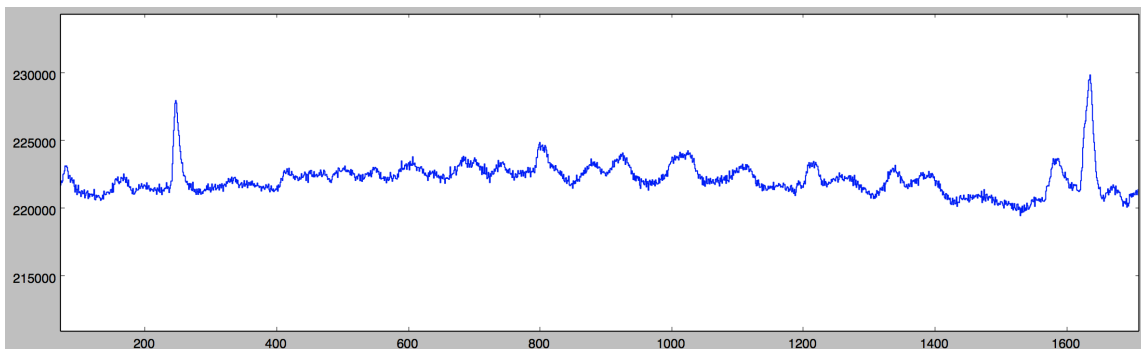
(d) CCD-Bild bei 480 nm und Argonionisation. Belichtungszeit beträgt 7200 Sekunden.



(e) „genullte“ Pixel gut sichtbar → „dunkle Flecken“



(f) Aufnahme mit rekonstruierten Pixel. Die „Flecken“ wurden größtenteils entfernt. Die horizontalen roten Linien haben in diesem Zusammenhang keine weitere Bedeutung.



(g) Dies ist das Spektrum des „gesäuberten“ Bildes. Es sind keine spitzen Peaks mehr zu sehen, die durch Cosmics verursacht werden. Stattdessen sieht man deutliche Peaks, die aufgrund des Lichts der Ionen in der Falle entstehen.

7.4.4 Optimieren von Parametern

Um eine gute Messung durchzuführen, müssen die Peaks, die aufgenommen werden möglichst gut aus dem Untergrund „hervorstechen“. Man versucht dabei das Signal-to-noise ratio (*deutsch*: Signal-zu-Untergrund-Verhältnis) zu verbessern.

Dabei wird pro Messung jeweils ein Parameter an der EBIT verändert, um festzustellen, wie sich dies auf die Aufnahme auswirkt. Während der Optimierungsphase wurden hierfür die Zeit, Spaltgröße des Spektrometers, Injektionsdruck (Menge an Argon in der Falle) und die Stromstärke (d.h. die Intensität des Elektronenstrahls) variiert. Dabei stellte sich heraus, dass die besten Aufnahmen bei 2 h Belichtungszeit, einer Breite des Eintrittspaltes von 2 mm, einem Injektionsdruck von $2 \cdot 10^{-7}$ mbar und einer Stromstärke von 10 mA am besten waren.

7.4.5 Aufnahme eines Übersichtsspektrums

Im Folgenden soll die eigentliche Messung, die am Max-Planck-Institut für Kernphysik durchgeführt wurde, dargelegt und näher erläutert werden.

Die Zielsetzung war es, ein Übersichtsspektrum des sichtbaren Bereichs von Argon aufzunehmen und dieses auszuwerten. Dafür wurde der sichtbare Bereich von 380 nm bis ungefähr 780 nm stückweise abgescannt. Danach wurde der gleiche Bereich ohne Argoninjektion aufgenommen, um den Untergrund der EBIT zu entfernen.

Die dabei aufgenommenen Spektren (mit bereits abgezogenem Untergrund) wurden in ein Koordinatensystem geplottet.

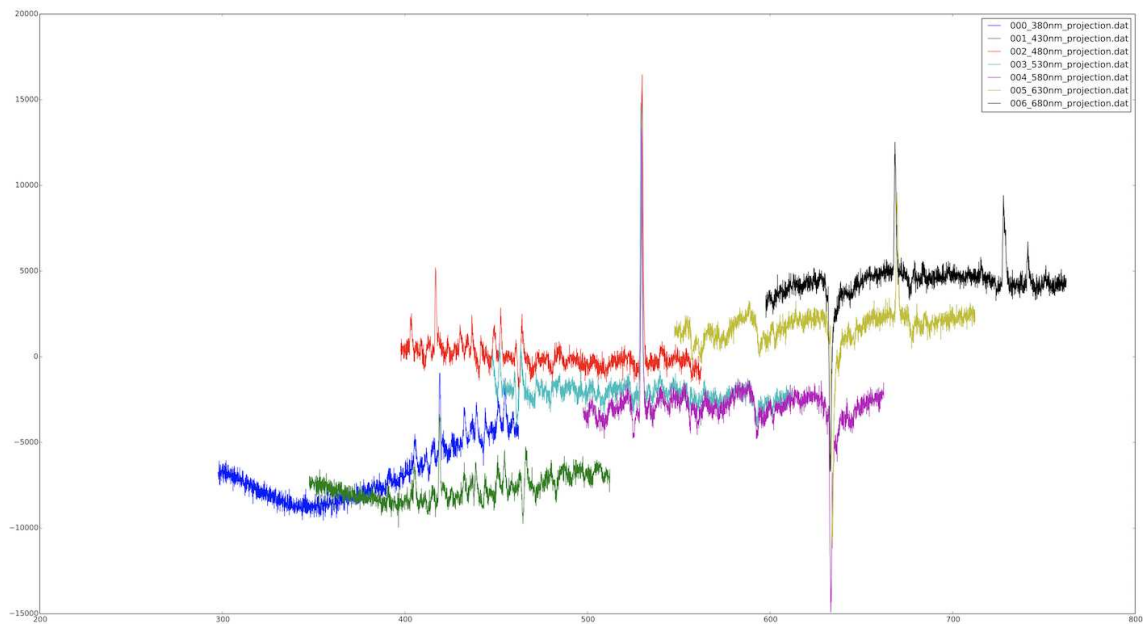


Abbildung 14: Zu sehen ist das unkalibrierte Übersichtsspektrum. Die jeweiligen Farben entsprechen der Gittereinstellung. Die x-Achse entspricht den ungefähren Wellenlänge der einzelnen Peaks, die y-Achse ist in beliebigen Einheiten eingezeichnet (Counts). Die unterschiedlichen Höhen entstehen durch den verschiedenen Untergrund.

7.4.6 Kalibration

Der Kalibrationsschritt ist essenziell, um genau festlegen zu können, welche Wellenlänge jeder Peak hat. Ohne Kalibration nützt die aufgenommene Messung nicht viel, da keine Wellenlängen zugeordnet und somit auch keine Ergebnisse formuliert werden können.

Das Spektrometer ist grob kalibriert, aber nicht genau genug. Das bedeutet, dass Peaks, die laut der Kalibration sich bei beispielsweise 500 nm befinden, in Wirklichkeit bei 490 nm oder 510 nm liegen können.

Um diese große Fehlerquelle zu verringern, wird die erwähnte Kalibration durchgeführt. Dabei wurde in diesem Fall eine Neon-Kalibrationslampe genutzt. Die Beson-

derheit liegt darin, dass die Spektrallinien dieser Lampe genauestens bekannt sind. Man führt dabei eine Messung mit dieser Lampe durch und versucht die aufgenommenen Peaks denen des Spektrums, das bekannt ist und einem bei der Auswertung vorliegt, zuzuordnen.

Nach dieser Zuordnung weiß man, ob und wenn ja wie sehr die Kalibration des Spektrometers der Wahrheit entspricht. Um den Vorgang zu verdeutlichen ein kurzes Beispiel:

Die eigentliche Messung zeigt einen Peak bei 432 nm. Daraufhin wird eine Kalibrationsmessung mit einer Neonlampe durchgeführt. Man erkennt die Linien des Neonspektrums in der Kalibrationsmessung wieder. Laut Spektrometer haben die 3 größten Linien eine Wellenlänge von 540 nm, 550 nm und 610 nm. Laut Literaturspektrum liegen die 3 großen Linien. Man erkennt, dass das Spektrometer die Linien um 3 Nanometer verschiebt. Dieses Wissen lässt sich nun auf die eigentliche Argonmessung (oder generell die Messung) übertragen. Der aufgenommene Peak liegt nicht bei 432 nm sondern bei 435 nm.

Eine solche Kalibration wurde durchgeführt, um die Messdaten aus dem Übersichtsspektrum verarbeiten zu können.

7.4.7 Auswertung

Die bereits erwähnte Messung wurde mithilfe von Origin (Computerprogramm) kalibriert. Das Resultat war ein sauberes Übersichtsspektrum von Argon von 450 Nanometern bis 800 Nanometern.

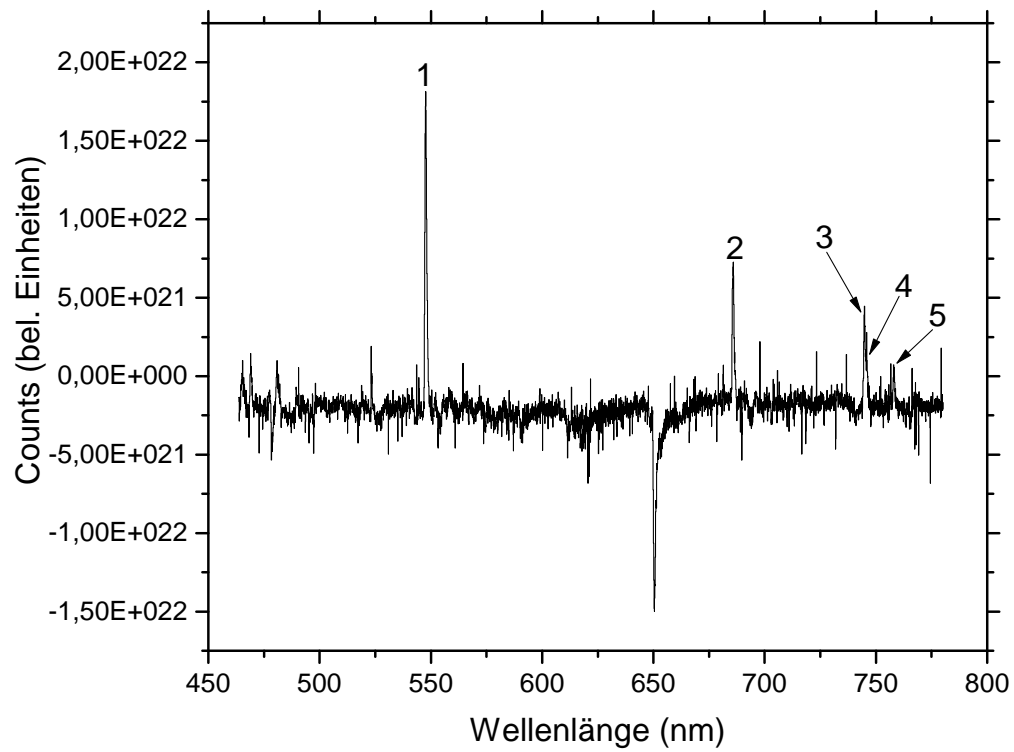


Abbildung 15: übersichtsspektrum im Wellenlängenbereich 450-800nm von Argon nach Korrektur von Cosmics und Untergrund und Kalibration der Wellenlänge

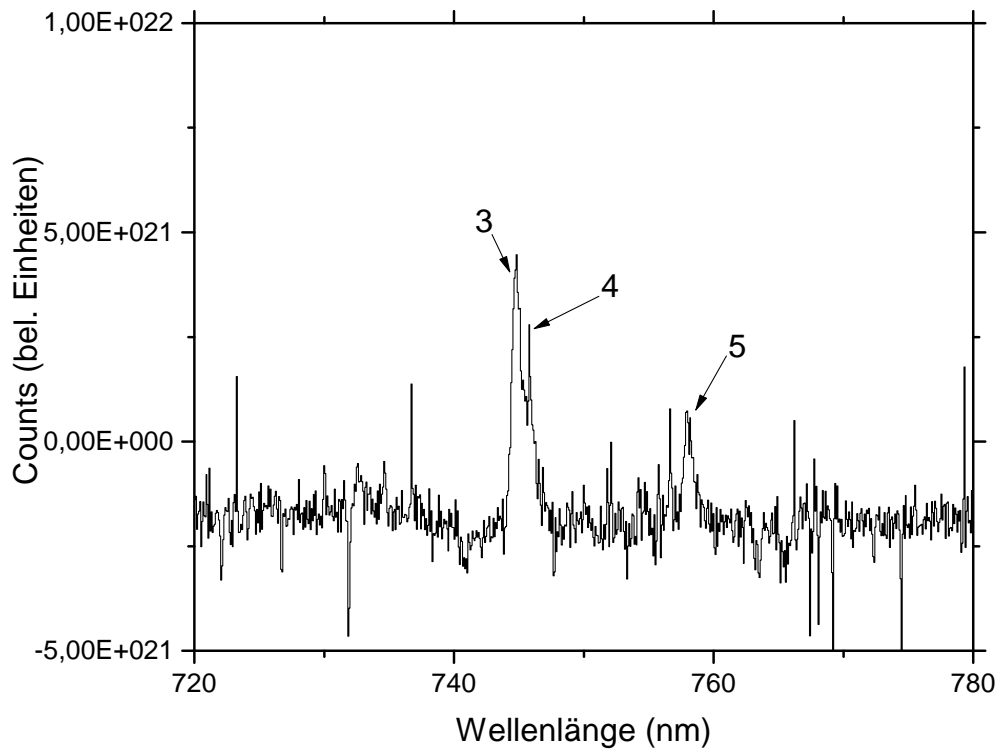


Abbildung 16: Dies sind Peaks 3, 4 und 5 des Übersichtsspektrums vergrößert dargestellt.

Jeder einzelne Peak stellt Licht dar, welches von den Ionen abgestrahlt wurde. Anhand der Wellenlängen der Peaks lassen sich Rückschlüsse auf die Übergänge ziehen, die in der angeregten Atomhülle stattgefunden haben. Aufgrund von Berechnungen und der relativen Intensität der Peaks lassen sich diese Übergänge sehr genau zuordnen. Dies soll im Folgenden anhand der fünf markierten Peaks exemplarisch dargelegt werden.

#	λ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	w[nm]	Δw [nm]	A[E21]	ΔA [E21]
1	547,88	0,01	0,81	0,02	19,22	0,48
2	685,80	0,01	0,75	0,03	7,93	0,34
3	744,76	0,01	0,45	0,079	1,92	0,57
4	745,77	0,01	0,11	0,02	0,33	0,07
5	758,01	0,03	0,65	0,10	1,74	0,34

#	λ [nm]	$\Delta\lambda$ [nm]	w[nm]	Δw [nm]	A[E21]	ΔA [E21]
1*	650,52	0,02	0,94	0,05	-12,73	0,62

#: Nummer des Peaks

λ : Wellenlänge des Peaks

$\Delta\lambda$: Fehler der Wellenlänge des Peaks

w: Breite des Peaks

Δ : Fehler der Breite des Peaks

A: Amplitude (Höhe) des Peaks

ΔA : Fehler der Amplitude des Peaks

Die zweite und untere Tabelle bezieht sich auf den großen negativen Peak im Übersichtsspektrum. Dieser wurde aus Interesse ebenfalls vermessen. Er stammt aus einem Gas, welches bei Abwesenheit des Argons stärker ionisiert und angeregt wird als wenn das Argon vorhanden ist.

Nun stellt sich die Frage, welche Übergänge diesen Wellenlängen entsprechen. In Tabellen (NIST-Tabelle, http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html) kann jetzt die Intensität und die Wellenlänge eines bestimmten Peaks nachgeschaut werden. Oft sind diese Tabellen errechnet und werden durch Messungen wie diese bestätigt. Ziel ist es also, Theorien und Rechnungen anhand der Versuche zu

überprüfen, zu bestätigen oder zu verwerfen. Dies ist das große Ziel der Grundlagenphysik, die am Max-Planck-Institut für Kernphysik durchgeführt wird. Anhand der ermittelten Peaks soll auch dies ein Stück weit nun aufgezeigt werden.

#	λ [nm]	errechnetes λ [nm]	möglicher Übergang von	möglicher Übergang zu
1	547,88	549,59	$3s^23p^5(^2P_{3/2}^{\circ})6d$	$3s^23p^5(^2P_{3/2}^{\circ})4p$
2	685,80	687,13	$3s^23p^5(^2P_{3/2}^{\circ})4d$	$3s^23p^5(^2P_{3/2}^{\circ})4p$
3	744,76	743,54	$3s^23p^5(^2P_{3/2}^{\circ})6s$	$3s^23p^5(^2P_{3/2}^{\circ})4p$
4	745,77	744,05	$3s^23p^4(^3P)4p$	$3s^23p^4(^1D)3d$
5	758,01	758,93	$3s^23p^4(^3P)4p$	$3s^23p^4(^3P)3d$

In der Tabelle ist jeweils ein möglicher Übergang aufgeführt. Dieser muss aber nicht zwingend der richtige sein, da aufgrund der relativ großen Fehleranfälligkeit und Ungenauigkeit auch andere Übergänge in Betracht zu ziehen sind. Diese Arbeit soll aber exemplarisch darlegen, wie eine wissenschaftliche Arbeit aufgebaut werden könnte. Des Weiteren können einzelne Peaks aus mehreren bestehen und nicht richtig aufgelöst werden. Erst bei der detaillierten Aufnahme eines Peaks würde man dies bemerken. Da hier ein Übersichtsspektrum aufgenommen wurde, besteht die Möglichkeit aufgrund der vergleichsweise geringen Auflösung, dass mehrere Peaks zu einem zusammengefasst wurden.

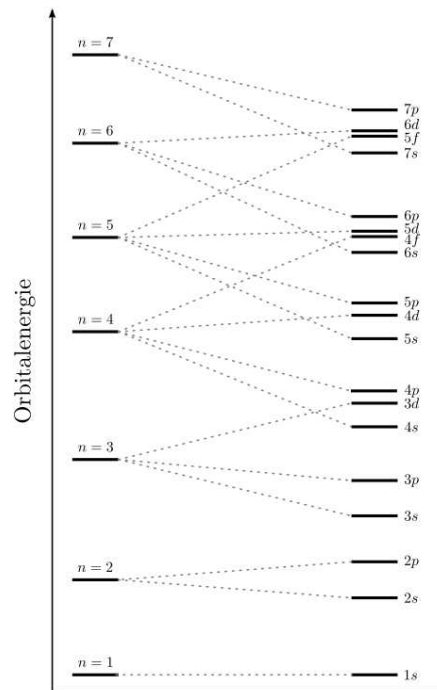
Die Elektronen in der Atomhülle „springen“ von einer Schale zur anderen. Dabei emittieren sie, wie im Bereich der Grundlagen erläutert, Licht. Dieses wird aufgefangen und ausgewertet. Anhand dieser Messungen kann dann die Energiedifferenz zwischen den einzelnen Schalen beziehungsweise Orbitalen ausgemessen werden.

$$E = h \cdot v = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

wobei h das Planck'sche Wirkungsquantum ($h = 6,626070040 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$), v die Fre-

quenz des Photons und c die Lichtgeschwindigkeit beschreibt.

#	möglicher Übergang von	möglicher Übergang zu	Energiedifferenz der Orbitale [J]
1	$3s^2 3p^5 ({}^2P_{3/2}^{\circ}) 6d$	$3s^2 3p^5 ({}^2P_{3/2}^{\circ}) 4p$	$3.62568741 \cdot 10^{-28}$
2	$3s^2 3p^5 ({}^2P_{3/2}^{\circ}) 4d$	$3s^2 3p^5 ({}^2P_{3/2}^{\circ}) 4p$	$2.89656969 \cdot 10^{-28}$
3	$3s^2 3p^5 ({}^2P_{3/2}^{\circ}) 6s$	$3s^2 3p^5 ({}^2P_{3/2}^{\circ}) 4p$	$2.66721644 \cdot 10^{-28}$
4	$3s^2 3p^4 ({}^3P) 4p$	$3s^2 3p^4 ({}^1D) 3d$	$2.66360302 \cdot 10^{-28}$
5	$3s^2 3p^4 ({}^3P) 4p$	$3s^2 3p^4 ({}^3P) 3d$	$2.62059543 \cdot 10^{-28}$



8

Abbildung 17: Die einzelnen Orbitale und deren Energieniveaus.

⁸http://grund-wissen.de/physik/_images/orbitalenergie.png

#	Ladungszustand des Argons (q^+)	Argondarstellung
1	0	Ar
2	0	Ar
3	0	Ar
4	1	Ar^+
5	1	Ar^+

Die letzte Tabelle stellt die Ladungszustände der lichtemittierenden Ionen da. Die ersten 3 Linien könnten von ungeladenen Atomen stammen. Allerdings könnten diese Linien wie erwähnt aus mehreren bestehen, bei denen auch höher ionisierte Ionen Licht emittieren. Das eigentliche Projektziel hochgeladene Ionen zu sehen wurde somit leider nicht erreicht. Dafür hätte es eine genauere Ausmessung des Spektrums und eine Analyse von mehr Linien gebraucht. Auch ist es wichtig zu erwähnen, dass die verwendete Tabelle zwar sehr viele Linien enthält, keinesfalls aber vollständig ist. Es bleibt also im Rahmen des Möglichen, dass die Linien nicht aufgeführt und somit nicht zugeordnet werden konnten.

Im Folgenden soll noch kurz auf den Peak 1* eingegangen werden. Er stellt eine Besonderheit dar, da der Peak nur auftritt, wenn kein Argon injiziert ist. Das bedeutet, dass das Gas normalerweise in der EBIT in kleinsten Mengen enthalten ist, bei Argoninjektion aber an Wichtigkeit verliert. Die beste Theorie ist hier, dass es sich um ein Gas handelt, welches in der Luft enthalten ist. Es spielen also hauptsächlich Sauerstoff und Stickstoff eine Rolle:

Sauerstoff

#	λ [nm]	errechnetes λ [nm]	möglicher Übergang von	möglicher Übergang zu
1*	650,52	650,02	$1s^2 2p(^2P_{3/2}^{\circ}) 3d$	$1s^2 2p(^2P_{3/2}^{\circ}) 3p$

#	Ladungszustand des Sauerstoffs (q^+)	Sauerstoffdarstellung
1*	4	O^{4+}

Stickstoff

#	λ [nm]	errechnetes λ [nm]	möglicher Übergang von	möglicher Übergang zu
1*	650,52	648,21	$2s^2 2p 3p$	$2s^2 2p 3s$

#	Ladungszustand des Stickstoffs (q^+)	Stickstoffdarstellung
1*	1	N^+

Der analysierte „negative“ Peak könnte durch eine der oben dargestellten Elektronenübergänge zustande gekommen sein. Allerdings muss dies nicht zwingend so sein. Um das verifizieren zu können, müsste der Peak genauer ausgemessen werden.

7.4.8 Fehleranalyse

Wie jede wissenschaftliche Arbeit hat auch diese einige Fehlerquellen, die an dieser Stelle kurz angesprochen werden sollen.

1. Dunkel-Hell-Messung:

Zwischen den einzelnen Dunkel- und Hell Messungen sollte in der Regel eine möglichst geringe Zeit liegen, damit sich der Untergrund so wenig wie möglich verändert. In diesem Projekt lagen zwischen den zwei Messungen jeweils 24 Stunden, was bedeutet, dass sich der Untergrund etwas verändert haben könnte und deshalb nur unsauber abgezogen wird. Aus zeittechnischen Gründen war dies allerdings nicht anders realisierbar.

2. Kalibrationsspektrum:

Die durchgeführte Kalibration basiert auf einem mehrere Monaten alten Kalibrationsspektrum einer Neonlampe. Zwischen der Aufnahme des Kalibrationsspektrums und der Messung könnte sich das Spektrometer leicht verändert haben (Position der Spiegel, Gitter usw.). Geplant war die Aufnahme eines Kalibrationsspektrum kurz nach der Argonmessung. Das Spektrometer hatte aber unmittelbar nach dieser Messung einen zunächst nicht reparablen Defekt und konnte daher nicht weiterverwendet werden. Das Projekt drohte an dieser Stelle zu scheitern, da keine Kalibration durchgeführt worden war. Dank einer vorher durchgeführten Probemessung mit der Neonlampe konnten die Daten aus dem März gesucht, gefunden und für die Kalibration verwendet werden. Es muss aber gesagt sein, dass sich die Fehleranfälligkeit der Messung vergrößert, je mehr Zeit zwischen Kalibration und eigentlicher Messung vergeht.

Anmerkung: Die in den Tabellen aufgeführten Fehler sind so angegeben, wie sie

ausgerechnet wurden. In Wahrheit beträgt der systematische Fehler aufgrund der hier genannten Fehlerquellen wahrscheinlich deutlich mehr.

3. Ungenauigkeit der Messung:

Natürlich entspricht diese Arbeit nicht einer Master- beziehungsweise Doktorarbeit. Die Zeit, die zur Verfügung stand wurde möglichst gut ausgenutzt. Da die Arbeit in einem Labor aber viele Stunden erfordert, um gute und genaue Messwerte hervorzubringen, muss gesagt sein, dass in einer weiterführenden, tiefergehenden Arbeit, die einzelnen Peaks separat noch einmal vermessen worden wären. Auch hätte man einer Reihe weiterer Dinge optimiert, auf die jetzt im spezifischen nicht eingegangen werden soll.

4. Einmalige Durchführung:

Es wurde aus Zeitgründen nur eine Messung pro Wellenlängenbereich aufgenommen. Tatsächlich hätten mehrere durchgeführt werden müssen, um einen Mittelwert zu bestimmen. So wären die Auswirkung möglicher Fehler verringert worden.

5. Geringe Erfahrung:

Eine weitere Fehlerquelle besteht einfach darin, dass der Autor dieser Arbeit noch kein Physikstudium absolviert hat und nur sehr limitierte Kenntnis über physikalische Grundlagen und generell über der Arbeit im Labor besitzt. Größtenteils mussten und wurden diese Kenntnisse während dieser Arbeit angeeignet. Es besteht also die realistische Möglichkeit, dass Ergebnisse der Messung falsch interpretiert wurden, da ein Teil der Auswertung selbstständig durchgeführt wurde.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Kooperation mit dem Max-Planck-Institut begann am 30. November 2016. Seit diesem Tag hat sich das Projekt nicht nur in eine Richtung entwickelt. Es gab wie bereits früh klar wurde, für eine wissenschaftliche Arbeit typisch, viele Rückschläge. Diese gingen vom Fehlen von Schrauben bis hin zu einem irreparablen Defekt des Spektrometers. Trotzdem konnte die Arbeit durchgeführt und beendet werden.

Laut meinen Messergebnissen stammt das aufgenommene Licht hauptsächlich von neutralen oder einfach geladenen Argonatomen beziehungsweise Argonionen. Es muss allerdings klargestellt werden, dass die benutzten Tabellen keinesfalls die gesamten Linien enthalten. Es besteht also die Möglichkeit, dass die Linie einfach nicht in der Tabelle zu finden war. Des Weiteren wurden aufgrund von einigen Komplikationen und Problemen auf die jetzt nicht näher eingegangen werden soll, nur 5 Peaks analysiert und letztendlich ausgewertet. Bei Aufnahme eines detaillierteren Spektrums hätten sehr wahrscheinlich Linien von hochgeladenen Ionen lokalisiert werden können.

Trotzdem wurden alle aufgestellten Zwischenziele erreicht. Zunächst einmal wurde Vertrauen gesammelt und sich an die EBITs gewöhnt. Eine Besonderheit für das Projekt war ebenfalls, dass das ganze von Null aufgebaut wurde. Die Konstruktion für das Spektrometer, das Spektrometer an sich, die benutzten Computer und alle Kabel und das zusätzliche Material mussten zunächst einmal gesucht, auf ihre Funktionstüchtigkeit geprüft und dann zusammengebaut werden. Alle weiteren Ziele, Messungen durchzuführen und letztendlich auszuwerten wurden vollständig erreicht und sogar bei weitem übertroffen.

Obwohl das große Ziel leider knapp verfehlt wurde, hat die Zeit am Max-Planck-Institut einen unglaublichen Wissenszuwachs erbracht. Besonders wichtig ist, dass erlernt wurde selbstständig zu arbeiten. Zu Beginn herrschte eine große Unsicherheit

beim Umgang mit den Maschinen, da diese unbekannt, teuer und kompliziert waren. Im Laufe der Zeit konnte aber mehr und mehr Selbstvertrauen gesammelt werden. Am Ende war das Gefühl nicht das der Unsicherheit, sondern diese Angst hatte sich gelegt und war dem Spaß und der Neugier gewichen.

Wäre mehr Zeit zur Verfügung gestanden, so hätte der Aufbau weiter optimiert werden können. Auch hätte die Auswertung ausführlicher gestaltet werden können. Zudem wäre es interessant gewesen, die Übergänge des Argons mit beispielsweise Krypton zu vergleichen, da es sich in beiden Fällen um ein Edelgas (selbe Gruppe im Periodensystem) handelt. Ebenfalls könnte man zusätzlich zur Spektroskopie im sichtbaren Bereich, Spektroskopie im hochenergetischen (X-Ray) Bereich betreiben und dann beide Themengebiete miteinander vergleichen. Man muss an dieser Stelle auch erwähnen, dass die Wissenschaft, vor allem im Bereich der experimentellen Physik so viele Möglichkeiten bietet, dass es unmöglich ist, sich mit allem auszukennen. Trotzdem bietet sich das Thema EBIT an, um in viele Bereiche reinschauen und Erfahrung sammeln zu können.

Im Großen und Ganzen kann die Zeit trotz aller Rückschläge aber als ein voller Erfolg eingestuft werden, die hungrig auf die Zukunft und auf weitere ähnliche Arbeiten gemacht hat. Das alleinige Arbeiten und auch das Arbeit in der Gruppe wurden gezielt gefördert und habe dazu geführt, dass solche Projekte in der Zukunft hoffentlich erneut durchgeführt werden können.

9 Danksagung

Zuallererst will ich meiner Mutter für alles was sie getan hat und ihre gesamte Unterstützung danken, die mir die Arbeit an diesem Projekt ermöglicht hat. Sie hat mich wöchentlich an das Max-Planck-Institut für Kernphysik nach Heidelberg gefahren und auch wieder abgeholt. Ihr gebührt der größte Dank.

Natürlich muss ich mich ebenfalls bei Priv.-Doz. Dr. José Ramón Crespo López-Urrutia, der Gruppenleiter, bei dem ich arbeiten konnte, bedanken. Es ist keine Selbstverständlichkeit, dass jemand ohne Studium, ja nicht einmal Abitur ein zeitlich derart intensives Praktikum durchführen kann. Er hat es mir ermöglicht, trotz meines jungen Alters, an der wissenschaftlichen Arbeit teilzuhaben und diese zu genießen.

Ebenfalls großer Dank gebührt Steffen Kühn und Dr. Sven Bernitt, die als Betreuer während der gesamten Zeit am Max-Planck-Institut fungiert haben. Nur durch sie konnte ich diese Arbeit erst durchführen. Auch haben sie für mich eine Tür in ein faszinierendes und spannendes Universum geöffnet, die ohne sie womöglich nie geöffnet worden wäre. Ebenfalls bedanken will ich mich an dieser Stelle bei Steffen Kühn und bei Dr. Götz, Betreuer von Seiten des Hector-Seminars, für die Korrektur dieses Berichtes.

Zuletzt soll natürlich Herrn und Frau Hector für die Unterstützung des Hector-Seminars gedankt werden, die diese wundervolle Erfahrung erst ermöglicht hat.

10 Quellen

10.1 Literatur

1. „Inbetriebnahme und Charakterisierung einer Elektronenkanone mit optischem Zugang zur Strahlachse in einer kompakten Elektronenstrahlionenfalle“
Masterarbeit Steffen Kühn, Betreuung Priv.-Doz. Dr. José R. Crespo López-Urrutia, Heidelberg 2017
2. „Optische Spektroskopie an hochgeladenen Bismut-Ionen und Konstruktion eines hochauflösenden VUV-Gitterspektrometers“
Masterarbeit Michael A. Blessenohl, Betreuung Priv.-Doz. Dr. José R. Crespo López-Urrutia, Heidelberg 2015

10.2 Internetquellen

1. <https://www.mpi-hd.mpg.de/mpi/de/start/>
2. <https://de.wikipedia.org/wiki/Atom>
3. <https://www.mpi-hd.mpg.de/pfeifer/page.php?id=36>
4. <https://ebit.lbl.gov>
5. <http://www.dreebit-ibt.com/reference/dresden-ebit-am-mpik-heidelberg-deutschland.html>
6. https://www.mpi-hd.mpg.de/kellerbauer/en/lectures/ss07/experimental_methods_atomic_physics/ion_sources_bartesch.pdf

7. <https://de.wikipedia.org/wiki/Teilchenbeschleuniger>
8. <http://www.seilnacht.com/versuche/spektrum.html>
9. <http://archiv.ub.uni-heidelberg.de/volltextserver/13380/>
10. <http://www.chemie.de/lexikon/Spektrometer.html>
11. <https://de.wikipedia.org/wiki/Monochromator>
12. <https://www.mpi-hd.mpg.de/pfeifer/EBIT/>
13. https://de.wikipedia.org/wiki/Electron_Beam_Ion_Trap
14. <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/photoionisation/11196>
15. http://www.idn.uni-bremen.de/cvpm/content/elementarteilchenphysik/show.php?modul=26&ident=720&file=62&right=level13a_6_right.html
16. <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/gitterspektrometer/5893>
17. https://de.wikipedia.org/wiki/Highly_Charged_Ion
18. http://www.bcp.fu-berlin.de/chemie/chemie/studium/ocpraktikum/_Unterrlagen_Spektroskopie/uv.pdf
19. <https://de.wikipedia.org/wiki/Emissionsspektrum>
20. <http://www.grund-wissen.de/physik/elektrizitaet-und-magnetismus/magnetismus.html>
21. <https://kernenergie.technology/definitionen/electron.html>
22. <http://www.chemie.de/lexikon/Spektroskopie.html>

23. <http://www.chemie.de/lexikon/UV2FVIS-Spektroskopie.html>
24. <http://www.phyx.at/fraunhoferlinien/>
25. <https://de.wikipedia.org/wiki/Fraunhoferlinie>
26. [https://de.wikipedia.org/wiki/Rekombination_\(Physik\)](https://de.wikipedia.org/wiki/Rekombination_(Physik))
27. <https://ebit.llnl.gov>
28. <https://www.mpi-hd.mpg.de/pfeifer/EBIT/>
29. https://de.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetisches_Spektrum
30. <http://www.swisseduc.ch/chemie/labor/spektr/docs/spektr.pdf>
31. <http://www.uni-bielefeld.de/chemie/lehre/basispc/media/Spektrometer/>
32. <https://files.vogel.de/vogelonline/vogelonline/files/3810.pdf>
33. <http://www.akoci.uni-hannover.de/ak-duddeck/pdf/pdf-spektro-info/UV-01.pdf>
34. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0031-8949/1988/T22/024/meta>
35. <https://www.uni-marburg.de/fb15/ag-oberthuer/teaching/uvskript>
36. <http://www.lenntech.es/periodica/elementos/ar.htm>
37. <https://www.mpi-hd.mpg.de/pfeifer/page.php?id=41>
38. http://universal_lexikon.deacademic.com/75724/Emissionsspektrum

39. <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/elektronenbeschleuniger/4076>
40. <http://www.chemgapedia.de/vsengine/glossary/de/emissionsspektrum.glos.html>
41. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/teilchenbeschleuniger>
42. <https://www.mpi-hd.mpg.de/mpi/de/institut/>
43. <http://www.lg-n.de/chemie/chemiehomepage/Chemie2012.2.pdf>
44. <http://www.u-helmich.de/che/Q2/orbitalmodell/orbitalmodell1.html>
45. https://de.wikipedia.org/wiki/Optisches_Gitter
46. <http://www.spektrum.de/lexikon/physik/elektronenstossionisation/4134>
47. <http://www.chemie-master.de/FrameHandler.php?loc=http://www.chemie-master.de/lex/begriffe/e17.html>
48. <https://de.wikipedia.org/wiki/Linienspektrum>
49. http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/lines_form.html
50. <https://www.nist.gov/pml/atomic-spectra-database>
51. http://www.vias.org/tmanalytik_germ/hl_elektronenstoss_ionisat.html
52. <https://www.lernhelfer.de/schuelerlexikon/physik-abitur/artikel/photonen>

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende schriftliche Ausarbeitung meiner meiner Kooperationsarbeit selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen übernommen sind, wurden als Zitat kenntlich gemacht.

Unterschrift:

Datum: