



universität
wien

DIPLOMARBEIT / DIPLOMA THESIS

Titel der Diplomarbeit / Title of the Diploma Thesis

„Simulation und Optimierung
des Laser-Ionen-Aufbaus an VERA“

verfasst von / submitted by

Paul Wasserburger

angestrebter akademischer Grad / in partial fulfilment of the requirements for the degree of

Magister der Naturwissenschaften (Mag. rer. nat.)

Wien, 2018 / Vienna, 2018

Studienkennzahl lt. Studienblatt /
degree programme code as it appears on
the student record sheet:

A 190 406 412

Studienrichtung lt. Studienblatt /
degree programme as it appears on
the student record sheet:

Lehramtsstudium UF Mathematik UF Physik

Betreut von / Supervisor:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Robin Golser

Mitbetreut von / Co-Supervisor:

Ass.-Prof. Mag. Dr. Peter Steier

Zusammenfassung

Am Vienna Environmental Research Accelerator (VERA), einem Beschleunigermassenspektrometer (AMS) der Universität Wien, wurde mit dem neuen Ionen Laser InterAction Massenspektrometrie (ILIAMS) Aufbau ein neues System zur Isobarenunterdrücken entwickelt. Dabei werden die störenden Ionen durch Wechselwirkung mit Photonen geeigneter Energie neutralisiert. Zur Optimierung sind ionenoptische Berechnungen und Simulationen auf der Basis von Phasenraummessungen nötig um das Verhalten eines Teilchenstrahl ermitteln zu können.

Um diese Phasenraummessungen entlang der ILIAMS-Beamline vornehmen zu können, war es nötig neue möglichst flexibel einsetzbare Diagnoseinstrumente zu entwickeln und einzubauen. Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit wurden Schlitze mit magnetischer Führung ins Vakuumsystem entwickelt, die mit sehr geringem Aufwand in das jeweilige Strahlrohrstück eingefügt werden können.

Für die durchgeführten Phasenraummessungen wurden auch die entsprechenden Programme entwickelt, mit deren Hilfe es möglich ist halbautomatisch zu messen und die Messungen auszuwerten. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich der Phasenraum bei einem Probenwechsel ändert.

Mithilfe des Ionenoptiksimulationsprogramms SIMION wurde der Strahlengang zwischen der Quelle und dem ILIAMS-Kühler berechnet. Dabei konnte auch die Massenseparation durch den Analyse magneten simuliert werden. Dies ermöglichte die Simulation von $^{180}\text{HfF}_5^-$ mit je zwei interferierenden Nachbarmassen und die Berechnung der Transmission für die einzelnen Massen, die für zwei Nachbarmassen bei rund 1% bis 1.5% liegt. Außerdem haben die ionenoptischen Berechnungen ergeben, dass die Strahltaillen vor dem ILIAMS-Kühler noch nicht an den idealen Stellen liegen, wodurch die Transmission durch selbigen gesenkt wird.

Weiters wurde eine Optimierung der Massenseparation des Ablenk magneten im ILIAMS-Aufbau durch eine neu installierte Blende vorgenommen, wodurch es zum Beispiel möglich ist, dass bei der Messung von $^{180}\text{HfF}_5^-$ keine Nachbarmassen in den Kühler mit eingeschossen werden.

Abstract

At the Vienna Environmental Research Accelerator (VERA), which is a facility for Accelerator Mass Spectrometry (AMS) at the University of Vienna, the Laser InterAction Mass Spectrometry (ILIAMS), a new setup for the suppression of isobars, was developed. This setup is based on the interaction of disturbing ions with photons of the suitable energy to neutralize this ions. The charged particle beam could be optimized with ion-optical calculations and simulations of the beamline on the basis of phase-space measurements.

For phase-space measurements at the ILIAMS-beamline new diagnostic instruments would be needed. These instruments should allow a flexible positioning in the beamline, where needed. For this diploma thesis new slits were developed, which can be used like that. They also use a magnetic lead through into the vacuum system. They also could be integrated into the beamline with little work.

With the help of the new slits it was possible to accomplish the required phase-space measurements. The acquired software was programmed, especially one that makes it possible to measure the phase-space half-automatically and one that could be used to interpret the measurement. During the measurements it could be e.g. noticed, that the phase-space would change as a result of the changing of the samples in the source.

With the ion-optics simulation program SIMION the ILIAMS-beamline between source and ILIAMS-cooler was simulated including the mass separation through the analysing magnet. This made it possible to simulate the transmission through the cooler for $^{180}\text{HfF}_5^-$ and two neighboring interfering masses of this ion. The transmission of the second neighbor mass was calculated to be at least 1%. Besides from that, the ion-optical calculations shows that the beamwaists between the magnet and the ILIAMS-cooler doesn't yet lie at the ideal positions, whereby the transmission through the cooler was reduced.

The mass separation of the magnet BMI1 in the ILIAMS-beamline was optimized with a newly designed slit. This new slit made it for example possible to avoid the injection of neighbor masses of $^{180}\text{HfF}_5^-$ into the cooler.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	iii
1. Einleitung	1
1.1. AMS - Accelerator Mass Spectrometry	1
1.2. VERA - Vienna Environmental Research Accelerator	2
1.3. ILIAMS - Ion Laser InterAction Mass Spectrometry	3
2. Physikalische Grundlagen	7
2.1. Ionenoptische Systeme und Berechnungen	7
2.2. Phasenraum	11
3. Untersuchung der Beamline und Aufbau der Analyseinstrumente	15
3.1. Neuvermessung der Beamline	15
3.2. Bestehende Diagnoseelemente	17
3.3. Neue Diagnoseelemente	18
3.4. Blende (Slit-I1-2)	22
3.5. Verwendung zur Phasenraummessung	25
4. Messung	27
4.1. Messverfahren	27
4.2. Phasenraummessungen	29
4.3. Berechnung des Strahlprofils	33
4.4. Konstanz des Phasenraums beim Targetwechsel	37
5. Simulationen	39
5.1. Simulationsgeometrie	39
5.2. Phasenraumeinbindung	41
5.3. Ergebnisse	41
5.4. Vergleich mit Matrizenrechnung	49
6. Optimierungen	55
6.1. Massenauflösung an BMI1 durch Slit I1-2	55
6.2. Ausrichtung der Quelle S2	57

Inhaltsverzeichnis

7. Diskussion der Simulations- und Messergebnisse	59
7.1. Grundsätzliche Ergebnisse der Phasenraummessungen	59
7.2. Vor dem Ablenkmagneten BMI1	59
7.3. Nach dem Ablenkmagneten BMI1	60
7.4. Injektion in den Kühler	62
8. Conclusio und Ausblick	65
A. Anhang A	67
A.1. Skript zur Phasenraummessung	67
A.2. Python Programm zur Ionenerzeugung für SIMION	67
A.3. Python-Programm zur Ablenkung von Ionen an einem Magneten	71
A.4. Programm zur Phasenraumauswertung	74
Literaturverzeichnis	81

1. Einleitung

Diese Arbeit beschäftigt sich mit Simulation und Optimierung der Ionenoptik des Laser-Ionen-Aufbaus am Vienna Environmental Research Accelerator (VERA). Dabei handelt es sich um eine Beschleunigeranlage der Universität Wien, die zur Accelerator Mass Spectrometry (AMS) genutzt wird.

1.1. AMS - Accelerator Mass Spectrometry

Es gibt zwei verschiedene Methoden um das Verhältnis eines Spurenisotops zu einem anderen Isotop einer Probe zu bestimmen: Einerseits die Massenspektrometrie (MS), d.h. Massanalyse durch die Ablenkung des Isotopenstrahls in magnetischen und elektrischen Feldern, und andererseits die Messung von Zerfällen. Während erstere Methode für jegliche Isotope verwendet werden kann, eignet sich die zweite nur für kurzlebige Radioisotope [1].

Accelerator Mass Spectrometry, in der Kurzform auch AMS genannt, kombiniert die Effizienz der Massenspektrometrie mit der Teilchenbeschleunigung. Durch diese Konfiguration wird AMS zu einer äußerst sensiblen Methode um die Häufigkeit von langlebigen Isotopen bis zu einem Anteil von bis zu 10^{-16} messen zu können. Durch diese Kombination werden Messverfahren ermöglicht, die weitere Vorteile gegenüber der Zerfallsmessung haben. Nicht nur die wesentlich kürzeren Messdauern, sondern auch die kleineren Proben, welche für die Messung benötigt werden, sprechen dafür diese Methode anzuwenden [1]. So sind zum Beispiel ^{14}C -Messungen mit Proben im Mikrogrammbereich mit AMS möglich [2].

AMS kann außerdem sehr vielseitig genutzt werden, da mit dieser Messmethode das gesamte Elementspektrum, für das langlebige Isotope existieren, abgedeckt werden kann. Die Anwendungen beginnen mit der Datierung von archäologischen Funden, dafür wird die bekannte ^{14}C -Methode verwendet, und geht bis zu Reaktionsstudien für die nukleare Astrophysik. Es handelt sich um eine Analysemethode, bei der die Welt „Atom für Atom“ analysiert werden kann [3, 4].

Die grundlegende Funktionsweise einer AMS-Anlage und der Aufbau selbiger kann in die folgenden Abschnitte gegliedert werden [5, 6]:

1. In der Ionenquelle werden aus der Probe, welche für die Verwendung sorgfältig aufbereitet werden muss, negativ geladene Ionen erzeugt [7]. Dazu wird ein Cs^+ -Strahl auf die Probe fokussiert. Die negativ geladenen Ionen werden durch eine elektrostatische Extraktionsvorrichtung in Richtung eines ersten Analysemagneten beschleunigt. Durch die

Bildung der negativen Ionen werden bereits einige isobare Interferenzen ausgeschlossen. So wird zum Beispiel im Fall von ^{14}C eine Interferenz mit ^{14}N ausgeschlossen, da dieses Isotop keine stabilen negativen Ionen bildet [8].

2. Auf der Niederenergieseite, also noch vor dem Tandem-Beschleuniger, wird eine erste Massenanalyse der Ionen vorgenommen, wobei dabei bereits eine Differenzierung zwischen verschiedenen Isotopen realisiert werden kann. An dieser Stelle können noch Molekülisobare auftreten. Das sind Moleküle, welche die selbe Masse und Ladung aufweisen wie das gesuchte Ion. Deshalb sind an dieser Stelle noch keine Messungen der Isotopenverhältnisse möglich.

Es wurden Systeme entwickelt, welche sowohl die gesuchten Spurenisotope, als auch weitere Isotope durchlassen können, entweder gleichzeitig, wodurch das System komplexer wird, oder durch schnelle Ionenstrahlumlenkung.

3. Im Tandem-Beschleuniger werden die negativen Ionen zum Zentrum, an welchem je nach System eine Spannung von 0,2 MV bis 25 MV anliegt, beschleunigt. Hierbei erhöht sich die Energie der Ionen. Im Zentrum werden die Ionen umgeladen, dies wird auch „stripping“ genannt. Dabei werden den negativen Ionen durch eine dünne Folie oder ein Gas Elektronen abgestreift. Durch diese Umladung herrscht zwischen den ein Atomen eines Moleküls eine abstoßende Coulombkraft, sobald das Bindungselektron entfernt wird. Dadurch können die Moleküle aufgespalten werden. Die mehrfach positiv geladenen Ionen werden wiederum zur Erdspannung („ground-potential“) beschleunigt.
4. Durch magnetische und elektrische Felder werden die zu untersuchenden Ionen ausgewählt, andere Ionen abgetrennt und die ausgewählten an die jeweiligen Detektoren weitergeleitet. Dabei kann nach Energie E , Ladung q , Geschwindigkeit v und Impuls p selektiert werden.
5. In den Detektoren ist es möglich jedem aufgenommenen Signal ein einzelnes auftretendes Ion zuzuordnen. Es sind dafür Silizium- und Ionisationskammern gebräuchlich. Aus der Zählung kann ein Isotopenverhältnis berechnet werden. Außerdem werden Referenzmaterialien und Blindproben gemessen um systematische Fehler vermeiden zu können.

1.2. VERA - Vienna Environmental Research Accelerator

Die AMS-Anlage VERA wurde am Institut für Radiumforschung und Kernphysik, heute Gruppe Isotopenforschung und Kernphysik, an der Fakultät für Physik der Universität Wien im Jahr 1996 im ersten Aufbau fertiggestellt. Das Herzstück der Anlage ist ein 3-MV-Pellatron-Tandem-Beschleuniger der Firma National Electrostatics Corporation in Wisconsin (USA). VERA konnte bereits 1996 komplett mittels Computern gesteuert werden [9, 10].

1.3. ILIAMS - Ion Laser InterAction Mass Spectrometry

Seit der Inbetriebnahme haben mehrere Umbauarbeiten stattgefunden, wobei unter anderem eine zweite Ionenquelle aufgebaut wurde [11]. Beide Quellen sind MC-SNICS („Multi Cathode Source of Negative Ions by Caesium Sputtering“) und sind mit einem Probenrad für 40 Sputtertargets ausgestattet. An die Quelle S1 beziehungsweise bei der Quelle S2 an die ILIAMS-Beamline schließt die Niederenergiemassenspektrometrie an, welche aus einer elektrostatischen Analyse und einem darauf folgenden Analyse magneten besteht. Durch verschiedene Einstellungen des magnetischen Quadrupol vor dem 90° Ablenkmagneten im Injektor-Aufbau können Ionen mit einer Masse von 12 amu ($^{12}\text{C}^-$) bis zu 277 amu ($^{182}\text{HfF}_5^-$) gemessen werden [3]. Darauf folgt der 3-MV-Pelletron-Tandem-Beschleuniger, wobei die Endenergie abhängig vom Ladungszustand bis zu vielen MeV reichen kann. Daran schließen verschiedene elektrostatische und magnetische Analyseinstrumente, sowie Detektoren (zum Beispiel Time-of-flight-Detektoren oder Siliziumdetektoren) an, die je nach gemessenem Isotop verwendet werden können. Eine schematische Darstellung des derzeitigen Aufbaus von VERA ist in Abbildung 1.1 zu sehen.

Für VERA liegen die erreichbaren Nachweisgrenze bei bis zu 10^{-16} . Einige Isotope mit der jeweiligen möglichen Nachweisgrenze an VERA sind in Tabelle 1.1 gemeinsam mit einem Beispiel zur jeweiligen Nutzung ersichtlich.

Isotop	Nachweisgrenze		Beispiel zur Nutzung [4]
^{26}Al	$6 \cdot 10^{-16}$	[3]	Datierung von geologischen Vorgängen
^{14}C	$3 \cdot 10^{-16}$	[3]	Datierung von archäologischen Funden (Präzision besser als 40 Jahre)
^{36}Cl	$5 \pm 5 \cdot 10^{-16}$	[12]	Datierung von geologischen Vorgängen
^{55}Fe	10^{-15}	[13]	Reaktionsuntersuchung für die Astrophysik
^{68}Ge	10^{-16}	[13]	Reaktionsuntersuchung für die Astrophysik
^{202}Pb	$2 \cdot 10^{-14}$	[13]	Reaktionsuntersuchung für die Astrophysik
^{236}U	$5 \cdot 10^{-12}$	[14]	Untersuchung der Meeresströmungen.

Tabelle 1.1.: Erreichbare Detektionsgenauigkeit von verschiedenen Isotopen an VERA mit einem jeweiligen Beispiel zur Nutzung.

1.3. ILIAMS - Ion Laser InterAction Mass Spectrometry

Isobare Interferenzen treten auf, falls zwei Isotope unterschiedlicher Elemente die selbe Masse aufweisen. In manchen Fällen stellt dieses Phänomen ein Problem bei der Messung dar, da die Messmethode zu empfindlich auf die falschen Isotope anschlägt. So können zum Beispiel Interferenzen bei der ^{182}Hf -Messung durch ^{182}W auftreten [7].

Zur Unterdrückung der isobaren Interferenzen sind zwei Verfahren in Entwicklung, wobei die eine Methode auf einem reaktiven Gas und die andere auf Laser basiert. Das Ziel ist die elementabhängige Unterdrückung der vorliegenden Interferenzen, wobei beide Systeme in die Niederenergieseite der AMS-Anlage integriert werden.

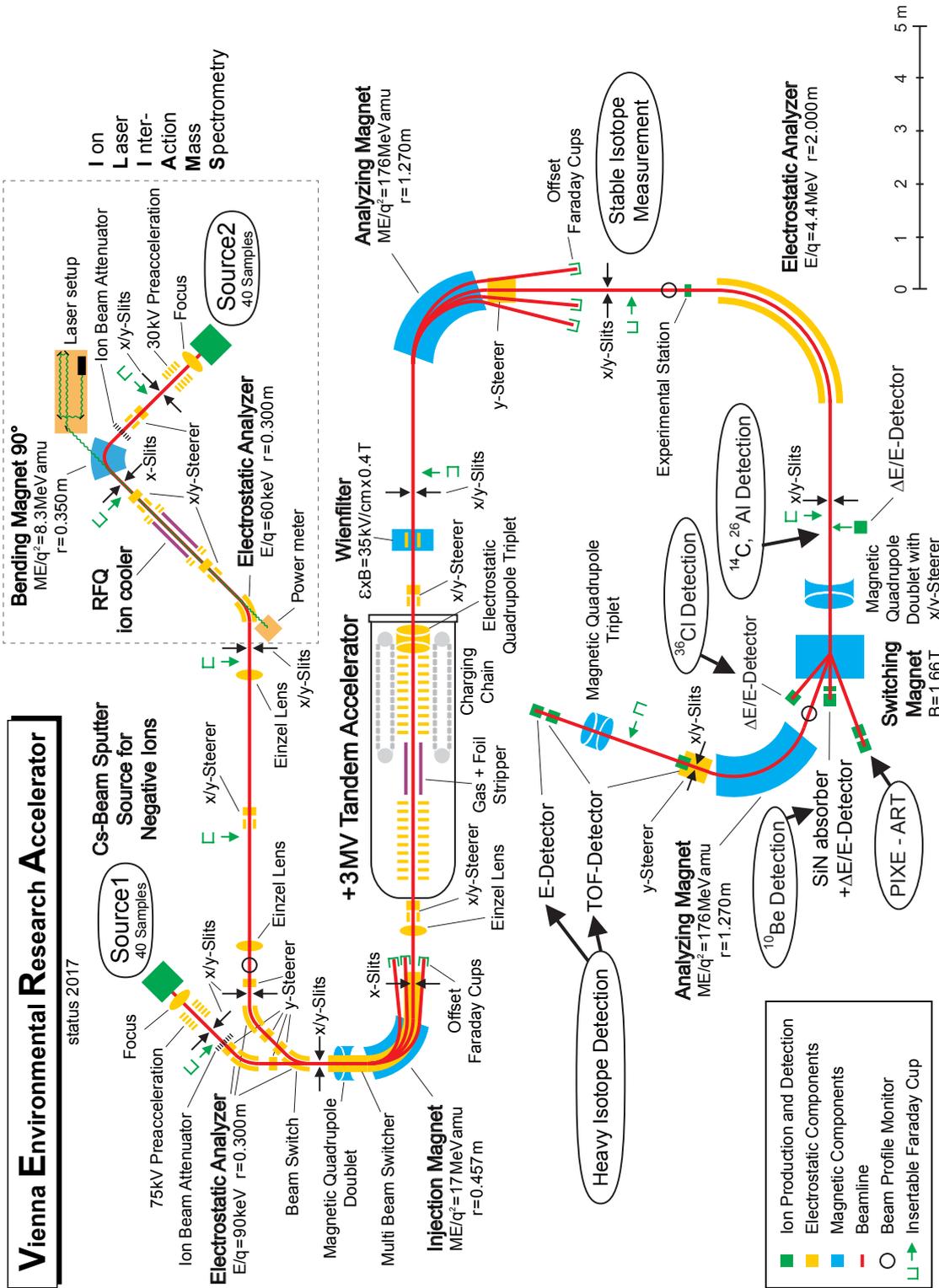


Abbildung 1.1.: Schematische Skizze des Aufbaus von VERA

1.3. ILIAMS - Ion Laser InterAction Mass Spectrometry

1. Durch Reaktionen zwischen Anionen und einem Reaktionsgas, dies kann zum Beispiel O_2 , N_2 oder NO_2 sein, können atomare und molekulare isobare Interferenzen unterdrückt werden. Dazu wird das Gas in eine lineare Paul-Falle geleitet, wobei in diesem Abschnitt ein Elektronenaustausch zwischen Anionen und Gas stattfinden kann [15]. Da das Elektronenaustauschverfahren auf den chemischen Eigenschaften des Gases und der Anionen basiert, handelt es sich hierbei um eine elementempfindliche Methode. Für eine effiziente Trennung der Isobaren müssen diese eine Energie im eV-Bereich innehaben [16].
2. Unter „Laser photodetachment“ versteht man ein Verfahren zur optischen Filterung von negativ geladenen atomaren oder molekularen Ionen. Dabei wird das überzählige schwach gebundene Elektron durch Interaktion mit einem Laserstrahl vom neutralen Atom beziehungsweise Molekül getrennt [17, 18, 19]. Dazu muss die Photonenenergie größer als die Elektronenaffinität des Ions sein [20]. Es wird für ein ungewolltes negatives Ion X^- die folgende Reaktion forciert, wobei für h das plancksche Wirkungsquantum und ν die Laserfrequenz steht [21]:



Durch die passende Wahl der Wellenlänge des Lasers kann dieses Verfahren genutzt werden, um ungewollte Isobare zu neutralisieren [18]. Dazu muss allerdings die Voraussetzung erfüllt sein, dass die Ablösearbeit für Elektronen des untersuchten Isotops höher ist als jene der ungewollten Isobaren [17].

Um die Effizienz des Verfahrens zu steigern wird auch diese Methode in einer linearen Paul-Falle, die mit einem Buffergas gefüllt ist, durchgeführt. Durch die Zusammenstöße zwischen den Ionen und dem Buffergas verlieren die Ionen Energie und werden „gekühlt“ [22, 23]. Um möglichst viele der interferierenden Ionen zu filtern muss eine höhere Interaktionszeit mit dem Laser erreicht werden. Dazu wird die Bewegungsenergie der Ionen durch das Buffergas gedämpft. Durch die langsameren Ionen wird eine Zeit in der Größenordnung von Millisekunden erlangt, in welcher sie dem Laserstrahl ausgesetzt sind [24]. Durch den RFQ-Quadrupol wird außerdem gewährleistet, dass der Ionenstrahldurchmesser rund um die longitudinale Achse verringert wird, wodurch der Überlapp zwischen Laserstrahl und Ionenstrahl weiter erhöht werden kann [20].

An der Gruppe Isotopenforschung und Kernphysik an der Fakultät für Physik der Universität Wien wurde mit ILIAS ein System entwickelt, in welchem das Prinzip des „Laser photodetachment“ genutzt wird, um die Isobarenunterdrückung zu realisieren. Dieses System wurde ab 2010 entwickelt, an VERA gekoppelt und wird unter dem Namen ILIAMS weiterentwickelt [25].

Der ILIAMS-Aufbau wird durch die Quelle S2 mit negativen Ionen, sowohl atomar als auch molekular, mit Energien bis zu 70keV versorgt. Bereits vor dem Kühler werden die Ionen über

einen doppelfokussierenden Ablenkmagneten der Firma DANFYSIK mit einem Ablenkwinkel von $\alpha = 90^\circ$ einer Massenseparation unterzogen. Für den Eintritt der Ionen in die Quadrupolstruktur des Kühlers wird ein Linsensystem verwendet. Die komplette Kühlerstruktur ist auf einer Hochspannungsplattform aufgebaut und es kann eine Spannung zwischen 0kV und -30kV angelegt werden, wobei diese Spannung zur elektrostatischen Abbremsung auf einige 10 eV der Ionen benötigt wird, bevor sie mit dem Buffergas kollidieren. Dies ist nötig, da die Schwerpunktsenergie bei Zusammenstößen die Elektronenaffinität der gemessenen Ionen nicht übersteigen darf, da es sonst zu ungewollten Neutralisationen kommen würde.

Der innere Aufbau des Kühlers besteht aus vier zylindrischen Elektroden mit einem Radius $r = 5$ mm und einer Länge von $l = 95$ cm in einem Quadrupolaufbau. Der Abstand zwischen den Elektroden ist von einem eingeschriebenem Kreis mit einem Radius von $r_0 = 4,37$ mm beschrieben. An diesen wird eine Wechselspannung mit Radiofrequenz angelegt, was bewirkt, dass die Ionen näher an die ideale Strahlenachse gedrängt werden. Die Bewegung der Ionen innerhalb des Kühlers kann durch *Methieu Gleichungen* beschrieben werden, eine ausführliche Beschreibung der Ionenbewegung in einer Paul-Falle findet sich in [26]. Das Buffergas welches sich im Inneren des Kühlers befindet wird durch Turbomolekularpumpen abgesaugt, sodass das Hochvakuum außerhalb des Kühlers möglichst wenig beeinträchtigt wird. Führungselektroden, an denen Gleichspannung anliegt und die zwischen den Quadrupolelektroden liegen, erzeugen ein geringes longitudinales Feld, welches die Ionen durch den Kühler ziehen. Nach diesem Aufbau werden die Ionen auf 30keV beschleunigt und einer elektrostatischen Analyse unterzogen [25, 20].

Eine der Anwendungsmöglichkeiten besteht in der Analyse von ^{182}Hf , welches besonders von astrophysikalischem Interesse wäre, da es ein Kandidat zur Bestimmung des Zeitpunkts einer erdnahen Supernova ist. Die Unterdrückung des Isobars $^{182}\text{W}/^{182}\text{Hf}$ konnte bereits durch die Verwendung von HfF_5^- in der Ionenquelle gesteigert werden. Trotzdem muss das Detektionslimit für die obig genannte Anwendung noch weiter gesenkt werden, was durch die Photodetachment-Methode ILIAMS gelingen könnte [27, 28, 29].

In dieser Arbeit wird versucht durch Messungen, Simulationen und ionenoptischen Berechnungen den Strahlengang innerhalb der ILIAMS-Beamline zu verstehen und mögliche Optimierungen zu erreichen.

2. Physikalische Grundlagen

Dieses Kapitel umfasst die wichtigsten physikalischen Grundlagen, welche für diese Arbeit benötigt werden.

2.1. Ionenoptische Systeme und Berechnungen

Ionenoptische Instrumente können verwendet werden um ein Ion abzulenken oder beschleunigen. Die Ablenkungen oder Beschleunigungen resultieren aus der Wechselwirkung des jeweiligen Teilchens mit elektrischen und magnetischen Feldern. Die Lorentzkraft \vec{F} drückt in einer Gleichung den Zusammenhang zwischen der Kraft, die auf ein Teilchen mit der Ladung q wirkt, welches sich mit der Geschwindigkeit \vec{v} bewegt, und der momentan erfahrenen elektrischen Feldstärke \vec{E} und magnetischen Flussdichte \vec{B} aus.

$$\vec{F}_L = q \cdot (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}) \quad (2.1)$$

In diesem Abschnitt werden die ionenoptischen Systeme, die für diese Arbeit relevant sind, dargelegt und die physikalischen Grundlagen selbiger umrissen. Eine ausführliche Abhandlung über Ionenoptik und deren mathematische Darstellung kann in [30] und [31] gefunden werden.

2.1.1. Matrixdarstellung

Für die folgenden Betrachtungen wird ein Koordinatensystem angenommen, welches sich entlang der Bahn eines zentralen Teilchens, auch Sollbahn genannt, mit dem Teilchen mitbewegt, sodass die Ortsabweichung von der Sollbahn immer auf der x/y-Ebene bestimmt wird. Die Position auf der z-Achse wird durch den zurückgelegten Weg entlang der Sollbahn bestimmt. Das Verhalten eines Teilchenstrahls in ionenoptischen Systemen kann durch lineare Gleichungen beschrieben werden. Dabei wird jedoch von idealen Systemen, zum Beispiel von vollständig homogenen Magnetfeldern, ausgegangen. So kann die Transformation eines Teilchens durch die beiden Gleichungen 2.2 und 2.3 mit der Ortsabweichung x und der Richtungsdivergenz $x' = \frac{dx}{dz}$, vor und nach dem ionenoptischen System, berechnet werden.

$$x_{nach} = a_{11} \cdot x_{vor} + a_{12} \cdot x'_{vor} \quad (2.2)$$

$$x'_{nach} = a_{21} \cdot x_{vor} + a_{22} \cdot x'_{vor} \quad (2.3)$$

Durch die Matrixdarstellung lassen sich diese Gleichungen in einen Ausdruck zusammenfassen. Man erhält dadurch 2.4. Werden mehrere dieser einfachen Transformationen in Folge verwendet, so kann der Gesamteffekt mittels Matrixmultiplikation berechnet werden, wodurch die Berechnung der Transformation durch mehrere ionenoptische Instrumente stark vereinfacht wird.

$$\begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{vor} \\ x'_{vor} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{nach} \\ x'_{nach} \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

2.1.2. Driftstrecke

Wirkt kein elektromagnetisches Feld auf ein Teilchen, so geht man für ionenoptische Berechnungen von einer geradlinigen Trajektorie aus. Dazu kann für die ionenoptische Berechnung einer Driftstrecke der Länge l die Gleichung 2.5 verwendet werden um die Ortsabweichung zu ermitteln. Die Steigung x' ändert sich entlang einer Driftstrecke nicht, was auch aus der Matrixdarstellung ersichtlich ist. Dies gilt nicht nur für die x -Achse, sondern auch äquivalent für die y -Achse.

$$D \cdot \begin{pmatrix} x_{vor} \\ x'_{nach} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & l \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{vor} \\ x'_{nach} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{nach} \\ x'_{nach} \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

2.1.3. Ablenk- und Analysemagnet

Verläuft ein geladener Teilchen- oder Ionenstrahl zwischen den Polschuhen eines Elektromagneten, so werden die Ionen aufgrund der Induktion einer Richtungsselektion welche vom Verhältnis von Impuls und Ladung abhängig ist, also $\frac{p}{q}$, unterzogen. Dabei wird der Strahl unter Nutzung des Magnetfelds, welches einen möglichst hohen Dipolfeldanteil aufweist, um den Ablenkwinkel α gekrümmt.

Ionenoptische Berechnung

Wird die Teilchenbahn in einem Ablenkmagnet mit dem Radius der Sollbahn r_0 und dem Ablenkwinkel α berechnet, so können die Zusammenhänge 2.6 und 2.7 für die Orts- und

2.1. Ionenoptische Systeme und Berechnungen

Steigungstransformation entlang der x- beziehungsweise y-Achse genutzt werden.

$$AM_x \cdot \begin{pmatrix} x_{vor} \\ x'_{vor} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \alpha & r_0 \sin \alpha \\ -\frac{\sin \alpha}{r_0} & \cos \alpha \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{vor} \\ x'_{vor} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{nach} \\ x'_{nach} \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

$$AM_y \cdot \begin{pmatrix} y_{vor} \\ y'_{vor} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & \alpha r_0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_{vor} \\ y'_{vor} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{nach} \\ y'_{nach} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Für die Kantenfokussierung, welche durch die Kantenwinkel β bestimmt wird, können die Gleichungen 2.8 und 2.9 hergeleitet werden.

$$K_x \cdot \begin{pmatrix} x_{vor} \\ x'_{vor} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \frac{\tan \beta}{r_0} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x_{vor} \\ x'_{vor} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{nach} \\ x'_{nach} \end{pmatrix} \quad (2.8)$$

$$K_y \cdot \begin{pmatrix} y_{vor} \\ y'_{vor} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{\tan \beta}{r_0} & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} y_{vor} \\ y'_{vor} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{nach} \\ y'_{nach} \end{pmatrix} \quad (2.9)$$

Für die y-Achse muss dabei aufgrund der Verschmierung des Randfeldes eine Korrektur vorgenommen werden. Dazu wird der Winkel β_{eff} eingeführt, der durch den Zusammenhang in 2.10 definiert ist. Dieser muss statt β in 2.9 eingesetzt werden. Für diese Abschätzung wird der Polschuhabstand g und der Faktor K benötigt, dessen exakter Wert nur durch eine Vermessung des Magnetfeldes bestimmt werden kann. Für die Rogowski-Form, welche der Ablenkmagnet BMI1 hat, kann $K \approx 0.7$ angenommen werden. Eine Näherung dazu ist in 2.11 zu finden.

$$\tan \beta_{eff} = \tan \beta - \frac{g}{r_0} \cdot \frac{1 + \sin \beta^2}{\cos \beta^3} \cdot K \quad (2.10)$$

$$\beta_{eff} \approx \beta - \frac{g}{r_0} \cdot \frac{1 + \sin \beta^2}{\cos \beta^3} \cdot K \quad (2.11)$$

Zwischen der Bildfläche vor beziehungsweise nach dem Magneten und der Magnetkante besteht für den Ionenstrahl eine Driftstrecke, die entsprechend 2.1.2 „Driftstrecke“ berechnet werden kann.

Beschreibung	Zeichen		Einheit
Nomineller Radius der Sollbahn	r_0	350	mm
Ablenkwinkel	α	90	°
Shim-Winkel (Eintritt und Austritt)	β	29.5	°
Abstand zwischen Objektpunkt und Eintritt zum Magneten	a	787	mm
Abstand zwischen Austritt vom Magneten und Objektpunkt	a	787	mm
Polschuhabstand	g	50	mm

Tabelle 2.1.: Angaben zum verwendeten Ablenkmagneten BMI1 im ILIAMS-Aufbau

Im ILIAMS-Aufbau ist ein Ablenkmagnet, dessen Daten in Tabelle 2.1 ersichtlich sind. Diese Daten können für die Erstellung der Transformationsmatrizen verwendet werden. Diese sehen wie folgt aus:

$$D \cdot K_x \cdot AM_x \cdot K_x \cdot D = R_x = \begin{pmatrix} -9.630 \cdot 10^{-1} & 3.736 \cdot 10^1 \\ -1.943 \cdot 10^{-3} & -9.630 \cdot 10^{-1} \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

$$D \cdot K_y \cdot AM_y \cdot K_y \cdot D = R_y = \begin{pmatrix} -7,867 \cdot 10^{-1} & 2,512 \cdot 10^2 \\ -1,517 \cdot 10^{-3} & -7,867 \cdot 10^{-1} \end{pmatrix} \quad (2.13)$$

Analyseeigenschaften eines Magneten

Außerdem kann ein Ablenkmagnet zur Analyse der Ionen herangezogen werden. Dabei filtert ein Magnet nach dem Impuls/Ladungsverhältnis $\frac{p}{q}$. Für Teilchen der Energie E , der Masse m und der Ladung q gilt für die magnetische Flussdichte B , welche die strahlablekende Feldgröße des Magneten darstellt, der Zusammenhang 2.14.

$$\frac{p}{q} = \frac{\sqrt{2mE}}{q} = B \cdot r_0 \quad (2.14)$$

Für Ionen mit geringer Energie- oder Massenabweichung gilt für die Ortsabweichung Δx im Zuge der Massenseparation des Analyse magneten der Zusammenhang 2.15 für einen idealisierten Magneten, welcher den Ablenkwinkel $\alpha = 90^\circ$, den Shim-Winkel mit $\beta = \arctan(1/2)$ und die Bildposition $d = 2r_0$ vor und nach dem Magneten aufweist.

$$\Delta x = 2r_0 \cdot \left(\frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta m}{m} \right) \quad (2.15)$$

Die Massenauflösung R ist eine dimensionslose Größe, welche über den kleinsten Massenunterschied Δm definiert ist, der bei einer Signalaufnahme einer bestimmten Masse m separiert werden kann. Die Relation ist in Gleichung 2.16 gegeben [32].

$$R = \frac{m}{\Delta m} \quad (2.16)$$

2.1.4. Linsen

Auch bei dünnen Linsen wird für die ionenoptische Berechnung von Vereinfachungen ausgegangen, in diesem Fall, dass das hypothetische Instrument unendlich dünn ist. Weiters wird bei dieser idealisierten Linse davon ausgegangen, dass durch dieses ionenoptische Instrument ein Teilchen eine sprunghafte Richtungsänderung erfährt, die sich durch den Zusammenhang 2.17 darstellen lässt, wobei dazu die Brennweite f der Linse benötigt wird.

$$\Delta x = \frac{x}{f} \quad (2.17)$$

Wird dieser Zusammenhang in Matrizenform übersetzt, so erhält man 2.18. Dabei sind die beiden Zusammenhänge für y äquivalent zu verwenden.

$$L = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ f^{-1} & 1 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

2.1.5. Steerer

Mithilfe eines Steerers soll die Strahlrichtung korrigiert werden können. In der ILIAMS-Beamline wird dazu mithilfe von acht oktagon angeordneten Elektroden ein homogenes Feld geschaffen, welches den Strahl ablenkt [33].

2.2. Phasenraum

Befindet sich ein Teilchen im dreidimensionalen Raum, so besitzt dieses $n = 3$ Freiheitsgrade. Für die Definition des Phasenraums, durch den alle Zustände beschrieben werden, welche für ein Teilchen möglich sind, werden $2n$ Dimensionen benötigt. Diese setzen sich aus den Ortsvektoren (x, y, z) und Impulsen (p_x, p_y, p_z) zusammen. Ein Strahl kann im Phasenraum durch eine Gruppe von Punkten, für jedes Teilchen ein Punkt, dargestellt werden, wobei sich jeder dieser Punkte mit der Zeit durch diesen Phasenraum, entsprechend der Bewegung eines realen Teilchens, bewegt. Im sechsdimensionalen Phasenraum liegen die Punkte, als Repräsentanten der Teilchen, in einem sechsdimensionalen Hypervolumen [30].

Um die Berechnung der physikalischen Zusammenhänge möglichst einfach darstellen zu können, wird für die ionenoptische Berechnung ein Koordinatensystem gewählt, welches sich entlang des Sollstrahlenganges mit dem Teilchen bewegt, sodass die Ortsabweichung von der zentralen Bahn immer auf der x/y -Ebene bestimmt werden kann.

Eine Vereinfachung kann durch Anwendung des Satz von Liouville erreicht werden, indem statt der Impulse p_x beziehungsweise p_y die Winkeldivergenz $x' = \frac{dx}{dz}$ und äquivalent für y' verwendet wird. Diese Vereinfachung wird möglich, wenn dazu angenommen wird, dass der Impuls entlang des Sollstrahls p_z konstant ist und die Winkeldivergenz mit dem Verhältnis aus axialem und transversalem Impuls übereinstimmt. Die beiden Größen x und x' oder y und y' sind leicht messbar, außerdem wird dadurch die Darstellung vereinfacht. Die beiden transversal zum Sollstrahl stehenden Phasenräume werden in der beschriebenen Form für diese Arbeit verwendet.

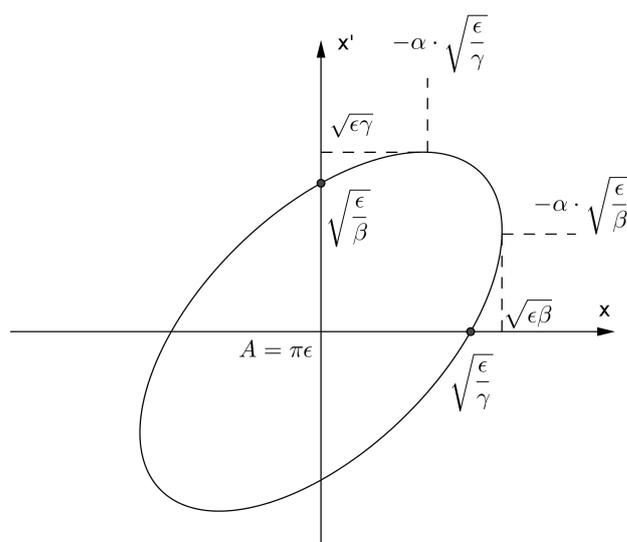


Abbildung 2.1.: Berechnung der Emittanz aus der Phasenraumellipse anhand der Ellipsenparameter.

2.2.1. Phasenellipse

Ausgehend von einer Gauß'schen Dichteverteilung der Intensität im Phasenraum, erhält man elliptische Isolinien. Jene Isolinie, welche bei der die Dichte um den Faktor $e^{-1/2}$ kleiner als das Maximum ist, beschreibt die Ellipse, welche beim Strahlprofil einer Standardabweichung 1σ entspricht. Man spricht bei der eingeschlossenen Fläche auch von der 1σ -Emittanz.

2.2.2. Emittanz und Akzeptanz

Die Emittanz ist eine Eigenschaft des Strahls. Sie ist ein Maß für die Ausbreitung des Strahls im Phasenraum. Sie wird in $\pi \cdot mm \cdot mrad$ angegeben.

Dabei ist eine Strahltaile, auch „Waist“ genannt, jene Stelle der engsten Einschnürung. Vor einem Waist konvergiert der Strahl – danach divergiert er.

Für die Berechnung der Emittanz können die Parameter der Phasenraumellipse, welche in Abbildung 2.1 gegeben sind, ausgehend von der Phasenraumellipse, verwendet werden.

Die „root mean square“ (rms) Emittanz, diese beinhaltet den 1σ -Bereich des Strahls, ist durch Zusammenhang 2.19 definiert. Dabei gilt $\langle x \rangle = \int x \rho(x, x') dx dx'$ mit der Verteilungsfunktion ρ , für die $\int \rho(x, x') dx dx' = 1$ gilt.

$$\epsilon_{rms,x} = \sqrt{\langle x^2 \rangle \langle x'^2 \rangle - \langle x x' \rangle^2} \quad (2.19)$$

Für die $\epsilon^{1\sigma}$ -Emittanz wird in dieser Arbeit die eingeschlossene Fläche einer Isolinie im x/x' oder y/y' Phasenraum gewählt, sodass der gewählte Ausschnitt 68,3% der Gesamtintensität beinhaltet.

Die Akzeptanz hingegen ist eine Eigenschaft eines Bauteils, welche angibt inwiefern der Phasenraum begrenzt sein muss, damit alle Teilchen, die den Strahl bilden, durch den Beamline-Abschnitt transmittiert werden. Vergleiche auch [30]

2.2.3. Messung von Ionenstrahlen

Für Phasenraummessungen muss die Intensität eines Ionenstrahls messbar sein. Dies kann auf unterschiedliche Art geschehen. An dieser Stelle sollen zwei Möglichkeiten vorgestellt werden.

Faraday-Cups

Faradaybecher oder auch Faraday-Cups können verwendet werden um einen Ionenstrahl zu messen. Ein Faraday-Cup besteht aus einem leitenden Becher. Wird nun ein Teilchenstrahl in einen Faraday-Cup gelenkt, so müssen Elektronen zur Kompensation der Ladungen der Teilchen zu oder abfließen können. Der Strom, welcher aufgrund dieses Teilchenflusses auftritt, kann gemessen werden [34].

Beam-Profile-Monitor

Bei einem Beam-Profile-Monitor, auch Strahllagemonitor genannt, nimmt ein dünner Draht die Strahlintensität auf. Dieser Draht kann im Strahl so bewegt werden, dass die Intensität des selbigen ortsabhängig gemessen wird [35, 36]. Dies wird auch Strahlprofil genannt, siehe auch Abschnitt 2.2.5 „Strahlprofil“.

2.2.4. Phasenraummessung

Zur Vermessung des Phasenellipse und der Emittanz können verschiedene Techniken verwendet werden, an dieser Stelle sollen zwei Möglichkeiten vorgestellt werden, die an VERA eingesetzt werden können.

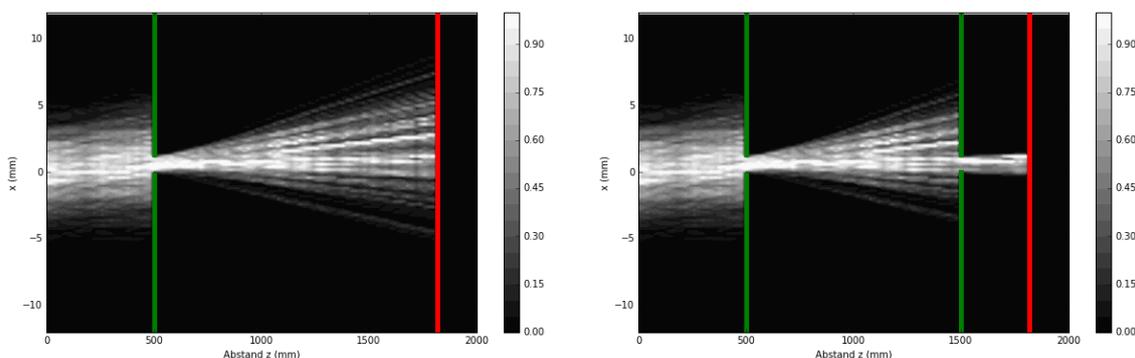
1. Mittels eines Schlitzes, welcher entlang der x- beziehungsweise y-Achse verschoben werden kann, und einem Beam-Profil-Monitor können Phasenraummessungen durchgeführt werden. Dazu wird das Strahlprofil für die eingenommenen Positionen des Schlitzes durch den Beam-Profil-Monitor vermessen. Eine schematische Darstellung der Messmethode ist in Abbildung 2.2a zu finden. Diese Methode fand bei der Phasenraumvermessung der Quelle S2 an VERA Anwendung [37, 35].
2. Mittels zwei parallelen Schlitzes, deren Position entlang der gewählten Achse (x oder y) frei wählbar ist und die möglichst nicht zu nahe beieinander positioniert sind, kann ebenfalls eine Phasenraummessung durchgeführt werden. Dazu ist ein Farady-Cup notwendig, der die Intensität für die jeweiligen Positionen der beiden Schlitzes aufnehmen kann. Für eine vollständige Phasenraummessung muss dazu für jede Position des einen Schlitzes die

KAPITEL 2. Physikalische Grundlagen

Intensität an allen Positionen des anderen Schlitzes gemessen werden. Eine schematische Darstellung der Messmethode ist in Abbildung 2.2b zu finden. In abgewandelter Form wurde diese Methode für die vorliegende Arbeit für die Phasenraummessungen verwendet. Einzelheiten zu dieser Adaptierung sind im Kapitel 4.1 „Messverfahren“ beschrieben.

Während die Methode mit dem Beam-Profile-Monitor den Vorteil hat, dass nur ein Schlitz benötigt wird und an VERA bereits eine automatisierte Messmethode entwickelt wurde [35], kann bei der Version mit den zwei Schlitz für die Messung auf einen Faraday-Cup zurückgegriffen werden. Dies hat den Vorteil, dass entlang der Beamline einige Faraday-Cups verbaut sind, die ohne weitere umbauten für Phasenraummessungen verwendet werden können, sofern dazu zwei Schlitz vorhanden sind.

Die Verwendung von besonders vielseitig einsetzbaren Schlitz wird in dieser Arbeit gemeinsam mit der entsprechenden Phasenraummessmethode und Messauswertung dargelegt. Diesen Messungen liegt die Messmethode mit zwei Schlitz und einem Faraday-Cup zugrunde.



(a) Schematische Darstellung der Phasenraummessung mit einem Schlitz (grün) und einem Beam-Profil-Monitor (rot).

(b) Schematische Darstellung der Phasenraummessung mit zwei Schlitz (grün) und einem Faraday-Cup (rot)

Abbildung 2.2.: Schematische Darstellung der Phasenraummessungen, welche für VERA relevant sind.

2.2.5. Strahlprofil

Wird eine Achse aus dem Phasenraum ausgewählt und die Intensitätsverteilung über diese als Funktion dargestellt, so spricht man von einem Strahlprofil. Dies kann mathematisch wie in Gleichung 2.20 dargestellt werden.

$$\rho_{\bar{I}}(x) = \int \rho_I(x, x') dx' \quad (2.20)$$

Stellt man die Strahlprofile als dreidimensionale Funktion über die Achse z dar, so kann dieses genutzt werden um den Strahlgang zu veranschaulichen und dadurch Strahltaillen auszumachen.

3. Untersuchung der Beamline und Aufbau der Analyseinstrumente

In diesem Abschnitt werden die für diese Arbeit nötigen Ionenoptikanalyseinstrumente charakterisiert, beziehungsweise deren Aufbau dargelegt. Außerdem wird die weitere Nutzung der jeweiligen Analyseinstrumente für diese Arbeit erläutert.

3.1. Neuvermessung der Beamline

Die Neuvermessung der Beamline wurde vorgenommen, um sicherzustellen, dass im eingebauten Zustand die Magnetführungsschlitze, siehe auch Kapitel 3.3.1, und der vorhandene Schlitz Slt-S2-1 auf den selben Nullpunkt eingestellt werden. Dazu wurden zwei Linienlaser und ein Theodolit verwendet, wobei erstere dazu dienten möglichst exakte Messmarkierungen im Bereich von ILIAMS zu erstellen, mithilfe derer der Theodolit zur weiteren Verwendung eingestellt werden sollte. Eine solche Markierung ist auch am Ablenkmagneten BMI1 angebracht, diese ist in Abbildung 3.1 ersichtlich.

3.1.1. Nullpunktsetzung und neue Höhenmarkierungen

Der Nullpunkt wurde so gewählt, dass dieser den Höhenmessmarkierungen des Ablenkmagneten BM03 und jenen rund um die Quelle S1 entspricht.

An manchen Punkten ist es einfacher, in einer fixen Höhe über der Beamline zu messen, als genau auf Beamlinehöhe, wo sich Hindernisse für den Linienlaser befinden. Dieser Fall tritt zum Beispiel ein, wenn die Höhe von der Innenseite des Ablenkmagneten BM03 der ILIAMS-Beamline verglichen werden soll, da es sonst nötig wäre rund um die gesamte Beamline herum zu messen. Deshalb wurden nicht nur neue Markierungen in der Höhe des gewählten Nullpunktes entlang der Beamline an der Wand angebracht, sondern auch zusätzliche Markierungen, welche $(25,00 \pm 0,05)$ cm über dem Nullpunkt liegen, errichtet. Diese wurden auch nummeriert und tragen die Bezeichnung *LVL* für die Markierungen auf Nullpunkthöhe und *LVH* für jene, die 25 cm höher befestigt sind. Weiters sind die Messpunkte mit einer Abkürzung für die Wand und einer Nummerierung ausgestattet, sodass eine eindeutige Bezeichnung möglich ist.



Abbildung 3.1.: Höhenmessmarkierung am Ablenkmagnet BMI1 mit nebenstehender Höhenabweichung des Magneten, mit Datum versehen.

3.1.2. Vermessung der Position von BMI1

Mithilfe eines Linienlaser und der neuen Höhenmarkierungen konnte die Position des BMI1 ausgemessen werden. Dabei wurde festgestellt, dass sich der Ablenkmagnet um $\Delta h = (2,0 \pm 0,5)$ mm zu niedrig im Vergleich zum festgelegten Nullpunkt befindet.

3.1.3. Vermessung der Position der Kammer zwischen Quelle S2 und BMI1

Im Zuge der Vermessung der Beamline konnte außerdem festgestellt werden, dass die Kammer zwischen der Quelle S2 und dem Ablenkmagneten BMI1, in der sich neben einem Strahlabschwächer auch Steerer befinden, sich im Vergleich zum definierten Nullpunkt um $\Delta h = (2,5 \pm 0,5)$ mm zu niedrig befindet.

3.1.4. Vermessung der Quellenposition

Zur Vermessung der Quellenposition wird ein Theodolit so aufgebaut, dass durch das Sichtfenster, welches in der Verlängerung der Strahlrichtung im Ablenkmagneten angebracht ist, in Richtung der Quelle geblickt werden kann. Für die Ausrichtung stehen drei Bodenmarkierungen und eine Markierung an der Decke zur Verfügung. Wird der Theodolit entlang der Geraden durch diese vier Punkte aufgestellt, so kann eine Verschiebung der Quelle festgestellt werden. Diese Verrückung beträgt in der Strahlrichtung $\Delta x \approx 2$ mm und $\Delta y \approx -2$ mm. Dabei wurden die Abstände anhand des Ionisatordurchmessers abgeschätzt. Beim Ionisator handelt es sich um eine halbkugelförmige aufgeheizte Anode, die so weit aufgeheizt ist, dass sie glüht, wodurch sie auch aus der Entfernung gut sichtbar ist. Dass jedoch der Mittelpunkt der Quelle nicht mit dem Fadenkreuz des Theodoliten übereinstimmt, und somit eine Verschiebung besteht ist offensichtlich, die genaue Verschiebung festzustellen ist schwieriger festzustellen. Dies resultiert auch daraus, dass bei dieser Messung durch ein Sichtfenster in das Strahlrohr geblickt werden muss, wodurch bei nicht orthogonaler Ausrichtung zwischen Sehachse und Sichtfenster eine Parallelverschiebung der Lichtstrahlen auftreten kann, was die Messung, insbesondere bei

der Winkelmessung mit einem Theodoliten, verfälschen kann. Dieser Effekt resultiert aus der Lichtbrechung an der Grenzfläche zwischen verschiedenen optischen Medien. Die verschobene Quellenposition wurde ebenfalls im Rahmen einer Quellenreinigung festgestellt und in diesem Zuge auch korrigiert. Dies ist in Abschnitt 6.2 „Ausrichtung der Quelle S2“ zu finden.

3.2. Bestehende Diagnoseelemente

In diesem Abschnitt werden verschiedene Diagnoseinstrumente charakterisiert, die zum Teil bereits verbaut und zu Beginn der Tätigkeit für diese Arbeit in Verwendung waren.

3.2.1. NEC-Motorschlitz (Slit S2-1)

Beim Schlitz Slit S2-1 handelt es sich um ein motorisiertes Schlitzpaar, hergestellt von der Firma *NEC* (National Electrostatic Corp., Middleton, Wisconsin, USA), Typ BDS-8 [38], bestehend aus vier Backen, die parallel zur x- und y-Achse ausgerichtet sind. Die Positionen der Backen können individuell gewählt werden. Jede der Schlitzbacken ist mit einem Elektromotor, der über das VERA-Steuersystem *AcceINET* (Accelerator Network Control System) gesteuert werden kann, verbunden, mit dessen Hilfe der Schlitz in die Beamline geführt werden kann. Die Steuerung des Elektromotors erfolgt dabei über drei Zustände: *In*, *out* und *off*. Die Position des Schlitzes wird über den Widerstand eines Drehpotentiometers, welches ebenfalls vom Elektromotor bewegt wird, bestimmt und ist in *AcceINET* auslesbar.

Die Position der Schlitzbacken ist insofern adaptiert worden, als es nicht möglich war die Backen über den Strahlrohrmittelpunkt hinauszufahren. Um dies zu erlauben wurden die Befestigung der Führungsstangen, mit deren Hilfe die Bewegung der Elektromotoren für die Schlitz umgesetzt werden, versetzt. Nach dem Einbauen der Schlitz wurden die Positionen der Schlitzbacken durch die Verstellung der Position des Drehpotentiometers zur tatsächlichen Position so verändert, dass es möglich wird, dass über den Mittelpunkt hinaus gefahren werden kann.

Bestimmung der Nullpunkte

Da die Schlitzbacken verstellt wurden, musste versucht werden die Nullpunkte dieser zu überprüfen. Dazu wird die Messvorrichtung, wie sie auch schon für die Vermessung der Quellenposition verwendet wird und in Kapitel 3.1.4 „Vermessung der Quellenposition“ beschrieben ist, angewandt. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Nullpunkte, die in *AcceNet* auslesbar sind, an allen 4 Backen nicht mit dem Nullpunkt welcher vorgesehen wäre übereinstimmen. Aus dieser Messung geht hervor, dass die Nullpunkte bei den Einstellungen liegen, die in Tabelle 3.1 zusammengefasst sind.

Schlitzbacke	Position	Einheit
x+	1.35	mm
x-	-2.03	mm
y+	1.39	mm
y-	-1.85	mm

Tabelle 3.1.: Schlitzbackenposition des Slt-S2-1, bei denen der nominelle Nullpunkt erreicht ist.

Diese Werte müssen bei der Positionsbestimmung der motorisierten Schlitze Slt S2-1 berücksichtigt werden. Insbesondere bei der Verwendung zur Phasenraummessung, die Erklärung der Messmethode ist in Kapitel 4.1 zu finden, müssen die Werte in die Auswertung eingebunden werden. Zu finden ist diese Einbindung auch im Python-Programm zur Phasenraumauswertung, welches in Abschnitt A.4 gezeigt ist.

3.3. Neue Diagnoseelemente

In diesem Abschnitt wird der Aufbau der Diagnoseelemente erläutert, die im Rahmen dieser Arbeit aufgebaut wurden. Außerdem werden die Spezifikationen und die weitere Verwendung für Messungen innerhalb der Arbeit ausgeführt.

3.3.1. Magnetführungsschlitze

Zur Realisierung der Phasenraummessungen an verschiedenen Stellen in der Beamline, an denen noch keine passenden Analysewerkzeuge verbaut waren, wurden Schlitze entwickelt, welche innerhalb der Beamline an möglichst beliebigen Stellen eingesetzt werden können.

Eingesetzt können diese Schlitze überall dort werden, wo sich der Ionenstrahl in einem Rohr mit einem Durchmesser von mindestens $d_{min} = 97 \text{ mm}$ bis zu $d_{max} = 107 \text{ mm}$ bewegt und mindestens eine Länge im Strahlrohr von $l_{min} = 30 \text{ mm}$ frei ist, wodurch eine hohe Flexibilität gegeben ist. Durch modifizierte Arme, an denen die Magnete im Strahlrohr befestigt werden können, sind die Schlitze auch in Abschnitten mit größeren Strahlrohrdurchmessern einsetzbar. Ein weiterer Vorteil dieser neuen Schlitze wird durch die geringe Tiefe erreicht, wodurch die Einsatzmöglichkeit auch bei wenig Platz gegeben ist. Für die Verwendung der Magnetführungsschlitze wird keine Vakuumdurchführung in die Beamline benötigt, sodass der Umbauaufwand minimiert werden kann.

Entwurf und Anfertigung der Schlitze erfolgten in Zusammenarbeit mit der hauseigenen Werkstatt. Um die Beweglichkeit der Drehgelenke zwischen den einzelnen Elementen (also Montageplatte, Hebelarme und Schlitzbacken) zu gewährleisten, wurden diese mittels Nieten verbunden. Weiters haben Nieten gegenüber Schrauben den Vorteil, dass kein Gewinde in eines der Bauteile, die verbunden werden, eingebracht werden muss. Deshalb wird auch eine geringere Tiefe bei der Befestigung benötigt. Die Nieten wurden „getaumelt“, was, aufgrund

der örtlich begrenzten Umformung, eine höhere Beweglichkeit zulässt, als wenn sie gepresst oder gehämmert werden, weshalb die Wahl, nach der Fertigung des ersten Prototypen, auf dieses Verfahren gefallen ist. Vergleiche dazu auch [39].

Aufbau

Ein Schlitz besteht aus einem Backenpaar. Die Magnetführungsschlitze bestehen aus zwei Schlitzen, wobei je einer parallel zur x-Achse und einer zur y-Achse ausgerichtet ist. Der Strahl wird bei vollständiger Öffnung der Schlitze durch ein Quadrat in der Montageplatte mit $a = 25$ mm Seitenlänge begrenzt, auch wenn sich die Schlitze geringfügig weiter öffnen lassen würden. Jede Schlitzbacke lässt sich unabhängig von den anderen parallel zur x- beziehungsweise y-Achse verschieben. Auf den Backen ist ein Tantalblech mit der Stärke von $d = 0,2$ mm angebracht, welches laut Planung $d = 3$ mm über den Rand der Backengrundplatte ragt. Die beiden gegenüberliegenden Tantalbleche sind so verformt, dass sich der Schlitz vollständig schließen lässt. Wie auch in Abbildung 3.4 ersichtlich ist, wird pro Schlitzbackenpaar nur eines der beiden Tantalbleche entsprechend modifiziert, sodass sich die Schlitzbacken überlappen können und ein vollständiges Schließen möglich wird.

Die Steuerung der beiden Backen, welche zusammen einen Schlitz ergeben, kann von außerhalb des Strahlrohrs vorgenommen werden, ohne dass dieses dazu weiter modifiziert werden muss. Dazu sind die Backenplatten über ein Hebelwerk mit einem Magneten verbunden, welcher durch einen außen an der Beamlinewand angebrachten weiteren Magneten in die richtige Position gebracht werden kann. Eine Skizze des Hebelwerks ist in Abbildung 3.2 ersichtlich. Zur Bestimmung der eingestellten Schlitzbackenposition wurde an der Außenseite der Beamline außerdem eine Skala, zu der ein Nonius am Magneten aufgesteckt wurde, angebracht.

Die Schlitzhalterungen bestehen aus je einem $d = 6$ mm breiten Blechstreifen, welche in den vier Ecken der Montageplatte gegen die Beamline drücken und diese dadurch fixieren. Diese Halterungen wurden später modifiziert, vergleiche dazu auch Abschnitt 3.3.1.

Die fertigen Magnetschlitze sind in Abbildung 3.3 ersichtlich, wobei hier bereits die neuen Halterungen eingebaut sind (siehe auch 3.3.1).

Test

Mithilfe der neuen Schlitze wurden die ersten Phasenraummessungen in der Beamline zwischen der Quelle S2 und dem Ablenkmagnet BMI1 durchgeführt. Diese sind in Abschnitt 4.2.1 zu finden. Dabei konnte die Funktionalität der Schlitze erprobt werden und erste Probleme wurden festgestellt. Vergleiche dazu auch den Abschnitt 3.3.1 „Probleme“.

Genauigkeit

Aufgrund der Haftreibung in den Gelenken des Hebelwerk der Schlitze entsteht für die Schlitzbackenposition eine Hysterese. Dabei ist die tatsächliche Backenposition davon abhängig von

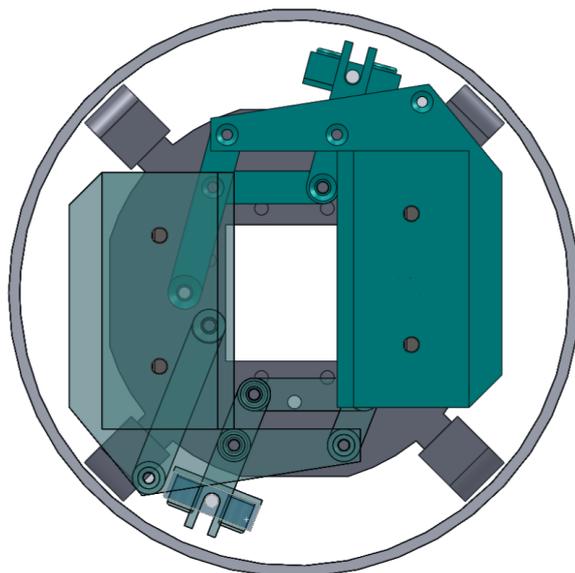


Abbildung 3.2.: Skizze des Hebelwerks eines Schlitzes, dabei ist zur besseren Ansicht eine Schlitzbacke etwas transparenter, als die andere.

welcher Richtung mit der Magnetführung eine Position angesteuert wird. Dies kann durch das anfahren eines gewählten Punktes von beiden Seiten beobachtet werden, wenn dazu ein Schlitz in ein offenes Rohrstück eingespannt wird. Für die Festlegung der Messungenauigkeit wurde ein Theodolit in einer Entfernung von $l = (573 \pm 1)$ mm aufgestellt, mit dessen Hilfe der Höhenwinkel für die Einstellung des Schlitzes ermittelt werden kann. Es wurde dazu die Position der Schlitzbacke gemessen, die den Strahl im eingebauten Zustand von $y+$ kommend begrenzt.

Der Messaufbau erlaubt es die Schlitzbackenposition auf $u_{pos} = \pm 0,05$ mm zu bestimmen. Die Schlitzpositionsgenauigkeit hängt davon ab aus welcher Richtung die Position angesteuert wird. Es wurden bis zu $u_{max} = 0.41$ mm Abweichung zwischen den Richtungen festgestellt, was auf die oben genannte Hysterese zurückzuführen ist. Diesem Problem kann entgangen werden, indem der einzustellende Wert um je 0.3 mm überschritten wird, wenn die Einstellung von der negativen Seite aus vorgenommen wird. Wird eine Position von nur einer Seite eingestellt, so liegt die Reproduzierbarkeit der Einstellung bei $u = \pm 0,07$ mm, wobei dieser Wert bei den Positionen $x = \pm 10$ mm von beiden Seiten bestimmt wurde.

Die Messunsicherheit der Schlitzes beträgt für den 1σ -Bereich $u_{1\sigma} = 0,12$ mm und ist ausgehend von der verwendeten Skala mit dem obigen Messaufbau festgestellt worden.

Die Unsicherheit resultiert unter anderem daraus, dass eine lineare Skala auf einer gekrümmten Bahn angebracht wurde, um einen Nonius verwenden zu können. Dies entspricht einer Messung des zurückgelegten Kreisbogens, obwohl eigentlich entlang einer Skala, welche normal zur Schlitzbackenkante steht, gemessen werden will. Es wird hierbei auf die Winkelnäherung für

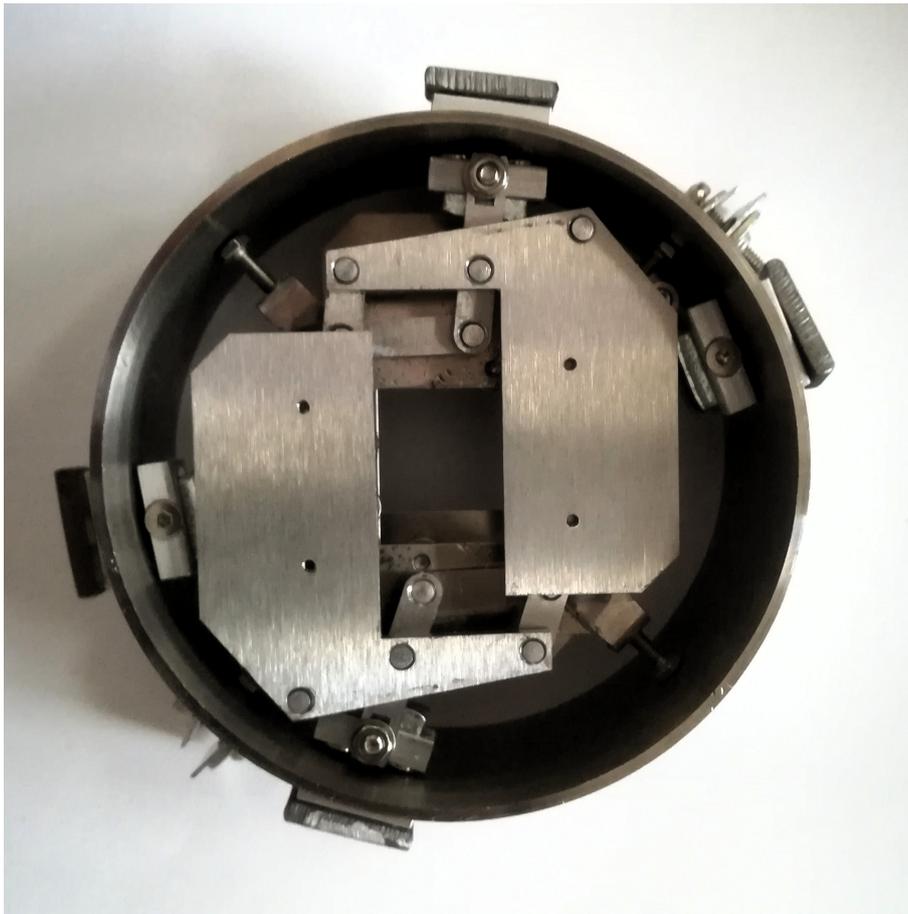


Abbildung 3.3.: Fertige Magnetschlitz in einem kurzen Rohrstück zur besseren Ansicht ohne aufgesetzten Tantalblechen auf den Schlitzbacken. Die äußeren Führungsmagneten sind hier noch provisorisch befestigt.

kleine Winkel in Zusammenhang 3.1 zurückgegriffen.

$$\sin \alpha \approx \alpha \quad (3.1)$$

Probleme

Bereits bei den ersten Messungen konnte festgestellt werden, dass sich die Federbeine, welche mit der Montageplatte der Schlitz verbunden sind und sich gegen die Beamlinewand verspreizen, gelockert haben. Dies resultiert aus den Kräften, welchen die Platte bei der Positionseinstellung der Schlitz ausgesetzt ist. Aus dieser Lockerung folgt, dass der Schlitzaufbau innerhalb der Beamline kippen kann und sich deshalb die Schlitzbacken nicht mehr bewegen lassen.

Um dies in weiterer Folge zu vermeiden gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Es können die Federbeine durch ein $d = 2$ mm dickes Stahlblech, statt 1 mm dickem Blech, gefertigt werden, wodurch eine festere Fixierung geschaffen wird. Dies ist beim

Schlitz Slit I1-1 erfolgt.

2. Die Federbeine können durch Schrauben ersetzt werden, welche parallel zur Montageplatte in Verlängerung zu den beiden Diagonalen des quadratischen Fensters in der Platte positioniert sind. Der Schraubenkopf kann dabei aus der Montageplatte gedreht werden, sodass dieser gegen die Beamline drückt und so den Aufbau in der Beamline fixiert.

Die ursprünglichen Federbeine sind in Abbildung 3.4 zu sehen, während die Variante mit den Schrauben in Abbildung 3.3 dargestellt ist.

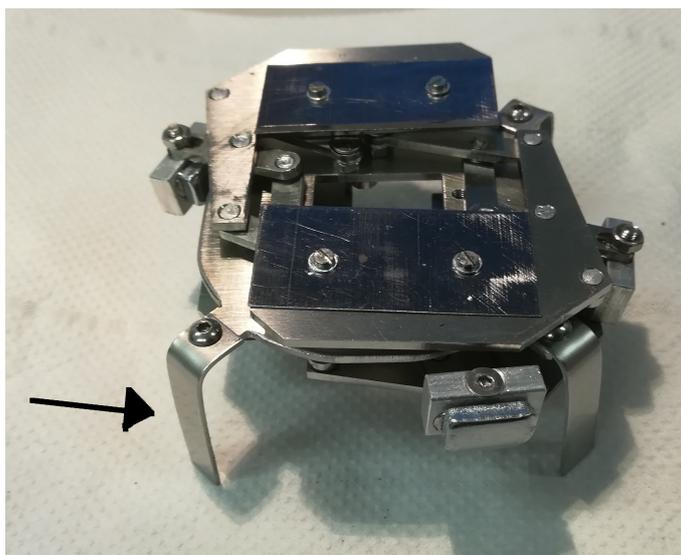


Abbildung 3.4.: Ausgebauter Schlitzaufbau mit ursprünglichen Federbeinen, markiert mit dem schwarzen Pfeil. Auf den abgebildeten Schlitzbacken sind bereits Tantalbleche angebracht.

Für verschiedene Positionen müssen die Schlitze an die Gegebenheiten adaptiert werden. So ist es für den Schlitz Slit I1-1 nötig die Hebelarme so zu verlängern, dass diese 56,2 mm lang sind. Dadurch wird es möglich die Schlitze durch die Seitenwand der Kammer zwischen BMI1 und Kühler zu steuern. Dies ist nötig, da an dieser Stelle ein Flansch sitzt, wodurch es nicht möglich ist die Schlitze durch ein Rohrstück magnetisch zu bewegen.

3.4. Blende (Slit-I1-2)

Nach der Massenaufspaltung durch den Ablenkmagneten BMI1 wäre es bei manchen Messungen von Interesse jene Masse, welche gesucht wird, in der horizontalen Achse der Beamline zu zentrieren. Dies wird zum Beispiel benötigt um leichter in den Kühler zu treffen. Durch die Abmessungen des Faraday-Cups werden jedoch bei höheren Massen nicht nur Ionen einer bestimmten Masse an der Position von FC I1-1 erfasst, sondern auch die Nachbarmassen. Der Innendurchmesser der Eintrittsblende in den Faraday-Cup FC I1-1 beträgt dabei $d = 18$ mm. Wird der Strom am Ablenkmagneten schrittweise erhöht und die Intensität am Faraday-Cup

FC I1-1 gemessen, so kann für eine Silber-Targets eine Messreihe, wie sie in Abbildung 3.5 ersichtlich ist, aufgenommen werden. Für Silber existieren dabei die stabilen Isotope ^{107}Ag und ^{109}Ag , welche in den verschiedenen Kombinationen Ag_2^- -Ionen ausbilden, woraus die Ionenmassen 214, 216 und 218 resultieren. Die sprunghaften Intensitätsänderungen in diesem Diagramm sind dabei das Wegfallen oder das Hinzukommen einer Masse durch den Faraday-Cup. Der Umstand, dass die Intensität mehrerer Massen aufgenommen wird, soll durch eine neue Blende behoben werden, sodass die Massen einzeln gemessen werden können.

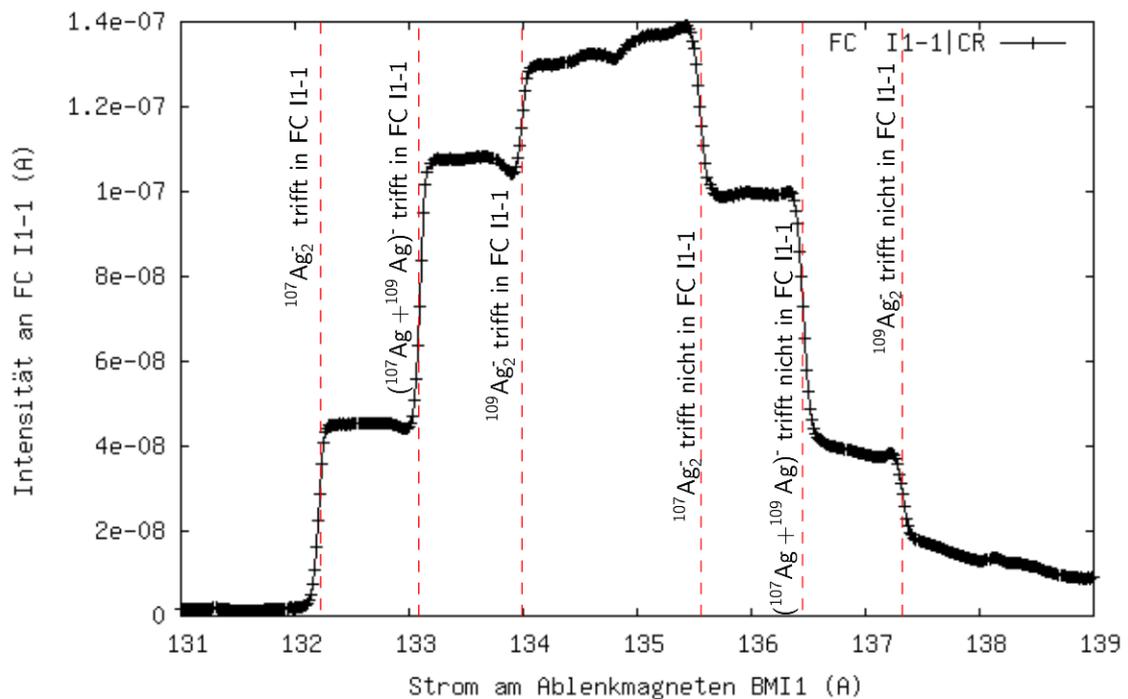
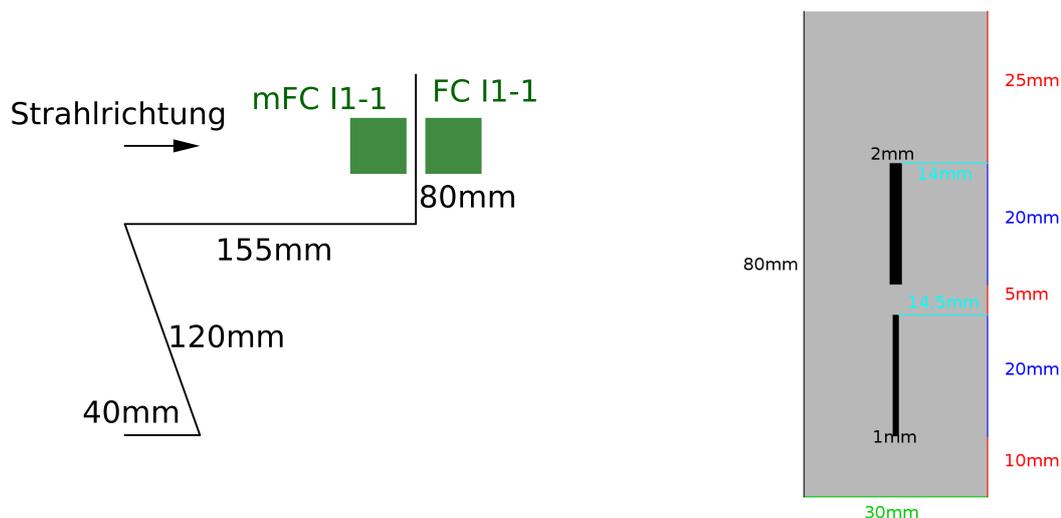


Abbildung 3.5.: Intensitätsmessung einer Silber-Targets an FC I1-1 in Abhängigkeit des Stroms am Ablenkmagneten BMI1.

3.4.1. Aufbau

Die Blende Slit I1-2 besteht aus einem $b = 30\text{mm}$ breiten und $l = 395\text{mm}$ langem Edelstahlblechstreifen mit einer Dicke von $d = 1\text{mm}$. Dieser ist in die Form, welche in Abbildung 3.6a ersichtlich ist, gebogen und hat zwei vertikale Schlitzte eingearbeitet, in den Breiten $d = 1\text{mm}$ und $d = 2\text{mm}$ je mit einer Länge von $l = 20\text{mm}$. Zwischen den beiden Schlitzten liegt ein Abstand von $l = 5\text{mm}$ und oberhalb des $d = 2\text{mm}$ breiten Schlitzes liegt zum Blendenanfang ein Abstand von $l = 25\text{mm}$. Die Vorderansicht ist in Abbildung 3.6b ersichtlich. Die Form resultiert aus dem Umstand, dass sich die Blende zwischen den beiden Faraday-Cups mFC I1-1 und FC I1-1 befinden soll, zwischen denen nur rund $z = 3\text{mm}$ Platz ist. Außerdem soll die vertikale Position der Blende Slit I1-2 durch eine Vakuumdurchführung verstellt werden, deren Position entlang der Beamline durch die vorhandene Öffnung vorgegeben ist.



(a) Skizze der Seitenansicht des Slt-I1-2.

(b) Skizze Vorderansicht des Slt-I1-2.

Abbildung 3.6.: Skizze zum Aufbau des Schlitz Slt I1-2.

Das Zentrum der beiden vertikalen Schlitzes und die Oberkante der Blende wurde mit einem Laser, welcher im Zentrum der ILIAMS-Beamline durch den Kühler läuft, bestimmt. Dabei ist die Oberkante bei der Einstellung $s = 15\text{mm}$, das Zentrum des $b = 2\text{mm}$ Schlitzes bei $s = 35\text{mm}$ und das Zentrum des $b = 1\text{mm}$ Schlitzes bei $s = 75\text{mm}$ des Linearvorschubs in Position.

3.4.2. Test

Die Testung des Slt I1-2 erfolgte mit einem Silber-Target. Dazu wurde der Strom am Ablenkmagneten BMI1 kontinuierlich gesteigert, sodass mit steigendem Strom massenreichere Ionen in den Faraday-Cup FC I1-1, der vor dem Kühlereingang positioniert ist, eingeschossen werden. Das Ergebnis ist in Abbildung 3.7 zu sehen. Hierbei ist im Gegensatz zu 3.5 zu erkennen, dass durch die Massenseparation nur Strahlen mit einzelne Massen in den Faraday-Cup FC I1-1 geschossen werden und zwischen diesen Strahlen eine Lücke besteht. Die Massen sind also sauber getrennt.

3.4.3. Positionen

Die Positionen innerhalb der Beamline, an welchen die neuen Analyseinstrumente verbaut sind, können aus der Abbildung 3.8 abgelesen werden.

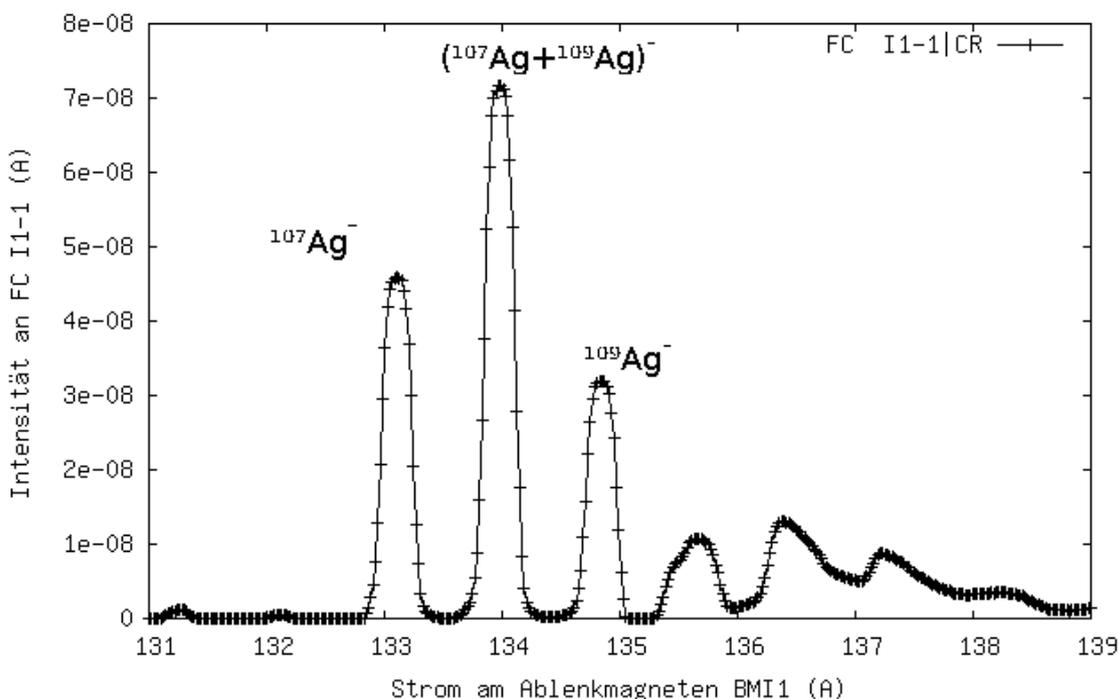


Abbildung 3.7.: Intensitätsmessung eines Silbertargets an FC I1-1 in Abhängigkeit des Stroms am Ablenkmagneten BMI1 mit eingesetzter Blende Slit-I1-2 mit 2mm breite.

3.5. Verwendung zur Phasenraummessung

Wie auch in Abschnitt 4.1 „Messverfahren“ dargelegt, werden zwei in der Beamline hintereinanderliegende Schlitze für eine Phasenraummessung benötigt. Dabei wurde versucht für diese Messungen zumindest ein Analyseinstrument zur Verfügung zu haben, dessen Backenpositionen computergesteuert angefahren werden können, sodass die Position an der Schlitzbacke und Intensität am jeweiligen Faraday-Cup automatisiert aufgenommen werden können.

Für Phasenraummessungen nach der Quelle S2 und noch vor dem Magneten BMI1 können damit Slit S2-1, der computergesteuert ist, und Slit S2-2, der händisch gesteuert werden muss, verwendet werden. Für Messungen nach dem Ablenkmagneten BMI1, aber noch vor dem Kühler, muss auf zwei verschiedene Techniken zurückgegriffen werden. Für die x-Achse der Phasenraummessung vor dem Kühler wird die Slit I1-1 und der Faraday-Cup mFC I1-1, die beide händisch positioniert werden müssen, verwendet. Für die Phasenraummessung der y-Achsen wird Slit I1-1 und die Oberkante von Slit I1-2 verwendet. Zu beachten ist dabei, dass jeweils nur eine Schlitzbacke durch mFC I1-1 und Slit I1-2 zur Verfügung steht, weshalb das Verfahren, welches in Abschnitt 4.1 „Messverfahren“ beschrieben wird, angewandt werden muss. Für beide Messungen wird der Strahl mit dem Faraday-Cup FC I1-1 aufgenommen.

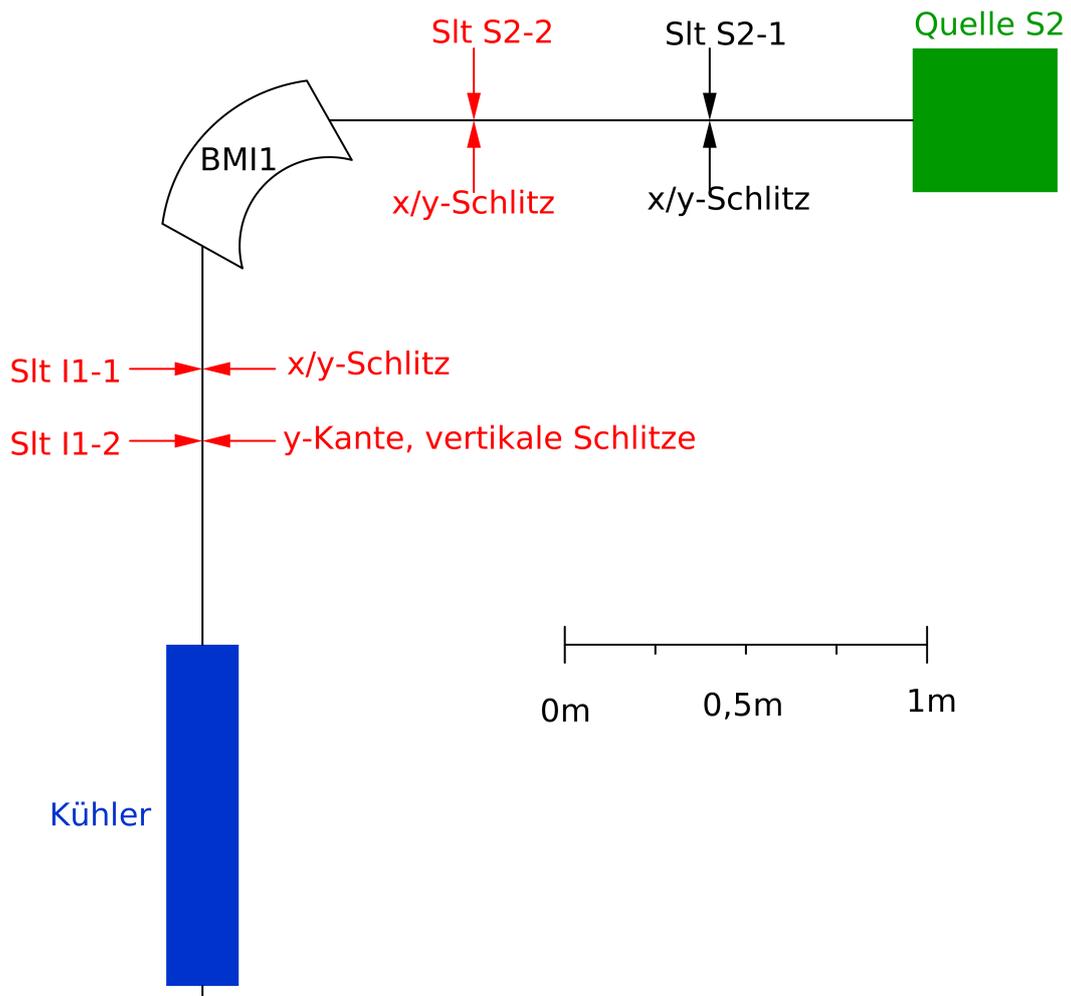


Abbildung 3.8.: Schematische Darstellung der ILIAMS-Beamline mit den Analyseinstrumenten, die zur Phasenraummessung benötigt werden. Rot sind die Magnetschlitz und der Slit I1-2, die im Zuge dieser Arbeit in der Beamline verbaut wurden, eingezeichnet.

4. Messung

Für diese Arbeit wurde der Phasenraum des Ionenstrahls an verschiedenen Stellen der Beamline mit unterschiedlichen Targets vermessen und ausgewertet, beziehungsweise auch für die weitere Verwendung aufbereitet. Außerdem wurden ionenoptische Berechnungen mithilfe dieser Messungen durchgeführt.

Es wurde dazu mit den Diagnoseelementen, die bereits beschrieben wurden, gearbeitet. Die verwendete Messmethode wird in weiterer Folge erläutert, es handelt sich dabei um die Abwandlung einer Methode, die in Abschnitt 2.2.4 „Phasenraummessung“ beschrieben wurde.

4.1. Messverfahren

Für diese Arbeit wurde die Messmethode mit zwei Schlitzten und einem Faraday-Cup (siehe auch Abschnitt 2.2.4 „Phasenraummessung“) abgewandelt, damit nur je zwei parallele Backen zur x - beziehungsweise y -Achse, sowie ein Faraday-Cup nötig sind. Die beiden parallelen Schlitzbacken, welche in die Beamline geschoben werden können, müssen den Ionenstrahl von der selben Seite beschneiden, um die Methode anwenden zu können. Außerdem müssen die beiden zur Messung verwendeten Backen in möglichst großem Abstand zueinander, entlang der Strahlachse, positioniert werden. Eine Skizze dazu ist in Abbildung 4.2 zu finden.

Anmerkung: In diesem Abschnitt wird die Messung für die x/x' -Achse erklärt, ist aber äquivalent auch für die y/y' -Achse gültig.

Für die vollständige Vermessung des Phasenraums wird die Intensitätsverteilung mittels eines Faraday-Cups, welcher hinter der zweiten Backe positioniert ist, für jede zu messende Position der hinteren Backe aufgenommen. Dazu wird beim Durchlauf der ersten Backe in geringen Abständen die Backenposition und die Intensität des Ionenstrahls am Faraday-Cup aufgenommen. Bei der gemessenen Intensitätskurve $\Phi(x)$ handelt es sich um eine Verteilungsfunktion, die nach der Positionsachse der vorderen Backe differenziert werden muss, um die Dichtefunktion der Intensität $\frac{d\Phi(x)}{dx} = \phi(x)$ zu erhalten. Dies ist für den Phasenraum mit den Achsen x und x' mit der Richtungsableitung¹ in der Funktion 4.1 zusammengefasst.

$$\phi(x, -x + d) = D \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \Phi \begin{pmatrix} x \\ -x + d \end{pmatrix} \quad (4.1)$$

¹Die Richtungsableitung wird nach der Konvention aus [40] mit $D_v f(x_0)$ für die Ableitung von f an der Stelle x_0 in Richtung v bezeichnet.

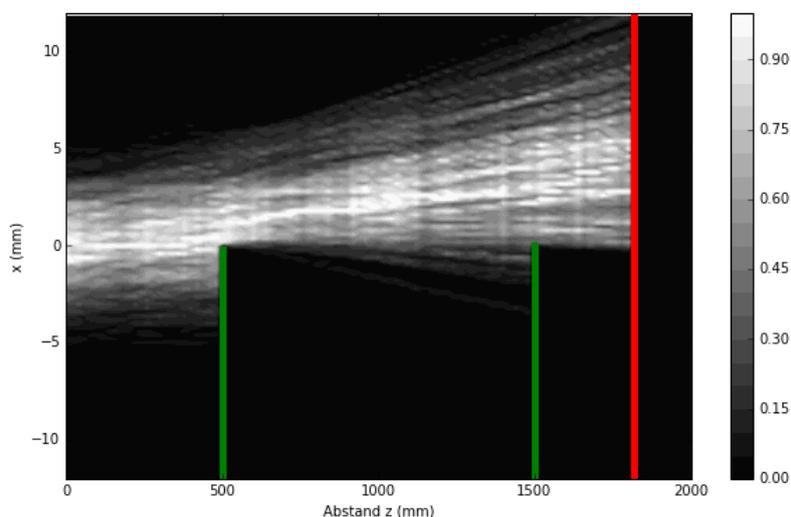


Abbildung 4.1.: Messung für y/y'

Abbildung 4.2.: Schematische Darstellung der Messmethode für den Phasenraum. Dabei stellen die grünen Balken je eine Schlitzbacke, von x - kommend, dar, die in diesem Fall auf $x = 0$ eingestellt sind.

Bei der nun erhaltenen Dichtefunktion der Intensität $\phi(x)$ handelt es sich gleichzeitig um den Wert der Intensitätsverteilungsfunktion parallel zur x' -Achse. Um auch hier die Dichtefunktion zu erhalten muss abermals differenziert werden, diesmal entlang der x' -Achse, um die Dichtefunktion der Intensität $I(x, x')$ zu erhalten. Dieser Zusammenhang ist in Gleichung 4.2 für $x' = -x + d$ zusammengefasst.

$$I(x, x') = \frac{\partial \phi}{\partial x'}(x, x') = \frac{\partial}{\partial x'} D \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \end{pmatrix} \Phi \begin{pmatrix} x \\ -x + d \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

Die hier beschriebene Auswertung wird für diese Arbeit mittels eines eigens dafür entwickelten Python-Programms vorgenommen, welches auch in Anhang A.4 „Programm zur Phasenraumauswertung“ zu finden ist. Dieses Programm ist dazu ausgelegt, dass die für jede eingenommene Position der gewählten Schlitzbacke am zweiten Schlitz eine Datei mit den Positionen der Schlitzbacke vom ersten Schlitz und dem jeweiligen gemessenen Strom am Faraday-Cup eingelesen werden kann und anhand dieser Daten die Phasenraummessung vornimmt. Diese Auswertung wird als farbiger Contour-Plot ausgegeben.

Für die passende Datenaufnahme wurde ein Skript entwickelt, welches die Daten in der passenden Weise aufnehmen lässt. Für die Phasenraummessung mit den Schlitz Slt S2-1 und Slt S2-2 ist eine halbautomatische Messung mit dem Skript aus A.1 „Skript zur Phasenraummessung möglich.“

Obwohl die Auswertung der Phasenraummessung relativ aufwendig erscheint hat diese Messmethode einige Vorteile. So ist nur ein Faraday-Cup nötig um Messungen durchzuführen, je-

doch kein Beam-Profile-Monitor. Außerdem können Schlitze für das System genutzt werden, die auch an Positionen verbaut werden können, an denen zu wenig Platz für andere Diagnoseinstrumente wäre.

4.2. Phasenraummessungen

In diesem Abschnitt werden die Messergebnisse der Phasenraummessungen, welche im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt wurden, dargestellt. Außerdem werden die Emittanzen, welche sich für den Strahl bei der jeweiligen Messung ergeben, ermittelt.

Die Messunsicherheiten für den Strahlstrom wird mit ($\pm 2\%$ relativ) angenommen [41].

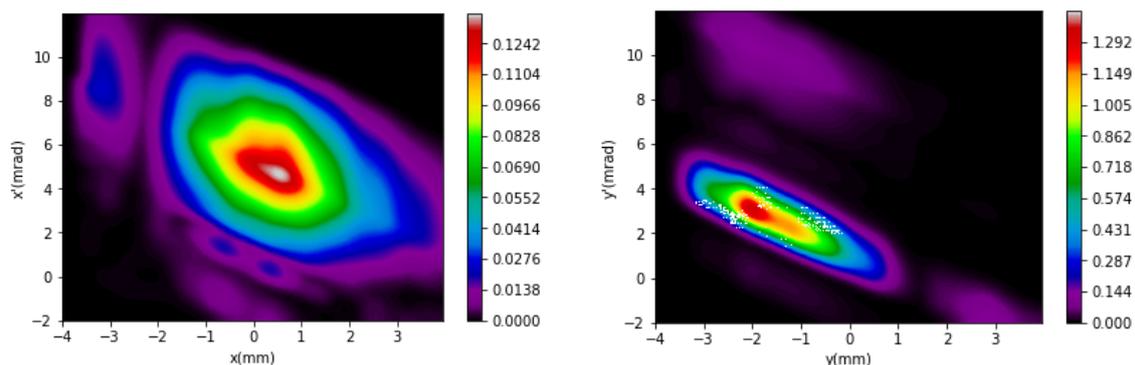
4.2.1. Aus der Quelle S2

Aus der Quelle S2 wurden drei Messungen mit je verschiedenen Targets durchgeführt. Dabei wurden für jedes Target jene Quelleneinstellungen verwendet, die für das jeweilige Isotop optimal sind beziehungsweise die auch für Messungen verwendet werden.

Kohlenstoff-Target

Aufgrund der traditionellen Bedeutung der ^{14}C -Messungen für AMS und da bereits sehr viele Messungen mit diesem Material durchgeführt wurden, wurde auch für die erste Phasenraummessung auf ein Kohlenstoff-Target zurückgegriffen. Dabei sind die folgenden ionenoptischen Einstellungen für die Quelle S2 eingesetzt worden: $CAT = -5,01\text{ kV}$, $Ext = 14,99\text{ kV}$, $HVS = -49,9\text{ kV}$ und $FOC = 1,51\text{ kV}$. Der Strahlstrom am Faraday-Cup FC I1-1 betrug bei dieser Messung zwischen $(12,09 \pm 2,42)\ \mu\text{A}$ und $(5,57 \pm 0,12)\ \mu\text{A}$, wobei eine Normierung der Messungen anhand der Strahlintensität bei vollständig geöffneten Schlitzen durchgeführt wird.

Für dieses Kohlenstoff-Target ergibt sich aus der Messung für die x-Achse eine Emittanz von $\epsilon_x^{1\sigma} = 7.537\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ und für die y-Achse $\epsilon_y^{1\sigma} = 3.419\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$. Der Phasenraum ist in Abbildung 4.3 graphisch dargestellt.



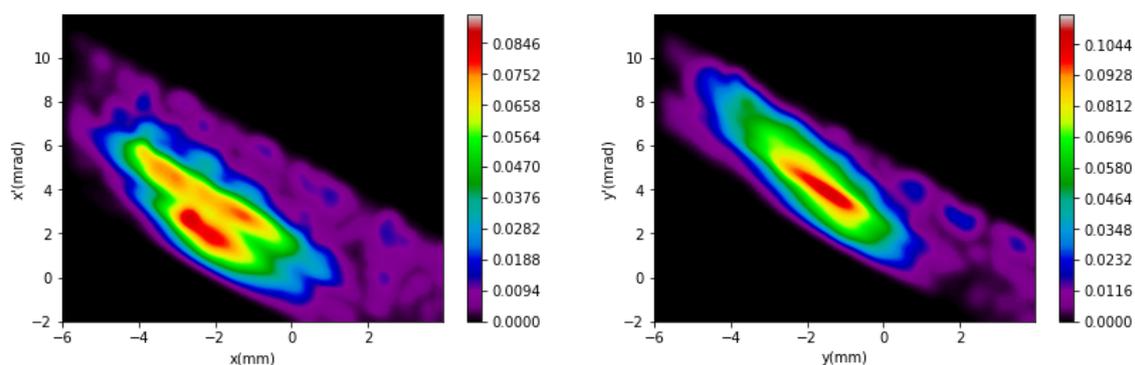
(a) Messung für x/x'

(b) Messung für y/y'

Abbildung 4.3.: Phasenraum aus der Quelle S2, gemessen für ein Kohlenstofftarget.

Cs-Target

Bei dieser Messung war der Strahl so weit nach in den negativen Bereich der x - und y -Achse versetzt, dass es nicht möglich war mit den Schlitzen S2-1 die nötigen Positionen anzusteuern. Um trotzdem ein vollständiges Bild des Phasenraums zu erhalten, ist es nötig die Messungen zwischen $x = -6$ und $x = -3.85$ und genauso für die y -Achse zu extrapolieren. Außerdem ist der gemessene Strahlstrom am Faraday-Cup FC I1-1 bei nur $I = (-1,362 \pm 0,028) \cdot 10^{-9}$ A zu Beginn der Messung gelegen. Durch diesen geringen Strom ist es nötig das Rauschen der Messung vor der weiteren Auswertung durch eine Glättung zu entfernen. Die verwendeten Algorithmen sind im Python-Programm zur Phasenraumauswertung in A.4 zu finden. Es wurden für die Messung die folgenden ionenoptischen Parameter für die Quelle S2 verwendet: $Cat = -4,87$ kV, $Ext = 12,64$ kV, $HVS = -12,3$ kV und $FOC = 0,29$ kV. Aus dieser Messung ergibt sich mit der Extrapolation für die Emittanzen $\epsilon_x^{1\sigma} = 5.886\pi \cdot mm \cdot mrad$ und $\epsilon_y^{1\sigma} = 4.567\pi \cdot mm \cdot mrad$, die graphische Darstellung ist in 4.4 ersichtlich.



(a) Messung für x/x'

(b) Messung für y/y'

Abbildung 4.4.: Phasenraum aus der Quelle S2, gemessen für ein Cäsiumtarget.

Hf-Target

Für ein Hafnium-Target ist die graphische Darstellung des Phasenraums nach der Quelle in Abbildung 4.5 zu finden. Für die Messung wurden die folgenden ionenoptischen Parameter für die Quelle S2 verwendet: $Cat = -3,81 \text{ kV}$, $Ext = 9,90 \text{ kV}$, $HVS = -16,2 \text{ kV}$ und $FOC = 0,02 \text{ kV}$. Der gemessene Strahlstrom lag dabei am Faraday-Cup FC I1-1 zu Messbeginn bei $I = (-2,779 \pm 0,056) \cdot 10^{-7} \text{ A}$. Die Messreihe hat die Emittanzen $\epsilon_x^{1\sigma} = 9.646\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ und $\epsilon_y^{1\sigma} = 8.472\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ ergeben.

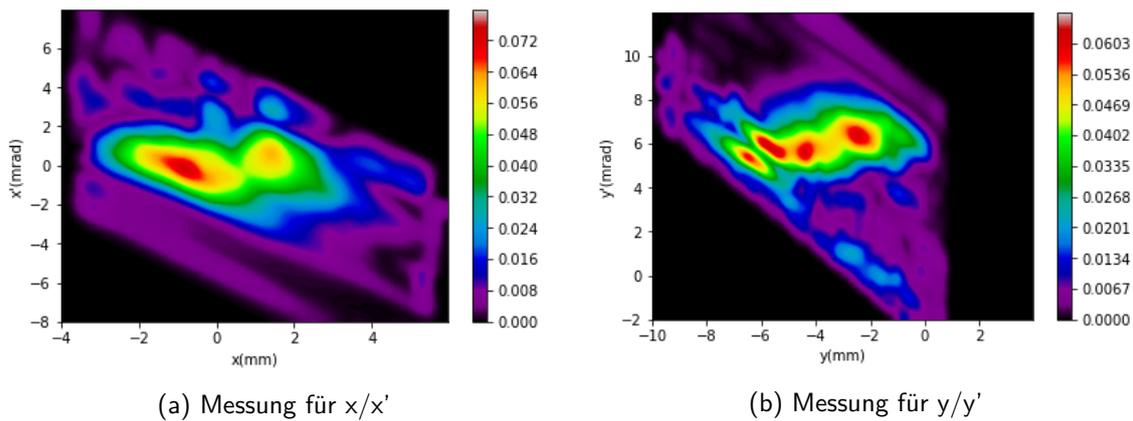
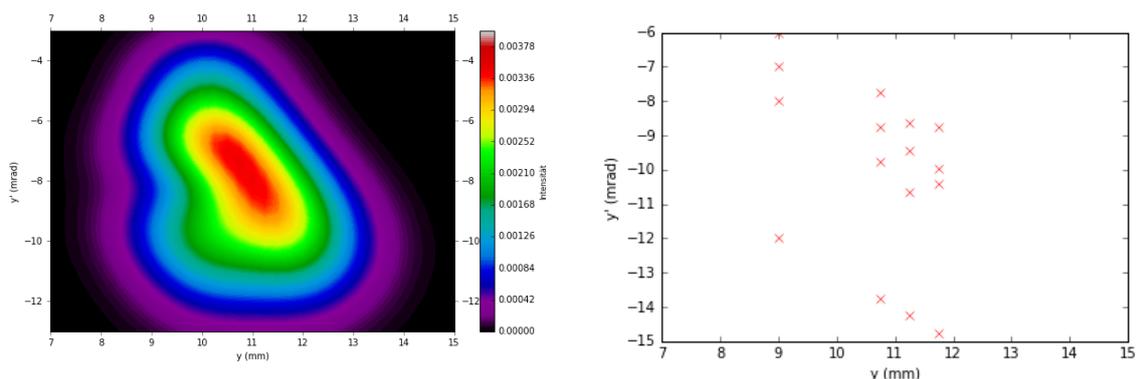


Abbildung 4.5.: Phasenraum aus der Quelle S2, gemessen für ein Hafniumtarget.

4.2.2. Nach dem Ablenkmagnet und vor dem Kühler

Bei der Phasenraummessung nach dem Ablenkmagneten BMI1 tritt das Problem auf, dass durch die Massendispersion des Analyse magneten die x/x' -Achse des Phasenraums für den Strahl nur für ein Target gemessen werden kann, bei dem nur eine einzelne Masse vorhanden ist.

Für ein Hafniumtarget ist dies nicht gegeben, weshalb nur der Phasenraum für die y -Achse gemessen werden kann. Die Darstellung selbiger Phasenraummessung ist in der Abbildung 4.6 ersichtlich. Bei dieser Messung musste besonders auf die besonderen Umstände des Strahls Rücksicht genommen werden. An der Messstelle von Slit I1-1 ist der Strahl nur ca 3 mm breit, wofür die Reproduzierbarkeit der Backeneinstellung des modifizierten Schlitzes nicht ausreicht. Deshalb wurde von normalverteilten Intensitäten entlang von y und y' ausgegangen. Die Messpunkte sind in Abbildung 4.6b zu finden. Die vollständige Auswertung inklusive der extrapolierten Daten ist in der Abbildung 4.6 ersichtlich.



(a) Phasenraum an der Stelle der Schlitze Slit I1-1 für die y-Achse.

(b) Messpunkte für die y-Phasenraummessung

Abbildung 4.6.: Phasenraummessung nach dem Ablenkmagneten BMI1, gemessen für ein Hafniumtarget.

Für diese Phasenraummessung ergibt sich für die y-Achse an der Stelle der Schlitze Slit I1-2 die Emittanz $\epsilon_y^{1\sigma} = 3.581\pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$. Zur Messung wurden die selben ionenoptischen Einstellungen der Quelle S2 verwendet, wie für eine Messung durch den Kühler. Diese lauten wie folgt: $Cat = -3,67 \text{ kV}$, $Ext = 10,13 \text{ kV}$, $HVS = -16,1 \text{ kV}$ und $FOC = 0,04 \text{ kV}$. Dabei lag der gemessene Strom zu Messbeginn am Faraday-Cup FC I1-1 für das Hafnium-Target bei $I = (6,551 \pm 0,131) \cdot 10^{-7} \text{ A}$ und für das Gold-Target bei $I = (-8,367 \pm 0,168) \cdot 10^{-7} \text{ A}$.

Für die x-Achse des Phasenraums wird eine Probe benötigt, bei der möglichst nur ein einzelnes Ion ausgebildet wird, sodass durch die Massenseparation des Ablenkmagneten BMI1 keine Verzerrung des Phasenraums auftritt. Um dies zu gewährleisten wird für die Vermessung dieses Teils des Phasenraums ein Goldtarget verwendet. Es werden jedoch die selben Quellenparameter verwendet, wie für die Messung des Hafniumtargets entlang der y-Achse.

Für die Messung des Goldtargets ergibt sich für die Position der Schlitze Slit I1-1 eine Emittanz von $\epsilon_x^{1\sigma} = 7,790\,634\,464\,35 \text{ mm} \cdot \text{mrad} \cdot \pi$. Der Phasenraums ist für diese Position in Abbildung 4.7 dargestellt.

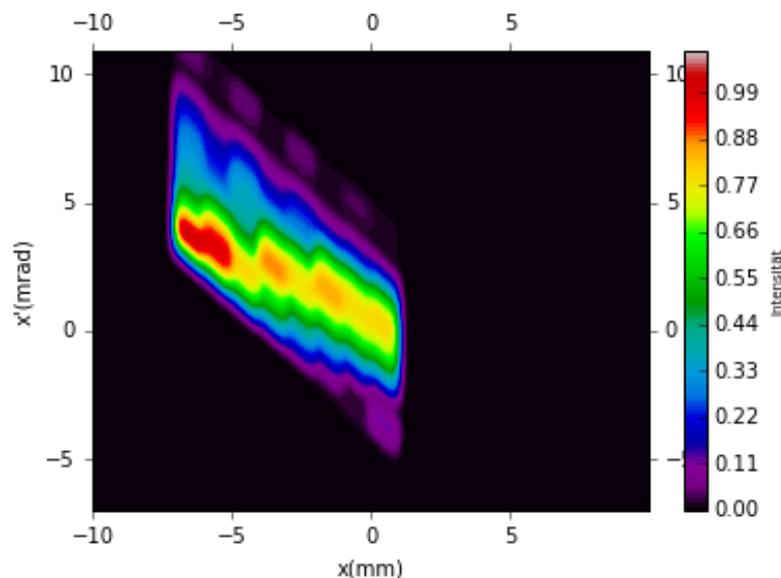


Abbildung 4.7.: Phasenraum in x nach dem Ablenkmagneten BMI1, gemessen mit einem Gold-Target.

4.3. Berechnung des Strahlprofils

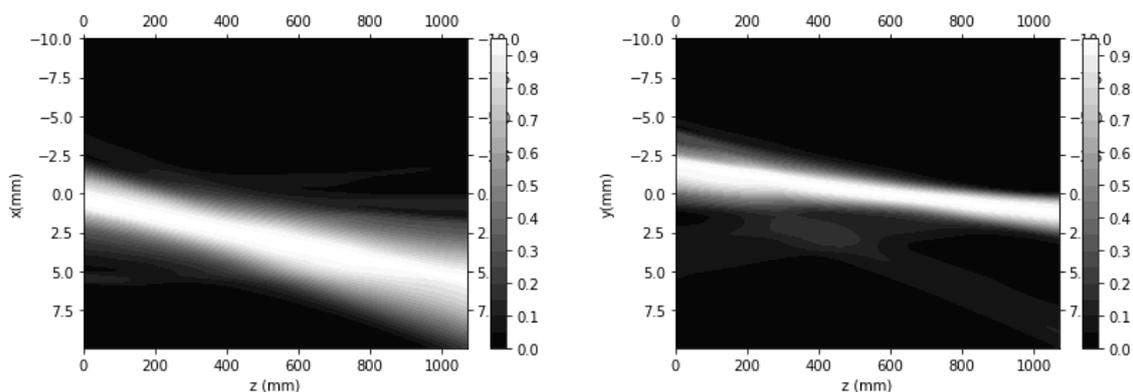
Anhand eines gemessenen Phasenraum kann auch das Strahlprofil für eine Driftstrecke berechnet werden. Dies erfolgt mithilfe von Matrizenrechnungen die Grundlagen dazu sind in 2.1.2 zu finden. Es werden bei dieser Berechnung des Strahlprofils keine Linsen der Injection-Aperture des Kühlers einbezogen.

4.3.1. Aus der Quelle S2

Aus der Quelle S2 wurden drei verschiedene Phasenraummessungen durchgeführt mit je einem Kohlenstoff-, Cäsium- und Hafnium-Target mit den Schlitzen Slt S2-1 und Slt S2-2 durchgeführt. Das Strahlprofil wird für die Beamline zwischen den Schlitzen Slt S2-1 und dem Ablenkmagneten BMI1 mit Hilfe von Matrizenrechnung berechnet.

C-Target

Ausgehend von der Phasenraummessung eines Kohlenstofftargets am Schlitz Slt S2-1 kann das Strahlprofil berechnet werden, welches in Abbildung 4.8 abgebildet ist. Aus der Berechnung ergibt sich für die x -Achse ein Waist bei $z = 340$ mm mit einem Strahldurchmesser des 1σ -Bereichs von $d = 2,90$ mm und für die y -Achse eine Waisttaille bei $z = 380$ mm mit einem Waistdurchmesser von $d = 2,97$ mm. Die Berechnung des Strahlprofils erfolgt dabei alle 10 mm, ausgehend von den Schlitzen Slt S2-1 in Strahlrichtung.



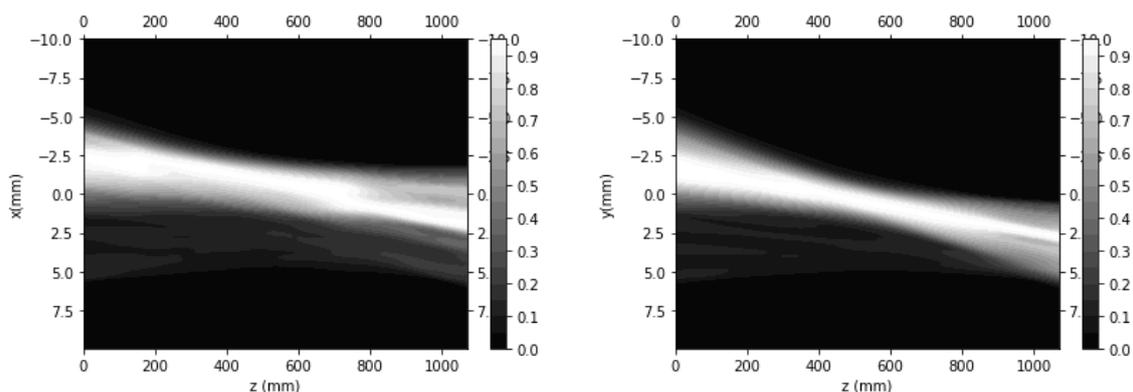
(a) Strahlprofil für die x-Achse.

(b) Strahlprofil für die y-Achse.

Abbildung 4.8.: Strahlprofil in der Beamline zwischen Quelle S2 und Ablenkmagneten BMI1 für ein Kohlenstofftarget. Dabei liegt bei $z = 0\text{mm}$ der Schlitz Slt S2-1 und bei $z = 1050\text{mm}$ die Eintrittskante des Ablenkmagneten BMI1.

Cs-Target

Die graphische Darstellung des Strahlprofils eines Cäsium-Targets zwischen Quelle und Magnet ist in Abbildung 4.9 ersichtlich. Durch die Berechnung des Strahlprofils kann für die x-Achse ein Waist bei $z = 700\text{mm}$ mit einem Strahldurchmesser des 1σ -Bereichs von $d = 2,90\text{mm}$ festgestellt werden. Für die y-Achse liegt die Waisttaille bei $z = 780\text{mm}$ mit einem Tailendurchmesser von $d = 2,12\text{mm}$. Die Berechnung des Strahlprofils erfolgt in Abständen von 10mm , wobei die z-Distanz in Strahlrichtung ab dem Schlitz Slt S2-1 gemessen wird.



(a) Strahlprofil für die x-Achse

(b) Strahlprofil für die y-Achse

Abbildung 4.9.: Strahlprofil in der Beamline zwischen Quelle S2 und Ablenkmagneten BMI1 für ein Cäsiumtarget. Dabei liegt bei $z = 0\text{mm}$ der Schlitz Slt S2-1 und bei $z = 1050\text{mm}$ die Eintrittskante des Ablenkmagneten BMI1.

Hf-Target

Für ein Hafnium-Target ist die graphische Darstellung des Strahlprofils nach der Quelle in Abbildung 4.10 zu finden. Aus der Berechnung des Strahlenprofils für die x -Achse ergibt sich ein Waist bei $z = 370$ mm nach den Schlitzen Slt S2-1 mit einem Durchmesser des 1σ -Bereichs von $d = 4,02$ mm. Für die y -Achse ergibt sich ein Waist bei $z = 380$ mm mit einem Waistdurchmesser des 1σ -Bereichs von $d = 4,22$ mm. Dabei erfolgte die Berechnung des Strahlprofils für alle $z \equiv 0 \pmod{n}$ und die z -Achse wird von den Schlitzen Slt S2-1 aus gemessen.

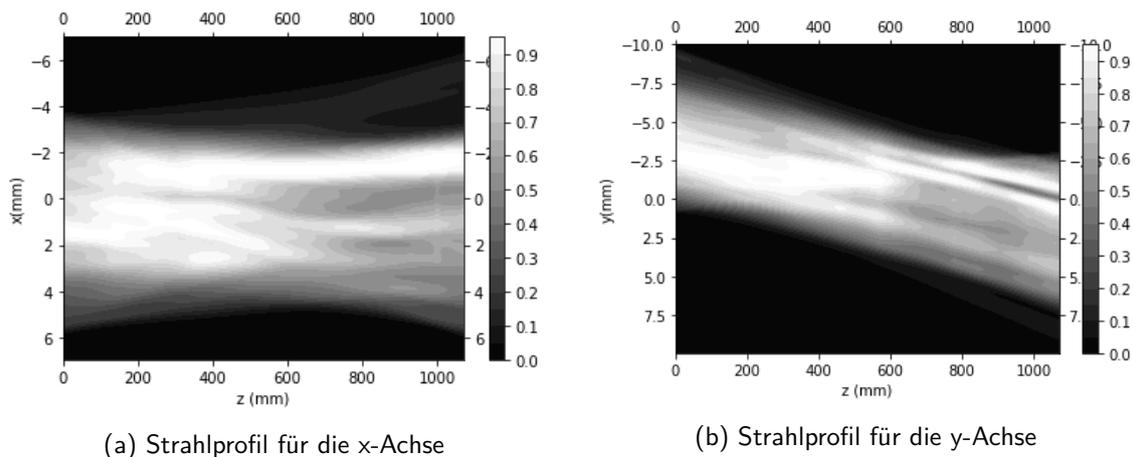


Abbildung 4.10.: Strahlprofil in der Beamline zwischen Quelle S2 und Ablenkmagneten BMI1 für ein Hafniumtarget. Dabei liegt bei $z = 0$ mm der Schlitz Slt S2-1 und bei $z = 1050$ mm die Kante des Ablenkmagneten BMI1.

4.3.2. Vor Kühler

Für ein Hafnium-Target ist die graphische Darstellung des Strahlprofils zwischen der Position der Schlitze Slt I1-1 und der Injection-Aperture des Kühlers in Abbildung 4.11 für die y -Achse zu finden. Aus den Berechnungen ergibt sich für die y -Achse ein Waist bei $z = -709,5$ mm, wobei der Strahl, der Messung dem Abschnitt 4.2.2 zufolge, im Bereich der Schlitze Slt I1-1 und Slt I1-2 sehr geringe Maße aufweist.

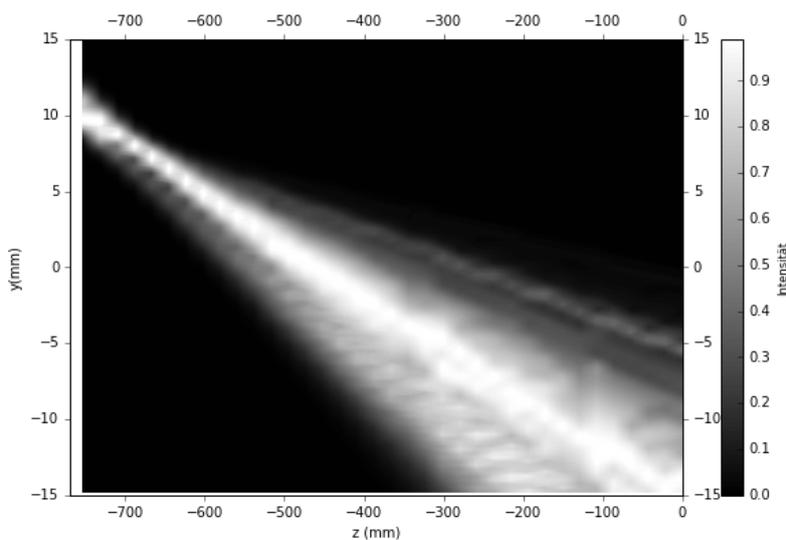


Abbildung 4.11.: Strahlprofil des Strahls zwischen den Schlitzen Slt I1-1 (bei $z = -768$ mm) und der Injection-Aperture des Kühlers (bei $z = 0$ mm) bei der Messung eines Hafnium-Targets.

Für das Gold-Target, für das der Phasenraum in x gemessen wurde, ist das Strahlprofil zwischen der Position der Schlitze Slt I1-1 und der Injection-Aperture des Kühlers in Abbildung 4.12 dargestellt. Aus den Berechnungen ergibt sich für die x -Achse ein Waist bei $z = -620$ mm von der Injection-Aperture des Kühlers entfernt.

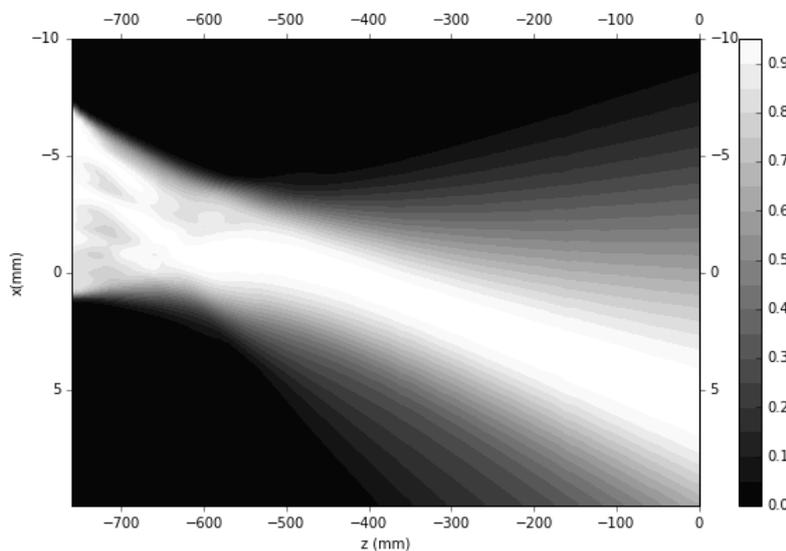


Abbildung 4.12.: Strahlprofil eines Gold-Targets nach dem Ablenkmagneten BMI1 zwischen den Schlitzen Slt I1-1 (bei $z = -768$ mm) und der Injection-Aperture des Kühlers (bei $z = 0$ mm) für die x -Achse.

Die Berechnungen des Strahlprofils erfolgte dabei ohne das einbeziehen der Linsen des Kühlers.

4.4. Konstanz des Phasenraums beim Targetwechsel

Im Zuge der Phasenraummessungen konnten auch noch weitere Beobachtungen gemacht werden. So konnte festgestellt werden, dass sich durch einen Probenwechsel in der Quelle S2 auch der Phasenraum ändert, auch wenn alle anderen Parameter gleich gehalten werden. Die Abweichung der Strahlposition für die y-Achse bei den Schlitzen I1-1 konnte dabei mit bis zu $\Delta y = 1,8 \text{ mm}$ bei zwei direkt aufeinander folgenden Strahlpositionsmessungen mit unterschiedlichen Proben festgestellt werden.

Wird in der Quelle S2 zwei mal das selbe Target ausgewählt, dazwischen jedoch eine andere, so wurden für die Strahlposition entlang der y-Achse bei den Schlitzen I1-1 eine Abweichung von bis zu $\Delta y = 1,25 \text{ mm}$ von der mittleren Strahlposition festgestellt, auch wenn sich sonst keine Parameter geändert haben.

5. Simulationen

Für die Simulationen wurde SIMION 8.1.1.32 [42], ein Programm zur Simulation von Ionenoptiken, verwendet. Damit können Ionenbahnen in elektrostatischen und magnetischen Feldern in einer gegebenen Geometrie durch das Lösen von Laplace-Gleichungen, mithilfe einer Methode der finiten Differenzen, berechnet werden [43].

Außerdem wurden für diese Arbeit ionenoptische Berechnungen mithilfe der Transformationsmatrizen durchgeführt. Die Grundlagen dazu sind im Kapitel 2.1.1 „Matrixdarstellung“ zu finden.

5.1. Simulationsgeometrie

Als Grundlage der Simulationen wurden die Geometrien verwendet, die für ILIAMS bereits vorhanden waren. Vergleiche dazu auch [33] und [44].

Für die Simulationen wurden die vorhandenen Geometrien an die bestehende Beamline angepasst, sowie der Ablenkmagnet BMI1 eingefügt. Dies ermöglicht die bisherigen Simulationen um die Massenseparation, welche durch BMI1 vorgenommen wird, zu erweitern.

Die Simulation der Beamline erstreckt sich auch über den gasgefüllten Kühler. Dazu wird für die Simulation der Kollisionen zwischen Buffergas, welches sich im Bereich der RFQ-Elektroden zwischen Injection- und Extraction-Aperture befindet, und Ionen auf das *hard sphere collision Model collision_hs1.lua* aus dem Beispiel-Set von SIMION 8.1.1.32 zurückgegriffen [45]. Dieses wurde dazu in das Hauptprogramm importiert. Weiter Informationen zum Kollisionsmodell sind in [46] zu finden.

Durch die Simulation des BMI1 und der ILIAMS-Beamline in SIMION ist es auch möglich zu untersuchen, ob Ionen mit ähnlicher Masse ebenfalls durch die Injection-Aperture in den Kühler injiziert werden. Dies ist vor allem interessant, nachdem bereits in vorhergehenden Messungen festgestellt wurde, dass 1% der Ionen mit ± 2 amu Abweichung von der gesuchten Masse bei der Messung von Hafniumtargets mitinjiziert werden.

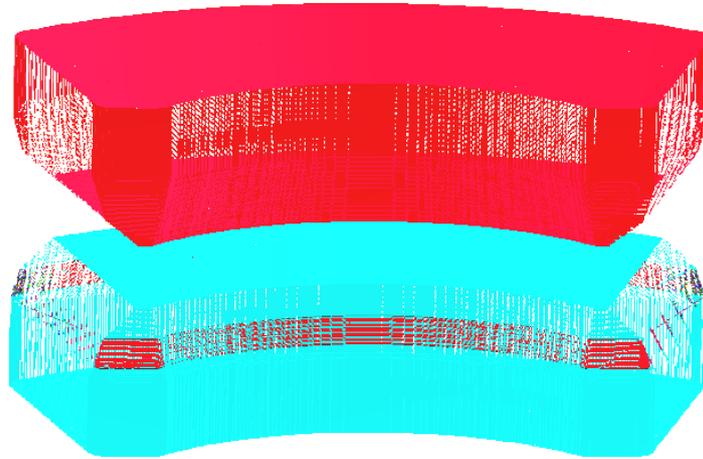


Abbildung 5.1.: Die Polschuhe des Ablenkmagnet BMI1 die in die SIMION-Simulation eingefügt wurden. Dabei ist der untere Polschuh in cyan und der obere rot dargestellt.

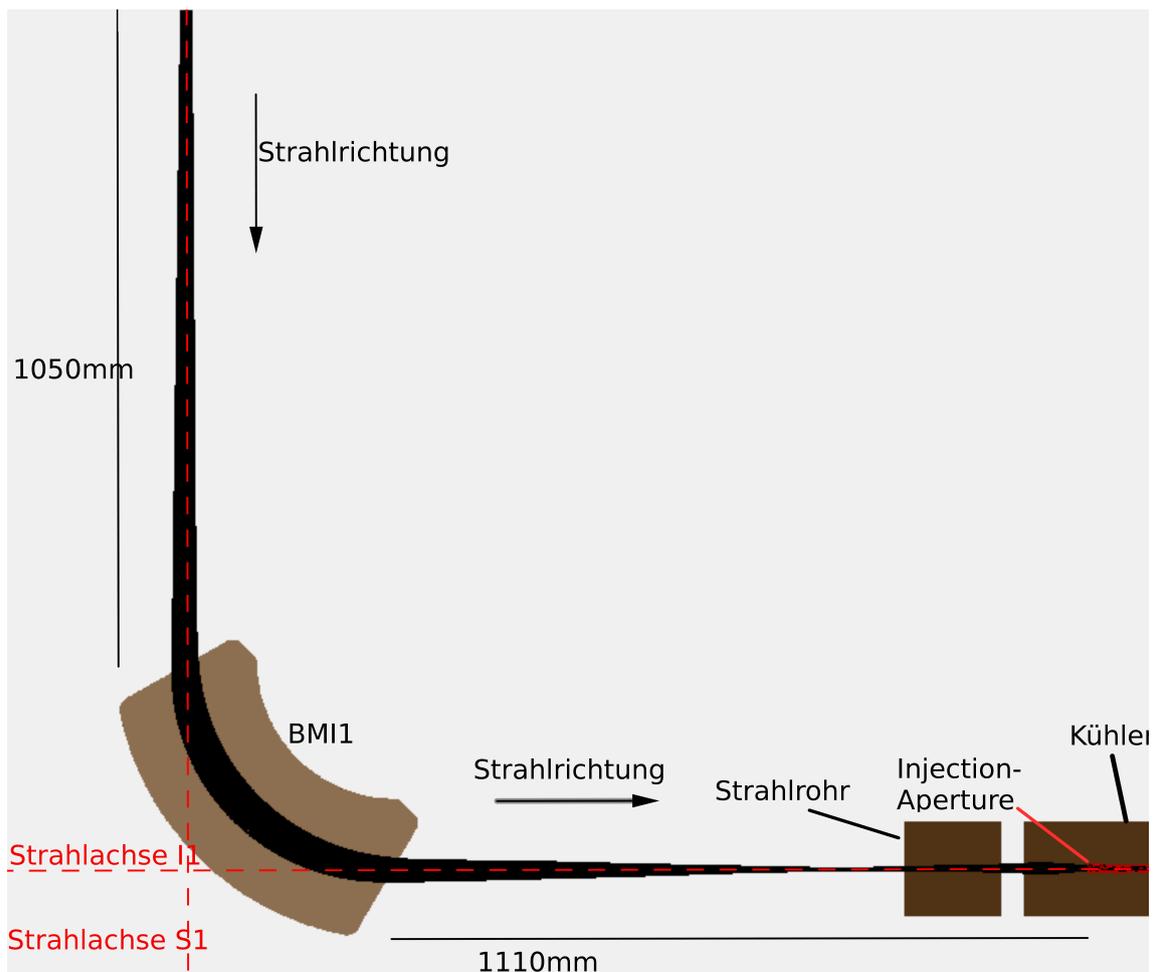
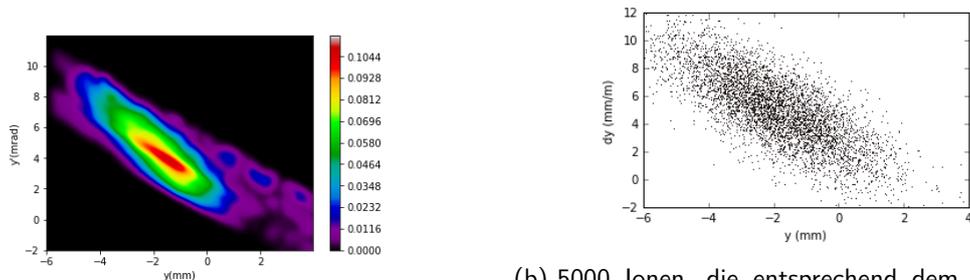


Abbildung 5.2.: Geometrie der Simulation von Kühler und Ablenkmagneten BMI1, ausgehend von den Schlitz S2-1, an deren Position Phasenräume der Ionenstrahlen gemessen wurden.

5.2. Phasenraumeinbindung

Es wurde für diese Arbeit ein PythonTM[47]-Programm entwickelt, welches ermöglicht einen gemessenen Phasenraum in eine SIMION-Simulation mittels eines *.ION-Files, siehe dazu auch [43], zu importieren, wodurch es möglich wird eine Simulation an die gegebenen Bedingungen anzupassen. Der Quelltext ist in Anhang A.2 ersichtlich.

Das Programm verteilt die gewählte Anzahl an Ionen entlang der x- und y-Achse entsprechend einer Normalverteilung mit gewählten Erwartungswerten und Standardabweichungen. Weiters kann eine Gerade gegeben werden, welche durch die Hauptscheitel der Phasenraumellipse geht. Orthogonal zu dieser Geraden werden in Abhängigkeit zur normalverteilten x-beziehungsweise y-Position die x'- und y'-Positionen im Phasenraum entsprechend einer Normalverteilung, deren Erwartungswert auf der gegebenen Gerade liegt und deren Sigma gegeben ist, gewählt. In Abbildung 5.3 ist das Bild einer Phasenraummessung und von der Verteilung von Ionen entsprechend dieses Phasenraums ersichtlich.



(a) Phasenraum entlang der y-Achse eines Cäsium-Targets beim Schlitz Slt S2-1.

(b) 5000 Ionen, die entsprechend dem Phasenraum entlang der y-Achse eines Cäsium-Targets verteilt, mit dem Python-Programm erstellt wurden.

Abbildung 5.3.: Vergleich zwischen dem Phasenraum, welcher entlang der y-Achse für ein Cäsium-Target gemessen wurde, und 5000 Ionen, die für die weitere Verwendung in Simulationen entsprechend dieses Phasenraums erstellt wurden.

Weiters bietet das Programm die Möglichkeit im selben Phasenraum auch Ionen mit den jeweiligen Nachbarmassen zu erzeugen, sodass Simulationen, bei denen die Massenaufseparation von BMI1 von Interesse ist, ermöglicht werden. Der Code ist in Abschnitt A.2 ersichtlich. Eine Abbildung der graphischen Oberfläche ist in 5.4 gegeben.

5.3. Ergebnisse

Die Ergebnisse aus verschiedenen Simulationen sind in diesem Abschnitt zusammengefasst. Für die vorliegenden Berechnungen wurde das Simulationsprogramm SIMION verwendet.

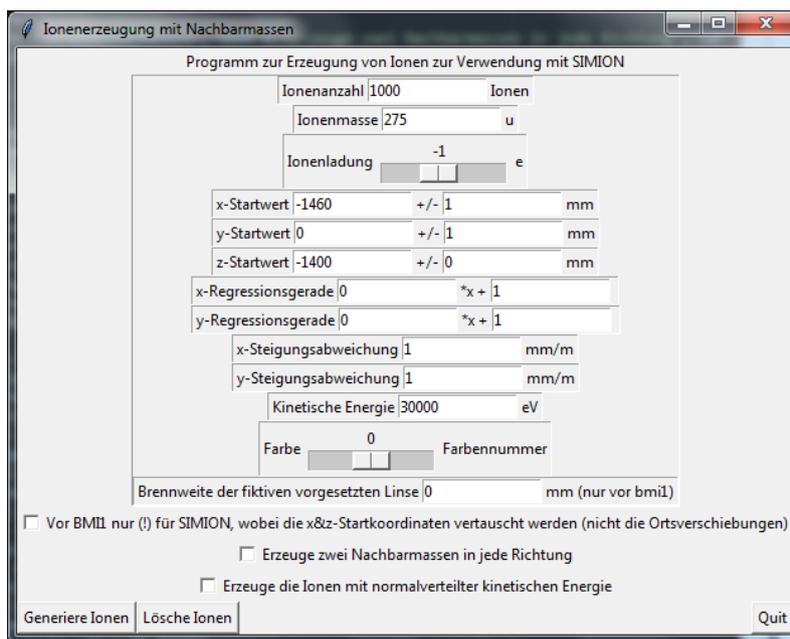


Abbildung 5.4.: Graphische Oberfläche des Python-Programms zur Erstellung von Ionen anhand eines vorgegebenen Phasenraums.

5.3.1. Phasenraumentwicklung entlang der Beamline

Mithilfe einer SIMION-Simulation der Beamline kann das Ausmaß des Phasenraums an verschiedenen Stellen entlang der Beamline berechnet werden. Zur besseren Veranschaulichung werden 25 Ionen in Rautenform angeordnet und die resultierende Anordnung im Phasenraum an verschiedenen wichtigen Stellen der Beamline für die x-Achse in Abbildung 5.5 gezeigt. In diese Berechnung werden die Linsen INJHI-, INJLO und das Potential an der Injection-Aperture nicht einbezogen.

5.3.2. Strahlprofil nach dem Ablenkmagneten BMI1

Ausgehend von den Phasenraummessungen vor dem Ablenkmagneten BMI1 wird der Strahlengang der Ionen durch den Magneten mithilfe des Programmes SIMION simuliert. Anhand dieser Simulation können die Parameter der einzelnen simulierten Ionen ausgegeben werden, um das Strahlprofil durch Matrizenrechnung zwischen dem Ablenkmagneten BMI1 und dem Kühler zu berechnen. Dieses kann wiederum graphisch dargestellt werden.

Bei der Darstellung des Strahlprofils werden keine Linsen einbezogen, sondern nur die Ionenstrahldriftstrecke berechnet.

Das Strahlprofil zwischen dem Ablenkmagneten BMI1 und dem Kühler ist von den Quellen-Einstellungen der Quelle S2 stark abhängig. Dies kann bei durch die Strahlprofilberechnungen nach dem Magneten BMI1 durch die SIMION-Simulation verdeutlicht werden, da für die Targets, für die eine Phasenraummessung durchgeführt wurde, anhand derer das Strahlprofil

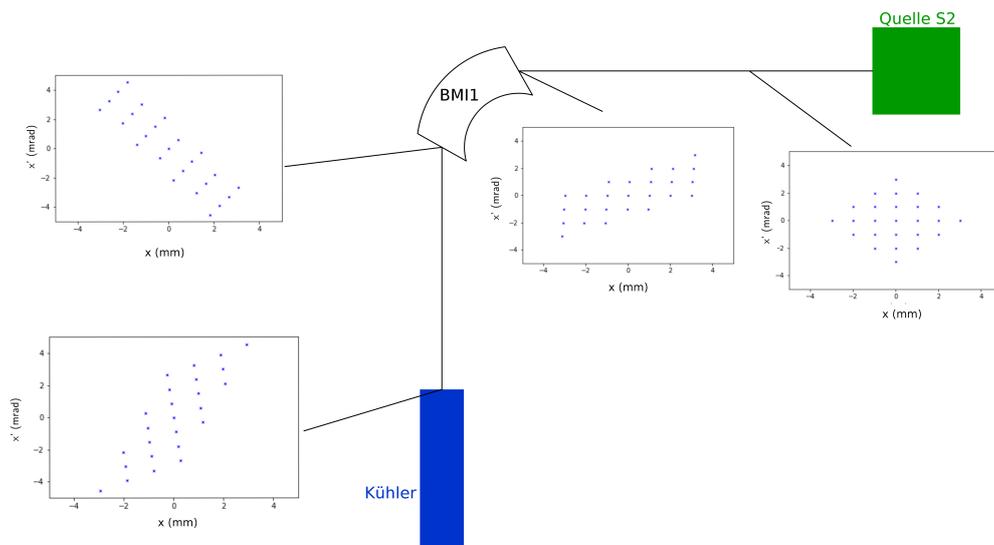


Abbildung 5.5.: Änderung des Phasenraums entlang der Beamline für die x-Achse, ausgehend von 25 Ionen, die in Rautenform angeordnet sind.

simuliert wird, jeweils die idealen Einstellungen der Quelle S2 verwendet wurden, die auch für Messungen des jeweiligen Isotops Anwendung finden.

C-Target

Der Phasenraum eines Kohlenstoff-Targets, welcher zuvor mit den Schlitzen Slt S2-1 und Slt S2-2 gemessen wurde, wird in die SIMION-Simulation eingebunden. Das Strahlprofil für den Beamline-Abschnitt zwischen Ablenkmagneten BMI1 und Kühler, welches aus dieser Simulation berechnet wurde, ist in Abbildung 5.6 ersichtlich. Aus diesen Berechnungen geht kein eindeutiges Waist für die y-Achse hervor. Der Strahl hat zwar auch entlang der x-Achse kein eindeutiges Waist, aber es könnte bei circa $z = -600$ mm ausgemacht werden.

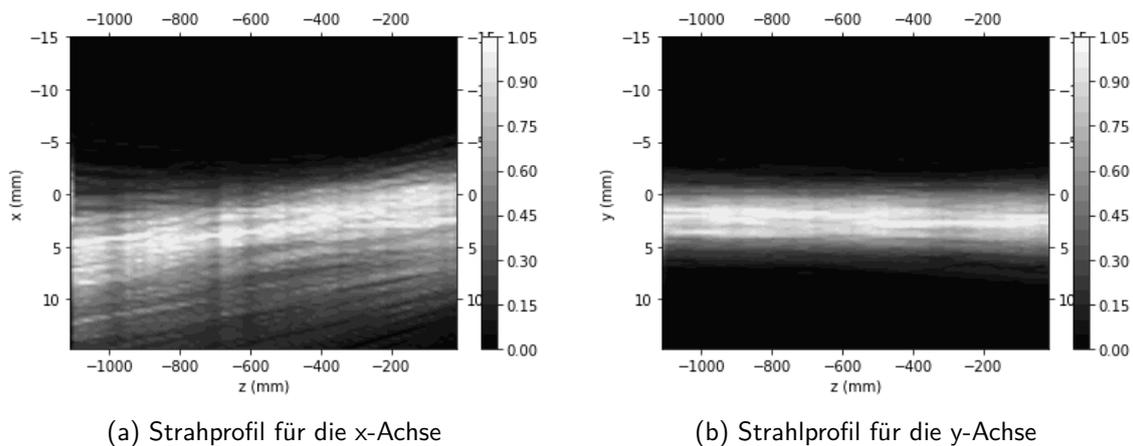


Abbildung 5.6.: Strahlprofil zwischen dem Ablenkmagneten BMI1 und dem Kühler, berechnet aus der Simulation des Phasenraums eines Kohlenstoff-Targets. Bei $z = 0$ mm befindet sich die Injection-Aperature des Kühlers, bei $z = -1110$ mm die Austrittskante des Kühlers.

Cs-Target

Für den Phasenraum, welcher mit den Schlitzen Slit S2-1 und Slit S2-2 nach der Quelle S2 für ein Cs-Target gemessen wurde, kann anhand einer SIMION-Simulation, in der der Ablenkmagnet BMI1 eingebunden ist, das Strahlprofil zwischen dem Magneten BMI1 und dem Kühler berechnet werden. Dieses ist in Abbildung 5.7 ersichtlich.

Für dieses Target konnte nach dem Ablenkmagneten BMI1 in der Simulation kein eindeutiges Waist ermittelt werden. der Strahl bewegt sich vielmehr relativ parallel zwischen dem Magneten BMI1 und dem Kühler.

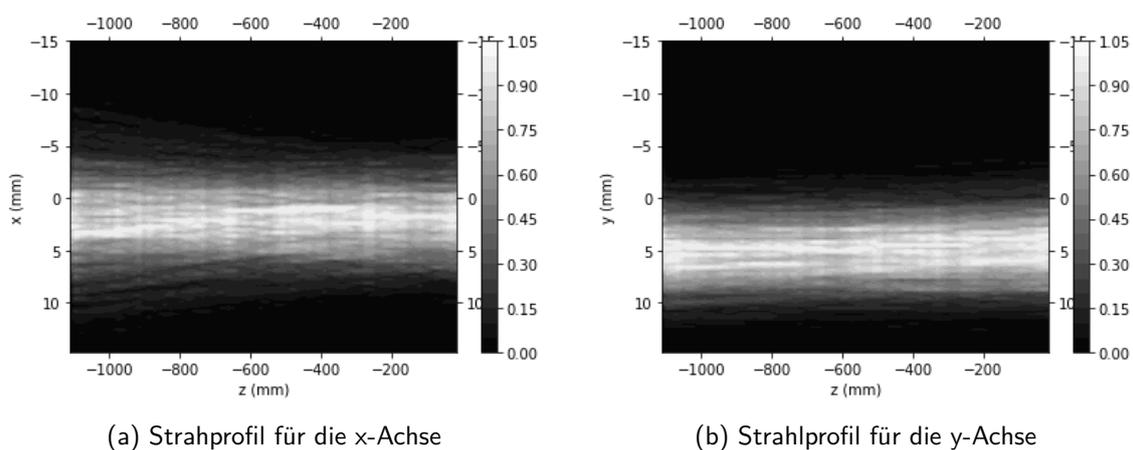


Abbildung 5.7.: Strahlprofil zwischen dem Ablenkmagneten BMI1 und dem Kühler, berechnet aus der Simulation des Phasenraums eines Cäsium-Targets. Bei $z = 0$ mm befindet sich die Injection-Aperature des Kühlers, bei $z = -1110$ mm die Austrittskante des Kühlers.

Hf-Target

Das Strahlprofil nach dem Ablenkmagneten BMI1, berechnet aus der Simulation mittels SIMION, ausgehend von der Phasenraummessung eines Hafnium-Targets, wird in Abbildung 5.8 dargestellt. Dabei wird zwischen dem Ablenkmagneten BMI1 und dem Kühler für die x -Achse des Phasenraums ein Waist im Bereich von $z = -500$ mm und für die y -Achse im Bereich von $z = -350$ mm aus dem Strahlprofil festgestellt werden.

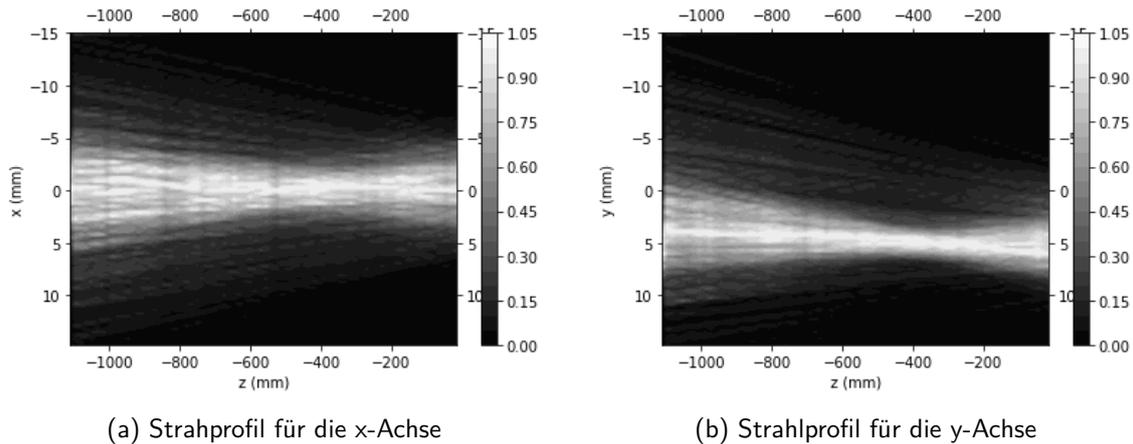


Abbildung 5.8.: Strahlprofil zwischen dem Ablenkmagneten BMI1 und dem Kühler, berechnet aus der Simulation des Phasenraums eines Hafnium-Targets. Bei $z = 0$ mm befindet sich die Injection-Aperature des Kühlers, bei $z = -1110$ mm die Austrittskante des Kühlers.

In der Simulation, welche für die Berechnung des Strahlprofils verwendet wird, können außerdem die idealen Einstellungen der INJHI und der INJLO-Linse des Kühlers, vergleiche dazu auch [33], berechnet werden, bei denen die höchste Transmission durch den Kühler erreicht wird. Dazu wird die Transmission bis zur Stelle $z = 95$ mm innerhalb der RFQ-Elektroden ermittelt.

Für die Simulation von HfF_5^- -Ionen wird dabei auf die Einstellungen des Kühlers für Messungen zurückgegriffen. Die Frequenz der RFQ-Elektroden ist dabei $F = 1,4$ MHz, die Amplitude liegt bei $U_{AC} = 350$ V, die Kühler-Hochspannung auf $U_{HV} = -29\,950$ V und die Guide-Elektroden auf $U_{GE} = -100$ V.

Für diese Simulation werden Ionen entsprechend des gemessenen Phasenraums eines Hafnium-Targets an der Stelle der Schlitze Slt S2-1 eingebunden. Sie erfahren entsprechend die Ablenkung durch den Magneten BMI1 und werden so in die Richtung des Kühlers abgelenkt. Das Simulationsprogramm enthält dabei die Möglichkeit das Magnetfeld schrittweise zu erhöhen, sodass für die jeweilige magnetische Flussdichte alle Möglichkeiten der Spannungs kombinationen an den Linsen überprüft werden.

Aus dieser Simulation folgt, dass für die beste Einstellung des Magneten mit den Linseneinstellungen $U_{INJHI} = 6000$ V und $U_{INJLO} = 1200$ V ein Transmissionsmaximum von 39,8% erreicht werden kann. Abbildung 5.9 ist ein Kontour-Plot für die Transmission in Abhängigkeit

zu den Spannungen an der INJHI- und der INJLO-Linse bei der Magneteinstellung, bei welcher die höchste Transmission erreicht wird.

Um eine erste Idee über die Unsicherheit der Transmission zu erlangen, welche durch die SIMION-Simulation ermittelt wird, wurde die Transmission mit den besten Parametern zehnmal berechnet. Für jede dieser Simulationen wurden die Ionen im Phasenraum neu erstellt. Dabei ergibt sich eine kleinste Transmission von 37,3% und eine größte von 45,9%.

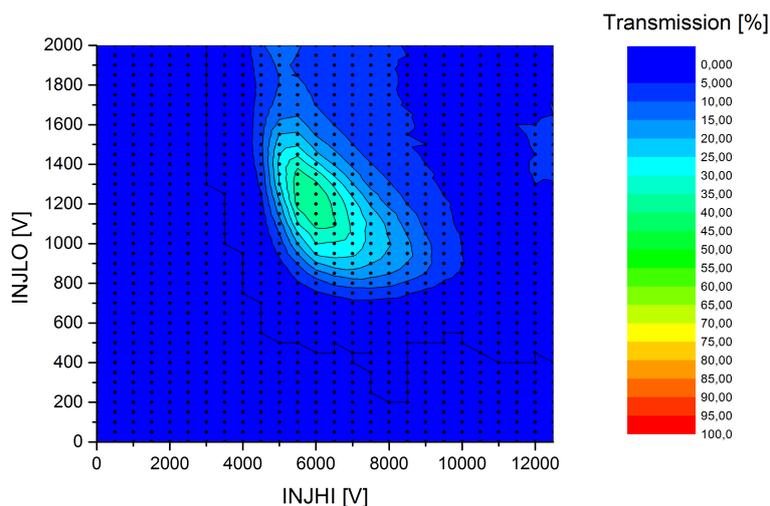


Abbildung 5.9.: Contour-Plot der Transmission für einen Strahl, der der Phasenraummessung eines Hafnium-Targets bei Slt S2-1 entspricht, in Abhängigkeit zu den Spannungen an der INJHI- und der INJLO-Linse.

Der Strahlengang in der Simulation ist für die y/z -Seitenansicht und für die x/z -Ansicht in 5.10 zu sehen. Dabei sind besonders die Strahlverschiebung in der y/z -Ebene und die Transmissionsverluste bei den Linsen auffällig. Für die Linseneinstellung $U_{INJHI} = 6000\text{ V}$ und $U_{INJLO} = 1200\text{ V}$ werden von der INJHI-Linse 3,7%, von der INJLO-Linse 37,2% und der Injection-Aperture 15,7% von der Transmission durch den Kühler abgehalten. Weitere 3,6% des Ionenstrahls werden im Bereich der RFQ-Elektroden verloren.

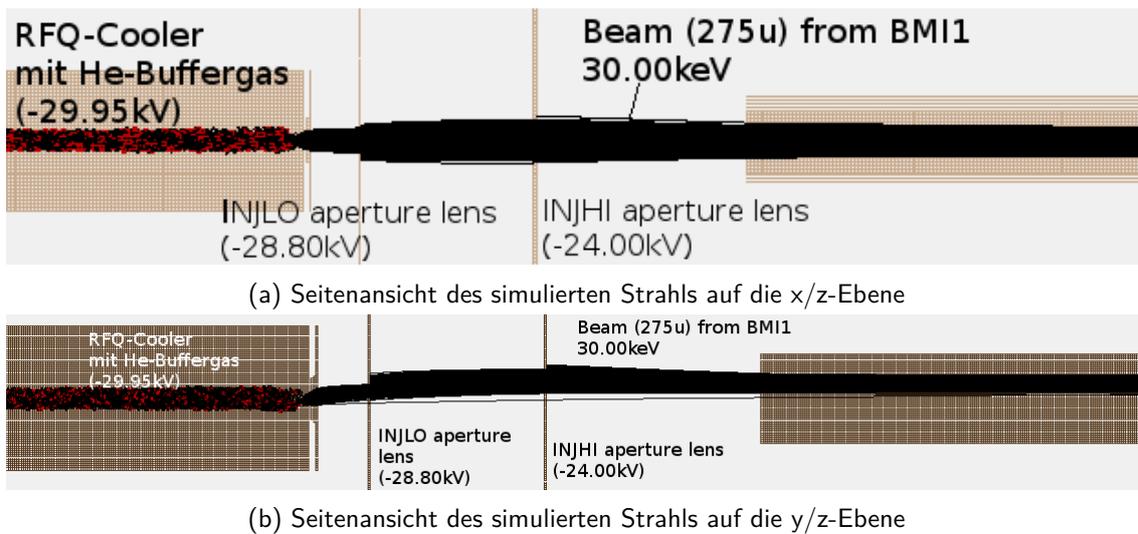


Abbildung 5.10.: Ausschnitt der Seitenansichten des simulierten Strahls für die höchste Transmission von ca 40% mit dem Kühler und den INJHI- und INJLO-Linsen. Die roten Punkte stellen dabei die Kollisionen mit dem Buffergas dar.

5.3.3. Simulation von Nachbarmassen

Diese Simulationen soll darüber Aufschluss geben, ob Nachbarmassen von einer gegebenen Masse, hier ist die gewählte Masse 275 für $^{180}\text{HfF}_5^-$, ebenfalls in den Kühler injiziert werden, wenn der Ionenstrahl durch den Magneten BMI1 abgelenkt wird. Durch den Ablenkmagneten BMI1 wird eine Massenselektion vorgenommen, jedoch wurde auch bei Messungen beobachtet dass diese Massen in den Kühler injiziert werden. In weiterer Folge soll mithilfe der Simulation aufgeklärt werden, ob es möglich ist dieser Injektion der „falschen“ Ionen in den Kühler zu entgehen.

Dazu wurden 1000 Ionen mit obigem Programm entsprechend der Phasenraummessung vor dem Kühler mit einem Hafnium-Target verwendet, siehe dazu auch 4.2.1.

Die Simulation gibt die Transmission für die verschiedenen Massen aus, wobei nur 100mm ab der Injection-Aperture simuliert werden. Die graphische Darstellung der Trajektorien der Ionen ist in der Abbildung 5.11 ersichtlich. Dabei ist die geringe Massenseparation der Massen 275 (rot), 274 (grün), 276 (cyan), 273 (schwarz) und 277 (blau) ersichtlich. Aus der Simulation geht hervor, dass bei den benachbarten Strahlen mit den Massen von 273u bis 277u die Massenseparation, gemeinsam mit dem Linsensystem, zu gering ist, als dass jene Strahlen, deren Masse nicht die Gesuchte ist, nicht vollständig durch die konisch geformte Injection-Aperture, mit einem Durchmesser von $d = 3\text{mm}$ des Kühlers abgefangen werden können. Dabei wird mit den optimalen Einstellungen, die durch die Simulation ermittelt wurden, für das Linsensystem gearbeitet. Dies entspricht $U = 5500\text{V}$ für die INJHI- und $U = 1250\text{V}$ für die INJLO-Linse.

Die Transmissionen für die jeweiligen Massen sind in Tabelle 5.1 ersichtlich, wobei zu be-

KAPITEL 5. Simulationen

achten ist, dass hierbei bereits Ionen mit den abweichenden Massen $\Delta m = \pm 2$ vom gesuchten Ion in den Kühler injiziert werden.

Masse	275 u	274 u	273 u	276 u	277 u
Transmission	42 %	14.5 %	1 %	18.5 %	1.5 %

Tabelle 5.1.: Transmissionen für die Massen 273u bis 277u bei der beschriebenen Simulation.

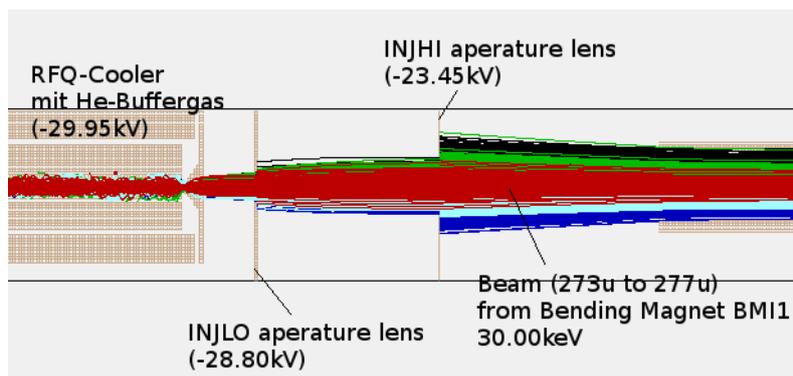


Abbildung 5.11.: Simulation von Ionen mit den Massen 273 bis 277amu, die durch den Ablenkmagneten BMI1 separiert werden.

Im Gegensatz dazu ist bei Chlorionen mit der Masse 36 die Massenseparation so weit ausgeprägt, dass nur die gesuchte Masse in den Kühler eingeschossen wird, die Nachbarmassen jedoch nicht. Der Strahlengang ist für die x-Achse in Abbildung 5.12 zu sehen. Dabei werden 74 % der Masse 36 eingeschossen, für die Masse 35 und 37 jedoch keine Ionen. Für diese Simulation muss die RFQ-Frequenz auf $F = 2,6$ MHz gestellt werden.

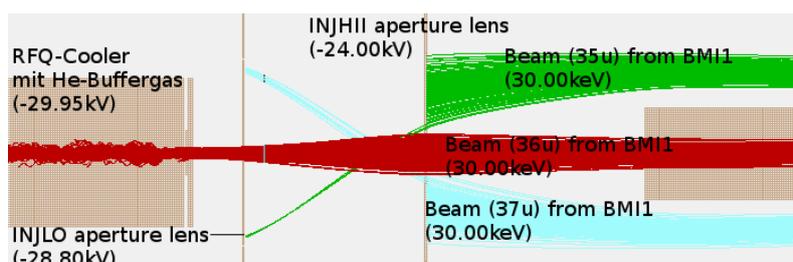


Abbildung 5.12.: Massenseparation bei für $m=35$ (grün), $m=36$ (rot) und $m=37$ (cyan) durch den Ablenkmagneten BMI1.

Verwendet man für die x-Achse den selben Phasenraum, wie für das Hafniumtarget gemessen wurde, und für die y-Achse den gleichen Phasenraum wie für das Hafniumtarget gemessen wurde, allerdings parallelverschoben, sodass der Nullpunkt des Koordinatensystems y/y' in der Phasenraumellipse liegt, so kann ab einer Masse von $m = 128$ u in der Simulation die Injektion von einer Nachbarmasse in den Kühler festgestellt werden.

Die dabei festgestellten Transmissionen sind in 5.2 ersichtlich.

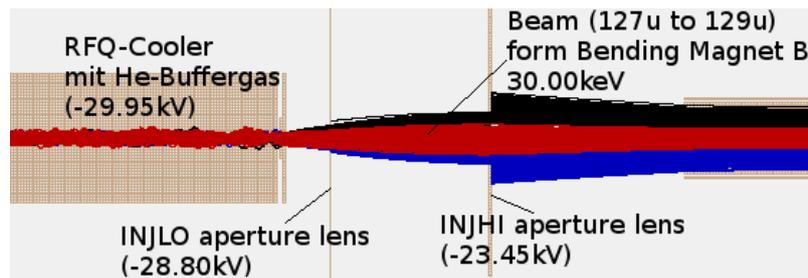


Abbildung 5.13.: Strahlengang bei der Massenseparation von Nachbarmassen bei einer Hauptmasse von 128 amu.

Masse	127 u	128 u	129 u
Transmission	0.5 %	70 %	0.5 %

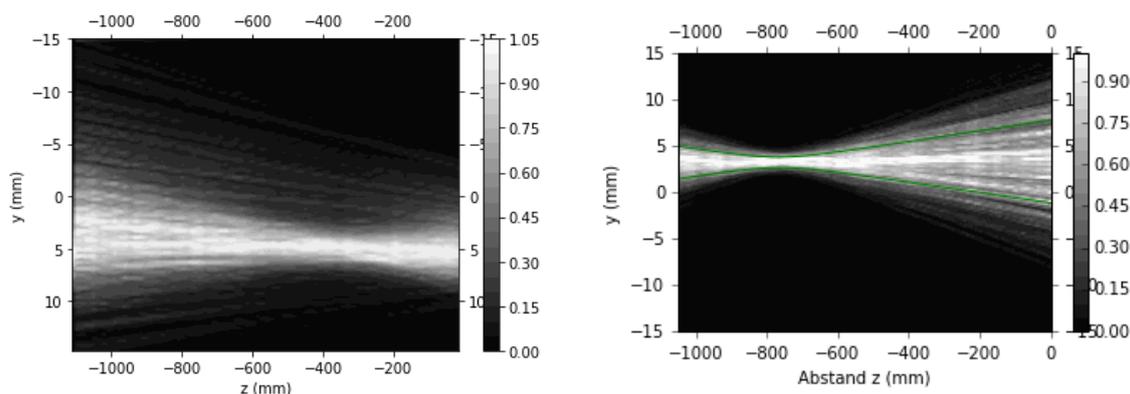
Tabelle 5.2.: Transmissionen für die Massen 273u bis 277u bei der beschriebenen Simulation.

Der Strahlengang der Massenseparation ist in Abbildung 5.13 ersichtlich.

5.4. Vergleich mit Matrizenrechnung

Ionenoptische Berechnungen für den Magneten können, wie in Kapitel 2.1.3 „Ablenk- und Analysemagnet“ beschrieben, auch mithilfe von Matrizenrechnungen bewerkstelligt werden. Diese Berechnungen haben den Vorteil, dass die Berechnung weit weniger rechenintensiv ist, als eine SIMION-Simulation. Wie im einführenden Kapitel beschrieben handelt es sich dabei allerdings nur um eine Näherung für ideale Bedingungen (homogenes Magnetfeld, etc), wodurch Abweichungen zur Realität entstehen können. Oft reicht dies für eine erste Abschätzung aus.

Für den Vergleich zwischen der SIMION-Simulation und der Matrizenrechnung werden Ionen entsprechend einer Phasenraummessung erzeugt und die Strahlprofile zwischen Magneten und Kühler aufgrund der Simulation beziehungsweise der Matrixtransformationen verglichen. Dabei kann bei einer der beiden Berechnungen ein Waist nach dem Magneten auftreten, während das bei der anderen nicht der Fall ist. So ist es zum Beispiel für das Strahlprofil, welches aus dem gemessenen Phasenraum eines Kohlenstofftargets resultiert. Hier kann für die Matrixtransformation ein Waist zwischen Ablenkmagnet BMI1 und Kühler festgestellt werden, während dieses bei der SIMION-Simulation nicht auftritt. Die Transformationsmatrix für den Magneten BMI1 wurde dabei aus den zur Verfügung stehenden technischen Daten, siehe auch 2.1, generiert. Zum Vergleich sind die beiden Strahlprofile für die x-Achse in Abbildung 5.14 dargestellt.



(a) Strahlprofil für die x-Achse zwischen BMI1 und Kühler berechnet aus einer SIMION-Simulation. (b) Strahlprofil für die x-Achse zwischen BMI1 und Kühler berechnet mittels Matrizenrechnung.

Abbildung 5.14.: Das Strahlprofil zwischen dem Ablenkmagneten BMI1 und dem Kühler berechnet mittels einer SIMION-Simulation und mithilfe von Matrizenrechnung. Die Position der Strahltaillen ist bei den beiden Berechnungswegen unterschiedlich. Weiters hat der Strahl innerhalb dieses Beamline-Abschnittes eine unterschiedliche Richtung, je nach Berechnungsweg.

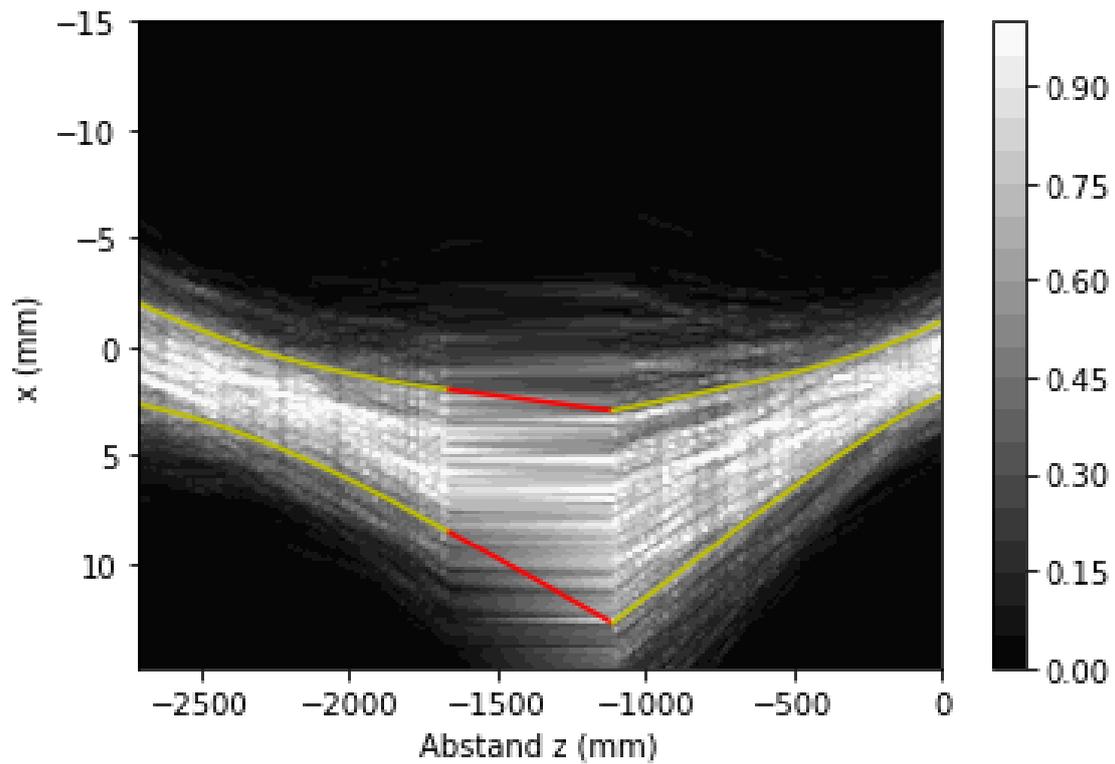
5.4.1. Reduzierung des Modells zu Matrizen

Um die weniger rechenintensiven Berechnungen durch Matrizenrechnung erreichen zu können, aber die Form der SIMION-Simulation zu erhalten werden Transformationsmatrizen anhand der SIMION-Simulation bestimmt. Diese Matrizen, welche sowohl die Ablenkung, als auch die Kantenfokussierung beinhalten, sind in 5.1 und 5.2 ersichtlich sind.

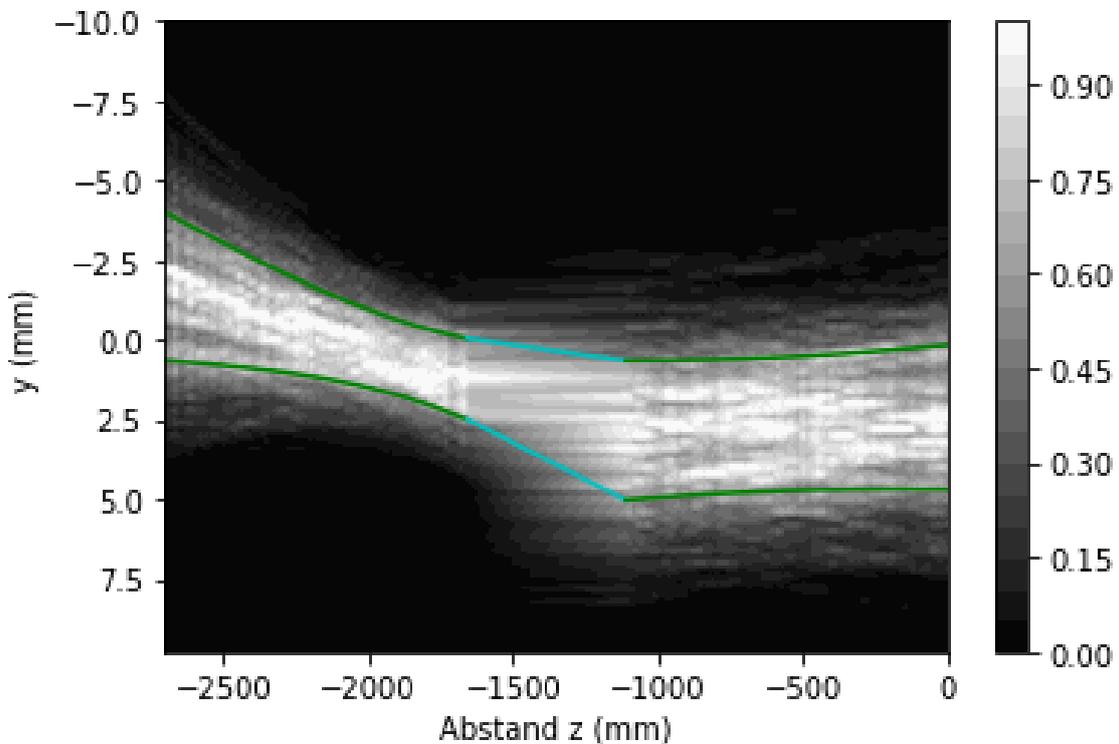
$$M_x = \begin{pmatrix} 1,089 & 447,392 \text{ mm rad}^{-1} \\ -1,512 \cdot 10^{-3} \text{ rad mm}^{-1} & 2,969 \cdot 10^{-1} \end{pmatrix} \quad (5.1)$$

$$M_y = \begin{pmatrix} 0,933 & 613,052 \text{ mm rad}^{-1} \\ -1,104 \cdot 10^{-3} \text{ rad mm}^{-1} & 0,350 \end{pmatrix} \quad (5.2)$$

Mithilfe dieser Matrizen kann für gemessenen Phasenräume, siehe auch Abschnitt 4.2.1 „Aus der Quelle S2“, das Strahlprofil zwischen dem Schlitz Slt S2-1 und der Injection-Aperture des Kühlers berechnet werden. Für ein Kohlenstoff-Target ist das Strahlprofil in 5.15 ersuchtlich, welches mittels Matrizenrechnung für den Bereich zwischen Slt S2-1 und Kühler ermittelt wurde. Für die Messung eines Cäsiumtargets das das Strahlprofil in Abbildung 5.16 zu sehen. Für ein Hafniumtarget ist das Strahlprofil in 5.17 erischtlich.

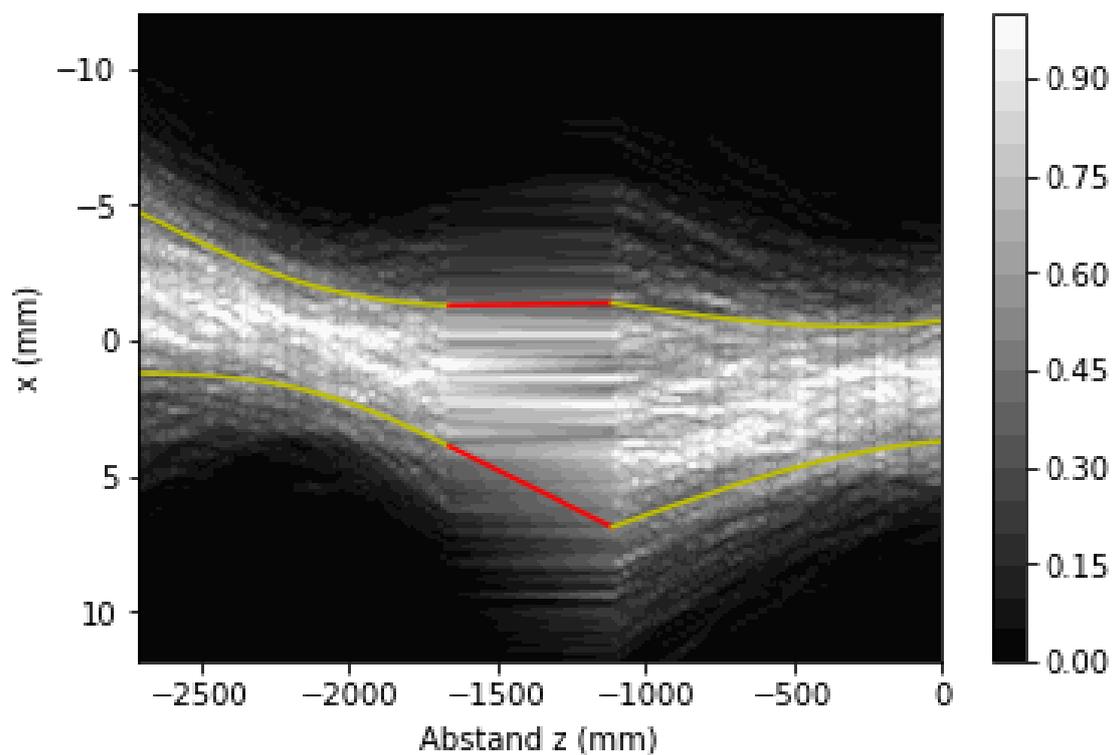


(a) Strahlprofil für die x-Achse

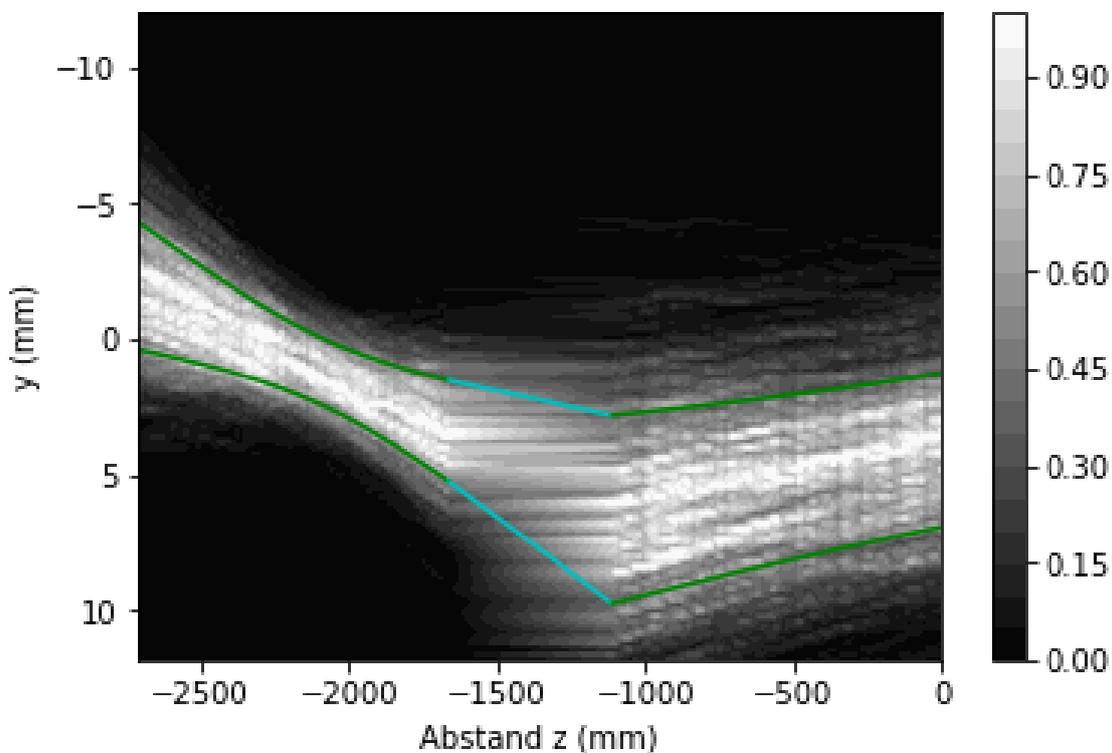


(b) Strahlprofil für die y-Achse

Abbildung 5.15.: Strahlprofil zwischen den Schlitzen Slit S2-1 und dem Kühler, berechnet aus der Phasenraummessung eines Kohlenstoff-Targets. Bei $z = 0$ mm befindet sich die Injection-Aperature des Kühlers, bei $z = -1110$ mm bis $z = 1599.7787$ befindet sich der Magnet BMI1. Innerhalb der gelben und roten beziehungsweise grünen und blauen Linien befindet sich der 1σ -Bereich der Strahlintensität. Die rote und blaue Linie zeigen außerdem den Bereich des Ablenkmagneten BMI1 an.

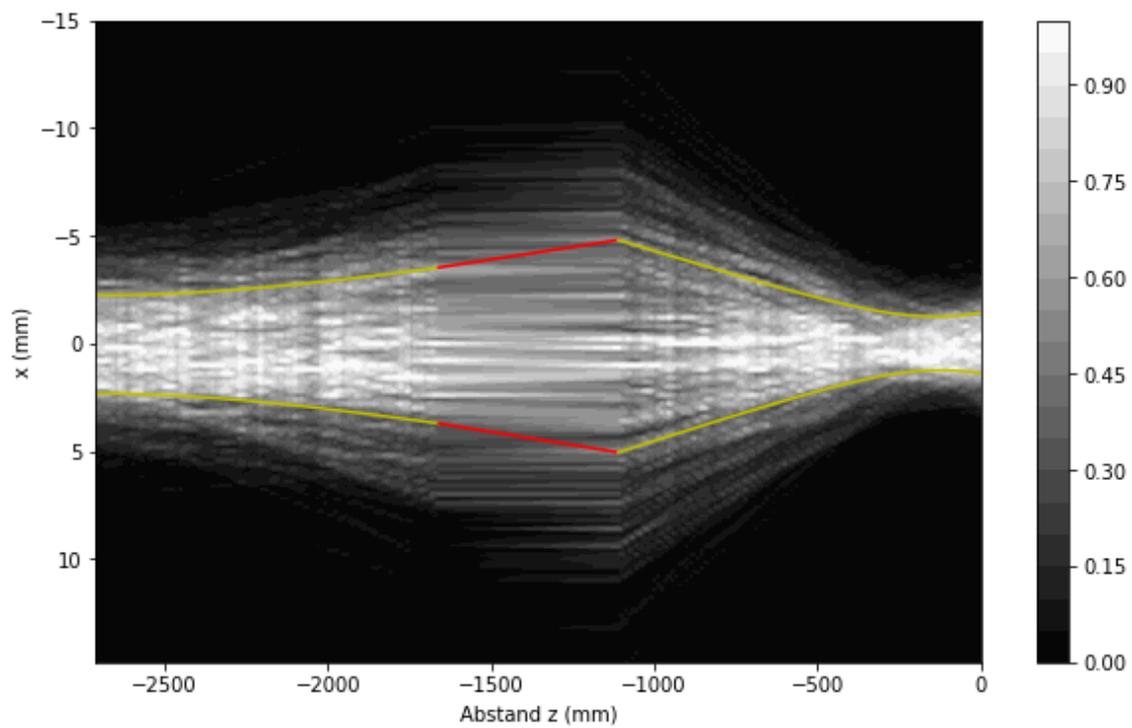


(a) Strahlprofil für die x-Achse

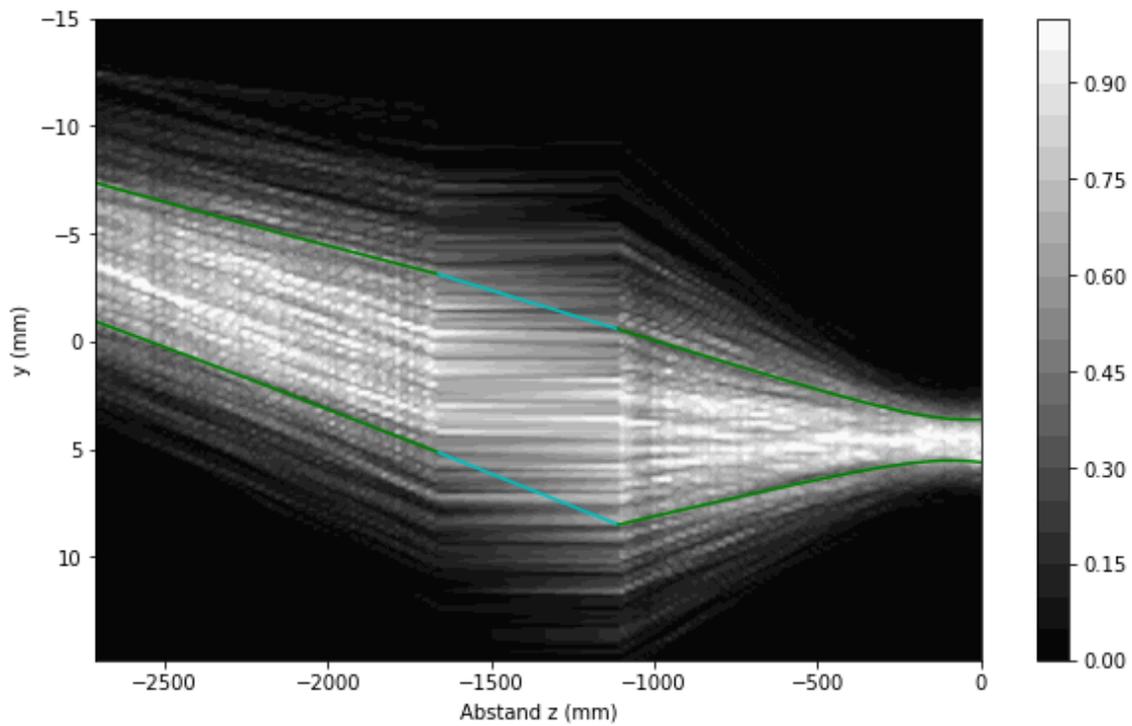


(b) Strahlprofil für die y-Achse

Abbildung 5.16.: Strahlprofil zwischen den Schlitzen Slt S2-1 und dem Kühler, berechnet aus der Phasenraummessung eines Cäsium-Targets. Bei $z = 0$ mm befindet sich die Injection-Aperature des Kühlers, bei $z = -1110$ mm bis $z = 1599.7787$ befindet sich der Magnet BMI1. Innerhalb der gelben und roten beziehungsweise grünen und blauen Linien befindet sich der 1σ -Bereich der Strahlintensität. Die rote und blaue Linie zeigen außerdem den Bereich des Ablenkmagneten BMI1 an.



(a) Strahlprofil für die x-Achse



(b) Strahlprofil für die y-Achse

Abbildung 5.17.: Strahlprofil zwischen den Schlitzen Slit S2-1 und dem Kühler, berechnet aus der Phasenraummessung eines Hafnium-Targets. Bei $z = 0$ mm befindet sich die Injection-Aperature des Kühlers, bei $z = -1110$ mm bis $z = 1599.7787$ befindet sich der Magnet BMI1. Innerhalb der gelben und roten beziehungsweise grünen und blauen Linien befindet sich der 1σ -Bereich der Strahlintensität. Die rote und blaue Linie zeigen außerdem den Bereich des Ablenkmagneten BMI1 an.

6. Optimierungen

In diesem Abschnitt werden Optimierungen dargelegt, welche an der Beamline von VERA vorgenommen wurden und ihre Verwendung dargelegt.

6.1. Massenauflösung an BMI1 durch Slit I1-2

Bei einer Messung eines Hafnium-Targets wurde der neue Schlitz Slit I1-2, siehe dazu auch Abschnitt 3.4 „Blende (Slit-I1-2)“, zur Optimierung eingesetzt. Dabei können bereits am Faraday-Cup FC I1-1 einzelne Massen selektiert werden, sodass die Strahlrichtung durch den Ablenkmagneten BMI1 für die gewählte Masse in Richtung des Kühlers eingestellt werden kann.

In Abbildung 6.1 ist die Massenseparation am Faraday-Cup FC I1-1 zu sehen. Dabei ist die Intensität des Strahls in Abhängigkeit zum Strom am Ablenkmagneten BMI1 ohne vorgeseztem Schlitz Slit I1-2 rot und jene mit 2 mm breitem Schlitz in Slit I1-2 schwarz dargestellt. Beim Vergleich der beiden Graphen kann erkannt werden, dass nur noch einzelne Massen durch den Schlitz Slit I1-2 in den Faraday-Cup eingeschossen werden.

Selbiges ist in der Graphik 6.2 für die Transmission durch den Kühler aufgetragen. Dabei ist der Strom des Strahls in Abhängigkeit zum Strom am Ablenkmagneten BMI1 ohne vorgesezten Schlitz rot und jener mit 2 mm breitem Schlitz in Slit I1-2 schwarz dargestellt. Auch aus dieser Graphik ist ersichtlich, dass für die Transmission durch den Kühler eine einzelne Masse durch den Schlitz Slit I1-2 ausgewählt werden kann.

Durch diesen Schlitz ist es also möglich, dass eine Vorauswahl der Massen, welche in den Kühler eingeschossen werden, zu treffen. Es kann bereits am Faraday-Cup FC I1-1 die Intensität des Strahls mit Teilchen einer Masse gemessen werden. Dadurch wird das Problem der zusätzlich eingeschossenen Nachbarmassen, welches auch durch eine Simulation in 5.3.3 „Simulation von Nachbarmassen“ beschrieben wird, umgangen. Außerdem wird es durch die Blende möglich den Strahl mit nur einer Masse an FC I1-1 horizontal zu zentrieren.

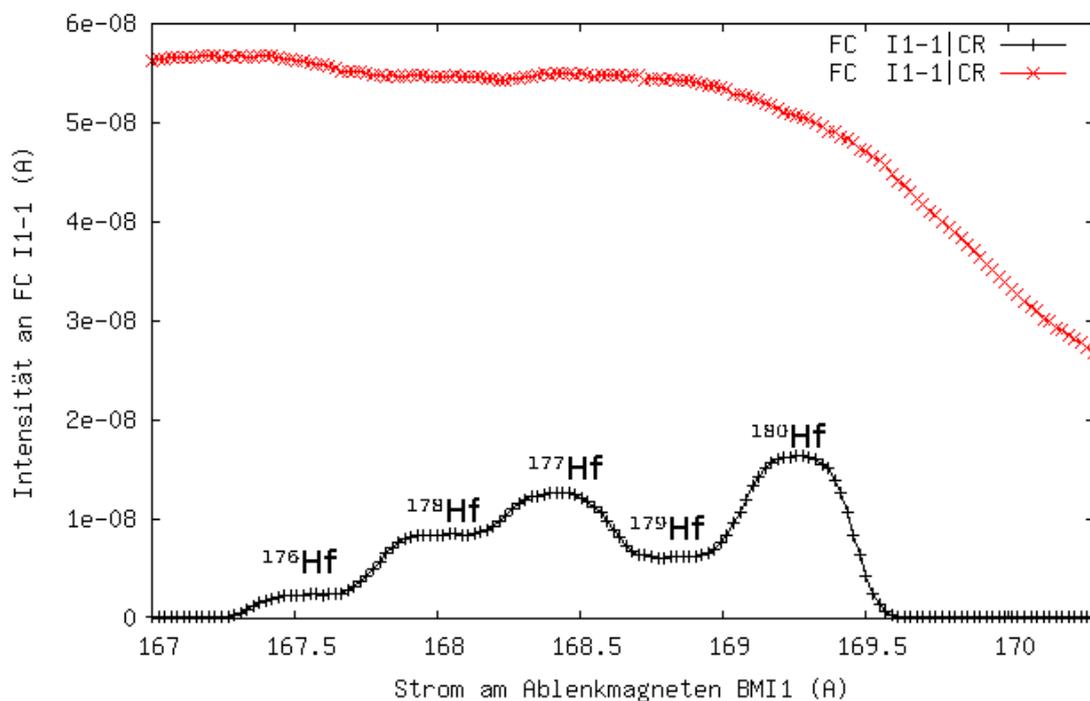


Abbildung 6.1.: Vergleich der Intensitäten des Strahls nach dem Kühler mit 2mm-Schlitz Slit I1-1 (in schwarz dargestellt) und ohne Schlitz (in rot dargestellt). Gemessen werden dabei die Intensitäten am Faraday-Cup FC I1-1 bei schrittweiser Erhöhung des Stroms am Ablenkmagneten BMI1.

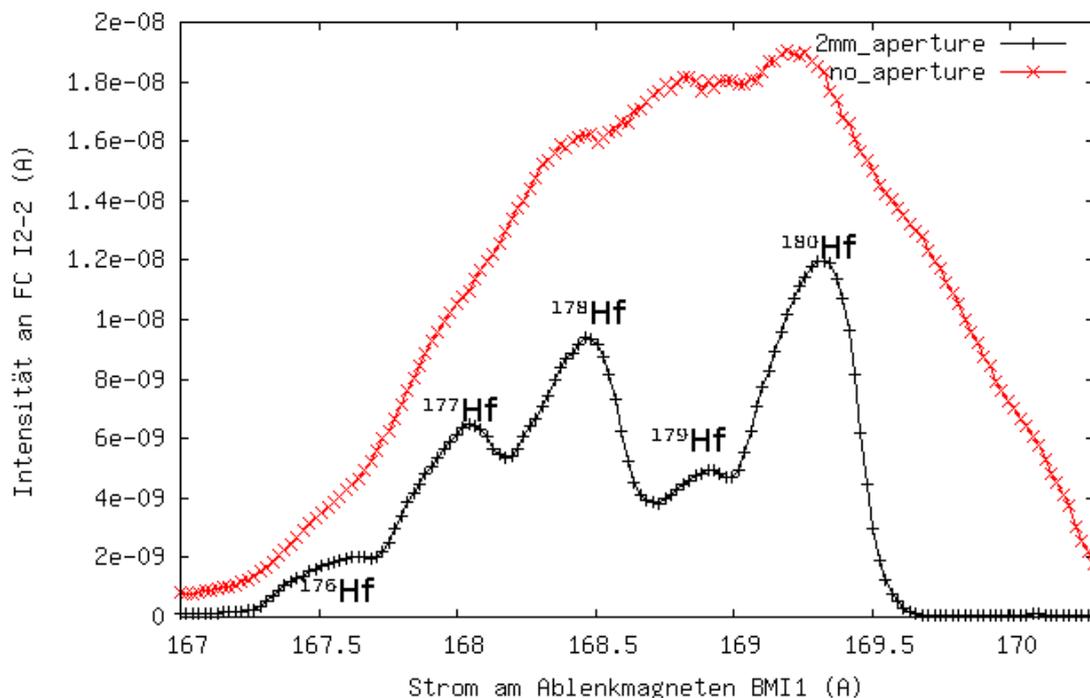


Abbildung 6.2.: Vergleich der Intensitäten des Strahls nach dem Kühler mit 2mm-Schlitz Slit I1-1 (in schwarz dargestellt) und ohne Schlitz (in rot dargestellt). Gemessen werden dabei die Intensitäten am Faraday-Cup FC I2-2 bei schrittweiser Erhöhung des Stroms am Ablenkmagneten BMI1.

6.2. Ausrichtung der Quelle S2

Durch die neuen Höhenmarkierungen, siehe auch Abschnitt 3.1.1 „Nullpunktsetzung und neue Höhenmarkierungen“ konnte im Zuge einer Reinigung der Quelle S2 diese neu ausgerichtet werden, sodass die Abweichungen, welche im Abschnitt 3.1.4 „Vermessung der Quellenposition“ beschrieben werden und bei den Phasenraummessungen in 4.2.1 „Aus der Quelle S2“ beobachtet werden, ausgeglichen werden können. Dazu wurde neben einem Linienlaser, welcher gemeinsam mit den Höhenmarkierungen die Höhe der Quelle bestimmt, auch ein Lot verwendet, welches entlang der idealen Strahlachse aufgehängt wurde. Dieser Aufbau zur Ausrichtungsänderung ist in Abbildung 6.3 ersichtlich.

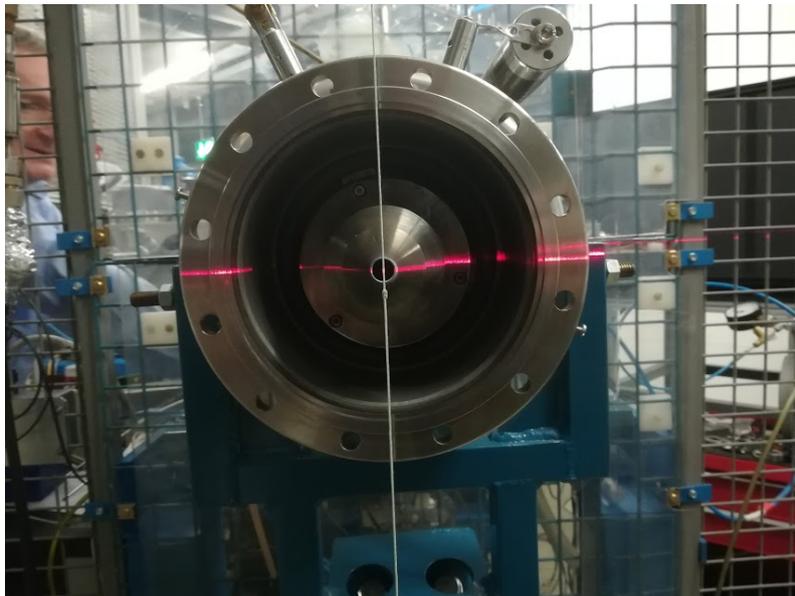


Abbildung 6.3.: Fadenkreuz aus Linienlaser und Lot, welches zur Ausrichtung der Quelle S2 verwendet wurde.

7. Diskussion der Simulations- und Messergebnisse

In diesem Kapitel werden die Simulations- und Messergebnisse zusammengefasst und an passenden Stellen miteinander verglichen um so ein möglichst umfassendes Bild zu schaffen.

7.1. Grundsätzliche Ergebnisse der Phasenraummessungen

Die Phasenraummessungen sind bei verschiedenen ionenoptischen Einstellungen der Quelle S2 durchgeführt worden. Die gewählten Parameter waren immer diejenigen, die auch für Messungen verwendet werden, jedoch bringt dies die Schwierigkeit mit sich, dass die Strahlpositionen und Strahltaillen für die verschiedenen Messungen an unterschiedlichen Stellen berechnet werden können. Außerdem wurde für den Targetwechsel eine Änderung des Phasenraums festgestellt, was eine weitere Schwierigkeit in der Vergleichbarkeit der Messungen mit sich bringt.

7.2. Vor dem Ablenkmagneten BMI1

Die Berechnung von Strahlpositionen und Strahltaillen erfolgt durch Matrizenrechnung aus den Phasenraummessungen zwischen Quelle S2 und dem Ablenkmagneten BMI1.

7.2.1. Strahlposition

Die Strahlposition entlang der x-Achse ist für jedes gemessene Target stark unterschiedlich. Die Strahlbreite liegt jedoch an der Stelle der Schlitzes Slt S2-1 bei keinem der Targets unter 3 mm.

Die Strahlposition entlang der y-Achse liegt für alle gemessenen Targets an der Position der Schlitzes Slt S2-1 zu niedrig. Die genaue Position entlang der y-Achse ist bei den Messungen unterschiedlich, der Strahlmittelpunkt liegt jedoch bei nie über $y = -1,5$ mm.

Dies legt nahe, was auch in der Untersuchung der Quellenposition 3.1.4 „Vermessung der Quellenposition“ ermittelt wurde, dass die Strahlen nicht symmetrisch rund um die Sollstrahlachse die Quelle S2 verlassen.

7.2.2. Strahltaillen

Die Intensitätsverteilung innerhalb des Phasenraums ist für jede Messung stark unterschiedlich. Daraus folgt, dass keine verallgemeinerte Aussage über Waists zwischen der Quelle und dem Ablenkmagneten BMI1 getroffen werden können. Die Positionen sind in der Graphik 7.1 gemeinsam mit der nominellen Bildposition des Ablenkmagneten BMI1 dargestellt. Wie in dieser Abbildung ersichtlich ist, liegen die Strahltaillen für die x- und die y-Achse nicht unbedingt bei der gleichen Position.

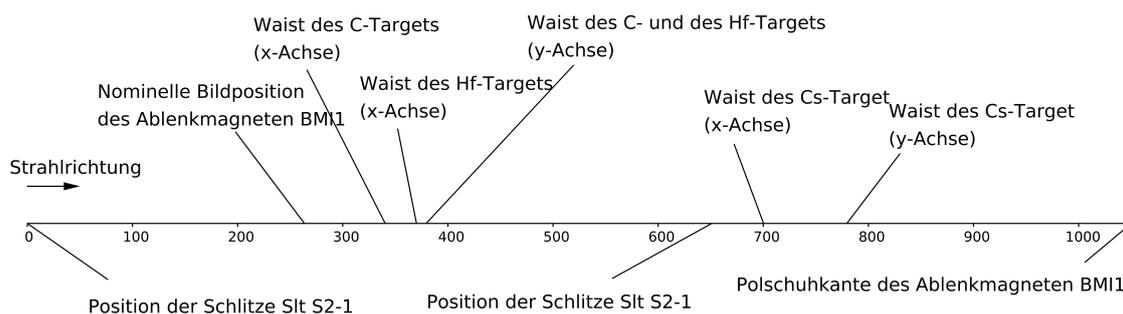


Abbildung 7.1.: Schematische Darstellung der Waist-Positionen für die verschiedenen gemessenen Targets zwischen der Quelle S2 und dem Ablenkmagneten BMI1.

7.3. Nach dem Ablenkmagneten BMI1

Für die Berechnung des Strahlprofils und damit sowohl von Strahlposition, als auch Strahltaillenpositionen werden die SIMION-Simulationen und die verfügbaren Messungen nach dem Ablenkmagneten genutzt.

7.3.1. Strahlposition

Für die Phasenraummessungen vor dem Ablenkmagneten befindet sich für die x-Achse die berechnete Strahlmitte an der Stelle der Injection-Aperture des Kühlers zwischen $x = 0$ mm und $x = 4$ mm. Für die y-Achse hingegen liegt die Strahlmitte des Strahls zwischen 2,5 mm und 5,5 mm. Aus dieser Verschiebung des Strahls entlang der y-Achse resultiert, dass ein Teil des Strahls an den Linsen INJHI und INJLO, sowie an der Injection-Aperture abgefangen wird.

Dem gegenüber stehen die Phasenraummessungen nach dem Ablenkmagneten BMI1, bei dem festgestellt werden konnte, dass die Strahlmitte bei $x = (-3,0 \pm 0,5)$ mm und $y = (10,0 \pm 0,5)$ mm an der Stelle der Schlitze Slit I1-2. Dabei wurde die Strahlmitte so festgestellt, dass dazu eine Schlitzbacke so weit in den Strahl geschoben wurde, bis der gemessene Strom um die Hälfte an FC I1-1 abgenommen hat. Bei der Injection-Aperture des Kühlers hingegen liegen

die Strahlmitten, welche aus den Phasenraummessungen berechnet werden, bei $x = 5 \text{ mm}$ und $y = -15 \text{ mm}$. Die Strahlrichtung ist in diesem Abschnitt also nicht parallel zum Sollstrahl ausgerichtet.

7.3.2. Strahltaillen

Für den Abschnitt zwischen Ablenkmagneten BMI1 und Kühler sind Simulationen und Berechnungen getätigt worden, die auf den Phasenraummessungen vor dem Magneten BMI1 basieren. Außerdem ist nach dem Ablenkmagneten BMI1 eine Phasenraummessung aufgenommen worden, aus der ebenfalls ein Strahlprofil für diesen Abschnitt berechnet werden kann. Die Strahltaillenpositionen sind in der Abbildung 7.2 eingezeichnet. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Waists für das Kohlenstoff und das Cäsiumtarget nicht eingezeichnet sind, da der Strahl laut der Simion-Simulation einen sehr stark parallelen Verlauf aufweist, sodass keine eindeutige Bestimmung eines Waist möglich ist. Für jene Messungen, bei denen der Phasenraum zwischen der Quelle S2 und dem Ablenkmagneten BMI1 aufgenommen wurde, wird eine SIMION-Simulation zur Berechnung des Phasenraums zwischen Magneten BMI1 und Kühler herangezogen.

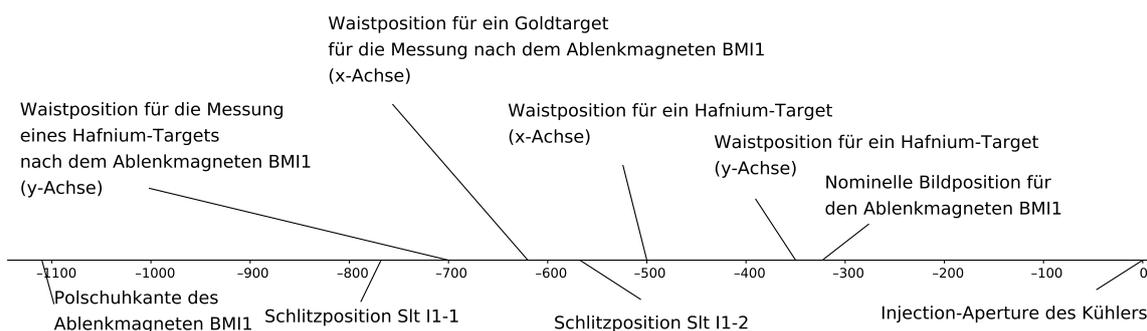


Abbildung 7.2.: Waistpositionen zwischen dem Ablenkmagneten BMI1 und der Injection-Aperture des Kühlers.

Es kann hierbei festgestellt werden, dass für den gemessenen Phasenraum eines Hafnium-Targets die Strahltaille der y -Achse nach dem Magneten BMI1 am nächsten an die Position der nominellen Bildposition des Ablenkmagneten BMI1 kommt, obwohl vor dem Magneten das Waist für die x -Achse näher an die nominelle Bildposition herangekommen wäre.

Die Strahltaillen zwischen Ablenkmagneten BMI1 und Kühler liegen relativ weit verteilt, über einen Raum von 350 mm. Für optimale Transmissionen durch den Kühler sollten diese jedoch möglichst nahe an der nominellen Bildposition des Magneten BMI1 liegen.

Der Schlitz Slt I1-2 müsste noch weiter in die Richtung des Kühlers versetzt werden, damit dessen Position mit jener der Strahltaille des Hafnium-Targets übereinstimmt, was der idealen Position entsprechen würde. Dies ist jedoch nicht möglich, da in diesem Bereich der Faraday-Cup FC I1-1 liegt. Für die Messung nach dem Ablenkmagneten BMI1 liegt der Schlitz Slt I1-2

im Gegenzug zu weit hinten. Der Schlitz Slit I1-2 liegt also genau zwischen den berechneten Strahltaillenpositionen von den Messungen vor und nach dem Ablenkmagnet BMI1.

7.4. Injektion in den Kühler

Für die Berechnung der Injektion in den Kühler und die Transmission durch selbigen wird eine SIMION-Simulation verwendet.

7.4.1. Injektion von Nachbarmassen

Durch die Simulation des Phasenraums ab der Stelle des Slit S2-1 kann die Massenseparation durch den Ablenkmagneten BMI1 ermittelt. Dabei kann beobachtet werden, dass bei einem Phasenraum, welcher bei der Messung eines Hafniumtargets festgestellt werden kann, ab einer Masse von 128 bereits eine Nachbarmasse und bei der Masse von 275, welche der Ionenmasse bei der Messung von Hafnium entspricht, 2 Nachbarmassen in den Kühler eingeschossen werden können. Dies kann durch die Optimierung der Massenauflösung am Ablenkmagneten BMI1 durch die Blende Slit I1-2 vermieden werden. Einzelheiten zu dieser Messung sind auch im Kapitel 6.1 „Massenauflösung an BMI1 durch Slit I1-2“ ersichtlich.

7.4.2. Transmission durch den Kühler

Die Transmission durch den Kühler ist von mehreren Faktoren abhängig. Einerseits von der Strahlform und andererseits auch von den Linseneinstellungen des Kühlers. Dabei können die idealen Spannungen an den Linsen durch eine Simulation festgestellt werden. Dies wird in im Kapitel 5.3.2 beschrieben. Laut dieser Simulation liegen die idealen Einstellungen bei $U_{INJHI} = 6000\text{ V}$ und $U_{INJLO} = 1200\text{ V}$. Dem gegenüber stehen die Einstellungen, die für Messungen verwendet werden. Diese liegen nach der Optimierung bei $U_{INJHI} = 4560\text{ V}$ und $U_{INJLO} = 1170\text{ V}$.

Die simulierte Transmission entspricht dabei jener, die auch bei Messungen festgestellt werden konnte. Sowohl für die gesuchte, als auch für die Nachbarmassen.

Die Transmission ist auch stark vom Phasenraum abhängig. Vor allem durch die Position entlang der y -Achse wird die Transmission stark beeinflusst. Dabei wird vor allem durch den geringen Radius der INJHI-Linse und der Injection-Aperture des Kühlers die Transmission gesenkt. Dies ist auch in Abbildung 5.10 dargestellt. Wird der Phasenraum eines Hafnium-Targets entlang der y -Achse so parallel verschoben, dass der Mittelpunkt der Phasenraumellipse den Nullpunkt der y/y' -Ebene bezeichnet, so wird ein Strahl mit geringerer Steigung entlang der y -Achse für die Beamline erzeugt. Dadurch kann die Transmission von 39,9% zu 85,4% bei gleichen ionenoptischen Einstellungen des Kühlers erhöht werden.

Aus Simulationen für den Kühler ist außerdem bekannt, dass ein Transmissionsmaximum erreicht werden kann, wenn eine Strahltaille 30 cm vor der Injection-Aperture des Kühlers

auftritt. Wie bereits beschrieben treten die Waists nach dem Ablenkmagneten BMI1 zu nahe bei selbigem auf, sodass diese optimale Position dafür verfehlt wird. Dies tritt sowohl bei den ionenoptischen Berechnungen durch Transformationsmatrizen für die Messung nach dem Ablenkmagneten BMI1, als auch für die Simulationen für die gemessenen Phasenräume aus der Quelle S2 auf.

8. Conclusio und Ausblick

Die Intention dieser Diplomarbeit war es den Strahlengang in der ILIAMS-Beamline durch ionenoptische Berechnungen zu simulieren um ein Verständnis des Strahlenganges in diesem Abschnitt zu erlangen und ihn je nach auftretenden Möglichkeiten zu optimieren.

Für Phasenraummessungen und zur weiteren Verwendung als Diagnoseinstrument wurden in Zusammenarbeit mit der hauseigenen Werkstatt neue magnetgeführte Schlitze gefertigt, die ohne Vakuumdurchführung auskommen. Diese können zur weiteren Verwendung mit Motoren zur Steuerung ausgestattet werden, sodass eine vollautomatische Phasenraummessung möglich wird. Auch die rasche Überprüfung der Strahlposition wird mit diesen Schlitzen ermöglicht. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auch ein Programm zur Auswertung der Phasenraummessung entwickelt. Durch die neuen Schlitzsysteme konnten Phasenraummessungen an verschiedenen Targets zwischen der Quelle S2 und dem Ablenkmagneten BMI1, sowie zwischen dem BMI1 und dem Kühler durchgeführt werden.

Diese Messungen gaben zusammen mit ersten ionenoptischen Berechnungen Aufschluss über die Position im Phasenraum des Strahls entlang der Beamline. Die gemessenen Phasenräume konnten durch ein eigens entwickeltes Programm in Simulationen des Programms SIMION eingebunden werden, sodass der simulierte Strahl möglichst mit den Messungen übereinstimmen.

Das einsetzen des Ablenkmagneten BMI1 in die SIMION-Simulationen ermöglichte es die Massenseparation durch den Magneten BMI1 nachzuvollziehen. Dadurch wurde es möglich zu simulieren, ob und wie viel der Nachbarmassen einer bestimmten Masse, zum Beispiel jener von $^{180}\text{HfF}_5^-$, in den Kühler injiziert werden.

Mittels eines zusätzlichen Schlitzes Slit I1-2, welcher zwischen Magnet und Kühler eingesetzt wurde, ist es möglich die Massenselektion durch den Ablenkmagneten BMI1 zu optimieren. Dadurch konnte erreicht werden, dass nur eine einzelne Masse in den Kühler injiziert wird.

Die ILIAMS-Beamline wurde außerdem im Bezug auf die Höhe neu vermessen, wodurch es möglich wurde die Höhe der Quelle S2 zu optimieren, wodurch die Positionsabweichung vom Sollstrahl in der Beamline nach der Quelle reduziert werden kann.

Mit dieser Arbeit wurde die Grundlage für weitere Optimierungen anhand ionenoptischer Berechnungen für die Beamline von ILIAMS geschaffen. Dabei bilden die Phasenraummessungen, welche nun an verschiedenen Stellen möglich sind, die Grundlage für umfassende ionenoptische Berechnungen und Simulationen. So wären auch Phasenraummessungen nach dem Kühler durch magnetisch geführte Schlitze möglich, sodass die bisherigen Berechnungen überprüft werden können.

KAPITEL 8. Conclusio und Ausblick

Für weitere Ergebnisse zur Optimierung des Strahls durch ionenoptische Berechnungen ist es allerdings nötig, dass noch weitere Phasenraummessungen, auch mit den nun vorhandenen Diagnoseinstrumenten, durchgeführt werden. Insbesondere wären Messungen, die sich mit der Konstanz des Phasenraum beim Targetwechsel beschäftigen, möglich.

A. Anhang A

A.1. Skript zur Phasenraummessung

Dieses Skript ist dazu ausgelegt, dass Phasenraummessungen mit den Schlitzen Sl1 S2-1 und Sl1 S2-2, sowie dem Faraday-Cup FC I1-1 vermessen werden kann. Dazu wird die Phasenraummessmethode, welche in Abschnitt 4.1 „Messverfahren“ dargelegt wird, verwendet. Hier ist exemplarisch das Skript für die Verwendung der x+-Backe eingefügt, es kann aber äquivalent für die anderen Schlitzbacken adaptiert werden.

```
1 #!/bin/bash
  . $SCRIPTDIR/scriptheader

  fsetpar "Sl1 S2-1|xpMovC" 3
  fwaitpar "Sl1 S2-1|xpPosR" -gt 7.0
6 fsetpar "Sl1 S2-1|xpMovC" 1
  while true ; do
    freadxpar "Sl1 S2-1|xpPosR" PosR \
    "L:SRS I1-2|CR" CR ;
    echo "$PosR $CR" ;
11 if fttest $PosR -lt -2.55 ; then
    break ;
    fi ;

    done ;
16 fsetpar "Sl1 S2-1|xpMovC" 3
  fwaitpar "Sl1 S2-1|xpPosR" -gt 7.0
  fsetpar "Sl1 S2-1|xpMovC" 0
```

A.2. Python Programm zur Ionenerzeugung für SIMION

Für eine vorliegende Phasenraummessung können mittels dieses Programmes Ionen für das Simulationsprogramm SIMION 8.1 erzeugt werden, die entsprechend der gemessenen Daten verteilt sind. Dazu werden Punkte entlang der x-Achse und der y-Achse normalverteilt. Dabei wird μ als Zentrum der Phasenellipse und σ entsprechend der Messung gesetzt. Die Ionenrichtung wird über zwei Regressionsgeraden bestimmt, welche anhand der Phasenraummessung festgelegt wird. Normal zu dieser Regressionsgerade wird der Abstand zu dieser mittels Normalverteilung pseudozufallsgeneriert.

```
# Author: Paul Wasserburger
2 # Programm zur Erstellung von Ionen, die zur Verwendung in einer SIMION-Simulation mit graphischer Oberfläche
# Time of Birth der Ionen wird zufallsgeneriert
# Position entlang der x-Achse und y-Achse wird zufallsgeneriert (Normalverteilung um das Zentrum)
# Position normal zur Regressionsgerade wird zufallsgeneriert (Gauß um die Gerade)

7 # 02/2018

import tkinter as tk
import math, numpy, scipy.stats
import random as rand
12 import matplotlib.pyplot as plt
```

KAPITEL A. Anhang A

```
import os
import numpy as np

17 n = 1000 # Anzahl der Ionen, welche erzeugt werden sollen

# ===== Nötige Parameter des Aufbaus =====
RF_Frequ = 1.4 # Frequenz der RF-Elektroden [Mhz]

22 Absbm = 1460 # Abstand des BMI zur injection

# ===== Nötige Parameter für das einzelne Ion =====
ion_TOB = 0 # Time of Birth [usec]
ion_m = 275 # Masse in [u], 36 für ein Chlor-Ion
27 ion_charge = -1 # Ladung des Ions [e]
ion_x = -1460 # Startposition x [mm]
ion_y = 0 # Startposition y [mm]
ion_z = -1400 # Startposition z [mm] - Position wird festgelegt
ion_az = 0 # Azimuthwinkel des Ions [°]
32 ion_el = 0 # Polarwinkel des Ions [°]
ion_KE = 30000 # Kinetische Energie des Ions [eV]
ion_cwf = 1 #
ion_color = 0 # 3 für blaue Ionen in der Simion-Simulation

37 # ===== Speicherort =====
Datei = "Datei.ION"
datei = open(Datei, "a")
datei.close()
os.remove(Datei)

42 # ===== Variablen für den Programmablauf =====
b,c,d,e = [],[],[],[]

47 # ===== Funktionen für den Programmablauf =====
def f_x(x):
    global Variablen
    k=float(Variablen[6][2].get())*x+float(Variablen[6][4].get())
    k=k*10**(-3)
52 return k

def f_y(y):
    global Variablen
    k=float(Variablen[7][2].get())*y+float(Variablen[7][4].get())
57 k=k*10**(-3)
    return k

# ===== Funktionsdefinition =====

62 def delete_ions():
    global b,c,d,e
    b,c,d,e=[],[],[],[]
    os.remove(Datei)

67 def Generiere(g_x_a,g_y_a,g_z_a):
    global Variablen
    global b, c, d, e

72 # ===== Ionenstartzeit wird zufallsgeneriert =====

g_ion_TOB = rand.random() / (RF_Frequ * 10**6)

77 g_x=numpy.random.normal(g_x_a, float(Variablen[3][4].get()),None)
g_y= numpy.random.normal(g_y_a, float(Variablen[4][4].get()),None)
g_z=g_z_a

82 # ===== Azimuthwinkel =====

delta_steigung_x = numpy.random.normal(0, float(Variablen[8][2].get())*10**(-3),None)
g_x = g_x + delta_steigung_x*(f_x(1)-f_x(0))/math.sqrt((f_x(1)-f_x(0))**2+1**2)
steigung_x = f_x(g_x)+delta_steigung_x*1/math.sqrt((f_x(1)-f_x(0))**2+1**2)

87 # Berechnung mit einer dünnen Linse, die Vorgelegt wird
if int(vbm.get()) == 1 and float(Variablen[12][2].get())!=0:
    # ===== Matrix für eine dünne Linse, die „vor“ die Ionen positioniert werden kann, um das Waist vor
    dem BMI1 zu verschieben
    R= np.matrix([[1,0],[1/float(Variablen[12][2].get()),1]])
92 xx = R * np.array([[-(g_x+Absbm)*10**(-3)],[steigung_x]])
    steigung_x = float(xx[1])

g_phi = math.atan(steigung_x)
g_ion_az = -math.pi/2 + g_phi

97 # ===== Elevationsswinkel =====

delta_steigung_y = numpy.random.normal(0, float(Variablen[9][2].get())*10**(-3), None)
g_y = g_y + delta_steigung_y*(f_y(1)-f_y(0))/math.sqrt((f_y(1)-f_y(0))**2+1**2)
102 steigung_y = f_y(g_y)+delta_steigung_y*1/math.sqrt((f_y(1)-f_y(0))**2+1**2)
```

A.2. Python Programm zur Ionenerzeugung für SIMION

```
if int(vbm.get()) == 1 and float(Variablen[12][2].get())!=0:
    # ===== Matrix für eine dünne Linse, die „vor“ die Ionen positioniert werden kann, um das Waist vor
    # dem BMI1 zu verschieben
    R= np.matrix([[1,0],[1/float(Variablen[12][2].get()),1]])
    yy = R * np.array([[g_y]*10**-3],[steigung_y])
107     steigung_y = float(yy[1])
    g_omega = math.atan(steigung_y)
    ,,,
    if g_phi > 0: # hier bin ich mir nicht sicher
        g_phi_1 = g_phi
112     else:
        g_phi_1 = math.pi - g_phi
    if g_phi != 0:
        #g_ion_el = math.atan(math.tan(g_omega)/math.sqrt(1+1/ math.tan(g_phi_1)**2))
        g_ion_el = math.atan(steigung_y/math.sqrt(steigung_x**2+1000**2))
117     else:
        ,,, g_ion_el = g_omega
    g_ion_el = math.atan(steigung_y/math.sqrt(steigung_x**2+1**2))

122 # ===== Kinetische Energie =====
    if int(kinenerg.get())==1:
        g_KE = numpy.random.normal(float(Variablen[10][2].get()),.5) # für normalverteilte KE
    elif int(kinenerg.get())==0:
        g_KE = float(Variablen[10][2].get()) # für gleich KE bei allen Ionen
127

    b.append(g_x)
    c.append(math.tan(g_phi)*10**3)
    d.append(g_y)
132     e.append(math.tan(g_omega)*10**3)
    if int(vbm.get()) == 0:
        return str(g_ion_TOB)+"",str(Variablen[1][2].get()),str(Variablen[2][2].get()),str(g_x)+"",str
            str(g_y)+"",str(g_z)+"",str(g_ion_az*180/math.pi)+"",str(g_ion_el*180/math.pi)+"",str(g_KE)+"",
            str(ion_cwf)+"",str(ion_color)+"\n"
    elif int(vbm.get()) == 1:
        return str(g_ion_TOB)+"",str(Variablen[1][2].get()),str(Variablen[2][2].get()),str(g_z)+"",str
            str(g_y)+"",str(g_x)+"",str((g_ion_az*180/math.pi)+90)+"",str(g_ion_el*180/math.pi)+"",str(
            g_KE)+"",str(ion_cwf)+"",str(Variablen[11][2].get())+"\n"
137

# Programmablauf
def Routine():
    global Variablen
    ion_mass_hm = [int(Variablen[1][2].get())-2,int(Variablen[1][2].get())+2,int(Variablen[1][2].get())-1,int(
        Variablen[1][2].get())+1,int(Variablen[1][2].get())]
142     Farben = [0,3,2,8,1]

    if int(vbm.get()) == 1:
        Variablen[6][2].set((-1)*float(Variablen[6][2].get()))
        Variablen[6][4].set(float(Variablen[6][4].get())-Absbm)*float(Variablen[6][2].get())
147

    for ion_number in range(int(Variablen[0][2].get())):
        if int(nachbarmassen.get()) ==1:

            for a in range(6):
152                 if ion_number == int(Variablen[0][2].get())*a/5:
                    Variablen[1][2].set(str(ion_mass_hm[a])) # Erhöhung der Ionenmasse nach je einem Drittel
                    Variablen[11][2].set(str(Farben[a])) # Farbänderung

            datei = open(Datei, "a")
            a = Generiere(float(Variablen[3][2].get()),float(Variablen[4][2].get()),float(Variablen[5][2].get()))
157             # print(a)
            datei.write(a)
            datei.close()

            # csv_x= open("csv_x.csv", "a")
            # csv_x.write(str(b[ion_number])+","+str(c[ion_number])+"\n")
            # csv_x.close()
162             #
            #
            if int(vbm.get()) == 0:
                f = [[b,c,"bo","x-Daten","x (mm)","dx (mm/m)",[-4,4,-15,15],[d,e,"ro","y-Daten","y (mm)","dy (mm/m)"
                    ,[-4,4,-15,15],[b,d,"go","","x (mm)","y (mm)",[-4,4,-4,4]]]
            elif int(vbm.get())==1:
167                 f = [[b,c,"bo","x-Daten","x (mm)","dx (mm/m)",[-Absbm+4,-Absbm-4,-15,15],[d,e,"ro","y-Daten","y (mm)",
                    "dy (mm/m)",[-6,4,-2,12],[b,d,"go","","x (mm)","y (mm)",[-Absbm+4,-Absbm-4,-4,4]]]
                for a in range(len(f)):
                    plt.plot(f[a][0],f[a][1],f[a][2], markersize='0.5', label=f[a][3])
                    plt.axis(f[a][6])
                    plt.xlabel(f[a][4])
172                 plt.ylabel(f[a][5])
                    plt.show()
                    linreg=scipy.stats.linregress(f[a][0],f[a][1])
                    print('y='+str(linreg[0])+'*x'+str(linreg[1]))
                    print('Geraden-Standardabweichung='+str(linreg[4]))
177                 print('x-Mittelwert='+str(numpy.mean(f[a][0]))+', std='+str(numpy.std(f[a][0])))

            #Variablen[11][2].set(str(int(Variablen[11][2].get())-5))
            Variablen[11][2].set(str(int(0)))

182     if int(vbm.get()) == 1:
        Variablen[6][4].set(float(Variablen[6][4].get())-Absbm*float(Variablen[6][2].get()))
        Variablen[6][2].set((-1)*float(Variablen[6][2].get()))
```

KAPITEL A. Anhang A

```
187 fenster = tk.Tk() # Fenster erzeugen und in my_window "speichern"
fenster.title("Ionenerzeugung mit Nachbarmassen")

# Textfeld im Fenster erzeugen
192 label_1=tk.Label(fenster, text="Programm zur Erzeugung von Ionen zur Verwendung mit SIMION", width=20)
label_1.pack(side=tk.TOP, fill=tk.X)

# Variablen-Frame
var_frame = tk.Frame(fenster, relief = tk.SUNKEN, borderwidth=1)
197 var_frame.pack(side = tk.TOP)

# Checkbox für die Erstellung von Ionen vor dem BMI für SIMION
vbm = tk.IntVar()
vbm_check = tk.Checkbutton(fenster, text = "Vor BMI1 nur (!) für SIMION, wobei die x&z-Startkoordinaten
vertauscht werden (nicht die Ortsverschiebungen)", variable=vbm)
202 vbm_check.pack(side=tk.TOP)

# Checkbox für die Erstellung der Ionen mit Nachbarmassen
# Checkbox für die Erstellung von Ionen vor dem BMI für SIMION
207 nachbarmassen_check = tk.Checkbutton(fenster, text = "Erzeuge zwei Nachbarmassen in jede Richtung", variable=
nachbarmassen)
nachbarmassen_check.pack(side=tk.TOP)

# Checkbox für die Erstellung der Ionen mit zufallsgenerierter Energie
kinenerg = tk.IntVar()
212 kinenerg_check = tk.Checkbutton(fenster, text = "Erzeuge die Ionen mit normalverteilter kinetischer Energie",
variable=kinenerg)
kinenerg_check.pack(side=tk.TOP)

# Variablenliste
Variablen = [{"Ionenanzahl", "Ionen", 0, n}, {"Ionenmasse", "u", 0, ion_m},
217 [{"Ionenladung", "e", 0, ion_charge}, {"x-Startwert", "mm", 0, ion_x, 0, 1},
{"y-Startwert", "mm", 0, ion_y, 0, 1}, {"z-Startwert", "mm", 0, ion_z, 0, 0},
{"x-Regressionsgerade", "", 0, 0, 0, 1}, {"y-Regressionsgerade", "", 0, 0, 0, 1},
{"x-Steigungsabweichung", "mm/m", 0, 1}, {"y-Steigungsabweichung", "mm/m", 0, 1},
222 [{"Kinetische Energie", "eV", 0, 30000}, {"Farbe", "Farbnummer", 0, ion_color},
{"Brennweite der fiktiven vorgeschzten Linse", "mm (nur vor bmi1)", 0, 0},
]}

# Die Berechnung der Steigungsabweichung erfolgt normal zur Regressionsgeraden
for a in range(len(Variablen)):
Variablen[a][2] = tk.StringVar()
227 Variablen[a][2].set(Variablen[a][3])
if a <= 2 or a > 7:
Variablen[a].append(tk.Frame(var_frame, relief = tk.SUNKEN, borderwidth = 1))
Variablen[a][4].pack(side = tk.TOP)
Variablen[a].append(tk.Label(Variablen[a][4], text = Variablen[a][0]))
232 Variablen[a][5].pack(side = tk.LEFT)
if a < 2 or (a > 7 and a < 11) or a > 11:
Variablen[a].append(tk.Entry(Variablen[a][4], width = 15, relief = tk.SUNKEN, textvariable =
Variablen[a][2]))
elif a == 2 or a == 11:
Variablen[a].append(tk.Scale(Variablen[a][4], from_ = -8, to = 8, variable = Variablen[a][2],
orient = tk.HORIZONTAL))
237 Variablen[a][6].pack(side = tk.LEFT)
Variablen[a].append(tk.Label(Variablen[a][4], text = Variablen[a][1]))
Variablen[a][7].pack(side = tk.RIGHT)
elif a > 2 and a < 8:
Variablen[a][4] = tk.StringVar()
Variablen[a][4].set(Variablen[a][5])
Variablen[a].append(tk.Frame(var_frame, relief = tk.SUNKEN, borderwidth = 1))
Variablen[a][6].pack(side = tk.TOP)
Variablen[a].append(tk.Label(Variablen[a][6], text = Variablen[a][0]))
Variablen[a][7].pack(side = tk.LEFT)
247 Variablen[a].append(tk.Entry(Variablen[a][6], width = 15, relief = tk.SUNKEN, textvariable = Variablen[
a][2]))
Variablen[a][8].pack(side = tk.LEFT)
if a > 2 and a < 6:
Variablen[a].append(tk.Label(Variablen[a][6], text = "+/-"))
elif a > 5 and a < 8:
252 Variablen[a].append(tk.Label(Variablen[a][6], text = "*x +"))
Variablen[a][9].pack(side = tk.LEFT)
Variablen[a].append(tk.Entry(Variablen[a][6], width = 15, relief = tk.SUNKEN, textvariable = Variablen[
a][4]))
Variablen[a][10].pack(side = tk.LEFT)
Variablen[a].append(tk.Label(Variablen[a][6], text = Variablen[a][1]))
257 Variablen[a][11].pack(side = tk.RIGHT)

# Generiere-Button
gen_button=tk.Button(fenster, text="Generiere Ionen", command = Routine)
gen_button.pack(side=tk.LEFT)
262

# Löschen-Button
del_button = tk.Button(fenster, text = "Lösche Ionen", command = delete_ions)
del_button.pack(side = tk.LEFT)

267 # Quit-button: führt beim anklicken "command" aus, wodurch das Fenster geschlossen wird.
quit_button=tk.Button(fenster, text="Quit", command=fenster.destroy)
quit_button.pack(side=tk.RIGHT)
```

```
272 # auf Ereignisse warten und ausführen
fenster.mainloop()
```

A.3. Python-Programm zur Ablenkung von Ionen an einem Magneten

Die Grundlagen zu diesem Programm, insbesondere der Matrixdarstellung von ionenoptischen Systemen, sind unter 2.1.3 zu finden. Das Programm ist so konzipiert, dass die eingelesenen und die ausgegebenen Dateien auch für eine SIMION-Simulation genutzt werden könnten. Das Programm bietet die Möglichkeit zwischen den Schlitzen Slt S2-1 und der Injection-Aperture des Kühlers das Strahlprofil zu berechnen.

```
# -*- coding: utf-8 -*-
#
3 # Das Programm lässt sich von *.lon-Files speisen, welche für SIMION-Simulationen konzipiert sind.
# Die Ionen werden entlang des gegebenen Magneten abgelenkt, wobei die z-Achse sich mit den Ionen entlang der
# idealen Flugbahn bewegt.
# Die Daten für die Ionen werden so abgespeichert, dass sie für eine SIMION-Simulation weiterverwendet werden können.

8 # Author: Paul Wasserburger
# 02/2018

13 import numpy as np
import math
import matplotlib.pyplot as plt
from matplotlib.colors import LinearSegmentedColormap

18 # ===== Daten des Magneten =====
alpha,r,beta,dst,g,K = 90,350,29.5,787,50,0.7 # Ablenkwinkel, Radius, shim-Winkel, Distanz zum Objekt/Bild vom
# Magneten aus
alpha = (alpha/360) * 2 * np.pi
beta = (beta/360) * 2 * np.pi
beta_eff = beta - g/r * (1+math.sin(beta)**2)/(math.cos(beta)) * K

23 # ===== Variablen für die Berechnungen =====

plota = 'y' # Achse die geplottet werden soll

28 i=0 # Laufvariable für die Berechnung

ma_z = 1460-350 # Abstand des Magneten von der injection
ma_x = 1400-350#787#1400-350 # Abstand des Ionenstarts zum Magneten entlang der x-Achse

33 pos_0 = -( ma_x+ alpha*r+ ma_z)
pos = pos_0
abst =[pos]
ts = 100 #Anzahl der Teilschritte vor und nach dem Magneten

38 x,dx,y,dy=[],[],[],[] # für die Grafik
for a in range(1+ts*2 +1):
    x.append([])
    y.append([])
43 dx.append([])
    dy.append([])

vor_bm = 1 # 1 für Simion-Daten, 0 für Ortsverschiebungen abhängig zum Idealstrahl

48 # TODO: vor magneten stimmt die steigung der regressions gerade nicht (würde *-1 gerechnet gehören) (Zumindest
# nach derzeitigem Ionenerzeugungsprogramm)
plt.rcParams["figure.figsize"]=(5,3)

# ===== Speicherort =====
53 Datei = "Datei.ION"
Data = []
datei = open(Datei, "r")
for line in datei:
    Data.append(line.rstrip())
58 datei.close()
```

KAPITEL A. Anhang A

```
# ===== Anpassung des Datenformats =====
63 for dv in range(len(Data)):
    Data[dv] = Data[dv].split(',')
    for dvv in range(len(Data[dv])):
        #print(Data[dv][dvv])
        Data[dv][dvv] = float(Data[dv][dvv])
68 # Verwendung der Daten

73 if vor_bm == 1: # Anpassung der Koordinaten, falls die Ionen vor dem Magneten starten
    for a in range(len(Data)):
        xv = Data[a][5] + 1460# ma_z+350
        zv = -ma_z - ma_x-350*2
        Data[a][3] = -xv
78     Data[a][5] = zv
        Data[a][6] = Data[a][6] - 90

    for a in range(len(Data)): # Einholen der Daten und Transformation für die Berechnung
83
        Data[a][0] = Data[a][0] # TOB - todo: gehört an Weg angepasst
        Data[a][1] = Data[a][1] # Ionenmasse
        Data[a][2] = Data[a][2] # Ionenladung

88     Data[a][6] = Data[a][6]/360* 2* math.pi
        Data[a][7] = Data[a][7]/360* 2* math.pi

        x[0].append(Data[a][3])
        y[0].append(Data[a][4])
93     #print(Data[a][3],Data[a][4],Data[a][5])

        # Umrechnungen der Winkel
        # Azimuth-Winkel -> Steigung (x)
        if vor_bm == 1: # todo: hier stimmt etwas nicht
98             k_x = math.tan(Data[a][6]+math.pi/2)*10**3
        else:
            k_x = math.tan(Data[a][6]+ math.pi/2)*10**3
        dx[0].append(k_x)

103     # Umrechnung Elevationswinkel mit Azimuth-Winkel -> Steigung (y)

        k_y=math.atan(Data[a][7])*math.sqrt(1+math.tan(Data[a][6]+math.pi/2)**2)

        dy[0].append(k_y*10**3)
108

    # Benötigte Matrizen
    Lin_dst = np.matrix([[1, dst],[0,1]])
    #R_x = np.matrix([[math.tan(beta),r],[math.tan(beta)**2/r-1/r, math.tan(beta)]]
113 #R_y = np.matrix([[1+alpha*math.tan(beta),alpha*r],[+2*math.tan(beta)/r+alpha/r*math.tan(beta)**2,1+alpha*math.
        tan(beta)]]
    #R_y = np.matrix([[1-alpha*math.tan(beta_eff),alpha*r],[-2*math.tan(beta_eff)/r+alpha/r*math.tan(beta_eff)
        **2,1-alpha*math.tan(beta_eff)]] # Mit Rogowski-Form-Abschätzung in Kurzform

    # Aus SIMION ermittelte Matrizen
118 R_x= np.matrix([[ 1.08873332e+00 , 4.47392068e+02], [ -1.51170752e-03 , 2.96901757e-01]]) #Kreis-Imm (
        normalverteilt) -23.1.2018
    R_y= np.matrix([[ 9.33016001e-01 , 6.13052895e+02], [ -1.10417112e-03 , 3.50315111e-01]]) #Kreis-Imm (
        normalverteilt) -23.1.2018

    fig, ax = plt.subplots()
123 levels = np.arange(0,1.05,0.05)

    def Linearteil(abstand): # Funktion zum Berechnen des Drift-Teils in einer Beamline
        global i,x,dx,y,dy
128         Lin_abstand = np.matrix([[1,abstand],[0,1]])
        for a in range(len(x[0])):
            xr = Lin_abstand * np.matrix([[x[i][a]],[dx[i][a]*10**-3]])
            x[i+1].append(float(xr[0]))
            dx[i+1].append(float(xr[1])*10**3)
133         yr = Lin_abstand * np.matrix([[y[i][a]],[dy[i][a]*10**-3]])
            y[i+1].append(float(yr[0]))
            dy[i+1].append(float(yr[1])*10**3)
            i=i+1

138 def Magnetteil(): # Funktion zum Berechnen des Strahlengangs in einem Magnetteil
        global i,x,dx,y,dy,R_x
        for a in range(len(x[0])):
            xr = R_x * np.matrix([[x[i][a]],[dx[i][a]*10**-3]])
            x[i+1].append(float(xr[0]))
143            dx[i+1].append(float(xr[1])*10**3)

            yr = R_y * np.matrix([[y[i][a]],[dy[i][a]*10**-3]])
            y[i+1].append(float(yr[0]))
```

A.3. Python-Programm zur Ablenkung von Ionen an einem Magneten

```
148     dy[i+1].append(float(yr[1])*10**3)
        i=i+1

def Strahlplot(ab): # Funktion zum Plotten des Strahlprofils
    global x,dx,y,dy,abst,pos
153     max_x,max_dx,max_y,max_dy=[],[],[],[]
        min_x,min_y=[],[]
        for a in range(ab,len(x)):
            if x[a] != []:
                max_x.append(np.mean(x[a])+np.std(x[a]))
158                 min_x.append(np.mean(x[a])-np.std(x[a]))
                    #max_dx.append(max(dx[a]))
                    max_y.append(np.mean(y[a])+np.std(y[a]))
                    min_y.append(np.mean(y[a])-np.std(y[a]))
                    #max_dy.append(max(dy[a]))
163     if pos <= -(ma_z+alpha*r) or pos > -(ma_z):
        if plota == 'x':
            plt.plot(abst[ab:],max_x,'y-',abst[ab:],min_x,'y-')
        elif plota == 'y':
            plt.plot(abst[ab:],max_y,'g-',abst[ab:],min_y,'g-')
168     elif pos >= -(ma_z+alpha*r) and pos <= -(ma_z):
        if plota == 'x':
            plt.plot(abst[ab:],max_x,'r-',abst[ab:],min_x,'r-')
        elif plota == 'y':
            plt.plot(abst[ab:],max_y,'c-',abst[ab:],min_y,'c-')
173
        plt.xlabel("Abstand z (mm)")
        plt.ylabel(str(plota)+" (mm)")
        #plt.show()

178

def Plotphasenraum(): # Funktion zum Plotten des Phasenraums
    global x,dx,y,dy
183     if plota == 'x':
        plt.plot(x[i],dx[i],"bx", markersize='3', label="")
        plt.axis([-5,5,-5,5])
        plt.xlabel("x (mm)")
        plt.ylabel("dx (mm/m)")
188     if plota == 'y':
        plt.plot(y[i],dy[i],"ro", markersize='1.0', label="")
        plt.axis([-4,4,-10,10])
        plt.xlabel("y (mm)")
        plt.ylabel("dy (mm/m)")
193     plt.show()

def Strahlenprofilplot():

    global cs,ax,x,X_plot,l_plot,Z_plot,x_plot,Mittelw,Stda

198     x_plot = np.arange(-15,15,0.2, float)
        y_plot = x_plot
        l_plot = np.zeros((1,len(x_plot)))
        ly_plot = l_plot
203     X_plot = np.zeros((1,len(x_plot)))
        Y_plot = X_plot
        Z_plot = np.zeros((1,len(x_plot)))

        Mittelw,Stda = [],[]
        for a in range(len(x)):
            i_plot = np.zeros_like(x_plot)
            iy_plot = np.zeros_like(y_plot)
            if plota == 'x':
213                 for b in range(len(x[a])):
                    for c in range(len(x_plot)):
                        if x[a][b]<x_plot[c]:
                            i_plot[c] = i_plot[c] +1
                            break
            elif plota == 'y':
218                 for b in range(len(y[a])):
                    for c in range(len(y_plot)):
                        if y[a][b]<y_plot[c]:
                            iy_plot[c] = iy_plot[c]+1
                            break
223
            l_plot = np.insert(l_plot,[1],i_plot,axis=0)
            ly_plot = np.insert(ly_plot,[1],iy_plot,axis=0)
            X_plot = np.insert(X_plot,[1],x_plot,axis=0)
            Y_plot = np.insert(Y_plot,[1],y_plot,axis=0)
228     Z_plot = np.insert(Z_plot,[1],abst[a]**np.ones((1,len(y_plot))),axis=0)
            if plota == 'x':
                Mittelw.insert(0,np.mean(x[a]))
                Stda.insert(0,np.std(x[a]))
            elif plota == 'y':
233                 Mittelw.insert(0,np.mean(y[a]))
                    Stda.insert(0,np.std(y[a]))
            l_plot = np.delete(l_plot, 0, 0)
            ly_plot = np.delete(ly_plot, 0, 0)
            X_plot = np.delete(X_plot, 0, 0)
```

```

238     Y_plot = np.delete(Y_plot, 0, 0)
        Z_plot = np.delete(Z_plot, 0, 0)

        if plota == 'x':
            for ii in range(len(I_plot)):
243                 i_max=max(I_plot[ii])
                    if i_max>0:
                        for iii in range(len(I_plot[ii])):
                            I_plot[ii][iii] = I_plot[ii][iii]/i_max
        if plota == 'y':
248             for ii in range(len(Iy_plot)):
                    i_max=max(Iy_plot[ii])
                    if i_max>0:
                        for iii in range(len(Iy_plot[ii])):
                            Iy_plot[ii][iii] = Iy_plot[ii][iii]/i_max
253
        if plota == 'x':
            plt.contourf(Z_plot, X_plot, I_plot, levels=levels, cmap= LinearSegmentedColormap.from_list('mycmap', ['
                black', 'white']))
        elif plota == 'y':
            plt.contourf(Z_plot, Y_plot, Iy_plot, levels=levels, cmap= LinearSegmentedColormap.from_list('mycmap', [
                'black', 'white']))
258     plt.colorbar()
        plt.gca().invert_yaxis()

        print('waist-Durchmesser vor dem Magneten='+str(min(Stda[:ts+1])*2)+(1-sigma)\n'
            'bei z='+str(Z_plot[Stda.index(min(Stda[:ts+1]))][0])+ ' bei x_quer = '+str(Mittelw[Stda.index(min(Stda[:t
            +1:]))]))
263
        print('waist-Durchmesser nach dem Magneten='+str(min(Stda[:ts-1])*2)+(1-sigma)\n'
            'bei z='+str(Z_plot[Stda.index(min(Stda[:ts-1]))][0])+ ' bei x_quer = '+str(Mittelw[Stda.index(min(Stda[:
            ts-1:]))]))

        Plotphasenraum()
268     for a in range(ts):
            Linearteil(ma_x/ts)
            pos = pos + ma_x/ts
            abst.append(pos)
            #print(a)
273
        #Plotphasenraum()
        Strahlplot(0)
        Magnetteil()
        pos=pos+alpha*r
278     abst.append(pos)
        #Plotphasenraum()
        Strahlplot(ts)
        for a in range(ts):
            Linearteil(ma_z/ts)
283     pos = pos + ma_z/ts
            abst.append(pos)
            #print(pos)

        Strahlplot(ts+1)
        Strahlenprofilplot()
288     #plt.axis([-1050.0, -15.15])
        plt.tick_params(axis='both', labeltop=True, labelright=True, top='on', right='on', direction='out')
        #plt.gca().invert_yaxis()
        plt.show()
293     #Plotphasenraum()

```

A.4. Programm zur Phasenraumauswertung

Das Verfahren der Phasenraummessung ist in Kapitel 4.1 beschrieben. Statt der Differentiation wird der Verteilungsfunktionen werden zwischen den Messpunkten der Differenzenquotienten verwendet um die genäherten Dichtefunktion zu erhalten. Das Programm beinhaltet außerdem die Anpassung der Steigung an den Abstand der Schlitzbacken, die Verschiebung der Nullpunkte der Schlitzbacken, die Glättung durch kubische Funktionen oder Gaußfilter, die Extrapolation der Messreihen und die Möglichkeit einen Gaußfilter über die gesamte Messung zu legen. Die Berechnung des Strahlprofils erfolgt mittels Matrizenrechnung und Rückrechnung von jedem Punkt des Bildes auf die ursprüngliche Phasenraummessung. Dabei wird für Punkte zwischen den Messwerten ein kubischer Fit durch eine einstellbare Anzahl von Punkten vor und nach beziehungsweise über und unter dem gewählten Punkt gelegt.

A.4. Programm zur Phasenraumauswertung

```
# -*- coding: utf-8 -*-
# Author: Paul Wasserburger
# 02/2018
5 # Programm zur Phasenraummessungsauswertung

import math
import numpy as np
import scipy

10 import scipy.ndimage

from lmfit.models import GaussianModel
import matplotlib.pyplot as plt
15 from matplotlib.colors import LinearSegmentedColormap

from mpl_toolkits.mplot3d import Axes3D
from matplotlib.ticker import LinearLocator, FormatStrFormatter
from scipy.signal import butter, lfilter, freqz
20

achse = 'x+'

Datei_list = [{"sltS2-1xp_0003_posxpos-5_0.dat.txt", "-5mm", -5, -10.77*10**-6}, {"sltS2-1xp_0003_posxpos0_0v1.dat",
"0mm", 0, -10.2*10**-6},
25 [{"sltS2-1xp_0003_posxpos3_0.dat", "3mm", 3, -11.64*10**-6}, {"sltS2-1xp_0003_posxpos5_0.dat", "5mm",
, 5, -9.982*10**-6}, {"sltS2-1xp_0003_posxpos7_0.dat", "7mm", 7, -11.15*10**-6},
{"sltS2-1xp_0003_posxpos10_0.dat", "10mm", 10, -7.38*10**-6}, {"sltS2-1xp_0003_posxpos20_0.dat", "20mm",
, 20, -9.711*10**-6}]

# Variablen für die Messung und Auswertung
if achse == 'x+': # Verschiebung des x/y-Schlitzes gegen den Nullpunkt (in mm), derzeit sind Werte für Slit S2-1
eingetragen.
30 xvs = 1.35
elif achse == 'y+':
xvs = 1.39
elif achse == 'x-':
xvs = -2.03
35 elif achse == 'y-':
xvs = -1.85
abstand = 0.651 # Abstand der Schlitze (in Meter)
vert_auswahl = -2 # -2(Rohdaten ohne -10**-10-Werte), 0 (Rohdaten), 1 (Normalverteilung, Dichtefunktion), 2 (
Student-T-Verteilung), 3 (Cauchy-Lorentz-Verteilung)
fvd = 2 # Filter vor Verarbeitung der Rohdaten: 0(Rohdaten), 1 gauß-Filter, 2 polynomial-Fits durch je eine gewisse
Anzahl Pkt vor und nach der Stützstelle
40
bsfilter = 1 # Welcher Filter wird über die gesamten Signale gelegt: 0(kein), 1 (Gaußfilter)
aequidistant = 1 # 0 (Messstellen), 1 (äquidistante Stützstellen), 2 (nur in x äquidistante Stützstellen)
Sf = 3/5 # Skalierungsfaktor, der von der verwendeten Skala abhängt
45
dlv = -6 # Daten extrapolieren bis (in mm), wenn 0: wird nicht extrapoliert
if vert_auswahl != -2:
dlv=0
nur_ellipse = 0 # Für die Berechnung des Strahls wird jeweils nur die Phasenraumellipse und nicht der gesamte
Phasenraum verwendet
50
Strr = 50 # Strahlrohrradius in mm

Data = []
Data_pos, Data_l, Data_l1 = [], [], []
Data_pos_1, Data_l_1 = [], []
55 # Einlesen der Daten
for a in range(len(Datei_list)):
Data.append([])
Data_pos.append([])
Data_l.append([])
Data_l1.append([])
60 datei = open(Datei_list[a][0], "r")
for line in datei:
Data[a].append(line.rstrip())
datei.close()
65
Datei_list[a][2] = Datei_list[a][2] / abstand # Anpassung der Steigung in Abhängigkeit zum Abstand der
Schlitze

for b in range(len(Data[a])):
Data[a][b] = Data[a][b].split(' ')
70 if vert_auswahl == -2:
if Data[a][b][1] != "-1.000e-10":
Data_pos[a].insert(0, float(Data[a][b][0])-xvs)
Data_l[a].insert(0, float(Data[a][b][1])/Datei_list[a][3])
Data_l1[a].insert(0, float(Data[a][b][1])/Datei_list[a][3])
75 if len(Data_pos[a])>1:
if Data_pos[a][0] == Data_pos[a][1]:
Data_pos[a].pop(0)
Data_l[a].pop(0)
Data_l1[a].pop(0)
80 else:
Data_pos[a].insert(0, float(Data[a][b][0])-xvs)
Data_l[a].insert(0, float(Data[a][b][1])/Datei_list[a][3])
Data_l1[a].insert(0, float(Data[a][b][1])/Datei_list[a][3])
```

KAPITEL A. Anhang A

```
85     if len(Data_pos[a])>1:
        if Data_pos[a][0] == Data_pos[a][1]:
            Data_pos[a].pop(0)
            Data_l[a].pop(0)
            Data_l1[a].pop(0)

90     Data_pos_1.append(list(np.arange(-9,1,0.1)))
    Data_l_1.append(list(np.zeros_like(Data_pos_1[a])))

def functnv(x,mu,std,mfl,k): # Verteilungsfunktion die gewählte Wahrscheinlichkeitsverteilung
95     #return mfl * scipy.stats.norm.cdf(x,mu,std)
    return mfl * scipy.stats.t.cdf(x,mu,std,k)
gaussfits = []
popt,pcov=[],[]
Data_pos_a = []
100 Data_l_a = []
if dlv != 0: #Extrapolieren der Daten, nur wenn es angewählt ist
    npkt = 40 # Punkte der rechten Seite, die nicht für die Auswertung verwendet werden sollen
    for a in range(len(Data_l)):
        print(a)
105         if len(Data_l[a])>npkt:
            Data_pos_a.append(np.zeros(len(Data_pos[a])-npkt))
            Data_l_a.append(np.zeros(len(Data_pos[a])-npkt))
            x_extrapol = list(np.arange(dlv, min(Data_pos[a]), 0.1))
            i_extrapol = list(np.arange(dlv, min(Data_pos[a]), 0.1))
110            mod = GaussianModel()

            for b in range(len(Data_pos[a])-npkt):
                Data_pos_a[a][b] = Data_pos[a][b]
                Data_l_a[a][b] = Data_l[a][b]
115            pars = mod.guess(Data_l_a[a], x=Data_pos_a[a])
            out = mod.fit(Data_l_a[a], pars, x=Data_pos_a[a])
            gaussfits.append(out)
            popt1, pcov1 = scipy.optimize.curve_fit(functnv, Data_pos_a[a], Data_l_a[a])
            popt.append(popt1)
120            pcov.append(pcov1)
            plt.plot(Data_pos[a], functnv(Data_pos[a], *popt[a]), label=Datei_list[a][1]+' fit')
            plt.plot(x_extrapol, functnv(x_extrapol,*popt[a]))

            Data_pos[a]=x_extrapol+Data_pos[a]
            Data_l[a]=list(functnv(x_extrapol,*popt[a]))+Data_l[a]
125         else:
            Data_pos_a.append(np.zeros(len(Data_pos[a])))
            Data_l_a.append(np.zeros(len(Data_pos[a])))
            popt.append(0)
            pcov.append(0)
130

if fvd ==1: # Filter über Messung legen, bevor die Differenzen gebildet werden
    for a in range(len(Data_l)):
135        Data_l[a]=list(scipy.ndimage.filters.gaussian_filter1d(Data_l[a], 0.8, axis=-1, order=0, output=None,
            mode='reflect', cval=0.0, truncate=4.0))
elif fvd == 2: #Kubische Funktionen über die Messpunkte legen zum Glätten
    pkt,grd = 40,2 # Anzahl der Punkte (viele Punkte-> weniger noise), durch welche gefittet wird; Grad des
    Polynom-Fits

    for a in range(len(Data_pos)):
140        plt.plot(Data_pos[a],Data_l[a], label=Datei_list[a][1]+str(' Daten'))
        for b in range(2,len(Data_pos[a])-2):
            l = min(b, int(pkt/2))
            r = min(int(pkt/2), len(Data_l[a])-1-b)
            grd = min(r,l,grd)
145        Data_l[a][b] = np.poly1d(np.polyfit(Data_pos[a][b-l:b+r+1],Data_l[a][b-l:b+r+1],grd))(Data_pos[a][b
            ])

plt.legend(bbox_to_anchor=(1.05, 1), loc=2, borderaxespad=0.)
150 plt.show()

for a in range(len(Data_pos_1)):
    for b in range(len(Data_pos_1[a])):
        for c in range(2,len(Data_pos[a])-2):
155            if achse == 'x+' or achse == 'y+':
                if Data_pos_1[a][b] < Data_pos[a][c]:
                    Data_l_1[a][b] = np.poly1d(np.polyfit(Data_pos[a][c-2:c+2],Data_l[a][c-2:c+2],3))(
                        Data_pos_1[a][b])
                    break
            elif achse == 'x-' or achse == 'y-':
                if Data_pos_1[a][b] > Data_pos[a][c]:
160                    Data_l_1[a][b] = np.poly1d(np.polyfit(Data_pos[a][c-2:c+2],Data_l[a][c-2:c+2],3))(
                        Data_pos_1[a][b])
                    break

# Nur die Messdifferenz zwischen zwei Messpunkten entlang der x/y-Achse bleibt bei diesem Schritt erhalten:
165 for a in range(len(Data_l)):
    for b in range(len(Data_l[a]),0,-1):
        if b>1:
            Data_l[a][b-1] = (Data_l[a][b-1]-Data_l[a][b-2])/(Data_pos[a][b-1]-Data_pos[a][b-2])
```

A.4. Programm zur Phasenraumauswertung

```
170 for a in range(len(Data_l)):
    if len(Data_l[a])>0:
        b_del = []
        for b in range(2): # hier können die Randwerte auf null gesetzt werden, falls dies bei der Auswertung n
            # nötig ist (zB wenn ein sehr geringer Strom gemessen wird und am Rand die 10^-10 als Minimum der
            # Messung bereits in der Darstellung sichtbar wäre)
            Data_l[a][b] = 0
            Data_l[a][len(Data_l[a])-b-1] = 0

175
    Data_pos_a = []
    Data_l_a = []
    180 gaussfits = []
    popt, pcov = [], []

    for a in range(len(Data_pos)):
        if vert_auswahl > 0:
            185 mod = GaussianModel()
            Data_pos_a.append(np.zeros(len(Data_pos[a])))
            Data_l_a.append(np.zeros(len(Data_pos[a])))
            for b in range(len(Data_pos[a])):
                Data_pos_a[a][b] = Data_pos[a][b]
                190 Data_l_a[a][b] = Data_l[a][b]
            pars = mod.guess(Data_l_a[a], x=Data_pos_a[a])
            out = mod.fit(Data_l[a], pars, x=Data_pos[a])
            gaussfits.append(out)
            popt1, pcov1 = scipy.optimize.curve_fit(funcfnv, Data_pos_a[a], Data_l[a])
            195 popt.append(popt1)
            pcov.append(pcov1)
            plt.plot(Data_pos[a], funcfnv(Data_pos_a[a], *popt[a]), label=Datei_list[a][1])

            for b in range(len(Data_l[a])-1,1,-1):
                200 Data_l[a][b] = funcfnv(Data_pos_a[a], *popt[a])[b]-funcfnv(Data_pos_a[a], *popt[a])[b-1]

            elif vert_auswahl == -1:
                Data_l_a.append(np.zeros(len(Data_pos[a])))
                Data_l_a[a]=scipy.ndimage.filters.gaussian_filter1d(Data_l[a], 0.8, axis=-1, order=0, output=None, mode
                    ='reflect', cval=0.0, truncate=4.0)
                205 plt.plot(Data_pos[a], Data_l_a[a], label=Datei_list[a][1])
            else:
                plt.plot(Data_pos[a], Data_l[a], label = Datei_list[a][1]+str('ohne Filter'))

210 # Plotten der Fits
    plt.legend(bbox_to_anchor=(1.05, 1), loc=2, borderaxespad=0.)
    plt.show()

215 for a in range(len(Datei_list)):
    Datei_list[a][2] = Datei_list[a][2] * Sf

    def Interpol suche(x_int, y_int, Messung, drunter, drueber): # Sucht den interpolierten Punkt (intensität), anhand
        # des gegebenen Datenpunktes (x/x') mit kubischen Fits bei den messungen darunter und darüber und durch die
        # y-Werte dieser Fits ebenfalls.
        220 global f_i, f_y
        f_i, f_y = [0], [0]
        # nur anwenden, sofern x_int > kleinstes x in der Position und < als größtes x, wobei vom Rand je zwei
        # abgezogen werden

        if achse == 'x+' or achse == 'y+':
            225 if Messung >= 0:
                for x_s in range(4, len(Data_pos[Messung])-4): # ACHTUNG : Hier gehen 4 Messpunkte pro Seite
                    # verloren, was jedoch nötig ist bei den Fits
                    if Data_pos[Messung][x_s] > x_int and Data_pos[Messung][x_s-2] < x_int:
                        f_i[0] = abs(Data_l[Messung][x_s])
                        f_i[0] = np.poly1d(np.polyfit(Data_pos[Messung][x_s-4:x_s+4], Data_l[Messung][x_s-4:x_s
                            +4], 3))(x_int)
                        230 f_y[0] = (x_int*(-1)/abstand+Datei_list[Messung][2])
                        break
            elif achse == 'x-' or achse == 'y-':
                if Messung >= 0:
                    for x_s in range(4, len(Data_pos[Messung])-4):
                        235 if Data_pos[Messung][x_s] >= x_int and Data_pos[Messung][x_s+1] < x_int:
                            f_i[0] = abs(Data_l[Messung][x_s])
                            f_y[0] = (x_int*(-1)/abstand+Datei_list[Messung][2])
                            break

240 return f_i[0], f_y[0]

    def Filterung(l_zf, a): # Zur Filterung einer Darstellung
        if a == 0: # Kein Filter
            l_1 = l_zf
        245 elif a == 1: # Gaußfilter
            sigma = [5, 3] # Einstellungen für den Gaußfilter, umso größer desto mehr wird der Konturplot
            # weichgezeichnet
            l_1 = scipy.ndimage.filters.gaussian_filter(l_zf, sigma, order=0, mode="reflect", cval=0.5, truncate=4.0)
            return l_1

250 def Strahl(l):
    global f, ff1, ff2, bsfilter
```

KAPITEL A. Anhang A

```
Lin = np.matrix([[1, 1], [0, 1]])

l = np.zeros((len(X), len(X[0])), float)
255 if achse == 'x+' or achse == 'y+':
    for x in range(len(X[0])):
        for y in range(len(X)):
            x_i = Lin**(-1) * np.matrix([[X[y][x]], [Y[y][x]*10**(-3)]] # x_i ist das ursprünglich gesuchte
                Element auf dem gemessenen Phasenraum
            x_i[1]=x_i[1]*10**3
            for a in range(len(Datei_list)):
                260 if x_i[1] <= x_i[0]*(-1)/abstand+Datei_list[a][2] and x_i[1] > x_i[0]*(-1)/abstand+Datei_list
                    [0][2]-1:
                    l[y][x] = abs(Interpolsuche(x_i[0], x_i[1], a, 1, 1)[0])
                    ff1, ff2 = [], []
                    if a >= 0 and a < len(Datei_list):
                265 l, r = min(a, 4), min(3, len(Datei_list)-a)
                    for aa in range(a-1, a+r):
                        f = Interpolsuche(x_i[0], x_i[1], aa, 1, 1)
                        ff1.append(float(f[0]))
                        ff2.append(float(f[1]))

                270 if 0 not in ff1+ff2 and ff1 != [] and ff2 != []: # lässt durch den unteren und oberen
                    Wert eine Interpolation legen um die Intensität im gewählten Punkt zu
                    berechnen

                    if l <= 1:
                275 for g in range(1, 3-l+1):
                        ff1.insert(0, 0)
                        ff2.insert(0, float((x_i[0]*(-1)/abstand+Datei_list[a][2]-g)))

                    if r < 2:
                        for g in range(1, 4-r+1):
                280 ff1.append(0)
                        ff1[len(ff1)-1]=ff1[len(ff1)-2]
                        ff2.append((x_i[0]*(-1)/abstand+Datei_list[a][2]+g))
                        for ff in range(len(ff1)-1, 0, -1):
                285 ff1[ff] = (ff1[ff]-ff1[ff-1])/(ff2[ff]-ff2[ff-1])
                        del ff1[0]
                        del ff2[0]
                        l[y][x] = abs(np.poly1d(np.polyfit(ff2, ff1, 3))(x_i[1]))
                    elif a > 1:
                        ff1, ff2 = [], []
                290 for aa in range(a-2, a+1):
                        f = Interpolsuche(x_i[0], x_i[1], aa, 1, 1)
                        ff1.append(float(f[0]))
                        ff2.append(float(f[1]))

                        if 0 not in ff1: # lässt durch den unteren und oberen Wert eine Interpolation legen
                295 um die Intensität im gewählten Punkt zu berechnen
                        for ff in range(len(ff1)-1, 0, -1):
                            ff1[ff] = (ff1[ff]-ff1[ff-1])/(ff2[ff]-ff2[ff-1])
                            del ff1[0]
                            del ff2[0]
                            l[y][x] = abs(scipy.interpolate.interp1d(ff2, ff1)(x_i[1]))

                300 break
            elif achse == 'x-' or achse == 'y-':
                for x in range(len(X[0])):
                    for y in range(len(X)):
                305 x_i = Lin**(-1) * np.matrix([[X[y][x]], [Y[y][x]*10**(-3)]] # x_i ist das ursprünglich gesuchte
                        Element auf dem gemessenen Phasenraum
                        x_i[1]=x_i[1]*10**3
                        for a in range(len(Datei_list)):
                            if a < len(Datei_list)-1:
                                if x_i[1] >= x_i[0]*(-1)/abstand + Datei_list[a][2] and x_i[1] < x_i[0] * (-1)/abstand +
                310 Datei_list[a+1][2]:
                                    l[y][x] = Interpolsuche(x_i[0], x_i[1], a, 1, 1)[0]
                                    ff1, ff2 = [], []
                                    if a >= 0 and a < len(Datei_list):
                    315 l, r = min(a, 1), min(4, len(Datei_list)-a)
                                    for aa in range(a-1, a+r):
                                        f = Interpolsuche(x_i[0], x_i[1], aa, 1, 1)
                                        ff1.append(float(f[0]))
                                        ff2.append(float(f[1]))

                                    if 0 not in (ff1+ff2) and ff1 != [] and ff2 != []:
                320 if l == 0:
                                        ff1.insert(0, 0)
                                        ff1[0]=ff1[1]
                                        ff2.insert(0, float((x_i[0]*(-1)/abstand+Datei_list[a][2]-1)))
                                    if r < 4:
                    325 for g in range(4-r+1):
                                        ff1.append(0)
                                        ff2.append((x_i[0]*(-1)/abstand+Datei_list[a][2]+g))
                                    for ff in range(len(ff1)-2):
                    330 ff1[ff] = (ff1[ff]-ff1[ff+1])/(ff2[ff]-ff2[ff+1])
                                        del ff1[len(ff1)-1]
                                        del ff2[len(ff1)-1]
                                        l[y][x] = abs(np.poly1d(np.polyfit(ff2, ff1, 3))(x_i[1]))
                                    break
```

A.4. Programm zur Phasenraumauswertung

```

335         if x_i[1]>= x_i[0]*(-1)/abstand + Datei_list[len(Datei_list)-1][2] and x_i[1]< x_i[0]*(-1)/
            abstand + Datei_list[len(Datei_list)-1][2]+1:
            l[y][x] = Interpolsuche(x_i[0], x_i[1], len(Datei_list)-1, 1, 1)[0]
            break

        return X, Y, Filterung(l, bsfilter)

340 def Phasenraumellipse(Int):
    global listx, listy, e_1, e_2
    max_i=0

345     Int_ell = np.zeros((len(X), len(X[0])), float)
    for x in range(len(Int)):
        max_line = max(Int[x])
        if max_line > max_i:
            max_i=max_line

350     for fak in range(100, -2000, -1): # Suche nach dem Passenden Faktor, sodass 68,3% der Intensität innerhalb
        der Emittanz sind
        listy, listx, listi = [], [], []
        emm=0
        fak = fak/100
355         for x in range(len(Int[0])):
            for y in range(len(Int)):
                if Int[y][x] >= max_i*math.exp(fak):
                    Int_ell[y][x]=Int[y][x]
                    listx.append(X[y][x])
360                    listy.append(Y[y][x])
                    listi.append(Int[y][x])
                    emm = emm+X[0][1]-X[0][0] *(Y[1][0]-Y[0][0])
                if Int_ell.sum()/Int.sum()>=0.683:
                    break
365     print('Emittanz (1-sigma)'+str(emm/math.pi)+'mm*rad*pi'+ ' bei '+str(Int_ell.sum()/Int.sum())+' Intensität'
        )

    listx = np.array(listx, float)

    reg_ger = scipy.stats.linregress([listx[0], listx[len(listx)-1]],[listy[0], listy[len(listx)-1]])
370     Int_ell2 = np.zeros((len(X), len(X[0])), float)

    return [Int_ell, reg_ger, listx, Int_ell2]

375 # Erstellung des passenden Phasenraumplots

    delta = 0.05
    x_1 = np.arange(-10.0, 10, delta)
    y_1 = np.arange(-7, 11, delta)
380 X, Y = np.meshgrid(x_1, y_1)
    l_plot = np.zeros((1, len(X[0])))
    X_plot = np.zeros((1, len(X[0])))
    Z_plot = np.zeros((1, len(X[0])))

385 for pos in range(0, 1075, 10):
    if pos % 10 == 0:
        St = Strahl(pos)
        if nur_ellipse == 1:
            l_plot = np.insert(l_plot, [1], np.sum(Phasenraumellipse(St[2])[0], axis=0), axis = 0)
390     else:
        l_plot = np.insert(l_plot, [1], np.sum(St[2], axis=0), axis = 0)
        X_plot = np.insert(X_plot, [1], St[0][0], axis = 0)
        Z_plot = np.insert(Z_plot, [1], pos*np.ones((1, len(St[0][0]))), axis = 0)

395     if pos%400 == 0:
        print('Abstand = '+str(pos)+'mm, entfernt von den Schlitzen')
        fig, ax = plt.subplots()

        max_ip = 0
        for a in range(len(St[2])):
            if max_ip < max(St[2][a]):
                max_ip = max(St[2][a])
        ll_plot = np.zeros_like(St[2])
        for x in range(len(St[2][0])):
405             for y in range(len(St[2])):
                ll_plot[y][x] = St[2][y][x]/max_ip

        levels = np.arange(-0.0, 1.1, 0.01)

410         cs=ax.contourf(St[0], St[1], ll_plot, levels=levels, cmap='nipy_spectral')
        cbar = fig.colorbar(cs)
        cbar.set_label('Intensität', va='top', size='x-small', rotation=90)
        plt.xlabel(achse[0]+' (mm)')
        plt.ylabel(achse[0]+'\' (mrad)')
415         plt.tick_params(axis='both', labeltop=True, labelright=True, top='on', right='on', direction='out')
        plt.show()
        if pos == 0:
            P_ell=Phasenraumellipse(ll_plot)
            fig, ax = plt.subplots()
            levels = np.arange(-0.0, 1.1, 0.001)
420             cs=ax.contourf(X, Y, P_ell[0], levels=levels, cmap='nipy_spectral')
            cbar = fig.colorbar(cs)

```

KAPITEL A. Anhang A

```
cbar.set_label('Intensität',va='top', size='x-small', rotation=90)
plt.plot(P_ell[2], P_ell[2]*P_ell[1][0]+P_ell[1][1])
425 plt.xlabel(achse[0]+'(mm)')
plt.ylabel(achse[0]+'\'(mrad)')
plt.tick_params(axis='both',labeltop=True, labelright=True,top='on', right='on', direction='out')
plt.show()
430 print('y='+str(P_ell[1][0])+'*x'+str(P_ell[1][1]))
print('Geraden-Standardabweichung='+str(P_ell[1][4]))
print('x-Mittelwert='+str(np.mean(P_ell[2]))+', std='+str(np.std(P_ell[2]))+' max-x_quer bzw x_quer-min
      '+str(max([abs(max(P_ell[2])-np.mean(P_ell[2])),abs(np.mean(P_ell[2])-min(P_ell[2]))])))

l_plot = np.delete(l_plot, 0, 0)
X_plot = np.delete(X_plot, 0, 0)
435 Z_plot = np.delete(Z_plot, 0, 0)

for ii in range(len(l_plot)):
    i_max=max(l_plot[ii])
440 for iii in range(len(l_plot[ii])):
        l_plot[ii][iii] = l_plot[ii][iii]/i_max

fig, ax = plt.subplots()
levels = np.arange(0,1.0,0.05)
445 cs=ax.contourf(Z_plot, X_plot, l_plot, levels=levels, cmap= LinearSegmentedColormap.from_list('mycmap', ['black',
        'white']))
cbar = fig.colorbar(cs)
plt.gca().invert_yaxis()
plt.xlabel('z (mm)')
plt.ylabel(achse[0]+'(mm)')
450 plt.tick_params(axis='both',labeltop=True, labelright=True,top='on', right='on', direction='out')
plt.show()

Werte=[]
for a in range(len(Z_plot)):
455 Werte.append([])
    for b in range(len(Z_plot[a])):
        for c in range(int(l_plot[a][b]*1000)):
            Werte[a].append(X_plot[a][b])

460 Mittelw, Stda = [], []
for a in range(len(l_plot)):
    Mittelw.append(np.mean(Werte[a]))
    Stda.append(np.std(Werte[a]))
465 print('waist-Durchmesser='+str(min(Stda)*2)+'(1-sigma)\n'
        'bei z='+str(Z_plot[Stda.index(min(Stda))][0])+ ' bei x_quer = '+str(Mittelw[Stda.index(min(Stda))]))

plt.hist(Werte[0], normed = True)
470 plt.plot(X_plot[0], l_plot[0]*scipy.stats.norm.pdf(X_plot[0], Mittelw[Stda.index(min(Stda))], min(Stda))[list(
    scipy.stats.norm.pdf(X_plot[0], Mittelw[Stda.index(min(Stda))], min(Stda)).index(max(scipy.stats.norm.pdf(
    X_plot[0], Mittelw[Stda.index(min(Stda))], min(Stda)))]), label='Strahlprofil an der Stelle z='+str(Z_plot
    [0][0]))
print(np.trapz(l_plot[0], x=X_plot[0], dx=0.1))
plt.plot(X_plot[0], scipy.stats.norm.pdf(X_plot[0], Mittelw[Stda.index(min(Stda))], min(Stda)))
plt.tick_params(axis='both',labeltop=True, labelright=True,top='on', right='on', direction='out')
```

Literaturverzeichnis

- [1] R. Hellborg and G. Skog, "Accelerator Mass Spectrometry," Mass Spectrometry Reviews, vol. 27, pp. 398–427, 2008.
- [2] J. Liebl, P. Steier, R. Golser, W. Kutschera, K. Mair, A. Priller, I. Vonderhaid, and E. Wild, "Carbon background and ionization yield of an AMS system during ^{14}C measurements of microgram-size graphite samples," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 294, pp. 335–339, 2013.
- [3] P. Steier, R. Golser, W. Kutschera, A. Priller, C. Vockenhuber, and S. Winkler, "VERA, an AMS facility for "all" isotopes," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 223-224, pp. 67–71, 2004.
- [4] W. Kutschera, "Applications of Accelerator Mass Spectrometry," International Journal of Mass Spectrometry, vol. 349-350, pp. 203–218, 2013.
- [5] L. Fifield, "Accelerator mass spectrometry and its applications," Reports on Progress in Physics, vol. 62, pp. 1223–1274, 1999.
- [6] H.-A. Synal, "Developments in accelerator mass spectrometry," International Journal of Mass Spectrometry, vol. 349-350, pp. 192–202, 2013.
- [7] W. Kutschera, "Progress in isotope analysis at ultra-trace level by AMS," International Journal of Mass Spectrometry, vol. 242, pp. 145–160, 2005.
- [8] K. Purser, R. Liebert, A. Litherland, R. Beukens, H. Gove, C. Bennett, M. Clover, and W. Sondheim, "An attempt to detect stable N^- ions from a sputter ion source and some implications of the results for the design of tandems for ultra-sensitive carbon analysis," Revue de Physique Appliquée, vol. 12, pp. 1487–1492, 1977.
- [9] W. Kutschera, P. Collon, H. Friedmann, R. Golser, P. Hille, A. Priller, W. Rom, P. Steier, S. Tagesen, A. Wallner, E. Wild, and G. Winkler, "VERA: A new AMS facility in Vienna," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 123, pp. 47–50, 1997.
- [10] A. Priller, R. Golser, P. Hille, W. Kutschera, W. Rom, P. Steier, A. Wallner, and E. Wild, "First performance tests of vera," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 123, pp. 193–198, 1997.

LITERATURVERZEICHNIS

- [11] A. Priller, , K. Melber, O. Forstner, R. Golser, W. Kutschera, P. Steier, and A. Wallner, "The new injection beamline at VERA," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 268, pp. 824–826, 2010.
- [12] M. Martschini, P. Andersson, O. Forstner, R. Golser, D. Hanstorp, A. Lindahl, W. Kutschera, S. Pavetich, A. Priller, J. Rohlén, P. Steier, M. Suter, and A. Wallner, "AMS of ^{36}Cl with the VERA 3 MV tandem accelerator," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 294, pp. 115–120, 2013.
- [13] A. Wallner, M. Bichler, K. Buczak, D. Fink, O. Forstner, R. Golser, M. A. C. Hotchkis, A. Klix, A. Krasa, W. Kutschera, C. Lederer, A. Plompen, A. Priller, D. Schumann, V. Semkova, and P. Steier, "High-sensitivity isobar-free AMS measurements and reference materials for ^{55}Fe , ^{68}Ge and ^{202g}Pb ," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 294, pp. 374–381, 2013.
- [14] P. Steier, M. Bichler, L. Fifield, R. Golser, W. Kutschera, A. Priller, F. Quinto, S. Richter, M. Srncik, F. Terrasi, L. Wacker, A. Wallner, G. Wallner, K. Wilcken, and E. Wild, "Natural and anthropogenic ^{236}U in environmental samples," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 266, no. 10, pp. 2246 – 2250, 2008.
- [15] W. Kieser, X. Zhao, A. Litherland, J. Eliades, and J. Cornett, "RFQ Reaction Cells for AMS: Developments and Applications," EPJ Web of Conferences, vol. 63, p. 03005, 2013.
- [16] A. Litherland, I. Tomski, X.-L. Zhao, L. Cousins, J. Doupé, G. Javahery, and W. Kieser, "Isobar separation at very low energy for AMS," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 259, pp. 230–235, 2007.
- [17] D. Berkovts, E. Boaretto, G. Hollos, W. Kutschera, R. Naaman, M. Paul, and Z. Vager, "Selective suppression of negative ions by Lasers," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, vol. 281, pp. 663–666, 1989.
- [18] D. Berkovts, E. Boaretto, G. Hollos, W. Kutschera, R. Naaman, M. Paul, and Z. Vager, "Study of laser interaction with negative ions," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 52, pp. 378–383, 1990.
- [19] Y. Liu, P. Andersson, J. R. Beene, O. Forstner, A. Galindo-Uribarri, T. Gottwald, D. Hanstorp, C. C. Havener, A. Lindahl, and K. Wendt, "Beam purification by photodetachment (invited)," Review of Scientific Instruments, vol. 83, no. 2, p. pages = 02A711, 2012.
- [20] O. Forstner, P. Andersson, D. Hanstorp, J. Lachner, M. Martschini, J. Pitters, A. Priller, P. Steier, and R. Golser, "The ILIAS project for selective isobar suppression by laser photodetachment," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 361, pp. 217–221, 2015.

- [21] O. Forstner, P. Andersson, C. Diehl, R. Golser, D. Hanstorp, W. Kutschera, A. Lindahl, A. Priller, P. Steier, and A. Wallner, "Isobar suppression in AMS using laser photodetachment," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 266, p. 4565–4568, 2008.
- [22] Y. Liu, J. F. Liang, G. D. Alton, J. R. Beene, Z. Zhou, and H. Wollnik, "Collisional cooling of negative-ion beams," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 187, pp. 117–131, 2002.
- [23] Y. Liu, J. Liang, and J. Beene, "A high efficiency RF quadrupole ion beam cooler for negative ions," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, vol. 255, pp. 416–422, 2007.
- [24] Y. Liu, J. Beene, C. Havener, and J. Liang, "Isobar suppression by photodetachment in gas-filled rf quadrupole ion guide," Applied Physics Letters, vol. 87, p. 113504, 2005.
- [25] M. Martschini, J. Pitters, T. Moreau, P. Andersson, O. Forstner, D. Hanstorp, J. Lachner, Y. Liu, A. Priller, P. Steier, and R. Golser, "Selective laser photodetachment of intense atomic and molecular negative ion beams with the ILIAS RFQ ion beam cooler," International journal of Mass Spectrometry, vol. 415, pp. 9–17, 2017.
- [26] F. Major, V. Gheorghe, and G. Werth, Charged Particle Traps. Heidelberg: Springer, 2005.
- [27] O. Forstner, H. Gnaser, R. Golser, D. Hanstorp, M. Martschini, A. Priller, J. Rohlen, P. Steier, C. Vockenhuber, and A. Wallner, "Reassessment of ^{182}Hf AMS measurements at VERA," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 269, p. 3180–3182, 2011.
- [28] C. Vockenhuber, M. Bichler, R. Golser, W. Kutschera, A. Priller, P. Steier, and S. Winkler, " ^{182}Hf , a new isotope for AMS," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B, vol. 223, pp. 823–828, 2004.
- [29] T. Leopold, J. Rohlén, P. Andersson, C. Diehl, M. Eklund, O. Forstner, D. Hanstorp, H. Hultgren, P. Klason, A. Lindahl, and K. Wendt, "Feasibility of photodetachment isobar suppression of WF_5^- with respect to HfF_5^- ," International Journal of Mass Spectrometry, vol. 359, pp. 12–18, 2014.
- [30] A. P. Banford, The Transport of Charged Particle Beams. London: E. and F. N. Spon Limited, 1966.
- [31] F. Hinterberger, Physik der Teilchenbeschleuniger und Ionenoptik. Heidelberg: Springer-Verlag, 2009.
- [32] J. Gross, Massenspektrometrie. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2013.

LITERATURVERZEICHNIS

- [33] T. Moreau, Development and characterization of the Ion Laser InterAction Setup (ILIAS). University of Vienna: Master Thesis, 2016.
- [34] K. Jousten, W. Jitschin, R. Lachenmann, A. Jünemann, U. Friedrichsen, E. Lippelt, B. Kossek, H. Grave, K. Galda, K. Bernhardt, et al., Wutz Handbuch Vakuumtechnik: Theorie und Praxis. Wiesbaden: Vieweg, 2013.
- [35] J. Lukas, A. Priller, and P. Steier, "A device for automated phase space measurement of ion beams," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B, vol. 259, pp. 140–143, 2007.
- [36] "Beam Profile Monitors, national electrostatics corp., middleton, wisconsin, usa." <http://www.pelletron.com/wp-content/uploads/2017/02/BPM-v1.pdf>. Accessed: 8.2.2018 (21:08).
- [37] K. Melber, AMS-Messungen stabiler Platinisotope in präsolaren Nanodiamanten mit Hilfe eines neuen Negativ-Ionen-Injektors für VERA. Universität Wien: Dissertation, 2011.
- [38] "Beam Defining Slits, national electrostatics corp., middleton, wisconsin, usa." <http://www.pelletron.com/wp-content/uploads/2017/02/Slits-v1.pdf>. Accessed: 31.1.2018 (09:59).
- [39] B. Lotter and H. Wiendahl, Montage in der industriellen Produktion: Ein Handbuch für die Praxis. Springer, 2013.
- [40] K. Fritzsche, Grundkurs Analysis 2: Differentiation und Integration in mehreren Veränderlichen. Berlin Heidelberg: Springer, 2013.
- [41] P. Steier, Exploring the limits of VERA: A universal facility for accelerator mass spectrometry. Universität Wien: Dissertation, 2000.
- [42] SIMION[®] 8.1.1.32. Ringoes, NJ 08551: Scientific Instrument Services, Inc., <http://simion.com>, 2013.
- [43] D. Manura and D. Dahl, SIMION[®] Version 8.0/8.1. Scientific Instrument Services, Inc., 2011.
- [44] J. Pitters, Laser Photodetachment in a Gas-Filled RF-Quadrupole. University of Vienna: Master Thesis, 2015.
- [45] D. J. Manura, "collision_hs1.lua,user program from simion[®] examples," Scientific Instrument Services, Inc., 2005-06/2011.
- [46] "SIMION 8.1 Supplemental Documentation on Collision Model HS1." http://simion.com/info/collision_model_hs1.html. Accessed: 18.9.2017 (09:04).
- [47] "Python[™]3.5.4.," Python Software Foundation, <http://python.org>, 2017.