

Abschlussbericht

NUSTAR.DE: MATS:

AUFBAU EINER PENNINGFALLE FÜR HOCHPRÄZISIONSMASSENMESSUNGEN

Vorhaben: **06GF9101I** bzw. 05P09HGFN6
Förderperiode: 01.07.2009 bis 30.06.2012
Projektleiter: Dr. Gerrit Marx, Prof. Dr. Lutz Schweikhard
Hochschule: Ernst-Moritz-Arndt-Universität Greifswald

Zusammenfassung

Das Projekt ist Teil des MATS Experiments [MATS06] im Forschungsschwerpunkt NuSTAR.de [NUST08]. Mit dem Aufbau der MATS Facility (precision Measurements of very short-lived nuclei using an Advanced Trapping System for highly charged ions) an FAIR werden hochpräzise Massenmessungen an sehr kurzlebigen Radionukliden möglich. Die Masse - und damit verbunden die Bindungsenergie - ist eine fundamentale Eigenschaft des Atomkerns. Anwendung finden hochpräzise Massenmessungen beispielsweise bei Kernstrukturuntersuchungen, bei Tests von Kernmodellen oder auch bei Tests zur Schwachen Wechselwirkung und des Standardmodells der Elementarteilchen. Die dabei geforderte relative Genauigkeit liegt im Bereich zwischen 10^{-5} und 10^{-8} . Die erfolgreichen Messungen der letzten Jahren an kurzlebigen Radionukliden an beispielsweise ISOLTRAP und SHIPTRAP unterstreichen die Stärke eines Penningfallen-Massenspektrometers.

In diesem Projekt wurde im Rahmen der MATS-Kollaboration eine Mess-Penningfalle für hochpräzise Massenmessungen für die MATS Facility entworfen und getestet. Dazu wurden verschiedene Falldesigns entworfen und das Einfangen und Extrahieren von Ionen simuliert. Die angekündigte Verzögerung des Aufbaus des niederenergetischen Zweigs (LEB) von FAIR hat zu einer Änderung in diesem Projekt geführt: Der ursprünglich kryogen und vertikal geplante Fallenaufbau wurde nun als horizontaler Aufbau bei Raumtemperatur umgesetzt. Damit konnte das System in einem bereits vorhandenen Magneten getestet werden.

Zielsetzung

Bei diesem Projekt soll im Rahmen der MATS Kollaboration [MATS06] eine Penningfalle zur Präzisionsmassenmessung entworfen und getestet werden. Dabei wird eine relative Messgenauigkeit von 10^{-8} für die Massenmessung kurzlebiger Radionuklide angestrebt. Diese Penningfalle ist Teil der im Aufbau befindlichen MATS Anlage [TDR08].

Die Penningfalle soll sowohl für den ToF-ICR-Nachweis, wie er beispielsweise bei ISOLTRAP oder SHIPTRAP angewandt wird, geeignet sein, als auch die Möglichkeit eines nicht-destruktiven FT-ICR-Nachweises bieten. Ziel des Projektes ist

- a) die vollständige Simulation des Fallensystems (inklusive Einschuss in die Penningfalle und Ausschuss auf den Detektor)
- b) das Design der Penningfalle,
- c) Aufbau und Test der Falle und der Nachweise mittels ToF-ICR.

Status des Projektes

An der für MATS im Rahmen dieser Arbeit aufzubauenden Präzisionspenningfalle, sollen zwei komplementäre Nachweismethoden Anwendungen finden: Der destruktive Flugzeitnachweis (ToF und ToF-ICR) und der Fouriertransformations-Ionenzyklotronresonanz Nachweis (FT-ICR). Geringe Erzeugungsraten stellen bei Verwendung einer destruktiven Nachweismethode eine Limitierung für experimentelle Untersuchungen dar. Der in zu einem späteren Zeitpunkt umzusetzende empfindliche FT-ICR Nachweis erlaubt eine Identifizierung der gespeicherten Ionen sowie die Massenbestimmung an einem einzelnen Ion. Im folgenden werden die beiden Nachweismethoden kurz beschrieben.

Grundprinzip des Flugzeitnachweises (ToF-ICR)

Das Prinzip des Flugzeitnachweises zur Bestimmung der reinen Zyklotronfrequenz, das z.B. am ISOLTRAP- und SHIPTRAP-Experiment verwendet wird, ist ausführlich in [Köni95] und [Boll96] beschrieben. Grundlegend ist dabei der Nachweis eines axialen Energiegewinns aus der radialen Bewegung, der sich in kürzeren Flugzeiten der extrahierten Ionen zeigt. Mit Hilfe einer geeigneten Anregung lässt sich eine vollständige Konversion einer anfänglich reinen Magnetronbewegung in die Zyklotronbewegung erzielen. Ist die Konversion vollständig, d.h. hat man die Resonanzfrequenz getroffen, so haben die Ionen eine maximale Zunahme ihrer radialen Energie erfahren. Nach dem Ausschuss aus der Falle, driften die Ionen zu einem Detektor, der sich im Randfeld des Magneten befindet. Beim Durchflug durch den inhomogenen Teil des Magnetfelds erfahren sie eine axiale Kraft. Infolgedessen wird die resonante Anregung über eine verkürzte Flugzeit der Ionen registriert [Gräf80].

Ionennachweis mittels FT-ICR

Ein Ionennachweis mittels FT-ICR ist eine nichtdestruktive Detektion. Im Prinzip besteht daher die Möglichkeit, ein Experiment am gleichen Ionenensemble zu wiederholen, ausreichend lange Lebensdauer der Ionen vorausgesetzt. Ein Beispiel für einen hochempfindlichen FT-ICR Nachweis für schwere Ionen findet sich in [Webe03] und [Webe05].

Ein gespeichertes Ion der Ladung q bzw. eine Ionenwolke mit N Einzelladungen ($Q=Nq$) wird zu einer kohärenten Bewegung angeregt. Die sich bewegende Ladung Q erzeugt in den Segmenten einer geteilten Ringelektrode der Penningfalle eine zeitlich veränderliche Bildladungsverteilung. Diese kann über einen Widerstand als Wechsellspannungssignal analysiert werden. Eine Fouriertransformation in den Frequenzbereich liefert das Frequenz- und damit das Massenspektrum der in der Falle gespeicherten Ionen.

Konstruktion der Ionenfalle

Für die Falle ergeben sich hieraus Bedingungen für die Qualität des Speicherfeldes (möglichst ideales Quadrupolfeld über einen großen Raumbereich) und den effektiven Ionentransfer aus der Falle heraus (ToF-ICR). Speziell für Anwendungen, die eine ideale Feldform über ausgedehnte, dicht an die Fallenelektroden heranreichende Raumgebiete erfordern, werden hyperbolische Fallen bevorzugt. Um das Feld nicht zu sehr zu stören, dürfen jedoch die Öffnungen in den Endkappen, durch die die Ionen in die Falle hinein- und wieder herausgelangen, nicht zu groß sein. Im Vergleich dazu stellt eine zylindrische Falle bauartbedingt eine sehr offene Struktur dar. Das ist vorteilhaft für das Evakuieren des Fallenvolumens, um die erforderlichen niedrigen Restgas-Drücke zu erreichen. Außerdem ist bei einer Falle mit großem Eintrittsloch die Akzeptanz der Ionen höher.

Ziele des Projektes in diesem Förderabschnitt sind

- a) die vollständige Simulation des Fallensystems (inklusive Einschuss in die Penningfalle und Ausschuss auf den Detektor),
- b) das Design der Penningfalle und des Nachweises,
- c) Aufbau und Test der Falle und der Nachweis mittels ToF-ICR.

Hierzu müssen im Vorfeld der Konstruktion und dann auch begleitend ausführliche ionenoptische Simulationen der Penningfalle, vor allem aber des Ionentransfers in das Magnetfeld hinein und für den ToF-ICR Nachweis auch die Extraktion aus dem Magnetfeld durchgeführt werden.

Die Konstruktionsarbeit umfasst das Design der Penningfalle in einem geeigneten Vakuumgefäß, Planung der Vakuumsicherheit und Integration des Penningfallenabschnitts in

die MATS-Anlage. In die Konstruktion und Simulation der Penningfalle fließen die Randbedingungen des Experimentes ein, namentlich die Stärke des Magnetfeldes, die Größe der Magnetbohrung, der Magnetfeldgradient, die Streumagnetfelder und die geplanten Nachweismethoden.

Es wurden drei Fallengeometrien untersucht: Eine Penningfalle mit hyperbolisch geformten Elektroden und zwei Fallen mit jeweils zylindrischen Elektroden aber unterschiedlichen Zylinderlängen. Da extern erzeugte Ionen in der Falle eingefangen werden sollen, lag ein besonderer Schwerpunkt auf den Simulationen zum Einschuss der Ionen. Abbildungen 1-3 zeigen Konstruktionsbilder der drei Penningfallen.

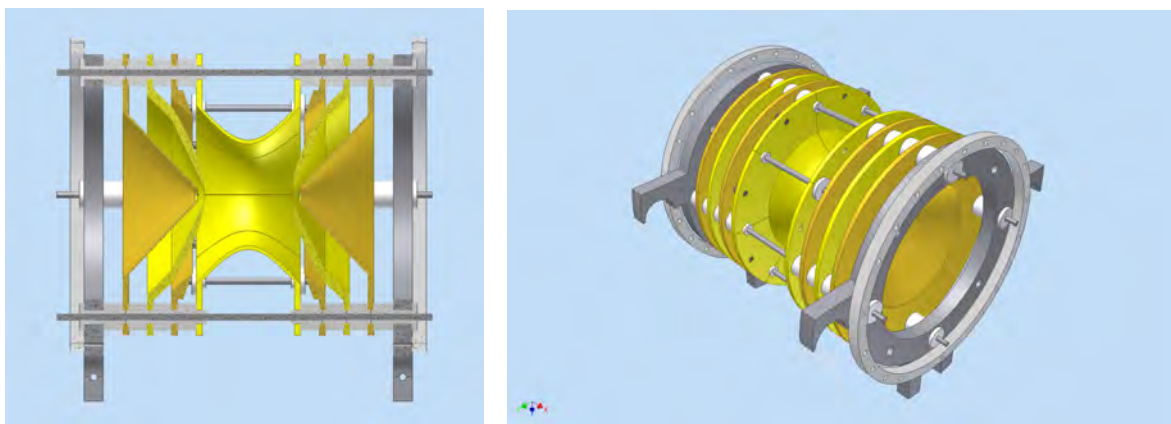


Abbildung 1: Hyperbolische Penningfalle mit Korrektorelektroden [Gab83] zur Kompensation von Feldabweichungen durch Fertigungstoleranzen bzw. Schnitte (Ringelektrode) und Löcher (Endkappen).

Abbildung 1 zeigt eine Penningfalle mit hyperbolisch geformten Elektroden. Neben der Ringelektrode und den beiden Endkappen sind in diesem Design zusätzliche Korrektorelektroden eingefügt. Diese dienen der Kompensation elektrischer Feldfehler, die zum einen von der endlichen Größe der Fallenelektroden herrühren, zum anderen aber auch von Feldabweichungen z.B. durch die Einschusslöcher in den Endkappen. Hyperbolische

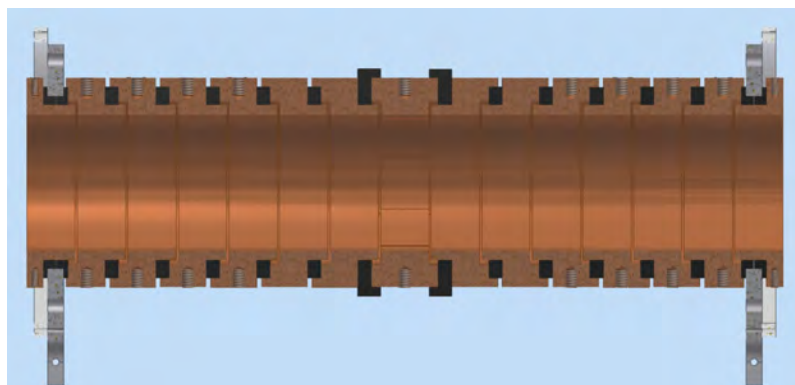


Abbildung 2: Penningfalle mit zylindrischen Elektroden (ähnlich Abbildung 2). Alle Elektrodenzylinder haben die gleiche Länge [Fei99]. Diese Konstruktion bietet die größte Flexibilität, um Ort und Form des Speicherpotentials der Messaufgabe anzupassen.

Fallen sind prinzipiell als Präzisionsfallen besonders geeignet, da ihre Elektroden die erwünschten Äquipotentialflächen am besten nachformen. Simulationen zum Einbringen der Ionen zeigen jedoch, dass die relativ kurze Fallenlänge hier ein Nachteil ist.

Das Design der in Abbildung 2 gezeigten zylindrischen Penningfalle verfolgt das Ziel, mit einem möglichst einfachen Aufbau (alle Zylinderelektroden haben die gleiche Länge) eine möglichst große Flexibilität in der Wahl der Form des Speicherpotentials zu erhalten. Durch Ändern der Spannungen an den einzelnen Elektroden während des Experimentes kann von großem Speichervolumen beim Einfang zu kleinem Speichervolumen (bei dann geringerer Magnetfeldinhomogenität) dynamisch gewechselt werden. Bei der technischen Umsetzung

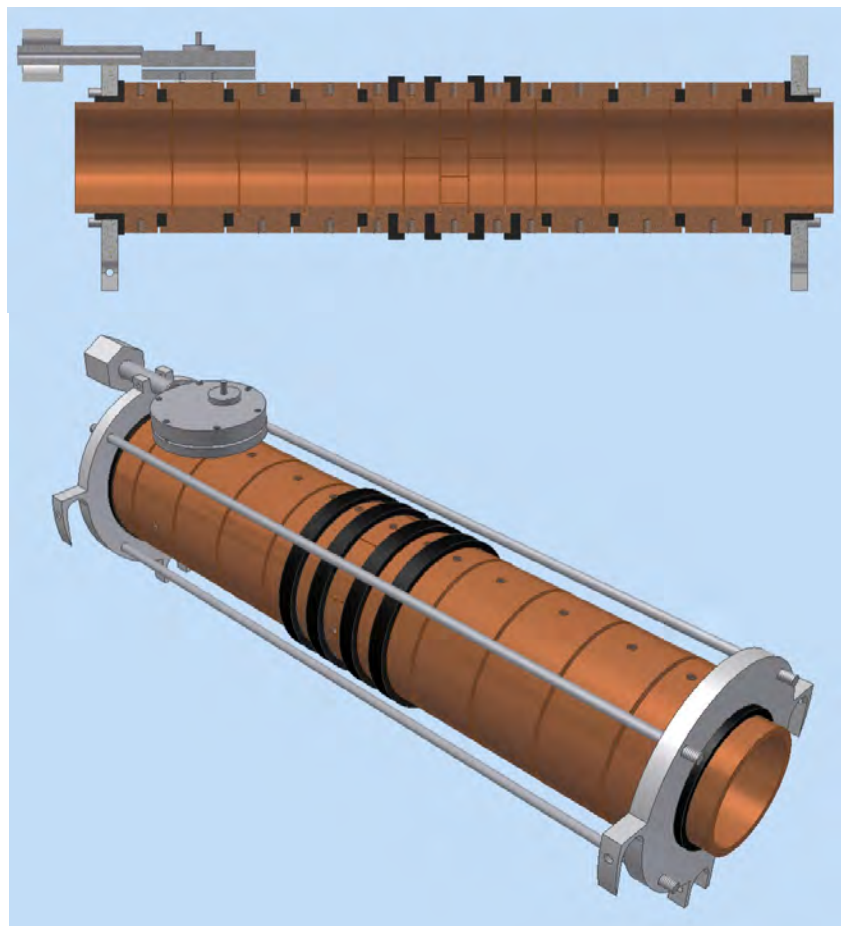


Abbildung 3: Penningfalle mit zylindrischen Elektroden. Es existieren ebenfalls Korrektur-elektroden zur Kompensation von Feldabweichungen durch Fertigungstoleranzen bzw. Schnitte (Ringelektrode) (siehe auch [Rai97][Sik03]).

skalieren die benötigten Stromzuführungen und Vakuumdurchführungen mit der Anzahl der Elektroden. Günstig ist es hier einen Kompromiss zu finden.

Die in Abbildung 3 gezeigte zylindrische Falle (Innendurchmesser der Elektroden $d=30\text{mm}$) bietet die Möglichkeit eines effektiven Ioneneinfangs in einem vergrößerten Speichervolumen

und die anschließende Speicherung in einem möglichst harmonischen Speicherpotential. Die Anzahl der notwendigen Zuleitungen ist durch die Wahl der unterschiedlichen Längen der Elektroden auf das Notwendige beschränkt. Simulationen mit dieser Konfiguration zeigen, dass die Abweichungen vom idealen Quadrupolfeld in einem Raumbereich von $-10\text{mm} < z, r < 10\text{mm}$ im Bereich von $< 10^{-4}$ liegen.

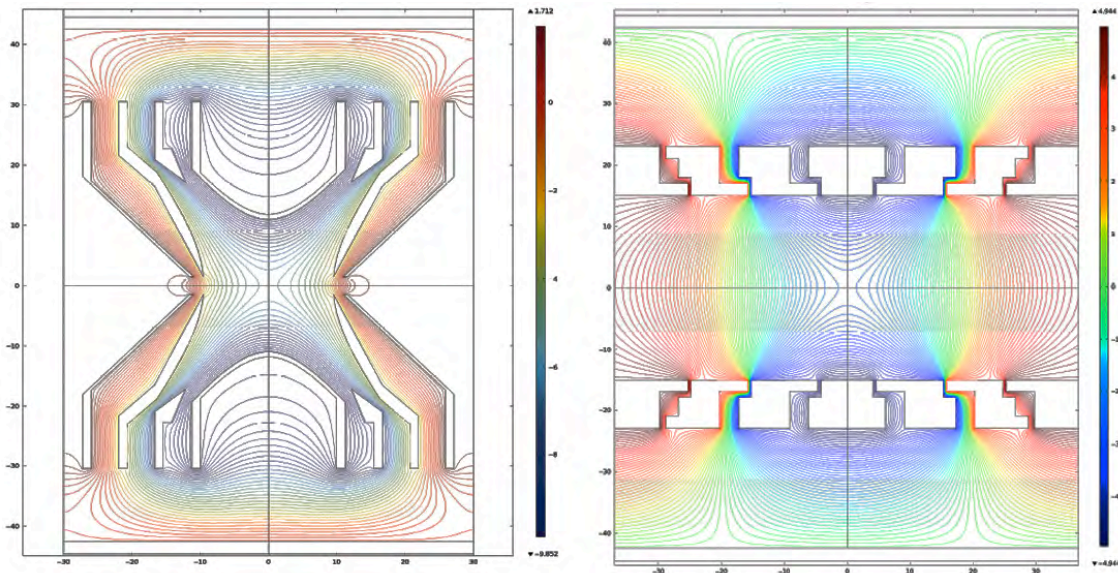


Abbildung 4: Vergleich einer zylindrischen mit einer hyperbolischen Fallenkonfiguration. Die jeweils im Fallenvolumen eingezeichneten Linien stellen die Projektion der Äquipotentialflächen in die r - z -Ebene dar. Bei geeigneter Wahl der Korrekturspannungen erzeugt die zylindrische Konfiguration (rechts) im Bereich des Fallenzentrums einen Potentialverlauf, der nahezu identisch mit dem ideal harmonischen (links) ist

In Abb. 4 sind Quadrupol-Potentiale dargestellt, wie sie von einer hyperbolischen und einer zylindrischen Falle erzeugt werden. Im Falle der hyperbolischen Geometrie hat das Feld im gesamten Raumbereich, der von den Elektroden eingeschlossen wird, die gewünschte Form. Abweichungen ergeben sich durch Justageunsicherheiten, Schnitte in der Ringelektrode und

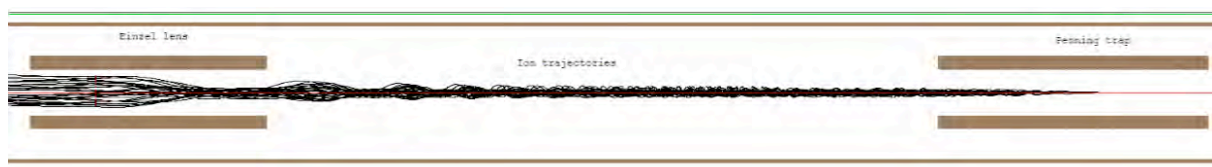


Abbildung 5: Beispiel zu den Simulationen mit dem Programm SIMION 8 zum Ein- und Ausschuss von Ionen in die bzw. aus der Penningfalle. (siehe auch Meilenstein 1)

die Löcher zur Injektion von Ionen. Dagegen kann ein durch Superposition erzeugtes Feld schon prinzipiell nicht perfekt sein. Auch bei geeigneter Wahl der Zylinderlängen und -spannungen kann man dem idealen Fallenpotential nur innerhalb eines begrenzten Bereichs

nahe kommen. Die Größe dieses Bereichs und die Genauigkeit, mit der dort ein harmonischer Feldverlauf erzeugt werden kann, wurden durch Simulationen bestimmt. Abbildung 5 zeigt exemplarisch den Einschuss von Ionen in ein 12T Magnetfeld. Dabei wurde in diesem Fall die Simulation gestoppt, sobald die Ionen das Fallenzentrum erreicht hatten.

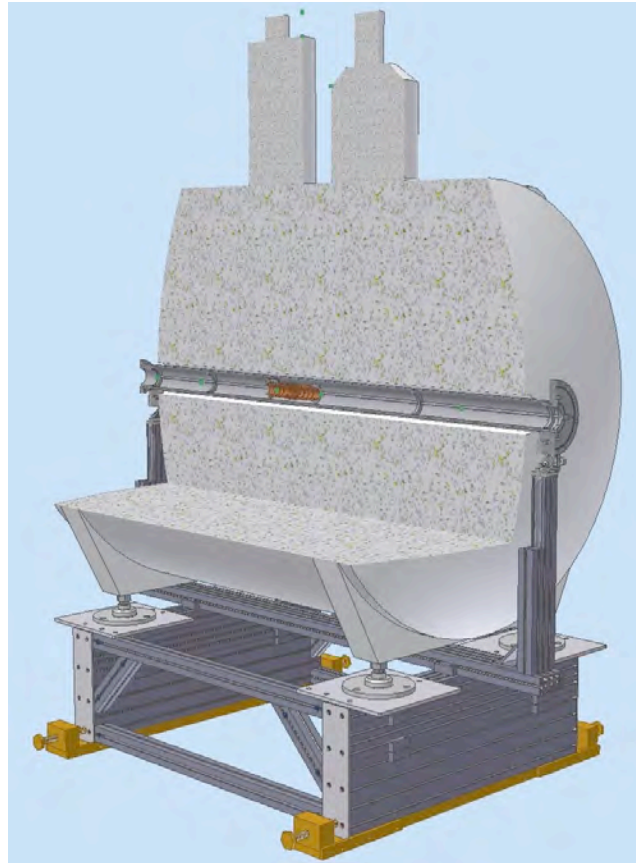


Abbildung 6: Magnethalterung zur Ausrichtung des Vakuumrohres im Magnetfeld. Zusätzlich kann der Magnet relativ zum Experiment ausgerichtet werden.

Um die Penningfalle im Magnetfeld ausrichten zu können, muss die Falle relativ zum Magnetfeld bewegt werden können. Dazu wurde eine neue Halterung entwickelt, die das Vakuumrohr in der Magnetbohrung relativ zum Magneten verschieben kann (siehe Abbildung 6). In Abbildung 7 kann man die Elektroden der Penningfalle vor dem Einbau in das Vakuumrohr und Justierung im Magneten sehen. Gut zu erkennen ist das Piezzoventil, welches den gezielten Einlass von Gaspulsen zur Kühlung des Ionenensembles in dem Fallenvolumen ermöglicht. In Abbildung 8 schließlich ist der Flugzeitnachweis gespeicherter Clustermono- und Dianionen zu sehen. Hierbei wurden zunächst Clusterionen von der Quelle im Bereich Au_{40}^- bis Au_{60}^- gespeichert. Durch Anwendung einer speziellen Kühltechnik konnten bei der Akkumulation der Ionen von der Quelle vermehrt Au_{57}^- Clusterionen

gespeichert werden. Nach Überlagerung mit gleichzeitig gespeicherten Elektronen bilden sich Au-Dianionen.

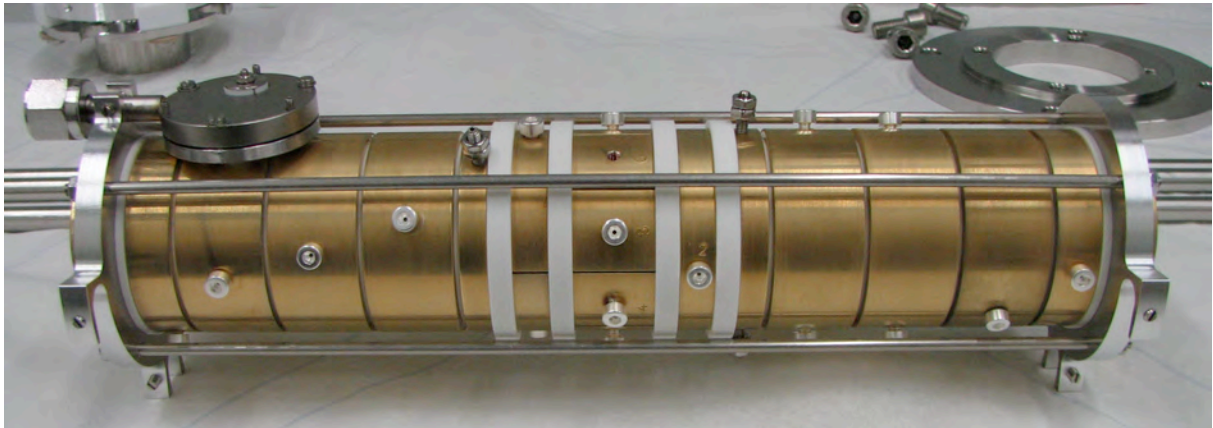


Abbildung 7: Fotografie der Penningfallen Elektroden vor dem Einbau in das Vakuumrohr und den Magneten. Auf der linken Seite kann man das aufgesetzte Ventil zum Einlass von Gaspulsen zur Kühlung der Ionen erkennen.

Parallel wurden die für den Betrieb der Falle und für den Nachweis durch ToF und ToF-ICR notwendigen Steuerungsschritte und Routinen durch Einbinden in das Experimentsteuerungs- und Datenaufnahmesystem CS vorgenommen [2]. Das gesamte Experiment mit Erzeugung von Clusterionen, Akkumulation in einer Paulfalle, Transfer in die neue Penningfalle und Nachweis über ToF kann vollautomatisch durchgeführt werden.

Unabhängig vom Experimentkontrollsystem werden die Vakuumbedingungen über ein selbstentwickeltes Vakuumüberwachungssystem überwacht. Dieses kann selbständig auf Notfälle wie Unterbrechung der Strom-, Druckluft- oder Kühlwasserversorgung reagieren.

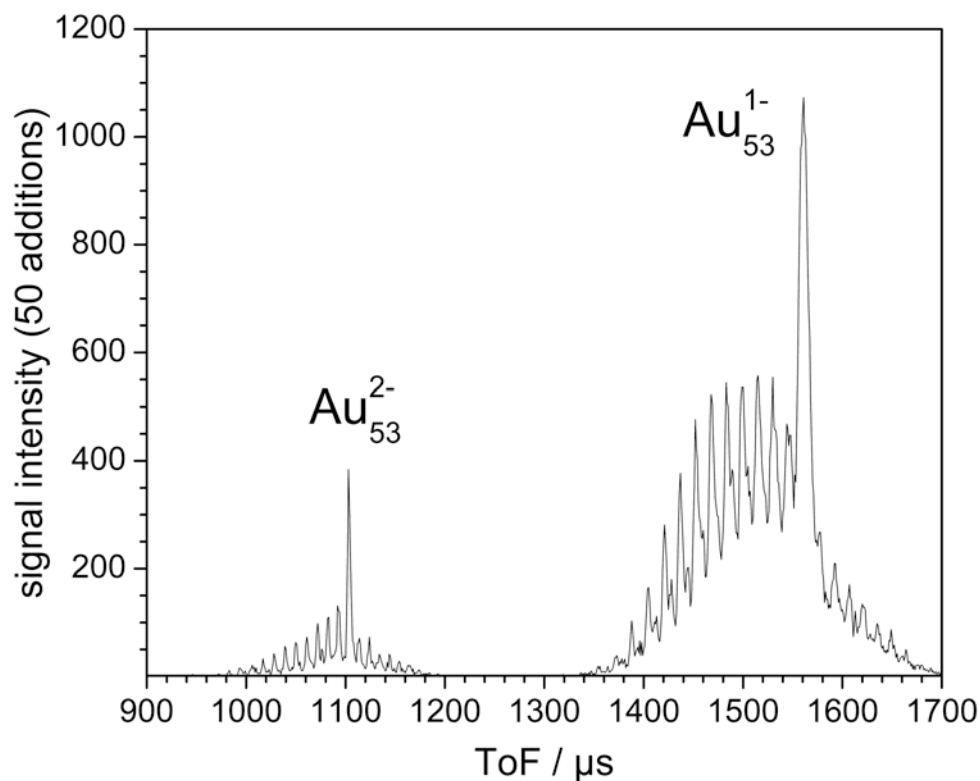


Abbildung 8: Zur Erzeugung von Dianionen in der Penningfalle: Bei gleichzeitigem Speichern von Clustermonoionen und Elektronen in der Penningfalle kann es zur Anlagerung von Elektronen kommen. In diesem Fall wurden Clustermonoionen unterschiedlicher Größe ($\text{Au}_{42} - \text{Au}_{60}$) eingefangen, wobei Au_{53} durch eine massenselektive Kühltechnik bevorzugt gespeichert wurde. Nach Überlagerung mit einer Elektronenwolke bilden sich Dianionen. Mithilfe dieser Technik wurden für größere Cluster bis zu 6-fach negativ geladene Clusterionen erzeugt.

Im Rahmen dieses Projektes konnte eine Penningfalle entworfen und getestet werden [1]. Es wurden erfolgreich verschiedene Anregungsschemata in Penningfallen untersucht und die Möglichkeiten zur Erzeugung exotischer hochgeladener Anionen verbessert [2,3,4]. Zur Automatisierung der Experimentkontrolle wurden mit dem Einsatz von FPGA Karten neue Wege beschritten [5,6]. Damit wurden nicht nur alle Meilensteine des Projektes erreicht, sondern darüber hinaus auch wichtige neue Entwicklungen für die zukünftigen Fallen bei MATS [7] im Low Energy Branch (LEB) von FAIR angestoßen.

Gegenüberstellung der geplanten und erreichten Ziele

Nr.	Geplante Ziele	Status
1	Simulationen zum Ionentransfer in die Penningfalle und zur Falle selbst	Simulationen wurden mit Hilfe der SIMION ® Software durchgeführt.
2	Design, Aufbau und Test der Präzisionsfalle mit Offline-Ionen	Die zylindrische Penningfalle wurde im Rahmen dieses Projektes designed, in der mechanischen Werkstatt gebaut und in einem neuen 12T Magneten mit extern erzeugten Al-Clustern getestet.
3	Erste ToF-Resonanz	Die erste ToF Resonanz wurde ??? aufgenommen. Inzwischen wird die Ionenfalle routinemäßig bei Experimenten mit Clusterionen eingesetzt.
4	Planung und Aufbau des Vakuumsystems und Tests der Vakuumkontrolle	Das Vakuumsystem der Apparatur ist mit verschiedenen Ventilen und Interlocks über eine selbstentwickelte Steuerelektronik in der Lage weitestgehend selbstständig auf Änderungen bei Strom-, Kühlwasser- oder Druckluftversorgung zu reagieren.
5	Planung und Test der Automatisierung	Die gesamte Experimentkontrolle wird durch das an der GSI gepflegte modulare Control System (CS) betrieben.

Mitarbeiter am Projekt während der Förderperiode

Name	Zeitraum	Anteil Projekt	Tätigkeitsbereich
Dr. G. Marx	01.07.2009 – 30.06.2012	20%	Projektleiter
Prof. Dr. L. Schweikhard	01.07.2009 – 30.06.2012	5%	
R. Wolf	01.04.2011 – 30.06.2012	100%	Doktorand
F. Wienholtz	01.04.2010 – 31.03.2011	100%	Doktorand
A. Vass	01.10.2009 – 31.03.2010	100%	Doktorand
F. Ziegler	01.07.2009 – 31.12.2010	20%	Doktorand
E. Eich	01.07.2009 – 31.12.2010	20%	Techniker

Veröffentlichungen

[1] The new ClusterTrap setup

F. Martinez, G. Marx, L. Schweikhard, A. Vass, F. Ziegler Eur. Phys. J. D 63, 255-262 (2011)

[2] One- and two-pulse quadrupolar excitation schemes of the ion motion in a Penning trap investigated with FT-ICR detection

M. Heck, K. Blaum, R. B. Cakirli, M. Kretschmar, G. Marx, D. Rodríguez, L. Schweikhard, S. Stahl, M. Ubieto-Díaz Appl. Phys. B Appl. Phys. B 107, 1019-1029 (2012)

[3] Lifting of the trapping-potential during ion storage for multi-anion production in a Penning trap

F. Martinez, S. Bandelow, C. Breitenfeldt, G. Marx, L. Schweikhard, F. Wienholtz, F. Ziegler Int. J. Mass Spectrom. 313, 30-35 (2012)

[4] A study of octupolar excitation for mass-selective centering in Penning traps

M. Rosenbusch, Ch. Böhm, Ch. Borgmann, M. Breitenfeldt, A. Herlert, M. Kowalska, S. Kreim, G. Marx, S. Naimi, D. Neidherr, R. Schneider, L. Schweikhard Int. J. Mass. Spectrom. 314, 6-12 (2012)

[5] A Pulse-Pattern Generator using LabVIEW FPGA

D. Beck, H. Brand, H. Hahn, F. Herfurth, S. Koszudowski, G. Marx, L. Schweikhard, F. Ziegler, Proceedings of ICALEPCS2009, Kobe, Japan, ISBN 978-4-9905391-0-8 (2010) 215-217

[6] A new Pulse-Pattern Generator based on LabVIEW FPGA

F. Ziegler, D. Beck, H. Brand, H. Hahn, G. Marx, L. Schweikhard Nucl. Instrum. Meth. A 679, 1-6 (2012)

[7] MATS and LaSpec: High-precision experiments using ion traps and lasers at FAIR

D. Rodríguez et al. Eur. Phys. J. Special Topics 183, 1-123 (2010)

Referenzen:

- [Boll96] G. Bollen *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **368**, 675 (1996)
- [Fei99] X. Fei *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A, **425**:431–440 (1999)
- [Gab83] G. Gabrielse *et al.*, Physical Review A, **27**:2277–2290 (1983)
- [Gräf80] G. Gräff *et al.*, Z. Phys. A **297**, 35 (1980)
- [Köni95] M. König *et al.*, Int. J. Mass. Spectrom. Ion Process. **142**, 95 (1995)
- [MATS06] K. Blaum for the MATS Collaboration, Technical Proposal, GSI/FAIR Darmstadt (2006)
- [NuST08] Antrag zur Einrichtung eines Forschungsschwerpunktes NuSTAR.de
- [Rai97] H. Raimbault-Hartmann *et al.* Nucl. Instrum. Meth. B, **126**:378-382 (1997)
- [Sik03] G. Sikler, Dissertation, Universität Heidelberg (2003)
- [TDR08] D. Rodríguez *et al.*, Eur. Phys. J. Special Topics **183**, 1-123 (2010)
- [Webe03] C. Weber, Dissertation, Universität Heidelberg (2003)
- [Webe05] C. Weber *et al.*, Eur. Phys. J. A **25**, 65-66 (2005)