

**Department of Physics and Astronomy
University of Heidelberg**

Bachelor Thesis in Physics
submitted by

DENIS DJENDJUR

born in Reutlingen (Germany)

2017

Projekt TrapRemi

-

Aufbau und erste Charakterisierung der Zajfman-Falle

This Bachelor Thesis has been carried out by Denis Djendjur at the
Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg
under the supervision of
Priv.-Doz. Dr. Robert Moshhammer

Abstract

At the Max-Planck-Institute for Nuclear Physics in Heidelberg, a new project named TrapRemi has been launched. It attempts to combine a Zafman - ion trap with a Reaction-Microscope (Remi) to investigate the quantum dynamics of molecular ions. This thesis first describes the end phase of the Zafman trap assembly: Reaching ultra-high vacuum in the main chamber, the proper wiring of all components and the optical alignment of the ion trap electrodes. Then, first results from ion source characterizations and ion injection in the Zafman trap are presented. Ultimately, it was possible to oscillate an ion packet up to six times inside the trap. Thus it was shown that the apparatus is able to successfully and reproducibly store ions. For the future, further optimizations must be made to reach storage times up to several hundreds of milliseconds, corresponding to thousands oscillations. Subsequent steps would be the implementation of Remi components such as Helmholtz coils and position sensitive detectors.

Zusammenfassung

Am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg wird mit dem Projekt TrapRemi der Versuch gestartet eine Zajfman-Ionenfalle mit einem Reaktionsmikroskop (Remi) zu kombinieren. In Zukunft soll damit die Untersuchung der Quantendynamik molekularer Ionen ermöglicht werden. In dieser Arbeit wird zunächst die Endphase des Aufbaus der Zajfmanfalle beschrieben: Das Erreichen eines Ultrahochvakuums in der Hauptkammer, stabile elektrische Verbindungen aller Komponenten so wie das optische Ausrichten der Fallenelektroden. Daraufhin werden erste Ergebnisse zur Charakterisierung der Ionenquelle und Zajfmannfalle präsentiert. Letztendlich gelang es ein Ionenpaket bis zu sechs Mal in der Falle oszillieren zu lassen. Damit konnte gezeigt werden, dass die Apparatur in der Lage ist erfolgreich und reproduzierbar Ionen zu speichern. Für die Zukunft müssen noch weitere Optimierungen vorgenommen werden, damit mehrere tausend Oszillation möglich sind. Anschließend können erste Remi-Komponenten wie Helmholtzspulen und Detektoren in den Aufbau integriert und getestet werden.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Ionenfallen	2
1.3	Reaktionsmikroskop	3
1.4	Thema dieser Bachelorarbeit	4
2	Projekt TrapRemi	6
2.1	Der Aufbau im Allgemeinen	6
2.2	Ionenstrahlführung	7
2.3	Zajfman-Falle	10
2.4	Reaktionsmikroskop des TrapRemi	12
3	Ionenquelle	13
3.1	Ionenquellen im Allgemeinen	13
3.2	Die Ionenquelle im TrapRemi	14
3.3	Aufbau der Ionenquelle	15
3.4	Charakterisierung der Ionenquelle	16
3.5	Stabilisierung des Ionenstrahls	19
4	Einkopplung des Ionenstrahls in die -falle	22
4.1	Messungen des eingekoppelten Ionenstroms	23
4.2	Optimierung des Strahlengangs	24
5	Charakterisierung der Ionenfalle	27
5.1	Vorbereitungen für das erstmalige Speichern von Ionen	27
5.2	Ladungsmessung eines Ionenpulses	27
5.3	Elektrische Störsignale:	32
5.4	Erste Schritte zur Speicherung von Ionen	34
6	Fazit der Bachelorarbeit	41
7	Quellenverzeichnis	
8	Danksagung	

1 Einleitung

1.1 Motivation

Fundamentale Forschung findet zur heutigen Zeit häufig auf molekularer, atomarer und subatomarer Ebene statt. Die Untersuchung von diesen Systemen benötigt hochentwickelte experimentelle Technik. Mitte des 20. Jahrhunderts wurde mit der Entwicklung der Penningfalle eine neue Art der Beobachtung von geladenen Teilchen entwickelt. Vormals nur in sehr kurzen Übergangszuständen beobachtet, konnten damit einzelne Ionen über einen relativ langen Zeitraum eingefangen und untersucht werden. Erst dadurch war es möglich Reaktionsmechanismen und angeregte Übergangszustände zeitaufgelöst zu erforschen. Nicht umsonst ist die weltweit teuerste und größte Forschungsanlage -der Large Hadron Collider (LHC) am CERN in Genf- eine Art von Ionenspeicher, in der unter anderem hoch ionisierte Bleikerne erst beschleunigt, dann in einem Ring gespeichert und anschließend zur Kollision gebracht werden. Da von grundlegender Teilchenphysik bis hin zu spezifischen Reaktionen in der Chemie, das Einfangen von geladenen Teilchen immer eine wichtige Rolle spielt, kann die Bedeutung von Ionenfallen für die heutige Forschung nicht genügend herausgestellt werden.

Beispielhafte Entdeckungen der letzten Jahre mit Hilfe von Ionenfallen waren die genaue Vermessung des g-Faktors von Antiprotonen [4], die Bestimmung der Massen von instabilen radioaktiven Isotopen [5] und die Erforschung von Quantum-Computing mit Hilfe von Qbits, die im Hyperfeinzustand von ^{43}Ca gespeichert wurden [6].

Am Max-Planck-Institut für Kernphysik (MPIK) in Heidelberg soll eine sogenannte Zajfman-Ionenfalle mit einem Reaktionsmikroskop kombiniert werden. Dadurch kann auch die Quantendynamik von Atom- und Molekülionen anstatt neutraler Atome und Moleküle untersucht werden. Das Projekt läuft unter dem Namen TrapRemi (zusammengesetzt aus den englischen Wörtern ion trap und reaction microscope). Durch das spezielle Design des TrapRemi lässt es sich mit einer Vielzahl von Sekundäraufbauten kombinieren. Geplant ist die Einkopplung eines Femtosekundenlasers um Pump-Probe Untersuchungen an Molekülen vorzunehmen. Damit sollen zum Beispiel chemische Reaktionen wie die Isomerisierung von Ethin zeitaufgelöst untersucht werden können.

1.2 Ionenfallen

Generell macht sich der Aufbau einer Ionenfalle die Eigenschaft zu nutze, dass geladene Teilchen von elektrischen und magnetischen Feldern abgelenkt werden. Dadurch ist es möglich die Teilchen auf eine gewünschte Bahn zu lenken. Ähnlich der gewöhnlichen Optik kann man mit Hilfe von Elektroden ionenoptische Linsen und Spiegel formen und den Ionenstrahl wie einen Lichtstrahl behandeln [7].

Betrachtet man beispielsweise die Penningfalle, so beschreibt das Teilchen innerhalb der Falle eine komplizierte schraubenförmige Oszillation zwischen zwei Elektroden, die sich in einem Magnetfeld befinden. Der Aufbau ist relativ simpel und kann kostengünstig in Betrieb genommen werden. Am LHC hingegen werden die Teilchen durch Elektroden auf nahezu Lichtgeschwindigkeit beschleunigt, fokussiert und durch starke Magnetfelder auf einer Kreisbahn gehalten. Da die Kreisbahn mit zunehmender Teilchenenergie auch größer wird, ist der LHC mit 27km Durchmesser die zur Zeit größte Forschungsanlage der Welt.

Einen Aspekt haben die meisten Aufbauten jedoch gemeinsam: die geladenen Teilchen befinden sich immer innerhalb eines Feldes; sei es nun elektrisch oder magnetisch. Diese Tatsache erschwert die Untersuchung von Ionen. Die Gruppe um D. Zajfman stellte im Jahre 1997 einen Aufbau vor, der es ermöglichte Ionen zu speichern und sie innerhalb einer feldfreien Zone zu untersuchen [1].

Zajfman-Falle:

Die Zajfman-Falle besteht im Wesentlichen aus zwei Elektrodenstapel in einer Vakuumkammer. Legt man an diese Stapel eine genau definierte Spannung an, so fungieren diese als eine Art Ionenspiegel, an denen sich Ionen reflektieren lassen. Dadurch kann man Ionen wie Photonen innerhalb eines optischen Resonators oszillieren lassen und somit speichern. Der Bereich zwischen den Spiegeln ist in diesem Aufbau feldfrei und kann entsprechend den Anforderungen der gewünschten Messung geformt werden, wie in Abbildung 1 zu sehen ist. Ein großer Vorteil dieses Fallentyps ist, dass lediglich elektrostatische Felder innerhalb der Falle verwendet werden. Dies ermöglicht das Speichern von Ionen unabhängig von ihrem Masse-zu-Ladung-Verhältnis. Dadurch können auch schwere Molekülonen problemlos gespeichert werden. Von großer Bedeutung ist auch, dass der Ionenstrahl einen langen Weg innerhalb der Falle zurücklegt. Bei Ionenquellen mit niedrigem Ionenstrom ist die Signalausbeute nur sehr klein. Eine Zajfman-Falle verwertet die Ionen wieder, indem sie sie den

Weg durch die Falle im Optimalfall mehrere tausend Male wiederholen lässt. Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit ein Ereignis innerhalb der Falle zu messen erhöht. Ein sehr gutes Beispiel für einen solchen Aufbau ist der "cryogenic storage ring,, (abgekürzt: CSR) am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg [10].

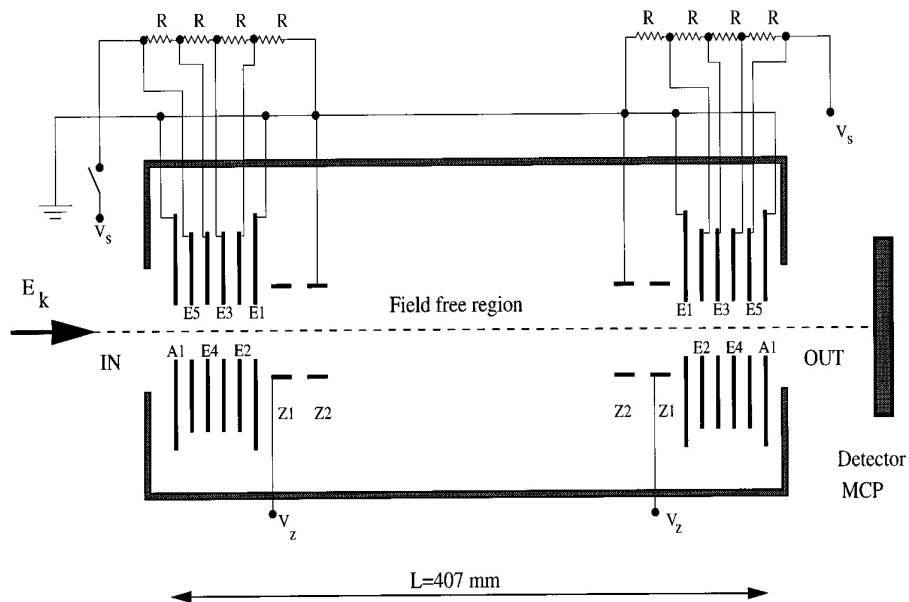


Abbildung 1: Skizze des Aufbaus einer Zajfman-Falle. E_k : Ionen mit der Energie E_k , A: Abschluss Elektroden E: Spiegelelektroden, Z: Linsen, MCP: Mikrokanalplatte. Quelle: [1]

1.3 Reaktionsmikroskop

Reaktionsmikroskope (kurz: Remi) sind Messinstrumente in der Atom- und Molekülphysik zur Untersuchung der Quantendynamik kollisionsbasierter Reaktionen, wie beispielsweise Ionisationen und Dissoziationen.[8]. Sie sind speziell dafür entwickelt worden Messungen von koinzidenten Ereignissen kinematisch vollständig und winkelaufgelöst durchzuführen. Dadurch verfügt man über dreidimensionale Aufnahmen von Teilchenimpulsen. In einem Remi werden Reaktionen innerhalb der Reaktionskammer erzeugt. Meistens werden dabei Atomstrahlen mit Laser- oder Elektronenstrahlen gekreuzt. Die dabei entstehenden geladenen Fragmente werden anschließend mit Hilfe von konstanten elektrischen und magnetischen Feldern, je nach Ladungsvorzeichen, in Richtung der Detektoren abgelenkt.

Remis sind dabei so fortgeschritten, dass man gleichzeitig Elektronen und Ionen vermessen kann und das trotz des großen Massenunterschieds. Somit lassen sich koinzidente Prozesse beobachten, wie zum Beispiel der Mehrteilchenprozess einer Doppelionisation.

Beispielhaft ist das in Abbildung 2 gezeigt. Die elektrischen Felder werden von den Elektroden des Spektrometers erzeugt, die magnetischen von einer Helmholtz-Spule außerhalb des Vakuums. Entstehen nun bei einer Ionisationsreaktion ein freies Elektron und ein Ion, werden sie in Richtung der jeweiligen Detektoren gelenkt und dort registriert. Die Detektoren sind häufig sogenannte Mikrokanalplatten (engl.: microchannel plate, MCP). Abhängig von der Masse und der Ladung bewegen sich die Teilchen mit unterschiedlichen Bahnen und können durch die Zeit- und Ortsauflösung des Detektors ein Bild der stattgefundenen Reaktion zeichnen.

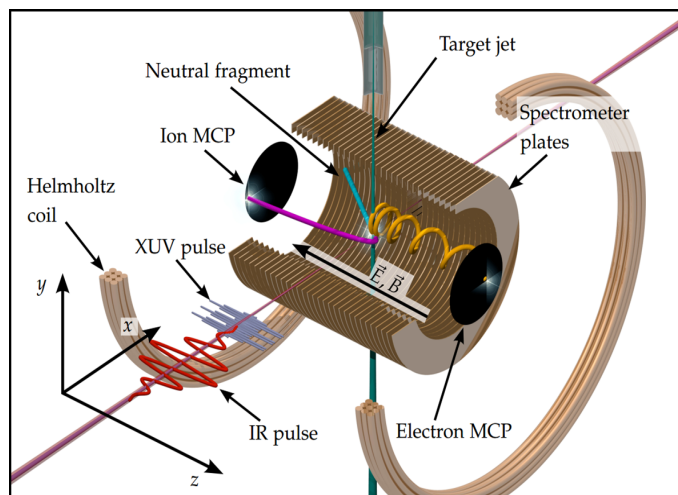


Abbildung 2: Aufbau eines typischen Reaktionsmikroskops. Hier wird ein Strahl von neutralen Teilchen mit Hilfe eines gepulsten Lasers ionisiert. Dabei beschreibt die gelbe Linie die Flugbahn der Elektronen, die rosafarbene die der positiven Ionen (fragmente) und die türkisfarbene die der neutralen Fragmente. Quelle: [3]

1.4 Thema dieser Bachelorarbeit

Wesentlicher Bestandteil dieser Bachelorarbeit war der Aufbau des TrapRemi im neuen Quantendynamiklabor des MPIK. Zum Eintritt in das Forschungsprojekt im Juni 2017 war die Planung des Projekts zu großen Teilen fertig gestellt und das Außengerüst mitsamt den Hauptkammern bereits aufgebaut. Die Strahlführung der Anlage war noch nicht mit dem TrapRemi verbunden. Es

fehlten sämtliche Vakuumpumpen am Aufbau und die Elektrodenstapel des Reaktionsmikroskops waren noch nicht in den Aufbau integriert. Die erste Aufgabe innerhalb des Projekts war der Bau einer kompakten, auf thermische Emission basierenden Ionenquelle.

Anschließend wurde eine vereinfachte Version eines Faraday-Bechers gebaut, um den Ionenstrom nach Passieren der Falle zu messen.

Die Turbomolekularpumpen wurden schon vor dem Zusammenfügen der beiden Hälften montiert und nach Verschießen der Hauptkammern zum probeweisen Abpumpen verwendet. Mit Hilfe eines Lecktesters wurde der Aufbau mehrmals auf undichte Stellen überprüft.

Nach dem Einbau der Elektroden wurden die beiden Hälften mit Hilfe eines Fernrohrs und innerhalb des Aufbaus montierten Targets mit einer Abweichung von $\frac{1}{10} mm$ aufeinander ausgerichtet. Mittels Wellbalg wurden die beiden Hälften zusammengeführt und letzte Tests zur Dichtheit des Aufbaus durchgeführt, bevor mit den ersten Messungen begonnen werden konnte.

Zu Beginn wurde das Verhalten des Ionenstroms bei verschiedenen Einstellungen der Spannungsquelle und der Ionenoptik bestimmt. Anschließend wurde nach der Überprüfung der Funktionsfähigkeit der elektrischen Komponenten die Speicherfähigkeit von Ionen innerhalb der Falle überprüft.

Bis zur Fertigstellung dieser Bachelorarbeit bestand das Projekt einzig aus der Zajfman-Falle, das Reaktionsmikroskop sowie sämtliche einhergehenden Aufbauten (Lasereinkopplung, Mikrowellen, kreuzende Elektronen-/Ionenstrahlen etc.) werden erst später eingebaut, sobald die Funktionstüchtigkeit der Ionenfalle demonstriert wurde.

2 Projekt TrapRemi

Im folgenden Abschnitt wird das Projekt TrapRemi beschrieben. Es wird auf die Besonderheiten und die Funktion der wichtigsten Komponenten des Aufbaus eingegangen.

2.1 Der Aufbau im Allgemeinen

Das Projekt am Max-Planck-Institut für Kernphysik eine Zajfman-Falle mit einem Remi zu kombinieren entstand im Jahre 2015. Der Zeitplan sieht vor, Ende 2017 die ersten Ionen speichern zu können.

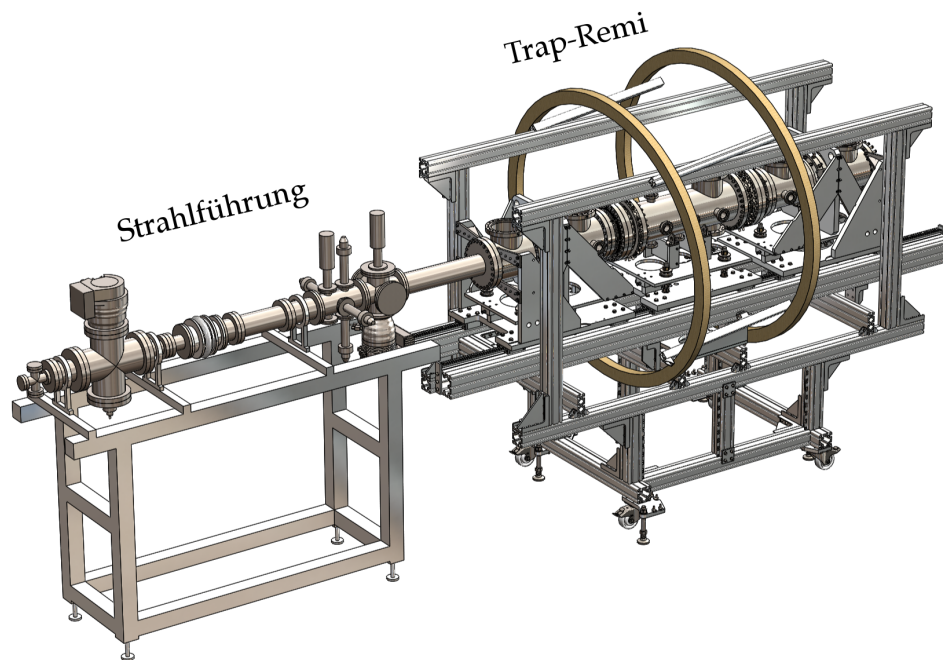


Abbildung 3: CAD-Konstruktion des gesamten Experiments. Quelle: [3]

Die Planungsskizze des Projekts TrapRemi ist in Abbildung 3 dargestellt. Der Aufbau besteht aus zwei Einheiten, der Strahlführung und dem TrapRemi. Beide Aufbauten sind auf ITEMTM-Gestellen montiert. Der vordere Teil ist etwa 2,5 m lang und 0,8 m breit, die Falle selbst ist ein wenig größer mit einer Länge von 3,2 m und einer Breite von 1,4 m. Die Strahlachse liegt 1,4 m über dem Boden. Die Strahlführung dient der Erzeugung und Charakterisierung des Ionenstrahls, an welche das TrapRemi angeschlossen ist.

2.2 Ionenstrahlführung

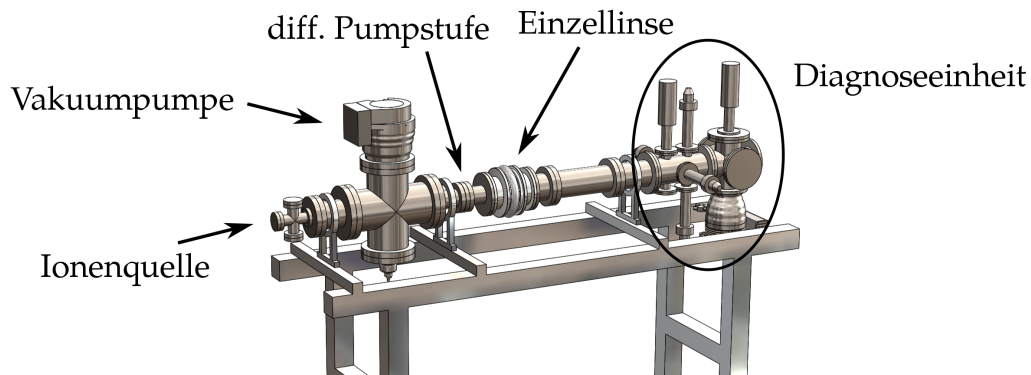


Abbildung 4: Einheit zur Erzeugung und Analyse des Ionenstrahls. Quelle: [3]

Die Strahlführung, gezeigt in Abbildung 4, besteht aus mehreren Untereinheiten: der Ionenquelle, einer ionenoptischen Einheit zur Extraktion, Ablenkung und Fokussierung der Ionen, einer Einzellinse, beweglichen Schlitzen, die auf Manipulatoren montiert sind und einer Diagnoseeinheit zur Untersuchung des Ionenstrahls. Zusätzlich sind noch zwei Druckmessgeräte im Aufbau montiert. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit fehlten die differentiellen Pumpstufen, da sie für die getätigten Voruntersuchungen noch nicht nötig waren.

Ionenquelle: Auf die Ionenquelle wird im Abschnitt 3.2 näher eingegangen.

Ionenoptische Einheit: Die ionenoptische Einheit besteht aus mehreren Teilen. Ihr Aufbau ist in Abbildung 6 zu sehen. Aus Richtung der Ionenquelle gesehen kommt zuerst eine Beschleunigungselektrode, dann drei aufeinander folgende Elektroden, die zusammen eine Einzellinse bilden. Anschließend folgt eine viergeteilte Elektrode, auch Deflektor genannt, um den Strahl jeweils nach oben, unten, rechts und links ablenken zu können und eine Abschlusselektrode, die, wenn sie auf Masse gelegt wird, ein Eindringen des elektrischen Felds in die Folgeaufbauten verhindert. Alle Elektroden wurden per Kapton[®]-Draht an SHV-Durchführungen angeschlossen. Zwischen den Elektroden befinden sich Isolatoren aus Keramik.

Einzellinse: Die Einzellinse soll der zusätzlichen Fokussierung des Ionenstrahls dienen. Sie besteht aus drei Elektroden, die in eine Makrolon[®]-Fassung eingebettet sind und somit elektrisch vom Rest der Strahlführung isoliert sind. Wäh-

rend des Aufbaus des TrapRemi war die Einzellinse jedoch nicht in Gebrauch und wurde, damit sie sich nicht elektrisch auflädt, geerdet.

Schlitze: Die vier an Manipulatoren montierten Schlitze dienen zur Formung und Vermessung des Ionenstrahls. Mit ihnen lässt sich dieser in die gewünschte Form bringen, indem die Ränder des Strahls abgeschnitten werden. Sie sind geerdet, damit sie sich nicht elektrostatisch aufladen können und der auf sie treffende Ionenstrom mit einem zwischengeschalteten Amperemeter gemessen werden kann.

Diagnoseeinheit; Quarz: Die Diagnoseeinheit im hinteren Teil der Strahlführung besteht aus einem mit Zinksulfid beschichteten Quarzkristall und einem Faraday-Becher. Beide können pneumatisch in den Strahlengang gefahren werden. Häufig benutzt man in der Hochenergie-Teilchenphysik Quarzkristalle, um Ionenstrahlen zu visualisieren. Die Methodik basiert auf dem Phänomen der Radiolumineszenz. Da die Energien der Ionen des TrapRemi-Experiments nicht ausreichen ($< 10\text{keV}$), um Radiolumineszenz zu erzeugen, wurde der Quarzkristall mit Zinksulfid beschichtet. Dieses leuchtet bei Kollision mit niedrigerenergetischeren, geladenen Teilchen grünlich und ist von alten Oszilloskopen oder Leuchtschirmen bekannt. Damit lässt sich der Ionenstrahl innerhalb der Analyseeinheit sichtbar machen. Unter dem Kristall befindet sich ein kleines Sichtfenster, hinter dem eine Webcam montiert ist. Die Beobachtungen können dadurch direkt digitalisiert werden .

Diagnoseeinheit; Faraday-Becher: Der Faraday-Becher, wie in Abbildung 5 gezeigt, ist ein Messinstrument um Elektronen- oder Ionenströme zu messen. Es handelt sich dabei um einen einseitig geschlossenen Metallzylinder, in den die geladenen Teilchen fliegen. Dort treffen sie auf die Oberfläche und fließen in Form eines messbaren elektrischen Stroms ab. Faraday-Becher können simpel oder mit zusätzlichen Funktionen versehen sein. Der Faraday-Becher der Analyseeinheit verfügt über eine Blende zur Unterdrückung von Sekundärelektronen.

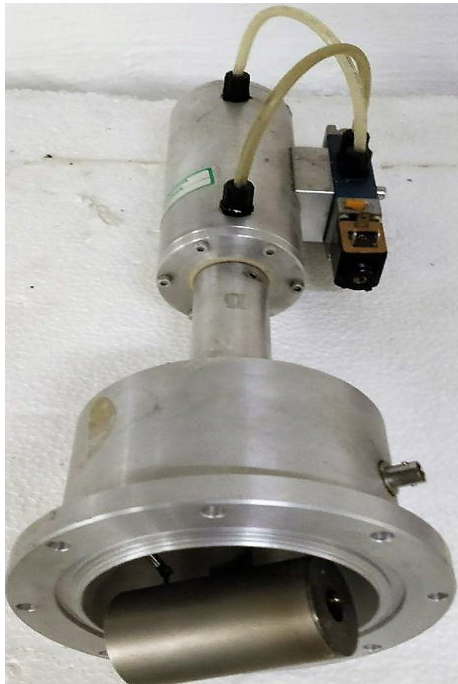


Abbildung 5: Faraday-Becher, wie er in der Strahlführung verbaut ist.

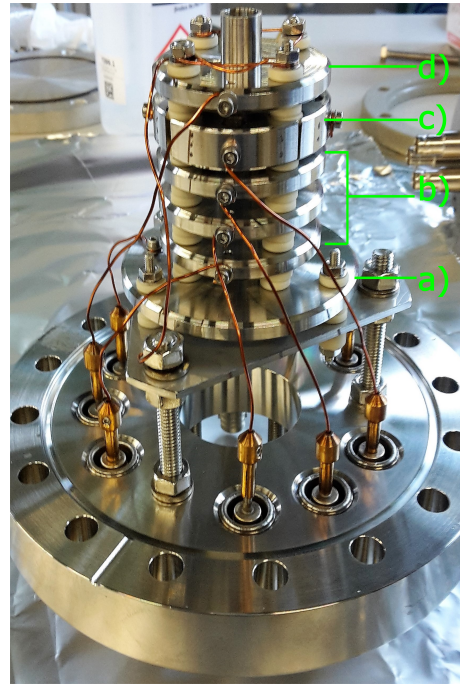


Abbildung 6: Der Elektrodenstapel zur Beschleunigung der Ionen und Manipulation des Strahls. Im Bild von unten nach oben: a) Beschleunigungselektrode, b) drei Elektroden zur Formung einer Einzellinse, c) Deflektor und d) Abschlusselektrode.

2.3 Zajfman-Falle

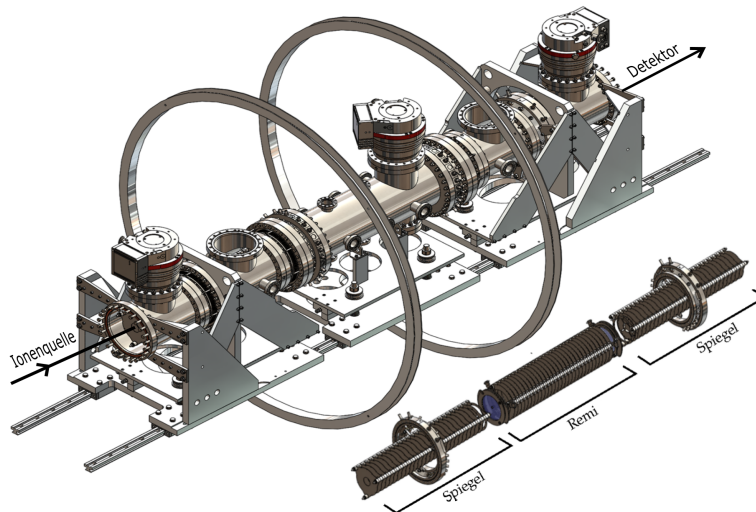


Abbildung 7: Links: das TrapRemi in der Außenansicht. Rechts: die im Aufbau links integrierten Elektroden. Quelle: [3]

In Abbildung 7 ist der Aufbau des TrapRemi ohne ItemTM-Gestell zu sehen. Daneben sind die Elektrodenstapel innerhalb des Aufbaus gezeigt. Der Aufbau lässt sich grob in drei Teile aufteilen, wobei der erste und dritte Teil identisch jedoch spiegelverkehrt zueinander sind. Der von der Ionenquelle gesehene erste (vordere) und dritte (hintere) Teil bestehen jeweils aus einem Elektrodenstapel, der zur Erzeugung eines symmetrischen elektrostatischen Fallenpotentials dient. Zusätzlich bilden manche Elektroden davon auch eine Linse zum Fokussieren des Ionenstrahls. Der Mittelteil ist der in Abschnitt 1.1 beschriebene feldfreie Teil einer Zajfman-Falle, in der das REMI untergebracht ist. Der Verlauf des Potentials innerhalb der Falle ist in den Abbildungen 8 und 9 beispielhaft dargestellt. Eine genauere Betrachtung der Potentialverläufe und der daraus resultierenden Speichereffizienz des TrapRemi ist in der Bachelorarbeit von Ludwig Hoibl „Design und Simulation der Ionenstrahlführung im Projekt TrapRemi“ [3] zu finden.

Die Speicherzeit der Ionen innerhalb der Falle hängt stark von ihrer Masse ab. Die ursprünglichen Experimente von D. Zajfman zeigen, dass sie mehrere Sekunden betragen kann [1].

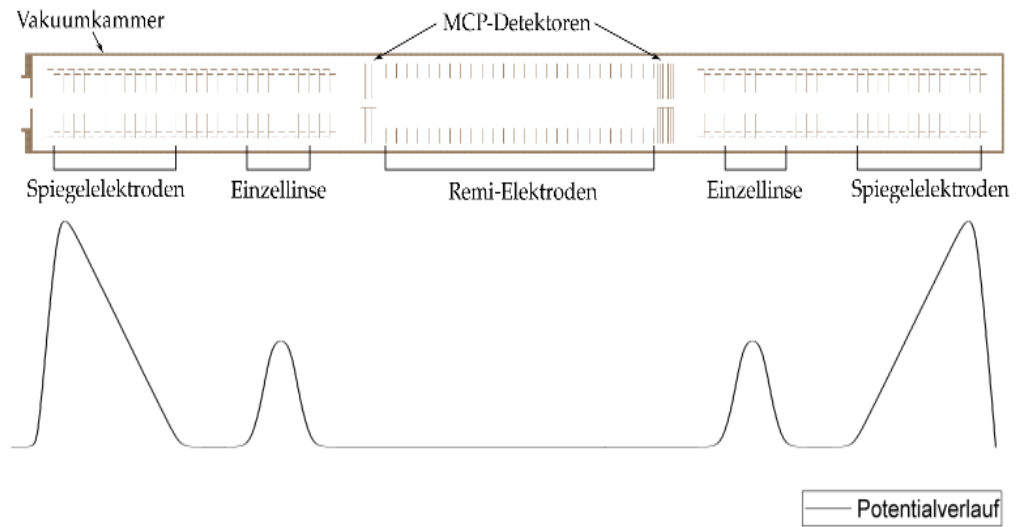


Abbildung 8: Simulation des TrapRemi mit Hilfe von SIMION und entsprechendem Potentialverlauf entlang des Aufbaus. Quelle: [3]

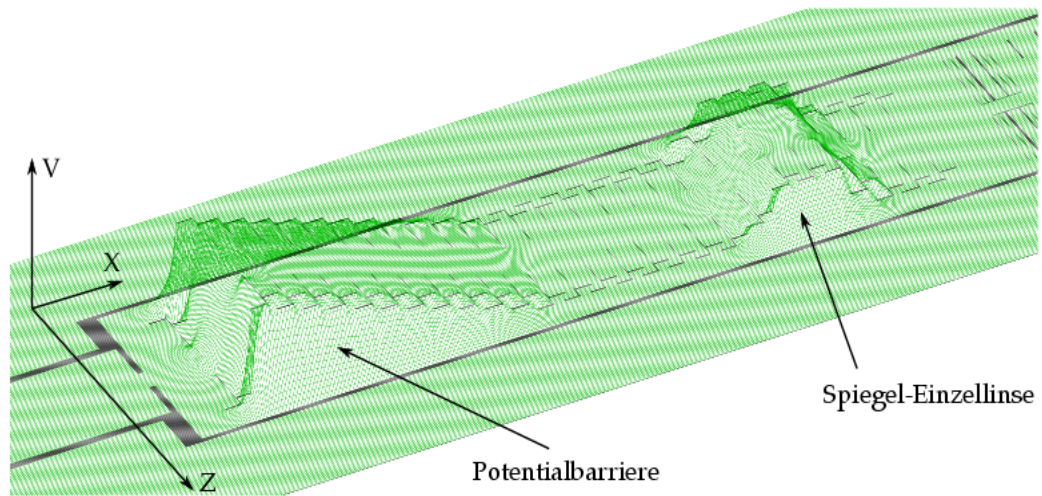


Abbildung 9: Simulation des Potentialverlaufs des vorderen Ionenspiegels in zwei Raumrichtungen mit SIMION. Quelle: [3]

2.4 Reaktionsmikroskop des TrapRemi

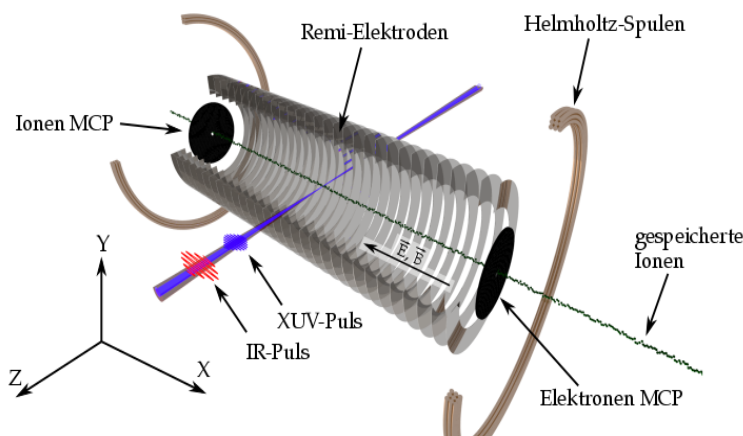


Abbildung 10: Schematische Darstellung eines Experiments innerhalb des TrapRemi. Der Ionenstrahl, der innerhalb des Aufbaus oszilliert, wird hier mit einem gepulsten Laser gekreuzt, wie es beispielsweise bei Pump-Probe-Untersuchungen üblich ist. Quelle: [3]

Wie in Abbildung 10 zu erkennen ist, unterscheidet sich der Aufbau des Reaktionsmikroskops innerhalb des TrapRemi vom üblichen Design. Da das Remi innerhalb einer Zafman-Falle positioniert ist, muss der zu untersuchende Teilchenstrahl nicht rechtwinklig, sondern entlang der Elektrodenachse verlaufen. Denn im Gegensatz zu den üblichen Untersuchungen von ungeladenen Teilchen werden hier geladene Ionen verwendet. Diese würden bei rechtwinkligem Einschuss von ihrer Oszillationsbahn innerhalb der Falle von den Remi-Feldern abgelenkt werden. Somit müssen die MCPs eine kleine Aussparung in der Mitte besitzen, damit die Teilchen in das Remi gelangen und es auch wieder verlassen können. Die Helmholtz-Spulen sind so angebracht, dass das Magnetfeld entlang der Elektrodenachse verläuft. Die genauen Dimensionen der MCPs müssen jedoch noch experimentell bestimmt werden. Es muss ein Kompromiss zwischen der Akzeptanz des Remis und der Detektionsfläche der MCPs gefunden werden, da die Vergrößerung des einen Werts die Verringerung des Anderen zur Folge hat.

3 Ionenquelle

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Ionenquellen im Allgemeinen, sowie eine detaillierte Beschreibung und Vermessung der im TrapRemi verwendeten Ionenquelle.

3.1 Ionenquellen im Allgemeinen

Atome und Moleküle sind im Grundzustand nach außen hin ungeladen. Entfernt man ein oder mehrere Elektronen aus dem Verbund aus Kern und Hülle oder fügt welche hinzu, entstehen (Molekül-)Ionen. Man spricht dann von Ionisierung. Bei Elektronenüberschuss sind die Ionen negativ geladen, bei Elektronenmangel positiv. In diesem Zustand sind die Teilchen nicht mehr neutral und lassen sich somit durch elektrische und magnetische Felder beeinflussen. Ionenquellen sind Vorrichtungen, die Ionen erzeugen indem ein oder mehrere Elektronen gezielt aus der Hülle der Atome entfernt wird. Dazu ist immer ein gewisser Energiebeitrag notwendig, die sogenannte Ionisierungsenergie. Diese kann durch Erhitzen, Kollisionen mit beschleunigten Teilchen, Anlegen einer starken Spannung oder chemische Reaktionen aufgewendet werden. Dabei ist es zumeist gewünscht, dass immer die selbe Art von Ion erzeugt wird. Auch ist wichtig, dass die Ionenquelle einen zeitlich konstanten Ionenstrom erzeugt. Nur so lassen sich reproduzierbare Bedingungen für wissenschaftliche Untersuchungen schaffen.

Ionenquellen besitzen häufig eine Vorrichtung, die die Ionen mittels Anlegen einer Spannung beschleunigt und durch ein Magnetfeld wie in einem Massenspektrometer aufteilt, sodass nur eine Art Ion die Quelle verlässt. Beispielhaft sei hier die Edelgas-Plasma-Quelle erwähnt, die in der Forschung sehr weit verbreitet ist. Einen tiefer gehenden Einblick in das Thema erhält man beispielsweise mit [13]. Theoretisch lassen sich von jedem Atom und Molekül Ionen herstellen (sofern diese stabil sind). Um die Falle des TrapRemi zu überprüfen, konnte jede Art von Ion verwendet werden.

3.2 Die Ionenquelle im TrapRemi

Im Falle des TrapRemi wurde für die anfänglichen Tests die Bedingung einer kompakten und einfach zu handhabenden Ionenquelle gestellt. Es stellte sich heraus, dass eine solche durch die Verwendung einer beheizbaren Alkaliionenquelle von *HeatwaveLabs* erfüllt wird. Die Quelle ist ein fingernagelgroßer Molybdänzylinder, mit einer eingefassten Molybdänheizspirale, die sich in einer Aluminiumoxid (Al_2O_3)-Fassung befindet, zu sehen in den Abbildungen 11 und 12. Auf dieser ist eine Wolframmatrix aufgetragen, in die das Alkalimetall eingelassen ist.

An einem Ende führen zwei, zur Stabilität nochmals umwickelte, Molybdändrähte nach außen als elektrische Kontakte für die Heizspirale. Die Quelle funktioniert nach einem einfachen Prinzip. Bei Fließen eines Heizstroms emittiert die Wolframmatrix thermisch einfach positiv geladene Cäsiumionen. Der zu Grunde liegende Mechanismus ist schon seit über hundert Jahren bekannt [9]. Laut Herstellerangaben besitzt diese Art von Ionenquelle eine Stromdichte von ca. $1 - 10 \frac{mA}{cm^2}$ bei einer Heiztemperatur zwischen $950^\circ C$ und $1100^\circ C$, wenn die Quelle mit $6,3V$ und $1,8A$ betrieben wird.



Abbildung 11: Ionenquelle, wie sie auch am TrapRemi verwendet wird.
Quelle: [11]

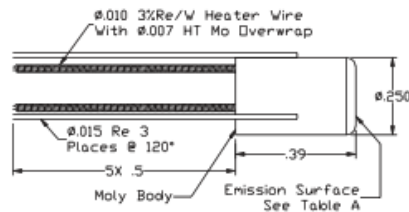


Abbildung 12: Technische Zeichnung des Herstellers der Ionenquelle.
Quelle: [11]

3.3 Aufbau der Ionenquelle

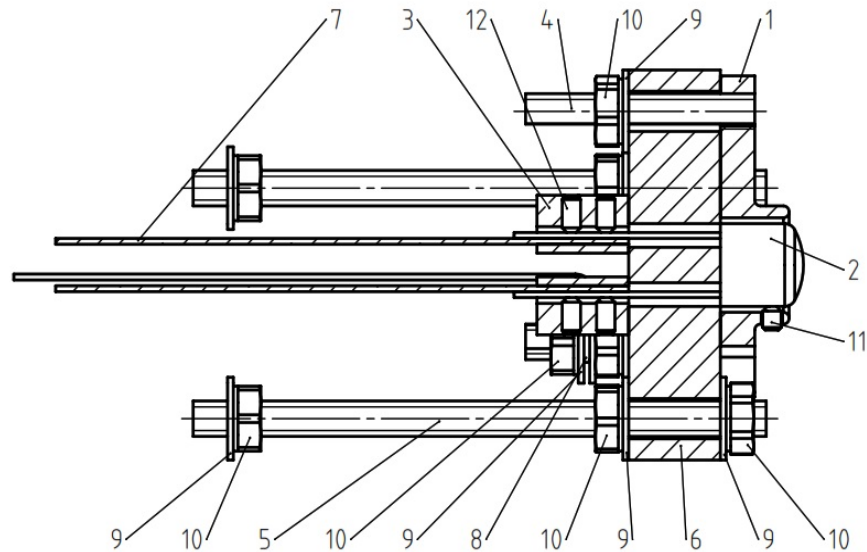


Abbildung 13: Technische Zeichnung: Querschnitt der Halterung. 1: Sternförmige Metallhalterung, 2: Ionenquelle, 3: Klemmen zur Verbindung des Kapton[®]-Drahts der Durchführungen mit der Quelle, 6: Keramikisolator, Rest: Gewindestangen, Schrauben, Muttern und Unterlegscheiben.

Der Bauplan für die Halterung der Ionenquelle in Abbildung 13 wurde uns von Sergej Eliseev bereitgestellt. Die Quelle selbst wird innerhalb eines sternförmigen Metallrahmens, der eine runde Aussparung besitzt mit drei Gewindestangen (Nummer 11 in Abbildung 13) befestigt. Der Rahmen wird auf einer Keramikplatte befestigt, die zur thermischen und elektrischen Isolierung dient. Die Halterung wurde mit drei Gewindestangen (Nummer 5 in Abbildung 13) auf einen CF40-Flansch montiert und die Heizspirale der Ionenquelle über SHV-Durchführungen nach außen geführt. Der fertig montierte Aufbau ist in Abbildung 14 zu sehen.

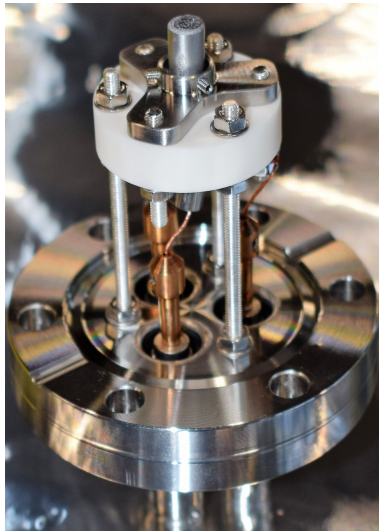


Abbildung 14: Die Ionenquelle in ihrer Halterung montiert. Zu beachten ist, dass die Quelle selbst ein längliches Pellet ist, entgegen der technischen Zeichnungen in den Abbildungen 13 und 15.

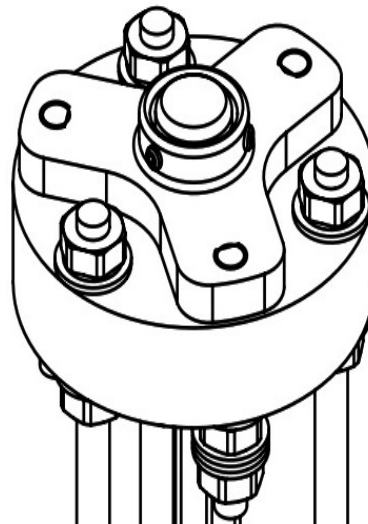


Abbildung 15: Technische Zeichnung: Kopfteil mit sternförmiger Halterung der Ionenquelle.

3.4 Charakterisierung der Ionenquelle

Die erste Datennahme nach dem Erreichen eines Vakuums von ca. 10^{-7} mbar bestand aus der Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Ionenquelle. Zum Heizen der Quelle diente ein Netzteil des Modells *2042-10B* der Firma *EA*. Ionenquelle und Netzteil werden auf ein erhöhtes Potential gelegt. Dieses sogenannte Transferpotential definiert die Energie der Ionen. Zusätzlich wurden die Elektroden der Ionenoptik direkt hinter der Ionenquelle an die Hochspannungsquellen *NHQ208L* und *NHQ204M* von *iseg* angeschlossen. Der Ionenstrom wurde mittels des Faraday-Behlers innerhalb der Analyseeinheit gemessen. Das von uns verwendete Messinstrument war ein Picoamperemeter der Firma *Keithley* mit der Modellbezeichnung *610B*. Es wurde bei angeschalteter Quelle die Ionenoptik so eingestellt, dass der Strom am Becher maximal wurde. Anschließend wurde die benötigte Anlaufzeit t_a gemessen, also die Zeit, die vom Zeitpunkt des Anschaltens des Netzgerätes der Ionenquelle bis zum Erreichen des Maximalstroms am Faraday-Becher nötig waren.

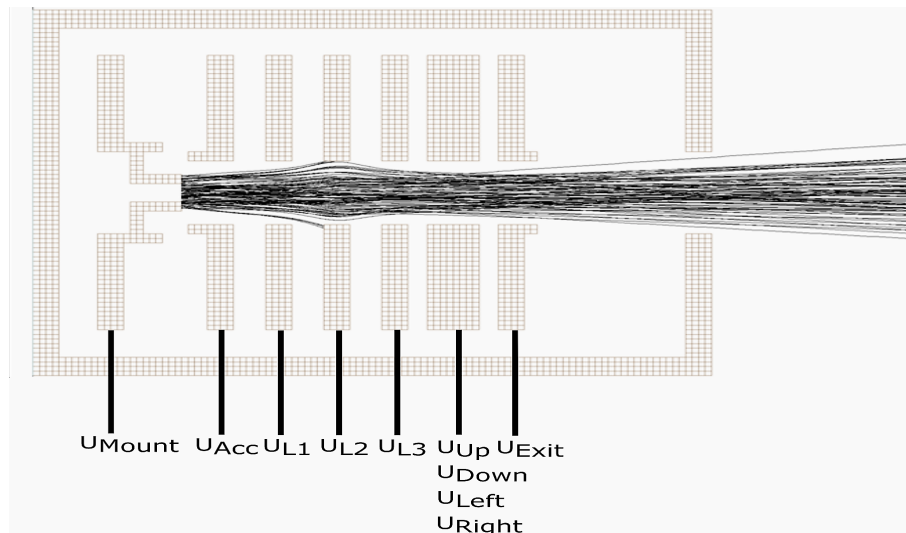


Abbildung 16: Simulation der Ionenstrahlgangs innerhalb der ionenoptischen Einheit, erstellt mit SIMION.

Der Heizstrom dafür betrug $I_H = 2,41 A$. Die Abweichungen des Stromwerts des *2042-10B* liegt laut Datenblatt bei $\frac{\Delta I}{I} = \pm 0,05$ und der Spannungen der *NHQ208L* und *NHQ204M* bei $\frac{\Delta U}{U} = \pm 10^{-5}$. Die Spannungen an der Ionenoptik sind schematisch in Abbildung 16 dargestellt und lagen bei:

- Ionenquelle: $U_{Mount} = 3997V$,
- Beschleunigungselektrode : $U_{Acc} = 2447V$,
- erste Elektrode: $U_{L_1} = 0VV$,
- zweite Elektrode: $U_{L_2} = 0V$,
- dritte Elektrode: $U_{L_3} = 2584V$,
- Deflektor, rechts: $U_{Right} = 0V$,
- Deflektor, links: $U_{Left} = 52V$,
- Deflektor, oben: $U_{Up} = 54V$,
- Deflektor, unten: $U_{Down} = 19V$,
- Abschlusselektrode: $U_{Exit} = 0V$.

Für die Anlaufzeit ergab sich damit:

$$t_a = (134 \pm 5) \text{ s.}$$

Zusätzlich wurde mit der selben Konfiguration die Abhängigkeit des am Becher gemessenen Stroms vom Heizstrom untersucht. Als Fehler wurden die Schwankungen des Messzeigers verwendet, da diese größer waren als der von Hersteller angegebene Fehler des Geräts.

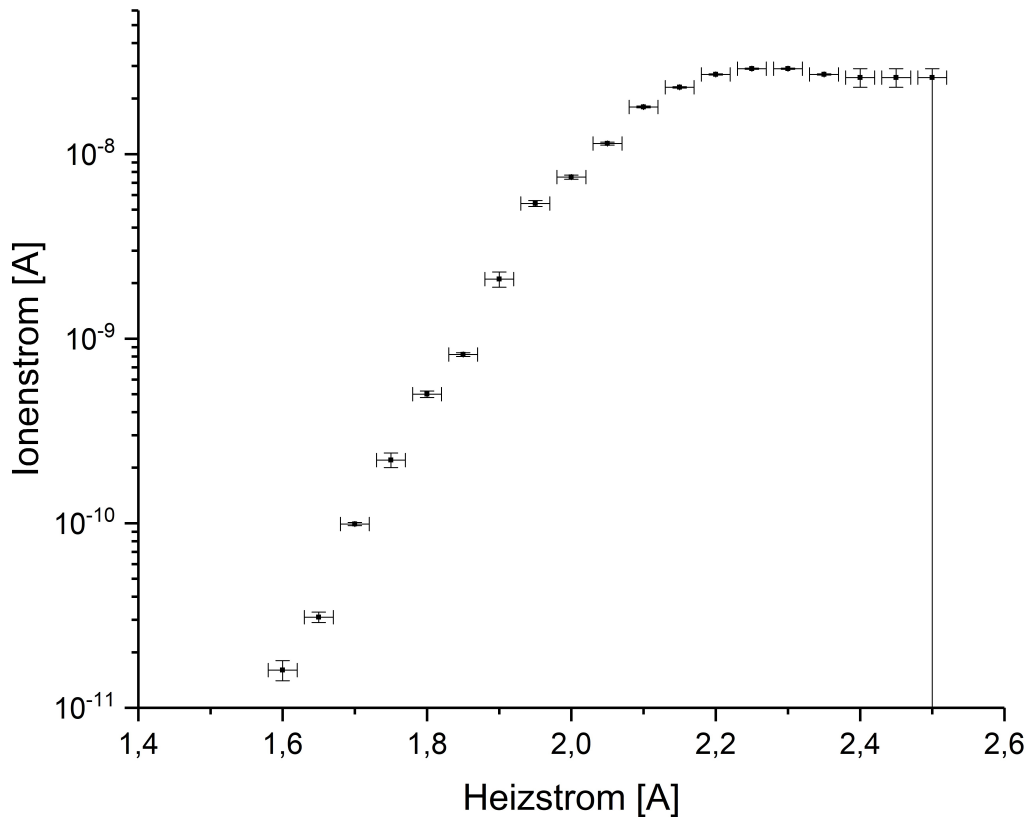


Abbildung 17: Am Faraday-Becher gemessener Strom gegen den Heizstrom der Ionenquelle einfach logarithmisch aufgetragen.

Wie in Abbildung 17 erkennbar ist, steigt der Strom mit zunehmendem Heizstrom an, bis er bei $I_H = 2,2 \text{ A}$ ein Plateau erreicht. Man erkennt, dass bei steigendem Heizstrom der Fehler des am Becher gemessenen Stroms größer wird, da der Zeiger hier anfing stärker zu Schwanken. Dies hängt von zwei Faktoren ab. Wie sich zum Einen später herausstellte, luden sich die Elektroden mit der Zeit auf, weshalb der Ionenstrahl nicht richtig fokussiert wurde und starke

Schwankungen auftraten. Des Weiteren entsteht bei hohen Ionendichten ein Plasma zwischen Ionenquelle und Beschleunigungselektrode, das zu unkontrollierbaren Strömen führen kann. Beides führte dazu, dass bei $I_H = 2,5 A$ der Zeiger zwischen 0 und $2,5 \cdot 10^{-8} A$ schwankte.

Es wurden verschiedene Konfigurationen für die Beschleunigungsspannung und Belegung der Elektroden untersucht. Dabei wurde iterativ die Spannung an den Elektroden verändert, bis das Maximum des am Becher ankommenden Stroms erreicht wurde. Die Ergebnisse sind in folgender Tabelle zusammengefasst. Die Tabelle wurden zur Orientierung für die Voreinstellungen der Quelle für folgende Tests verwendet. Der Heizstrom betrug $I_H = 2,01 A$, aber auch für andere Heizströme konnte man die Daten als Anhaltspunkt verwenden.

$E_{Ion}[keV]$	$U_{Mount}[V]$	$U_{Acc}[V]$	$U_{L_3}[V]$	$U_{Up}[V]$	$U_{Down}[V]$	$U_{Right}[V]$	$U_{Left}[V]$	$I_{Cup}[10^{-7} A]$
6	6000	4712	2775	-8	-15	0	0	1,2
5	5002	3881	2272	-3	-18	0	0	1,1
4	4000	2756	2320	-15	-20	0	0	0,6
3	3003	2213	1412	-28	-40	-4	-16	0,6
2	2000	1457	1064	0	0	0	0	0,3
1	1005	752	471	0	0	0	0	0,24
0,5	499	398	222	0	-1	-3	-1	0,3

Tabelle 1: Einstellungen der Ionenoptik bei $I_H = 2,01 A$ für maximalen Strom am Becher. Nicht angegebene Spannungen sind auf Massepotential $U = 0V$ gelegt worden.

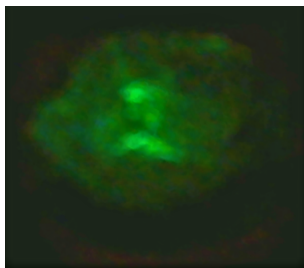


Abbildung 18: Screenshot der Aufnahme des mit ZnS beschichteten Quarzkristalls.

Zusätzlich bestand die Möglichkeit den mit Zinksulfid beschichteten Quarzkristall in den Strahlengang zu fahren. Damit wurde der Ionenstrahl sichtbar gemacht und dessen Form konnte untersucht werden. Wie in Abbildung 18 zu erkennen ist, war der Ionenstrahl nicht mittig zu einem Punkt fokussiert. Er bildete sich mit der Zeit verändernde Schlieren auf dem Zinksulfid. Mit diesen Ergebnissen wurde schnell klar, dass der Ionenstrom instabil war und starke Fluktuationen zeigte.

3.5 Stabilisierung des Ionenstrahls

Die ersten Versuche zeigten ein Problem mit der Stabilität des Ionenstrahls. Die Fluktuationen wurden stärker, je länger die Ionenquelle in Betrieb war. Ein wahrscheinlicher Grund dafür waren sich aufladende Elektroden. Die Ionendichte innerhalb der vorderen Kammer, in der die Ionenquelle sitzt, ist natür-

lich vergleichsweise hoch. Die Ionen werden mit einer $\cos^2(\Theta)$ -Winkelverteilung abgestrahlt. Es können dabei nicht alle Ionen erfolgreich extrahiert und zu einem Strahl gebündelt werden. Somit treffen viele Ionen auf die Beschleunigungselektrode. Es zeigte sich, dass die Netzteile der Elektroden aufgrund einer Diode am Ausgang keinen Strom in die entgegengesetzte Richtung zuließ. Die auf die Elektroden treffenden positiven Ionen konnten nicht kompensiert werden, sodass die Spannungen an den Elektroden mit der Zeit stiegen. Die elektronische Schaltung wurde deshalb um ein Zwischenstück erweitert, das einen Ladungsabfluss ermöglicht, während das Netzteil weiterhin die benötigte Spannung liefern kann.

Planung der Schaltung: Es wurde eine Schaltung entsprechend Abbildung 19 entworfen, die zwischen Elektrode und Netzteil einen hohen Widerstand mit Verbindung zur Masse besitzt. Bei entsprechend großem Lastwiderstand wird das Netzteil dabei nur wenig belastet. Da die verwendeten Netzteile für maximal $4kV$ ausgelegt sind, berechneten wir einen Widerstand von $20M\Omega$, für den die Quelle mit ca 10-20% ihrer Maximalleistung belastet wird. Zusätzlich sorgt diese Schaltung dafür, dass auch das Netzteil ständig Ladung auf die Elektroden schieben muss. Somit wird die Spannung an der Elektrode kontinuierlich nachreguliert, was zu einer stabileren Spannung führt.

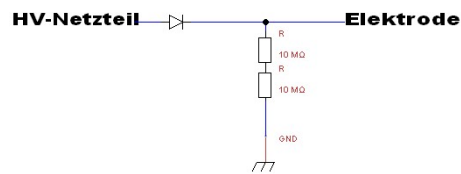


Abbildung 19: Schaltplan des Lastwiderstands, erstellt mit TinyCAD.

Praktische Umsetzung: Eine Metallbox aus Aluminium wurde verwendet um die elektronische Schaltung zu beherbergen. Zehn SHV-Durchführungen wurden eingefügt und je zwei davon mittels Silberdraht und bleifreiem Lötzinn miteinander verbunden. Zwischen den Durchführungen und deren Muttern zur Befestigung wurden Lötfähnchen angebracht, an die ein Silberdraht gelötet wurde, der schlussendlich zu einer Bronzeschraube führt, die den Masseanschluss darstellt. Dadurch können sowohl der Außenleiter der SHV-Anschlüsse, als auch die gesamte Aluminiumbox geerdet werden. Zusätzlich wurden an die Silberdrähte zwischen den SHV-Anschlüssen jeweils zwei $10M\Omega$ Widerstände in Reihe gelötet und mit einem weiteren Silberdraht an den an der Bronzeschraube befestigten Silberdraht verbunden. Dadurch besteht ein hochohmiger Anschluss der Elektroden zu Masse, wenn die Elektroden und die HV-Netzteile über diese Box verbunden werden. Es wurden zwei dieser Boxen gefertigt. Ab-

bildungen 20 und 21 zeigen den fertigen Aufbau einer dieser Boxen.



Abbildung 20: Box für die Lastwiderstände in der Ansicht von oben.

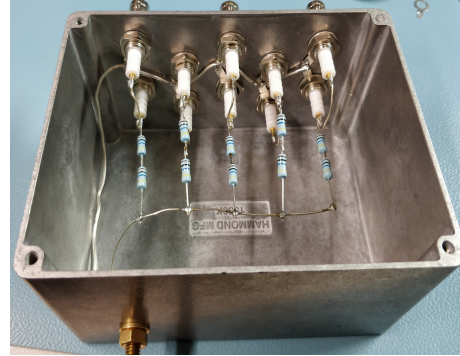


Abbildung 21: Box für die Lastwiderstände; Rückansicht.

4 Einkopplung des Ionenstrahls in die -falle

In diesem Abschnitt werden die ersten Messungen am TrapRemi diskutiert. Dabei geht es um die Passierbarkeit des Ionenstrahls durch den gesamten Aufbau.

Nachdem die Strahlführung und das TrapRemi verbunden und die Funktionalität der Quelle bestätigt wurde, sollte eine einfache Möglichkeit gefunden werden, die am Ende der Falle ankommende Ionen zu messen. Es wurde dafür eine vereinfachte Version eines Faraday-Bechers entworfen. An einen Manipulator wurde eine kleine Kupferplatte befestigt, an eine CF40 Durchführung eines Rohrstücks geschraubt und an eine elektrische Durchführung angeschlossen. Die Konstruktion ist in den Abbildungen 22 und 23 zu sehen. Die Kupferplatte lässt sich in den Strahlengang des Ionenstrahls schieben und der durch die auftreffenden Ionen erzeugte Strom messen. Das Ende des Rohres wurde mittels Fenster verschlossen, damit man auch eine visuelle Bestätigung der richtigen Platzierung der Kupferplatte im Rohr besitzt, während Vakuum in der Falle herrscht.

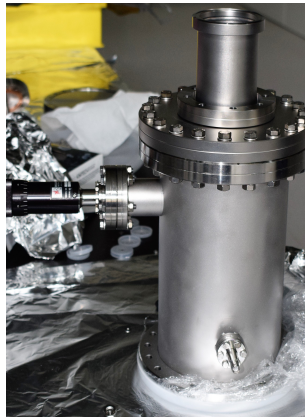


Abbildung 22: Aufbau der abschließenden Messelektrode. Seitlich ist der Manipulator zu erkennen, mit dessen Hilfe die Elektrode in den Strahlengang geschoben werden kann.

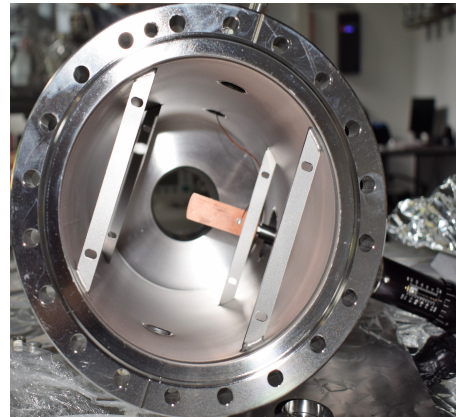


Abbildung 23: Abschließende Messelektrode in der Innenansicht. Man erkennt die Kupferplatte, die mittels Kapton[®]-Draht an eine Durchführung angeschlossen ist.

4.1 Messungen des eingekoppelten Ionenstroms

Die Messungen des Ionenstroms wurden mit Hilfe des selben Picoamperemeters getätigt, wie die Messungen innerhalb der Strahlführung aus Kapitel 3.4. Es wurde dabei versucht den an der abschließenden Elektrode ankommenden Strom zu maximieren. Abbildung 24 zeigt die Kennlinie der Abhängigkeit des an der Abschlusselektrode gemessenen Stroms vom Heizstrom. Die Einstellungen der Ionenquelle und Elektroden wurden sowohl zur Ausrichtung des Strahls als auch bei allen Folgemessungen verwendet. Für die Erstellung der Kennlinie wurde anschließend nur der Heizstrom verändert. Der Heizstrom wurde mit $I_H = 2,2A$ deshalb gewählt, weil laut Abbildung 17 dort die Ionenemission maximal war.

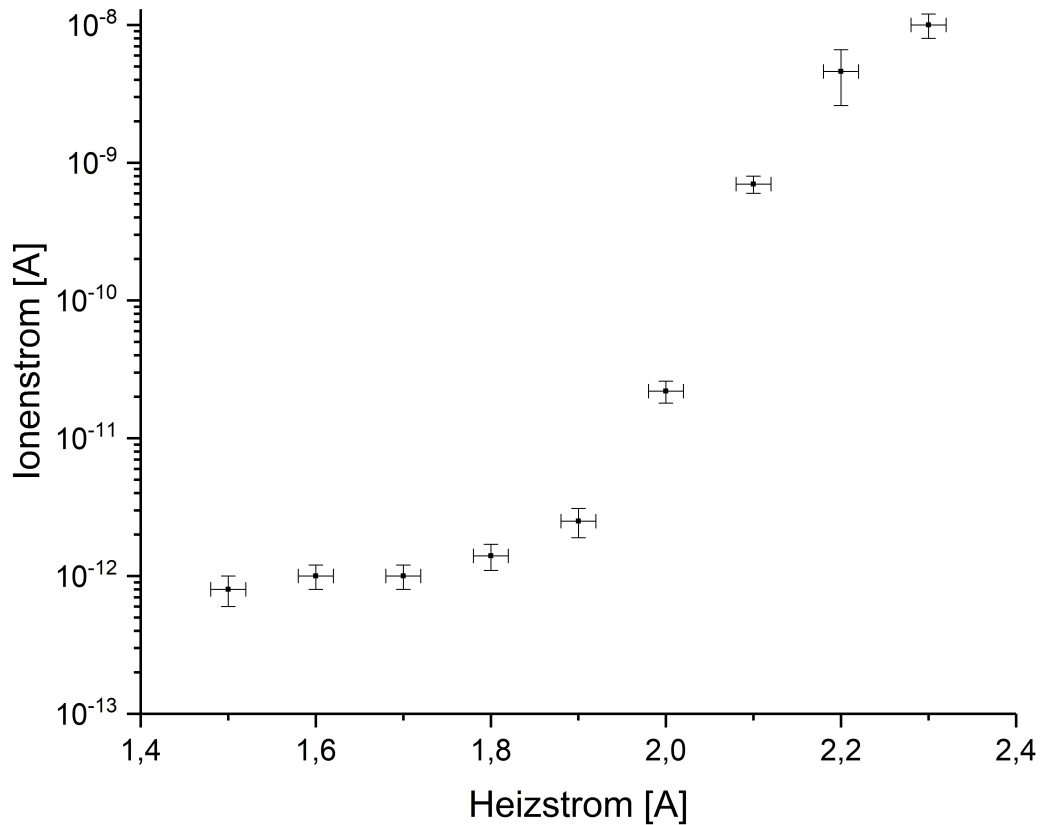


Abbildung 24: An der Abschlusselektrode gemessener Strom gegen Heizstrom einfach logarithmisch aufgetragen. Die Einstellungen für diesen Versuch waren: $I_H = 2,2A$, $U_{Mount} = 2512V$, $U_{Acc} = 1686V$, $U_{L_1} = 0VV$, $U_{L_2} = 1225V$, $U_{L_3} = 1397V$, $U_{Right} = 64V$, $U_{Left} = 103V$, $U_{Up} = 14V$, $U_{Down} = 58V$, $U_{Exit} = 0V$.

Der am in der Strahlführung befindlichen Faraday-Becher gemessene Strom betrug:

$$I_{Cup} = (0,98 \pm 0,1) \cdot 10^{-8} A.$$

Aus Grafik 24 erkennt man, dass bei $I_H = 2,2A$ der an der Abschlusselektrode gemessene Strom

$$I_{Abschl} = (0,46 \pm 0,2) \cdot 10^{-9} A$$

beträgt. Diese Messung zeigt, dass weniger als 5% des in der Strahlführung erzeugten Ionenstrahls wirklich am Ende der Falle ankommt. Geht man von einfach geladenen Ionen aus, entspricht ein Strom von $1nA$ ca. $6 \cdot 10^9 \frac{\text{Ionen}}{s}$. Bei einer späteren Pulsbreite des Ionenpackets von ca. $1\mu s$ resultiert das in 6000 Ionen innerhalb der Falle. Der Wert sollte jedoch das knapp 100-fache davon betragen. Somit muss der Strom, der den gesamten Aufbau passiert weiter erhöht werden, damit im späteren Betrieb genügend Ionen in die Falle eingekoppelt werden können.

4.2 Optimierung des Strahlengangs

Zur Optimierung des Strahlengangs wurde zusätzlich zum Deflektor der Quellenoptik ein Element zur Ablenkung der Ionen benötigt. Eine einfache Lösung bestand im Erstellen zweier Spulenpaare aus Kupferdraht, gezeigt in den Abbildungen 25 und 26. Das damit erzeugte Magnetfeld ermöglichte eine Ablenkung des Ionenstrahls in beide Dimensionen senkrecht zur Strahlrichtung.

Zwei Labornetzteile *PPS-16005* der Marke *Voltcraft* mit einem Maximalstrom von $I = 10A$ standen zur Verfügung. Es sollte die Windungszahl N der Spulen berechnet werden, die nötig ist, um den Ionenstrahl aus mit $U = 2000V$ beschleunigten Cäsiumionen innerhalb der Länge der Spule von $l = 20,7cm$ um $x = 3mm$ abzulenken. Die Spulenbreite betrug $R = 12cm$. Es wurde vereinfachend angenommen, dass die Spulen eine Helmholtz-Konfiguration bilden. Eine Herleitung findet sich beispielsweise in [12]. Die am Ende erhaltene Formel für die Windungszahl lautet:

$$N = \frac{\sqrt{125} \cdot R \cdot m_{Cs} \cdot x}{4 \cdot q \cdot \mu_0 \cdot I \cdot l^2} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot q \cdot U}{m_{Cs}}}. \quad (1)$$

Dabei sind: q : Elementarladung, m_{Cs} : Masse eines Cäsiumions und μ_0 : magnetische Feldkonstante. Es ergibt sich damit eine Windungszahl von $N \approx 40$. Damit sich die Drähte während des Dauerbetriebs nicht zu stark erhitzen, wurde die berechnete Windungszahl verdoppelt, wodurch bei halben Strom die

gleiche Magnetfeldstärke erzeugt werden kann. Somit wurden die Spulen mit $N = 80$ Windungen gewickelt.

Für die Fertigung der Spulen wurde eine Plastikgehäuse verwendet, dessen Länge ungefähr der Länge des Wellbalgs entsprach. Darum wurde lackierter Kupferdraht gewickelt, bis die berechnete Windungszahl erreicht wurde. Der Unterteil des Gehäuses konnte abgenommen werden und die Spulen so relativ einfach vom Gehäuse gelöst werden. Der Draht wurde anschließend mit Kabelbindern fixiert und ebenfalls mit Kabelbindern am Wellbalg befestigt (siehe Abbildung 27).

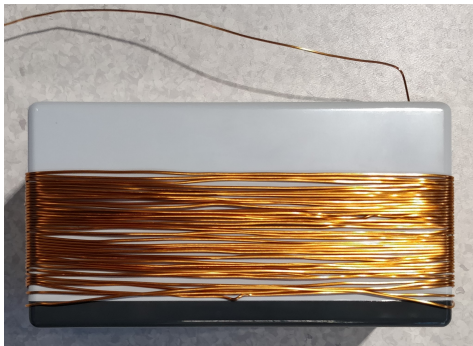


Abbildung 25: Zur Unterstützung wurde ein Plastikgehäuse beim Wickeln der Spulen verwendet.

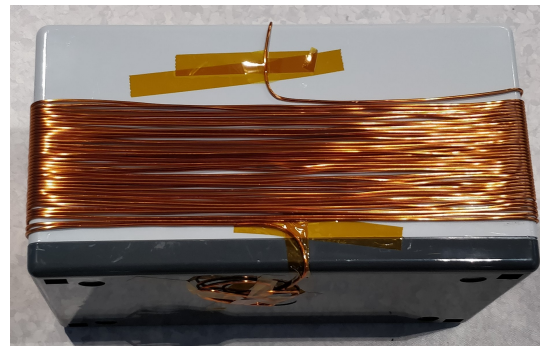


Abbildung 26: Die Enden der Spule wurden mit Kaptonband® fixiert.

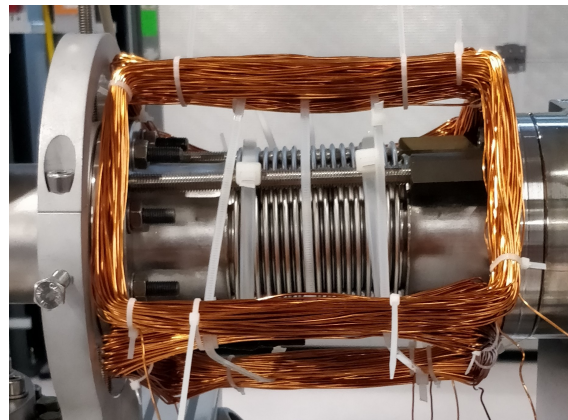


Abbildung 27: Alle vier Spulen wurden am Strahlrohr befestigt und so ausgerichtet, dass der Strom an der hinteren Messelektrode maximal wurde.

Es wurde daraufhin versucht den an der Abschlusselektrode ankommenden Strom weiter zu maximieren, indem Stromstärke und Ausrichtung der Spulen

iterativ verändert wurden.

Folgend wird beispielhaft eine Messung mit und ohne Magnetfeld gezeigt. Da, wie später noch behandelt wird, der Ionenstrom auf Grund der Aufladung von Elektroden im TrapRemi nicht konstant war, können sich einzelne Messungen von einander unterscheiden. Der normale Strombereich bei 2,2A angelegtem Heizstrom für die Ionenquelle am Faraday-Becher lag bei

$$I_{Cup} = (1,02 \pm 0,1) \cdot 10^{-7} A,$$

ohne Magnetfeld an der Abschlusselektrode bei

$$I_{Abschl} = (0,31 \pm 0,1) \cdot 10^{-8} A$$

und mit Magnetfeld bei

$$I_{Abschl}^{mag} = (0,89 \pm 0,1) \cdot 10^{-8} A.$$

Somit konnte der Strom um den Faktor drei erhöht werden. Auch in späteren Messungen zeigte sich, dass der Aufbau der Spulen einen signifikanten Einfluss auf den Anteil an Ionen, die den Aufbau passieren können, besitzt. Zwar stellte die Fertigung und Installation der Spulen eine sehr schnelle und nicht sehr ausgefeilte Lösung dar, jedoch ist der Einfluss selbst dieser Lösung sehr hoch. Trotzdem kam auch mit Verbesserung mittels Magnetfeld bei fehlenden Linsen im TrapRemi nur ein Bruchteil der Ionen am Ende der Falle an. Entsprechend Abbildung 34 im nachfolgenden Abschnitt, wurde am zur Quelle hin vorderen Teil der Falle eine Elektrode der Spiegelelektroden an ein HV-Netzteil der Marke iseg angeschlossen, damit diese als Linse zum Einkoppeln des Strahls in die Falle diene. Nachdem diese Elektrode benutzt wurde, konnte fast der gesamte Ionenstrom, der in der Strahlführung gemessen wurde auch auf der Abschlusselektrode gemessen werden.

5 Charakterisierung der Ionenfalle

Im folgenden Abschnitt werden der Aufbau und die Ergebnisse für Messungen an der Ionenfalle behandelt. Durch die vorhergehenden Versuche konnte gezeigt werden, dass ein Teil der Ionen den gesamten Aufbau passiert.

5.1 Vorbereitungen für das erstmalige Speichern von Ionen

Zur Inbetriebnahme der Falle wurden weitere elektronische Schaltungen und Geräte in den Versuchsaufbau integriert:

- Ein bei der Elektronikabteilung des MPIK in Auftrag gegebener Spannungsteiler, der die Spannungsrampe für den Ionenspiegel moduliert, wurde in den dafür vorgesehenen 19"-Rahmen des ITEMTM-Gestells unter der Falle montiert,
- ein HV-Schalter *HTS-121* von *Behlke*,
- ein Pulsgenerator *HM8035* von *HAMEG*,
- ein *HM03004* Oszilloskop von *Rhode&Schwarz*,
- ein rauscharmer ($0,5 \frac{nV}{\sqrt{Hz}}$) *SA-220F5* Vorverstärker von *NF*,
- ein Hauptverstärker des Modells *570* von *Ortec*,
- Netzteile von *iseg* der Nummern *NHQ204M* und *NHS 62 05x-K01*, von *Heinzinger* der Nummer *PNChp 10000* und ein *E3630A* von *HP*.

Die Funktionalität der einzelnen Komponenten wurde anschließend nach und nach überprüft.

5.2 Ladungsmessung eines Ionenpulses

Erzeugung eines Ionenpulses:

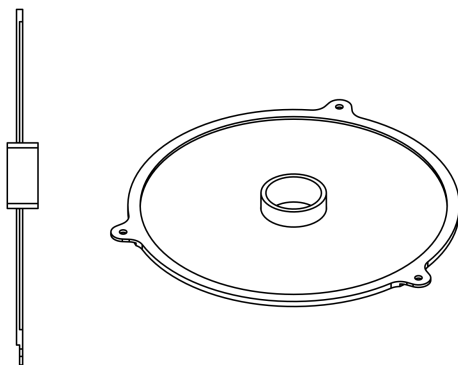
Im späteren Betrieb werden die Ionen nicht kontinuierlich in die Falle eingekoppelt, sondern in Ionenpakete gepulst. Dazu wird eine Elektrode, im folgenden Sperrelektrode genannt, an einen HV-Schalter angeschlossen. Dieser ist wiederum an zwei Spannungsquellen und einen Pulsgenerator angeschlossen. Die Pulserzeugung erfolgt in mehreren Schritten:

1. Es werden am HV-Schalter zwei Potentiale angelegt. Eine entspricht einem etwas höheren Potential, dem Sperrpotential U_A . Das Andere ist niedriger als das Sperrpotential, das Durchlasspotential U_B . Bei Anlegen dieses Potentials bleiben die Ionen auf der korrekten Flugbahn durch den Aufbau.
Die Sperrelektrode der Falle ist im Grundzustand an U_A angelegt. Von diesem Potential werden die Ionen reflektiert oder so stark abgelenkt, dass sie die Strahlachse verlassen, und durchlaufen somit nicht die Ionenfalle.
2. Am Pulsgenerator wird ein TTL-Triggerpuls mit einer bestimmten Zeitlänge μ_{Puls} erzeugt.
3. Der HV-Schalter schaltet während des TTL-Triggerpulses von Potential U_A auf U_B um. Die Ionen können nun die Elektrode passieren und fliegen in die Falle hinein.
4. Nachdem der TTL-Triggerpuls vorüber ist, schaltet der HV-Schalter wieder zurück in den Grundzustand. Damit liegt wieder das Potential U_A an der Sperrelektrode an und alle ankommenden Ionen werden wieder reflektiert.

Je schneller der HV-Schalter zwischen Maximalspannung und abgesenkter Spannung wechselt, desto klarer definiert sind die Flanken der Ionenpulse. Im Falle des *HTS-121* beträgt die Schaltzeit ca. $100ns$.

Pickupelektrode:

Innerhalb des TrapRemi befindet sich jeweils im vorderen und hinteren Elektrodenstapel eine Pickupelektrode. Die von uns verwendete Pickup-



elektrode ist in nebenstehender Abbildung zu sehen. Normale Elektroden sind eine Metallscheibe mit einer kreisförmigen Öffnung mit einem Durchmesser von $44mm$ in der Mitte. Die Pickupelektrode hingegen besitzt ein kleines Rohrstück in der Mitte mit den Abmessungen $(\varnothing 21,3 \times 1,6 \times 10)mm$. Es dient zur Vergrößerung des zu messenden Signals.

Abbildung 28: Technische Zeichnung der Pickupelektrode. links: Seitenansicht, rechts: Ansicht von schräg unten.

Messung eines Ionenpulses:

Beim Durchflug der Ionen durch die Pickupelektrode wird durch Influenz eine Spannung $U_{PU}(t)$ induziert, die anschließend gemessen werden kann. Es gilt:

$$U_{PU}(t) = \frac{1}{C_f} \cdot \sum q_j(t). \quad (2)$$

Dabei ist C_f die Kapazität der Pickupelektrode und $q_j(t)$ der zeitabhängige Ladung eines Ions. Letzere berechnet sich über das Flächenintegral der Innenfläche des Rohrstücks der Pickupelektrode und dem elektrischen Feld der Ionen:

$$q_j(t) = \epsilon_0 \int \vec{E}_j(\vec{r}, t) d\vec{s}, \quad (3)$$

mit ϵ_0 : Dielektrische Konstante.

An den Ausgang der Pickupelektrode wurde der rauscharme Vorverstärker angeschlossen, der wiederum an den Hauptverstärker im NIM-crate[®] unterhalb der Falle angeschlossen wurde. Als Sperrelektrode diente eine Elektrode des Deflektors aus der ionenoptischen Einheit.

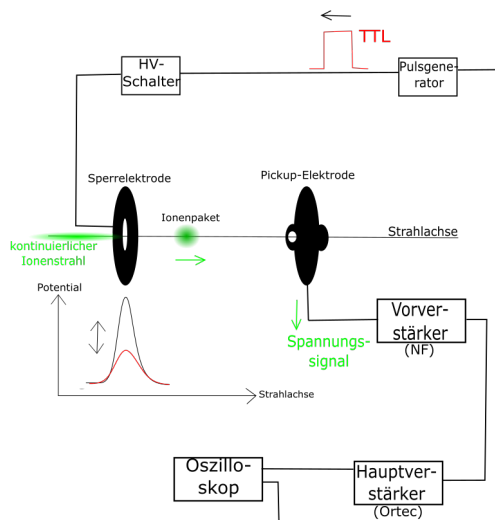


Abbildung 29: Skizze zur Erzeugung und Messung von Ionenpulsen.

Um den durch die Pickupelektrode gemessenen Ionenpuls mit dem TTL-Triggerpuls zu vergleichen, wurde entsprechend Abbildung 29 der Frequenzgenerator an das Oszilloskop und gleichzeitig an den HV-Switch angeschlossen. An den zweiten Eingang des Oszilloskops wurde der Hauptverstärker angeschlossen, sodass auf diesem Kanal die in der Pickupelektrode induzierte Spannung abgebildet wurde.

Daten der Messung:

Die ersten Messungen zeigten, dass der Hauptverstärker differenzierend verstärkt. Da dieses Verhalten nicht im Handbuch beschrieben wird und auch nicht bei allen Einstellungsarten zu tragen kommt, muss Vorsicht geboten werden bei der Auswertung der Signale. Dadurch sieht ein beispielhaftes Signal aus wie in Abbildung 30. In diesem Versuch wurde der Pulsgenerator direkt an den Hauptverstärker angeschlossen und das erhaltene Signal der Pickupelektrode auf dem Oszilloskop aufgezeichnet. Man erkennt darin einen ersten positiven Peak, der die ansteigende Flanke des Pulses darstellt, sowie einen Negativen, der die fallende Flanke des Pulses darstellt.

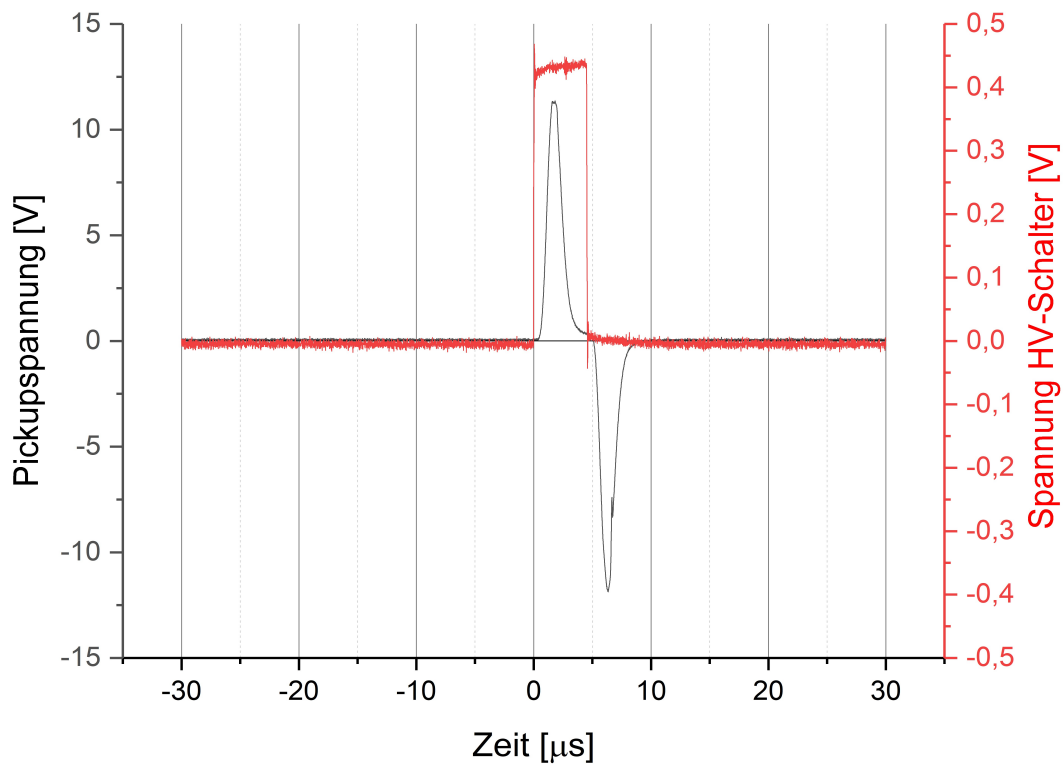


Abbildung 30: Messung der Eigenschaften des Hauptverstärkers. Rot: Spannungsverlauf des Pulsgenerators, Schwarz: Das verstärkte, differenzierte Signal des Pulsgenerators. Einstellungen: Pulsdauer: $\mu = 4,7\mu\text{s}$, $gain = 1,0$, $coarse\ gain = 1000$, shape time: $t = 0,5\mu\text{s}$.

In Abbildung 31 ist die Messung eines Ionenpulses dargestellt. Zu erkennen ist die, im Vergleich zu Abbildung 30, lange Zeitdifferenz zwischen TTL-Puls und an der Pickupelektrode registriertem Ionenpuls. Dies ist durch die Zeit bedingt, welche der Ionenpuls benötigt um den gesamten Aufbau zu passieren. Erkenn-

bar ist, dass die Ionen mit Hilfe des HV-Schalters erfolgreich in gepulste Pakete geformt werden können.

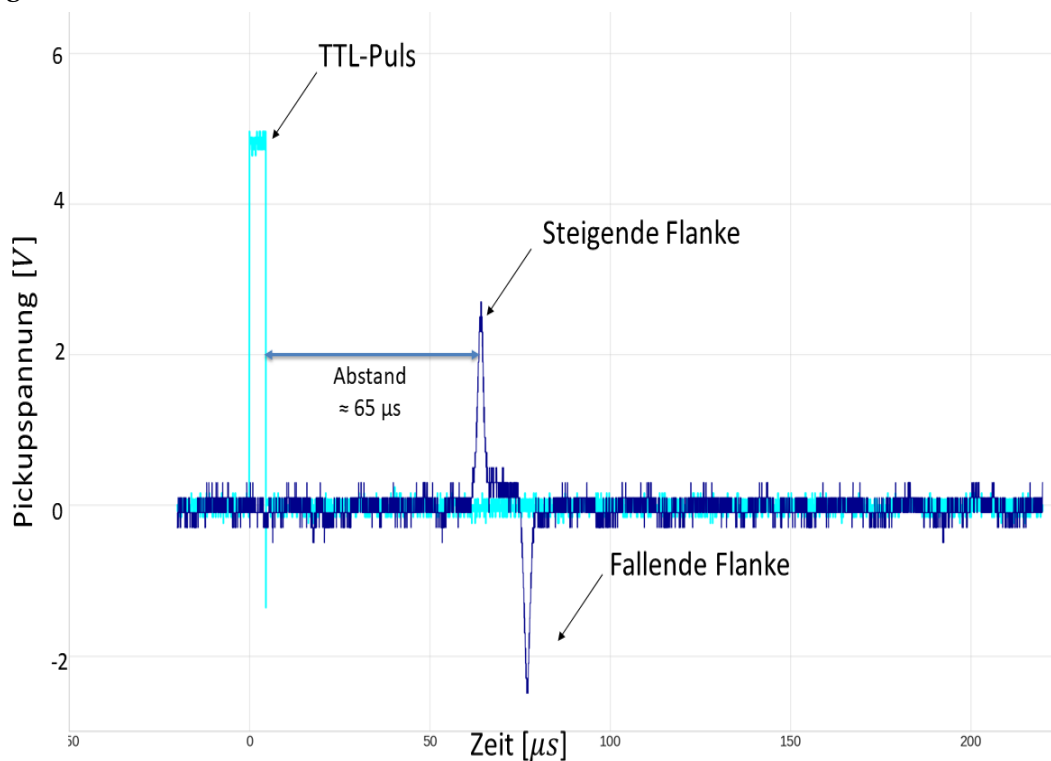


Abbildung 31: Messung eines Ionenpulses. Türkis: Spannungsverlauf des Pulsgenerators, blau: Das differenzierte Signal der Pickupelektrode. Einstellungen: $U_{Mount} = 2503V$, $U_{Acc} = 1661V$, $U_{L_3} = 1540V$, $U_{Right} = 34V$, $U_{Left} = 64 \leftrightarrow 268V$, $U_{Up} = 85V$, $U_{Down} = 59V$, Pulsdauer für die Sperrelektrode: $\mu_s = 2,3\mu s$, Zeit zwischen zwei Pulsen: $d = 10ms$, $gain = 1,0$, $coarse\ gain = 1000$, shape time: $t = 0,5\mu s$.

5.3 Elektrische Störsignale:

Durch die Vermessung der Puls zeigte sich eine Reihe an Störsignalen, die die Messung verfälschen können. Zur genauen Untersuchung von Ionen müssen diese reduziert oder beseitigt werden. **Störsignale beim Schalten des HV-Schalters:**

Der Schaltvorgang des HV-Schalters erzeugt ein Störsignal an der

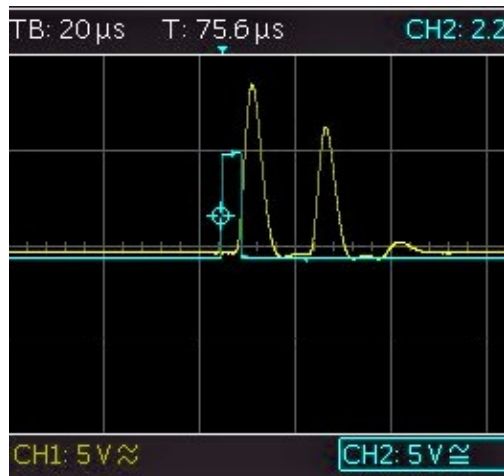


Abbildung 32: Signal an der Pickupelektrode mit abgeschalteter Ionenquelle und -optik. Man erkennt klar die beiden Peaks des HV-Schalters. Türkis: Spannungsverlauf des Pulsgenerators, Gelb: Spannungsverlauf der Pickupelektrode.

Pickupelektrode, wie in Abbildung 32 zu sehen ist. Dieses verstärkte sich noch, als der Spannungsteiler für den Ionenspiegel in den Aufbau integriert wurde. Um ein Überlagern der zwei Peaks des HV-Schalters am Oszilloskop mit dem Signal des Ionenpakets zu vermeiden, wurde zuerst versucht mögliche Verbindungen von Schalter zur Pickupelektrode abzukoppeln. Dabei wurden die Masseanschlüsse der Messelektronik auf eine andere Erdungsschiene verlegt, sodass dort kein Einfluss mehr bestehen konnte. Auch wurden die elektrischen Bauteile so weit wie möglich voneinander neu aufgebaut. Dies minderte die Peakhöhen etwas, jedoch war der Effekt des HV-Schalters immer noch ausgeprägt. Bis

zur Fertigstellung dieser Arbeit konnte das Störsignal des HV-Schalters nicht vollständig beseitigt werden.

Stabilisierung der Fallenpotentiale:

Wie schon zuvor zeigte sich ebenso im TrapRemi, dass sich die Elektroden beim Betrieb des Versuchs aufluden. Deshalb musste darauf geachtet werden, dass jede ungenutzte Elektrode geerdet wurde. Das wurde durch Kurzschließen des Innenleiters der SHV-Durchführungen mit dem Außengestell mittels Silberdraht beziehungsweise eigens dafür gefertigtem Kurzschlussstecker realisiert. Auch wurde eine weitere Vorrichtung aus Lastwiderständen, wie sie aus Kapitel 3.5 bekannt ist, in der Elektronikwerkstatt des MPIK in Auftrag gegeben. Sämtliche an Netzteile angeschlossenen Elektroden sollen damit verbunden werden.

Elektronische Resonanzen:

Als eine weitere Störquelle erwiesen sich Resonanzen im elektronischen Schaltkreis. Besonders stark ausgeprägt war das Problem bei angeschlossenem Spannungsteiler, da dieser durch seine verbauten Kondensatoren die Gesamtkapazität des Aufbaus um ein Vielfaches erhöhte. Dadurch bildeten sich bei bestimmten Einstellungen der Spannungsquellen und des Pulsgenerators Resonanzen, welche die Messungen am Oszilloskop überlagerten. In Abbildung 33 sieht man die Auswirkungen solcher Resonanzen. Durch Vermeiden entsprechender Fallenpotentialkonfigurationen konnten diese Störsignale vermieden werden.



Abbildung 33: Bei diversen Einstellungen bildeten sich Resonanzen im Schwingkreis. Der Spannungsteiler war in dieser Messung noch nicht angeschlossen. Türkis: Spannungsverlauf des Pulsgenerators, Gelb: Spannungsverlauf der Pickupelektrode. Einstellungen: $U_{Mount} = 2500V$, Strom an der vertikalen/horizontalen Spule: $I_{S_v} = 0A$, $I_{S_h} = 4,6A$, $U_A = 2500V$, $U_B = 0V$, $\mu_S = 1ms$, $d = 10ms$, $Gain = 1,5$, $coarse\ gain = 1000$, $t = 2\mu s$.

5.4 Erste Schritte zur Speicherung von Ionen

Nach dem erfolgreichen Erzeugen eines Ionenpulses, wurde ein Aufbau realisiert, mit dem die einzelnen Komponenten der Ionenfalle nach und nach getestet wurden.

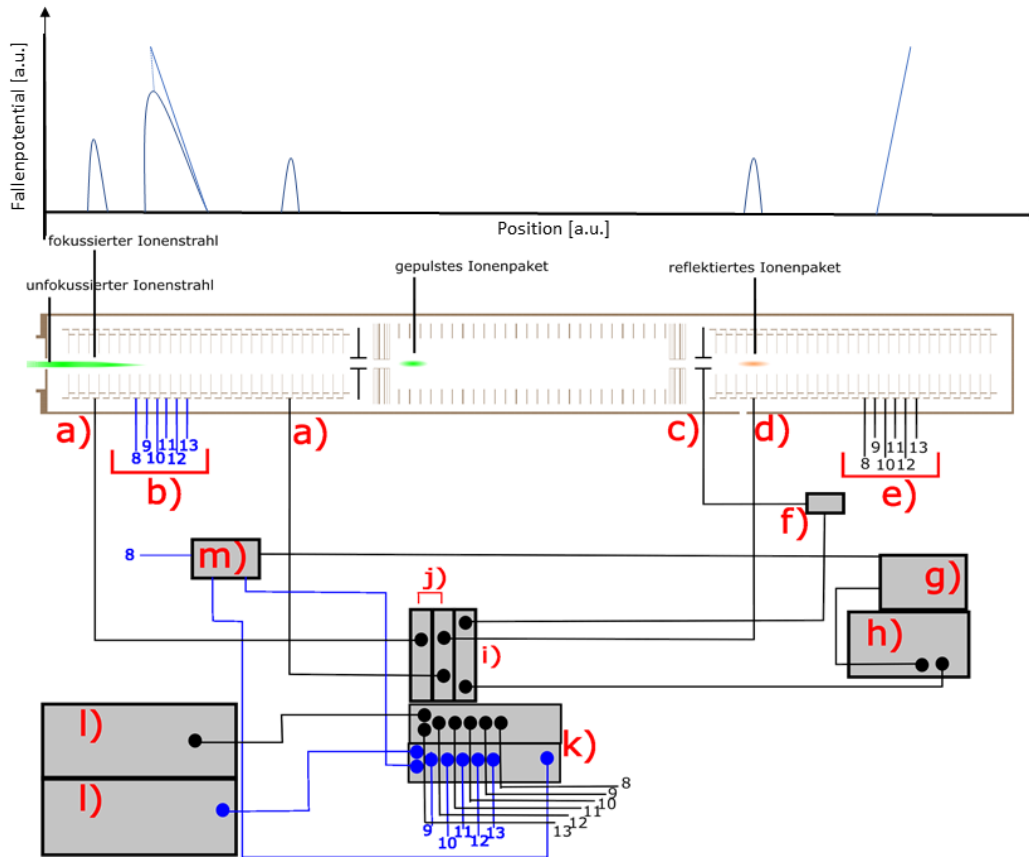


Abbildung 34: Skizze des Aufbaus zur Charakterisierung der Ionenfalle.

a) Elektrode des vorderen Elektrodenstapels, die als Linse verwendet wird, b) vorderer Ionenspiegel, die erste Elektrode wurde an den HV-Schalter angeschlossen c) Pickupelektrode, d) Elektrode des hinteren Elektrodenstapels, die als Linse verwendet wird, e) Sechs Elektroden des hinteren Stapels, angeschlossen an den Spannungsteiler, f) Vorverstärker, g) Pulsgenerator, h) Oszilloskop, i) Hauptverstärker, j) *iseg* Netzteile, k) Spannungsteiler, l) *Heinzinger* Netzteile, m) HV-Schalter.

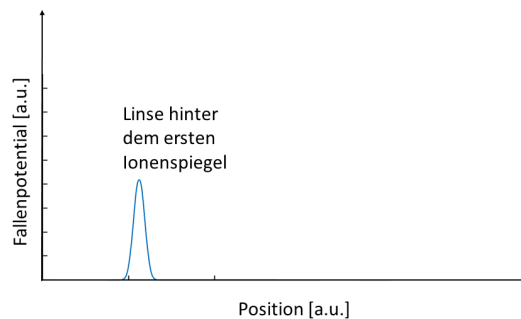
Auch bei dieser Messung wurde eine Deflektorelektrode in der ionenoptischen Einheit mit einem HV-Schalter verbunden, sodass aus der Strahlführung Io-

nenpulse kamen, anstatt eines kontinuierlichen Strahls. Die Pulserzeugung geschah somit nicht im TrapRemi, sondern in der Strahlführung.

Es wurden zwei Elektroden aus dem vorderen Elektrodenstapel der Falle und eine aus dem Hinteren an ein *iseg* Netzteil angeschlossen. Diese fungierten dann als Linse. Zwei *Heinzinger* Netzteile wurden an den Spannungsteiler angeschlossen. Sechs Elektroden des jeweils vorderen und hinteren Elektrodenstapels wurden mit dem Spannungsteiler per SHV-Kabel verbunden. Die der Ionenquelle am nächsten befindliche der sechs vorderen Elektroden wurde an das volle Potential der Spannungsquelle angeschlossen. Die darauffolgende an den mit dem nächst niedrigeren Potential, bis letztlich die sechste und letzte Elektrode das kleinste Potential der Spannungsrampe erhielt. Alle ungenutzten Anschlüsse des Spannungsteilers wurden mit dem Masseanschluss verbunden. Im hinteren Abschnitt wurde dasselbe, nur spiegelverkehrt aufgebaut. Der fertige Aufbau ist schematisch in Abbildung 34 dargestellt. Wird nun an den Spannungsteiler ein Potential angelegt, so wird durch die Elektroden eine Potentialrampe erzeugt, durch welche die Ionen reflektiert werden.

Ohne Fallenpotential:

Zu Beginn wurde die Schaltung ohne aktives Fallenpotential betrieben.



Es wurde eine Elektrode des vorderen Elektrodenstapels als Linse verwendet. Die Pulserzeugung geschah wie zuvor in der ioneoptischen Einheit. Das Potential innerhalb der Falle ist in Abbildung 35 dargestellt.

Abbildung 35: Das Potential bei diesem Setup kam ausschließlich von einer Linse aus dem vorderen Elektrodenstapel es TrapRemi.

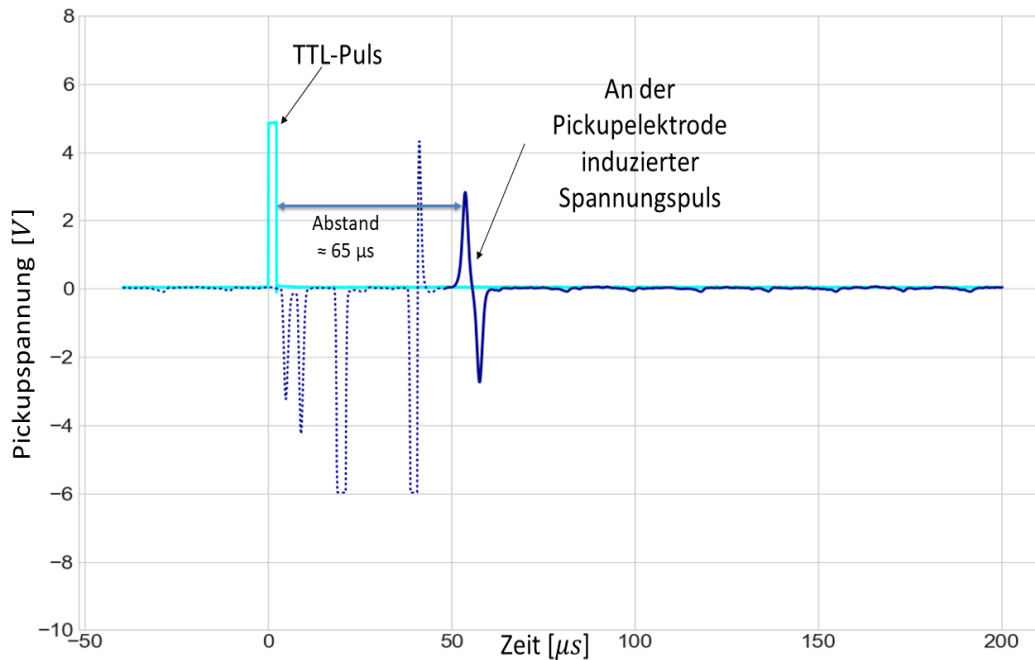
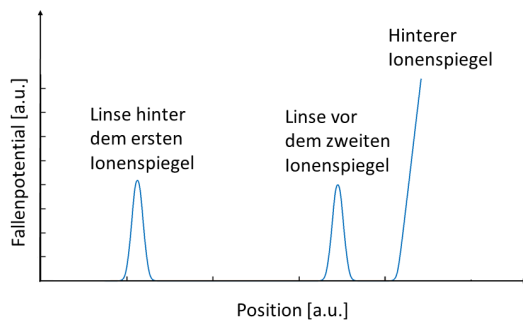


Abbildung 36: Messung eines einzelnen Pulses. Türkis: Spannungsverlauf des Pulsgenerators der ionenoptischen Einheit, blau: gepunktet: Störsignale, durchgezogen: an der Pickupelektrode registriertes Signal. Einstellungen: $I_H = 1,8 A$, $U_{Mount} = 2506 V$, $U_{Acc} = 1661 V$, $U_{L_3} = 1540 V$, $U_{Right} = 34 V$, $U_{Left} = 64 \leftrightarrow 268 V$, $U_{Up} = 85 V$, $U_{Down} = 59 V$, $I_{S_v} = 0 A$, $I_{S_h} = 9,1 A$, erste Linse im TrapRemi: $U_{S_1} = 0 V$, zweite Linse im TrapRemi: $U_{S_2} = 1363 V$, dritte Linse im TrapRemi: $U_{S_3} = 0 V$, TTL-Pulsdauer für die ionenoptische Einheit: $\mu_{iE} = 2,3 \mu s$, $d = 10 ms$, $gain = 1,0$, $coarse\ gain = 1000$, $t = 0,5 \mu s$.

Abbildung 36 zeigt das Ergebnis dieser Messung. Das Signal ist vergleichbar mit dem aus dem Abschnitt zuvor erhaltenen Signal des Ionenpakets.

Mit aktiviertem hinterem Ionenspiegel:

Nun wurde der hintere Ionenspiegel aktiviert, indem auf dem



entsprechenden *Heinzinger* Netzteil eine Spannung eingestellt wurde. Zusätzlich wurde auch an die einzelne Elektrode im hinteren Elektrodenstapel ein Potential angelegt, sodass sich im TrapRemi nun zwei aktive Linsen befanden. Der Potentialverlauf ist in nebenstehender Abbildung zu sehen.

Abbildung 37: Skizze des Potentialverlaufs innerhalb des TrapRemi.

Da die Pickupelektrode sehr nah am Ionenspiegel liegt, ist das erwartete Signal eines reflektierten Ionenpulses ein zeitlich kurz verzögertes zweites Signal, identisch zu dem des einfliegenden Ionenpulses.

ein zeitlich kurz verzögertes zweites Signal, identisch zu dem des einfliegenden Ionenpulses.

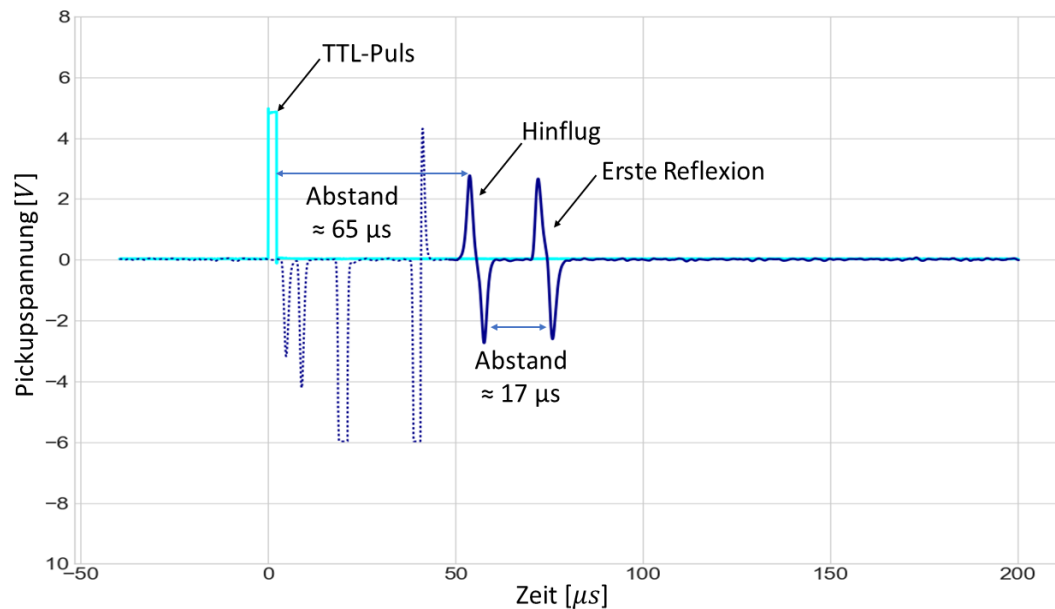


Abbildung 38: Zwei Spannungspulse sind zu erkennen. Türkis: Spannungsverlauf des Pulsgenerators der ionenoptischen Einheit, blau: gepunktet: Störansätze, durchgezogen: an der Pickupelektrode registriertes Signal. Einstellungen: $I_H = 1,8 A$, $U_{Mount} = 2506 V$, $U_{Acc} = 1661 V$, $U_{L_3} = 1540 V$, $U_{Right} = 34 V$, $U_{Left} = 64 \leftrightarrow 268 V$, $U_{Up} = 85 V$, $U_{Down} = 59 V$, $I_{S_v} = 0 A$, $I_{S_h} = 9,1 A$, erste Linse im TrapRemi: $U_{S_1} = 0 V$, zweite Linse im TrapRemi: $U_{S_2} = 1363 V$, dritte Linse im TrapRemi: $U_{S_3} = 1171 V$, Eingangsspannung des hinteren Ionenspiegels: $U_M = 2716 V$, $\mu_{iE} = 2,3 \mu s$, $d = 10 ms$, $gain = 1,0$, $coarse\ gain = 1000$, $t = 0,5 \mu s$.

In Abbildung 38 ist eine solche Reflexion zu erkennen. Die gepunktete Linie zeigt Störsignale, die von den HV-Schaltern stammen. Die ersten beiden Peaks sind das aus vorigem Abschnitt bekannte Signal des Ionenpakets. Man erkennt zusätzlich ein etwas schwächeres Signal bestehend aus zwei Peaks direkt dahinter. Der Zeitversatz beträgt knapp $17\mu s$. Dies deckt sich mit der Zeit, welche die Ionen für die Strecke vom Spiegel zur Pickupelektrode mit ihrer Geschwindigkeit bei einer kinetischen Energie von $2,5keV$ benötigen. Sobald der Ionenspiegel abgeschaltet wurde, verschwanden die beiden hinteren Peaks. Somit handelt es sich eindeutig um das Signal des reflektierten Ionenpakets. Die Funktionalität des Spiegels konnte damit gezeigt werden.

Mehrmalige Reflexion der Ionen

Nachdem das Ionenpaket ein Mal mit Hilfe des rückseitigen Spiegels reflektiert werden konnte, wurde nun auch der zur Ionenquelle hin vordere Spiegel verwendet. Die Elektrode des vorderen Ionenspiegels wurde an einen zweiten HV-Schalter angeschlossen, sodass das höchste Potential des Spiegels für kurze Zeit heruntergeklappt wurde, um den Ionenpuls in die Falle einzukoppeln. Zusätzlich wurde eine dritte Linse verwendet. Diese befindet sich vor dem vorderen Ionenspiegel. Somit wurden alle in Abbildung 34 aufgeführten Geräte verwendet. Das dadurch entstandene Potentialprofil im TrapRemi ist ebenfalls in der selben Abbildung gezeigt.

Die Schwierigkeit mehrmalige Reflexionen des Ionenpulses zu erhalten steigt mit der Anzahl an Einstellungsmöglichkeiten. Es zeigte sich, dass die Speicherung besonders empfindlich auf das Potential des vorderen Spiegels reagiert. Der Grund dafür ist, dass die Ionen beim Überwinden des Potentials sehr stark fokussiert werden. Der vordere Ionenspiegel fungiert demnach ebenfalls als Linse. Entsprechend lange dauerte es, bis eine stabile Konfiguration gefunden wurde. Nachdem die zweite Reflexion erkennbar war, wurde iterativ die Spannung an sämtlichen Geräten optimiert, bis mehr und mehr Oszillationen sichtbar wurden.

Das erwartete Signal der Mehrfachreflexionen ist asymmetrisch. Da die Pickupelektrode asymmetrisch, sehr nahe am hinteren Spiegel befestigt ist, erscheint die erste Reflexion zeitlich gesehen sehr kurz nachdem das Ionenpaket die Elektrode zum ersten Mal passiert ($\approx 17\mu s$). Zwischen erster und zweiter Reflexion vergeht etwas mehr Zeit, da das Ionenpaket einen weiteren Weg zurücklegen muss ($\approx 55\mu s$).

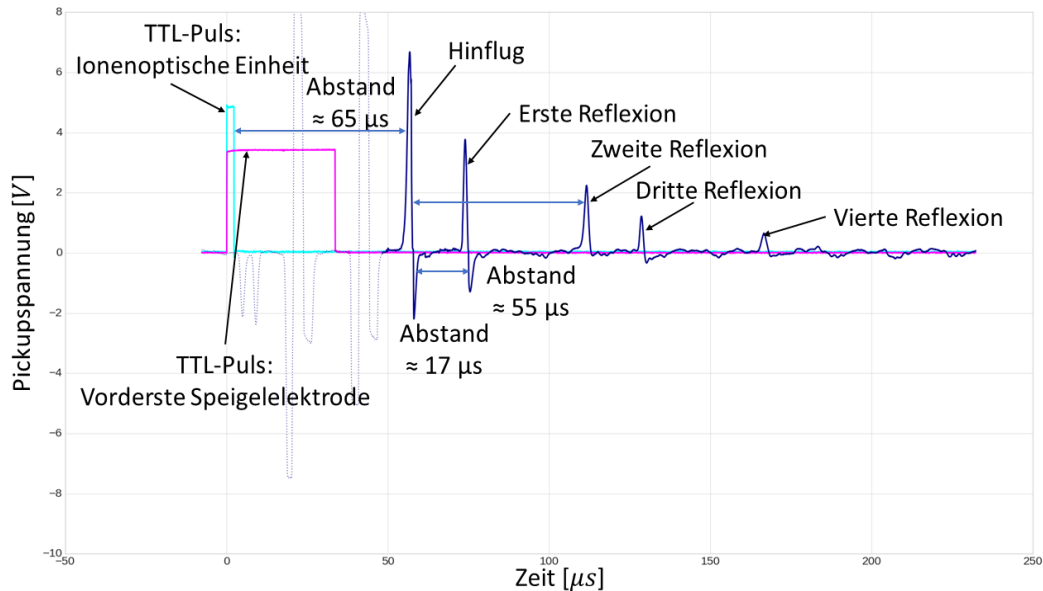


Abbildung 39: Signal an der Pickupelektrode mit beiden Spiegeln aktiv. Türkis: Spannungsverlauf des Pulsgenerators der Ionenoptischen Einheit, pink: Spannungsverlauf des Pulsgenerators der vordersten Speigelelektrode, blau: gepunktet: Störsignale der beiden HV-Schalter, durchgezogen: an der Pickupelektrode registriertes Signal. Einstellungen: $I_H = 1,8 A$, $U_{Mount} = 2506 V$, $U_{Acc} = 1661 V$, $U_{L_3} = 1540 V$, $U_{Right} = 34 V$, $U_{Left} = 64 \leftrightarrow 268 V$, $U_{Up} = 85 V$, $U_{Down} = 59 V$, $I_{S_v} = 0 A$, $I_{S_h} = 9,1 A$, Eingangsspannung des vorderen Ionenspiegels: $U_M^{front} = 2789 V$, Unteres Potential am HV-Schalter $U_B = 2045 V$, $U_{S_1} = 2045 V$, $U_{S_2} = 1363 V$, $U_{S_3} = 1171 V$, $U_M = 2716 V$, $\mu_{iE} = 2,3 \mu s$, $d = 10 ms$, TTL-Pulsdauer für den Ionenspiegel $\mu_S = 34 \mu s$, $d = 10 ms$, $gain = 1,0$, $coarse\ gain = 1000$, $t = 0,5 \mu s$.

In Abbildung 39 ist eine solche Messung gezeigt. Man erkennt vier Reflexionen. Auffällig ist, dass die Peaks sehr schnell kleiner werden. Die Verweildauer der Ionen innerhalb der Falle ist somit nur sehr kurz. Die Gründe dafür sind vielfältig, da der Ionenverlust von einigen Faktoren beeinflusst wird. Die falsche Fokussierung des Ionenstrahls stellt die wahrscheinlichste Ursache für den Ionenverlust dar. Es gibt jedoch weitere Möglichkeiten den Ionenstrahl zu fokussieren, die zu dem Zeitpunkt dieser Messungen noch nicht ausgeschöpft wurden. Aber auch das Ausheizen der Apparatur kann noch Besserung bringen, da dann das Vakuum verbessert wird und weniger Teilchen, an denen die Ionen stoßen können, vorhanden sind. Das Maximum an sichtbaren Reflexionen mit diesem Setup lag bei sechs. Um weitere Reflexionen zu erhalten, könnte zum Beispiel der Deflektor innerhalb der Ionenfalle in Betrieb genommen werden um eventuelle mechanische Fehlstellungen der Elektrodenstapel zu kompensieren.

sieren.

Ausblick:

Nachdem das praktische Arbeiten für die Erstellung dieser Bachelorarbeit beendet war, wurden noch einige Verbesserungen an der Falle getätigt. Schon im Aufbau vorhandene aber bisweilen ungenutzte Elektroden wurden zur weiteren Fokussierung des Ionenstrahls verwendet. Damit war es während eines kurzen Tests möglich mehrere hundert Reflexionen des Ionenpakets zu erzeugen, wie in Abbildung 40 abgebildet ist.

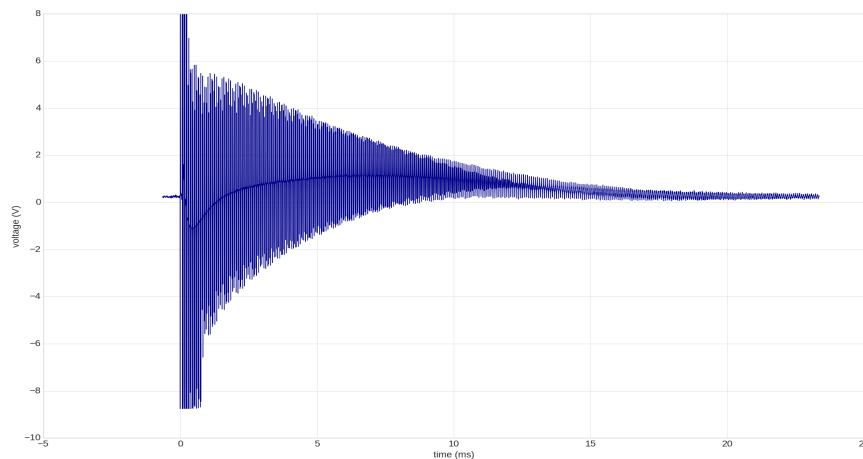


Abbildung 40: Mehrere hundert Oszillationen innerhalb des TrapRemi. Die Ionen konnten ca. 20ms lang gespeichert werden. Blau: an der Pickupelektrode registriertes Signal gegen die Zeit aufgetragen.

Damit zeigt sich, dass noch Potential für Verbesserungen besteht. Dem Ziel in Zukunft Ionen am TrapRemi zu untersuchen ist man näher gekommen, in dem der Nachweis gelungen ist, dass der Aufbau eine Speicherung von Ionen über einen längeren Zeitabschnitt ermöglicht.

6 Fazit der Bachelorarbeit

In dieser Bachelorarbeit wurde der Aufbau des Projekts TrapRemi entscheidend vorangetrieben und wichtige Eigenschaften wurden charakterisiert. Die Veränderungen wurden protokolliert und erörtert. Es wurde auf wichtige Abschnitte des Aufbaus wie dem Bau und dem Testen der Ionenquelle, sowie der ersten Inbetriebnahme der Falle näher eingegangen. Lösungen für aufgetretene Probleme wurden gefunden und Verbesserungen an dem Projekt nach und nach eingeführt.

Wichtige Meilensteine konnten erreicht werden, wie das Erreichen eines stabilen Ultrahochvakuums, eines messbaren Ionenstroms am Faraday-Becher (Abschnitt 3.4) und an der Abschlusselektrode (Abschnitt 4.1). Schlussendlich konnten bereits Ionen in der Falle gespeichert werden (Abschnitt 5.4). Zwar waren nur eine Hand voll Oszillationen zu erkennen, jedoch wurde demonstriert, dass der Grundgedanke des Aufbaus funktioniert. Darüber hinaus sind nicht alle Mechanismen innerhalb der Falle zur Regulierung des Strahls verwendet worden. Diese sind die Ablenkung des Ionenstrahls mittels falleninternen Deflektors oder die Erzeugung weiterer Linsen. Somit besteht noch viel Potential für Verbesserungen in der Zukunft. Somit konnten bereits kurz nach Abschluss der Datennahme für diese Bachelorarbeit bereits signifikante Verbesserungen umgesetzt werden. Mit leicht umzusetzender Optimierung konnte die Anzahl an Oszillationen innerhalb der Falle um den Faktor 100 erhöht werden.

Die Fortschritte am Projekt TrapRemi liegen innerhalb des vorgesehenen Zeitplans (Stand November 2017). Weitere Schritte zur Optimierung der Verweildauer von Ionen innerhalb der Falle müssen gemacht werden, damit anschließend das Remi des TrapRemi aufgebaut und die ersten Messungen getätigt werden können. Der Aufbau einer neuen Ionenquelle, welche die zur Untersuchung gewünschten Ionen liefert kann, muss installiert werden. Ebenfalls ist geplant einen gepulsten Femtosekundenlaser in das TrapRemi einzukoppeln. Dieser wird im Laufe des Projekts im neuen Quantendynamiklabor des MPIK aufgebaut und in das Projekt integriert. Aufgrund der Modularität des Aufbaus könnten in Zukunft noch andere Sekundäraufbauten, wie zum Beispiel eine Einkopplung von Mikrowellen oder eines Elektronenstrahls implementiert werden. Der Aufbau funktioniert und durch sein neuartiges Design können interessante und neue Experimente in Zukunft realisiert werden.

7 Quellenverzeichnis

Literatur

- [1] D. Zajfman, O. Heber, L. Vejby-Christensen, I. Ben-Itzhak, M. Rappaport, R. Fishman, M. Dahan Phys. Rev. A, 55 (1997), p. R1577
- [2] Major, F. G., et al. (2005). Charged particle traps : physics and techniques of charged particle field confinement. Berlin ; New York, Springer
- [3] Ludwig Hoibl, 2017. Design und Simulation der Ionenstrahlführung im Projekt TrapRemi, Heidelberg
- [4] Smorra, C., et al. (2017). A parts-per-billion measurement of the antiproton magnetic moment. Nature 550(7676): 371-374.
- [5] Otto, T., et al. (1994). PENNING-TRAP MASS MEASUREMENTS OF NEUTRON-DEFICIENT RB AND SR ISOTOPES. Nuclear Physics A 567(2): 281-302.
- [6] Ballance, C. J., et al. (2016). Fidelity Quantum Logic Gates Using Trapped-Ion Hyperfine Qubits. Physical Review Letters 117(6).
- [7] Für eine genauere Einführung zur Ionenoptik empfehle ich: F. Hinterberger, Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik: XIV, 417 S.
- [8] Fechner, L. High-Resolution Experiments on Strong-Field Ionization of Atoms and Molecules. Springer Theses, Recognizing Outstanding Ph D Research: XIV, 151 S.
- [9] I. O.W. Richardson. "The Emission of Electricity from Hot Bodies", Longman's, Green and Company, London, 1916
- [10] Einen schönen Einblick in das Thema bietet die Webseite des Projekts: <https://www.mpi-hd.mpg.de/blaum/storage-rings/csr/index.de.html> (URL Stand: November 2017)
- [11] Herstellerseite der Ionenquelle: http://www.cathode.com/i_alkali.htm (URL Stand: November 2017)

- [12] Beispielhafte Schulaufgabe und die entsprechende Lösung dafür:
http://kgs-skp-physik.iserv-tarmstedt.de/Homepage_PH-QP/Hausaufgaben/081_A4.jpg;
http://kgs-skp-physik.iserv-tarmstedt.de/Homepage_PH-QP/Hausaufgaben/082_L3-L4.pdf (URL Stand: November 2017)
- [13] Zhang, H. (1999). Ion sources. New York, Springer.

8 Danksagung

Ich möchte mich herzlich bei Allen bedanken, die mir die Erstellung dieser Bachelorarbeit ermöglichten:

Thomas Pfeifer, für die wirklich freundliche und unkomplizierte Aufnahme am MPIK. Die Entscheidung mich bei dir für eine Bachelorarbeit zu bewerben war die Beste, die ich hätte machen können.

Robert Moshhammer, für die Möglichkeit in deiner Arbeitsgruppe diese Arbeit anzufertigen, sowie die vielen hilfreichen Ratschläge und die Unterstützung, falls Probleme auftauchten.

Die Elektronikabteilung des MPIK, allen voran Thomas Wagner und Thomas Busch, die ich manchmal täglich um Rat gefragt habe. Es wurde mir immer mit Geduld und fachlicher Kompetenz Hilfe geboten, egal mit welchem Problem ich gekommen bin.

Frans Schotsch, für die wohl beste Zeit, die ich während des Studiums hatte. Die lockere Atmosphäre hat mich gerne ans MPIK kommen lassen. Mir wurde die Freiheit gegeben auch alleine am Projekt arbeiten zu dürfen, ohne dass ich jemals das Gefühl hatte alleine gelassen zu werden. Da wir praktisch nur zu zweit am Projekt gearbeitet haben, habe ich bei allen Aspekten des Aufbaus mithelfen dürfen und dabei einen umfassenden Einblick in das Aufbauen eines neuen Experiments erhalten. Bei Fragen hattest du immer einem guten Tipp parat und hast dir immer für mich Zeit genommen. Einzig der Musikgeschmack ließ manchmal zu wünschen übrig, daran kannst du ja noch arbeiten.

Die Helferlein, die mir beim Korrekturlesen dieser Arbeit unter die Arme gegriffen haben.

Und, last but not least:

Meine Eltern, die mich auf dem beschwerlichen Pfad zum Bachelorabschluss immer unterstützt haben, ob nun finanziell oder moralisch. Ohne den Rückhalt, den ich hatte, wäre das Alles nicht möglich geworden.

Erklärung

Ich versichere, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Heidelberg, den