

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

## Schlussbericht

Verbund: nein

Zuwendungsempfänger: Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg  
Projektleitung: Prof. Dr. Matthias Weidemüller  
E-Mail: weidemueller@uni-heidelberg.de  
Förderkennzeichen: 05P12VHFA6  
Förderzeitraum: 01.07.2012 - 30.06.2015  
Zuwendung: 391.200,00 €  
Projektträger: Projektträger DESY

Zusätzlicher Kontakt:  
Zusätzlicher Name:

Genutzte Großgeräte:	Labor FAIR	Gerät FAIR	Experiment APPA
Diplomarbeiten:			
Dissertationen:			
Habilitationen:			
Publikationen:	3		
Konferenzbeiträge:	14		
Patente:			
Bachelorarbeiten:	2		
Masterarbeiten:	2		

Dieser Bericht wurde beim Projektträger über einen individuellen Online-Zugang vom Projektleiter eingereicht und am 28.04.2016 23:34 für eine Veröffentlichung freigegeben.

## Schlussbericht <sup>1</sup>

### *'Ultrakalte Atome als zustandspräpariertes Target für niederenergetische Schwerionenstrahlen (MOT Target)'*

Zuwendungsempfänger: *Universität Heidelberg*

Projektleitung: *Prof. Dr. Matthias Weidemüller*

## Zusammenfassung

Während des Berichtszeitraums wurde die zweite Ausbaustufe des Quantengas-Targets vollständig konzipiert und mit dem Aufbau begonnen. Im Gegensatz zur ersten Ausbaustufe, in dem die Atome in einer magneto-optischen Falle gespeichert werden, ist für den neuen Aufbau ein Umladen der Atome in eine optische Dipolfalle vorgesehen. Basierend auf anderen Experimenten unserer Gruppe erwarten wir dadurch eine Erhöhung der Target-Dichte um zwei Größenordnungen, d.h.  $10^{13}$  Atome/cm<sup>3</sup>. Außerdem werden nach dem Transfer der Atome in die Dipolfalle keine Magnetfelder mehr zum Speichern der Atome benötigt, welche uns beim MOT-Target stark limitieren. Unter anderem muss das Magnetfeld vor jeder Kollisionsmessung abgeschaltet werden, was die Präparation kurzlebiger Zustände unmöglich macht, da diese während des Schaltvorgangs zerfallen. Mit einer Dipolfalle hingegen bestehen weitreichende Möglichkeiten zur präzisen Zustandskontrolle, wie Polarisation oder die innere Anregung der Atome in verschiedene Quantenzustände. Durch weitere Verdampfungskühlung der Atome ist es auch möglich, ein Bose Einstein Kondensates (BEC) zu erzeugen, welches ein weltweit einzigartiges Target zum Studium der Wechselwirkung von Schwerionenstrahlen mit quantenentarteter Materie darstellt.

Als erste physikalische Fragestellung wollen wir mit unserem Target den Mehrfachladungstransfer zwischen hochgeladenen Ionen und Neutralatomen untersuchen. Obwohl Mehrfachladungstransfer in der Dynamik von langsamen Ion-Atom Stößen (keV/u) eine entscheidende Rolle spielt, ist der Übergang von Einfach- zu Mehrfachladungstransfer aufgrund der hohen Anforderungen an experimentellen Auflösungsvermögen und theoretischer Rechenleistung bislang nur unzureichend untersucht. Die Erweiterung der Rückstoß-Ionenspektroskopie von kalten Gastargets (COLTRIMS<sup>2</sup>), die durch Überschallexpansion erzeugt werden, auf ultrakalte Atome, gefangen in einer magneto-optischen Falle bei Temperaturen unterhalb 200  $\mu$ K (MOTRIMS<sup>3</sup>), hat in der letzten Dekade zunehmend Interesse erfahren, da bei MOTRIMS die Auflösung nicht durch die

---

<sup>1</sup>Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt der Veröffentlichung liegt beim Autor.

<sup>2</sup>J. Ullrich et al., J. Phys. B 30, 2917-2974 (1997).

<sup>3</sup>B.D. DePaola et al., Adv At., Mol. Opt. Phys. 55, 139-189 (2008).

Temperatur des Targets beschränkt ist und differentielle Wirkungsquerschnitte sehr genau bestimmt werden können. Darüber hinaus ermöglicht diese Technik die Messung von Ladungstransfer im Bereich von keV Energien in einfach und mehrfach geladenen Ionen, Photodissoziation, Elektronenstoßionisation sowie Korrelationseffekte beim Doppelladungstransfer.

# Bericht

## 1 Aufgabenstellung

Die Zielsetzung für den Berichtszeitraum war die Weiterentwicklung und Implementierung eines in unserer Gruppe entwickelten neuartigen Targets für Präzisions- experimente an HITRAP bei FAIR im Rahmen der SPARC-Kollaboration. Dabei sollte das bereits bestehende Magneto-optische-Fallen-Target (MOT-Target) bestehend aus einer dichten ( $10^{11}$  Atome/cm<sup>3</sup>) Wolke lasergekühlter Rubidium-Atome ( $T \approx 200\mu\text{K}$ ) im Zentrum eines impulsauflösenden Ionen-Spektrometers um eine Dipolfalle erweitert werden. Das Umladen der Atome von der MOT in eine Dipolfalle, führt zu einer erwarteten Erhöhung der Dichte um ca. zwei Größenordnungen, d.h.  $10^{13}$  Atome/cm<sup>3</sup>. Außerdem werden nach dem Transfer der Atome in die Dipolfalle keine Magnetfelder mehr zum Speichern der Atome benötigt, welche sich beim MOT-Target als einer der stärksten Limitationen herausgestellt haben. Um die Auflösung des Spektrometers nicht zu beeinträchtigen, muss das Magnetfeld der MOT geschaltet werden, was erhebliche Nachteile mit sich bringt. Zum einen dehnt sich die Atomwolke nach dem Schalten der Magnetfelder frei aus, was zu kleineren Dichten führt, zum anderen macht es die Präparation kurzlebiger Zustände unmöglich, da diese während des Schaltvorgangs zerfallen. Mit einer Dipolfalle hingegen bestehen weitreichende Möglichkeiten zur präzisen Zustandskontrolle, wie Polarisation oder die innere Anregung der Atome in verschiedene Quantenzustände. Durch Evaporieren der Atome ist es auch möglich, ein Bose-Einstein-Kondensates (BEC) zu erzeugen.

## 2 Projektverlauf während des Berichtszeitraums

Während des Berichtszeitraums wurde mit dem Aufbau der zweiten Ausbaustufe des MOT-Targets begonnen, welche die optische Speicherung der Atome in einer Dipolfalle mit dem Ziel der präzisen Zustandspräparation, bis hin zu einem Bose-Einstein-Kondensat (BEC), beinhaltet. Zur Vorbereitung dieser Erweiterungen des Target Aufbaus wurden in anderen Experimentieranlagen unserer Gruppe Studien zur rein optischen Erzeugung eines BECs aus Rubidium-Atomen und der Präparation der Atome in hochliegenden Rydbergzuständen durchgeführt. Bei dem bereits bestehenden MOT-Target wurde ein neues Bildgebungsverfahren implementiert, welches die genaue Charakterisierung sehr dichter Atomwolken ermöglicht. Als Vorbereitung für erste Experimente an FAIR wurde außerdem die Wechselwirkung einfach-geladener Ionen mit unserem Target untersucht. Insbesondere ermöglichen uns diese Vorexperimente die Entwicklung der notwendigen Ionenoptik, um Ionen kontrolliert in unsere Experimentierkammer einzubringen und den Überlapp mit dem Target zu optimieren.

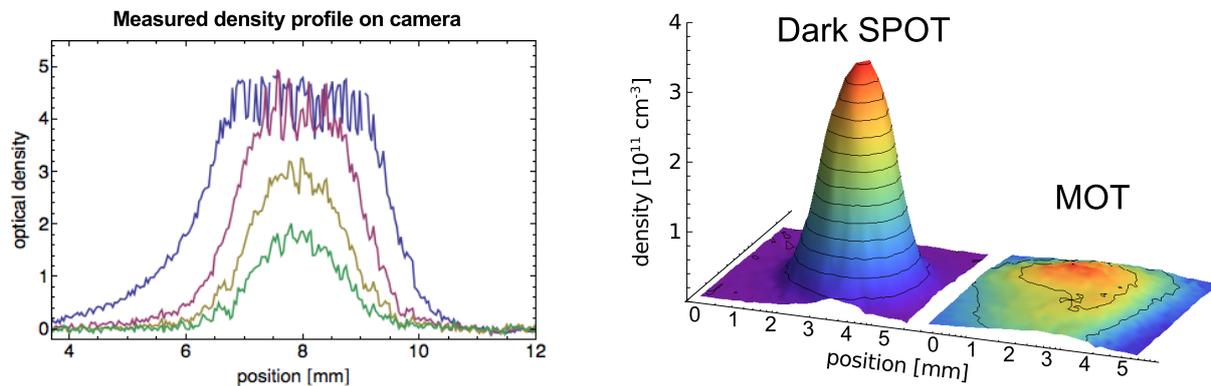


Abbildung 1: Charakterisierung einer dichten Atomwolke in einem DarkSPOT. Links: Optische Dichte auf der CCD-Kamera. Durch dynamisches Durchstimmen des Absorptionsquerschnitts (blau nach grün) wird eine Charakterisierung selbst bei sehr hohen optischen Dichten möglich. Rechts: Mit dem neuen Bildgebungsverfahren gemessene Dichteverteilung von MOT und Dark SPOT.

## 2.1 Status MOT-Target

Um die Atomdichte des Targets um eine Größenordnung gegenüber konventionellen magneto-optischen Fallen zu erhöhen, haben wir die Methode einer sog. Dark Spontaneous Force Optical Trap (DarkSPOT) implementiert. Hierbei wird ein Teil des Laserlichts, welches Atome aus den Hyperfein-Grundzuständen von Rubidium optisch pumpt, abgeschattet. Durch die Unterdrückung von Photonenreabsorption innerhalb der Atomwolke wird auf diese Weise nicht nur die Dichte signifikant erhöht, sondern auch die Atome im für Kollisionsexperimente gewünschten energetisch niedrigsten Hyperfeinzustand präpariert. Dabei kann die DarkSPOT im kontinuierlichen oder gepulsten Ladebetrieb verwendet werden.

Um später absolute Wirkungsquerschnitte für Stöße mit Ionen- oder Photonenstrahlen messen zu können, ist eine sehr genaue Kenntnis der Atomzahl und Dichte im Target notwendig. Zu diesem Zweck haben wir ein verbessertes Bildgebungsverfahren entwickelt, welches es uns ermöglicht die Atomwolke mittels Absorptionsabbildung selbst bei optischen Dichten der Größenordnung 100 sehr genau zu charakterisieren. Wir konnten zeigen, dass wir dadurch selbst bei den sehr hohen optischen Dichten in unserer DarkSPOT, die bei üblichen Absorptionsabbildungsverfahren eine verlässliche quantitative Analyse verhindern, eine präzise Bestimmung der Atomzahl und Dichte erreichen können (Abb. 1).

## 2.2 Neues Quantengas-Target

Die Erzeugung eines BECs stellt hohe Anforderungen an mechanische und thermische Stabilität des gesamten Aufbaus und ist daher in der alten UHV-Kammer nicht realisierbar. Daher wurde eine neue Vakuumkammer geplant und bis zum Ende des Berichtszeitraums vollständig aufgebaut (Abb. 2). Auf Grund des Umzugs unseres In-

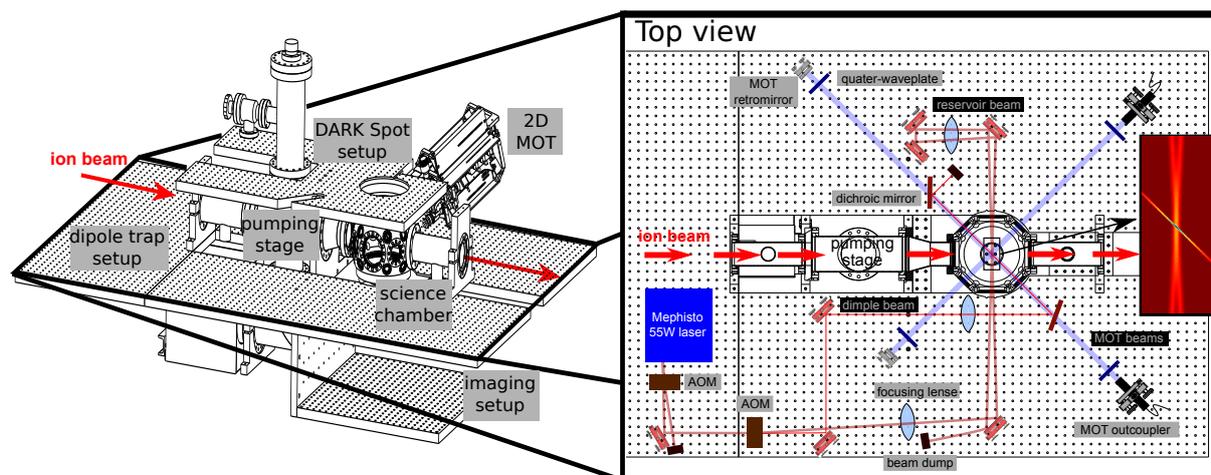


Abbildung 2: Neue BEC-Kammer. Die neue Vakuumkammer bietet maximalen optischen Zugang. Um diesen effizient nutzen zu können ist die Kammer von mehreren Ebenen von Breadboards umgeben, auf denen alle benötigten optischen Komponenten platziert werden können. Beispielhaft ist die Aufsicht der mittleren Ebene gezeigt, auf der die MOT-Strahlen (blaue Strahlen) und der komplette Aufbau für die Dipolfalle (rote Strahlen) platziert werden.

stituts in ein neues Gebäude konnte der ursprüngliche Zeitplan (Fertigstellung der neuen Kammer bis Anfang 2014) allerdings nicht eingehalten werden. Die Einrichtung der neuen Labore und die damit verbundene starke Auslastung unserer Werkstätten haben die Arbeiten um fast ein Jahr verzögert. Parallel zum Aufbau der neuen Kammer wurde hingegen in bereits bestehenden Experimentieranlagen unserer Gruppe bereits weitreichende Pilotstudien zur Erzeugung eines Bose-Einstein-Kondensats und zur Rydberganregung aus einem ultrakalten Gas unternommen.

### 2.3 Pilotstudien zur genauen Zustandspräparation

Das neue Quantaengas Target würde erstmals ermöglichen die Rückwirkung von Stoßprozessen mit Ionen auf ein hochkorreliertes Quanten-Vielteilchensystem zu untersuchen. Dazu sollen die Atome künftig in einem zweistufigen Transferprozess von der magneto-optischen Falle in eine Dipolfalle überführt werden und dort durch evaporative Kühlung zur Bose-Kondensation gebracht werden. In einer Machbarkeitsstudie haben wir an einer anderen Experimenteinrichtung in unserer Gruppe bereits detaillierte Pilotexperimente durchgeführt. In diesen Experimenten gelang es uns, innerhalb von weniger als 5 Sekunden die Atome in der MOT vorzukühlen, von dort in eine große Dipolfalle (Reservoir-Falle) umzuladen und dann evaporativ durch zusätzliche Verwendung eines stark fokussierten Laserstrahls (Dimple-Trap) zu einem BEC zu kondensieren<sup>4</sup>. Damit konnten wir  $10^5$  Atome mit einer Temperatur von  $T < 260$  nK erzeugen, wobei sich nahezu alle Teilchen im selben Quantenzustand befinden. Der gleiche optische Aufbau soll nun auch in das Quantengas-Target implementiert werden.

<sup>4</sup>C. Hofmann et al., *Frontiers of Physics* 9, 571-586 (2014)

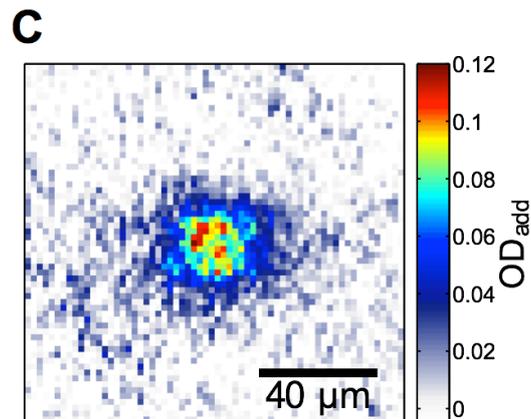


Abbildung 3: Abbildung einzelner Rydbergatome. Durch ein in unserer Gruppe entwickeltes Verfahren ist es möglich, einzelne Rydbergatome sichtbar zu machen. Die Abbildung erfolgt über ein 3-Level System, wodurch eine sog. elektromagnetische Transparenz induziert wird.

Als weitere Präparationsmöglichkeit haben wir die Überführung der Atome in hochliegenden Rydbergzuständen (bis  $n=50$ ) untersucht. Rydbergatome eignen sich zur Realisierung eines ultrakalten Elektronentargets, da die Elektronen nur sehr schwach an die Atomrümpfe gebunden sind. Dabei haben wir verschiedene Präparationsmethoden erprobt, die es uns erlauben die Atome in verschiedensten Konstellationen zu erzeugen. Weitere Perspektiven ergeben sich durch die Erzeugung von kristallinen Strukturen, sogenannten Rydbergaggregaten, verschiedener Größe. Dabei nutzt man die langreichweitige Natur der Wechselwirkung zweier Rydbergatome aus, die zu der sog. Rydbergblockade führt. Wir konnten zeigen, dass sich durch geschickte Wahl der Laserfrequenzen die Größe der Aggregate sehr genau einstellen lässt<sup>5</sup>. Damit lassen sich verschiedenste Viel-Körper-Systeme untersuchen, wobei besonders der Einfluss von Fehlstellen, zum Beispiel durch Einbringen von Ionen, viele spannende Fragestellungen eröffnet. Alternativ haben wir in früheren Untersuchungen die Möglichkeit demonstriert, durch „Rapid adiabatic passage“ die Rydbergblockade zu umgehen, wodurch sich hohe Anregungswahrscheinlichkeiten realisieren lassen<sup>6</sup>. Mit dieser Technik lassen sich dichte Rydberg-Gase herstellen, die z.B. als Elektronentarget oder zur Plasmaerzeugung genutzt werden können.

Bislang konnten Rydbergatome nicht mittels optischer Verfahren räumlich abgebildet werden. Wir haben in Heidelberg eine neuartige Methode entwickelt, einzelne Rydbergatome durch ein direktes optisches Verfahren sichtbar zu machen<sup>7,8</sup>. Dazu nutzen wir das Zusammenspiel der Rydbergblockade und der sog. elektromagnetisch induzierten Transparenz (Abb. 3). Diese Technik bietet interessante Möglichkeiten, Wechselwirkungen direkt zu beobachten, insbesondere da sie sich auch auf hochgeladene Ionen, welche in einem atomaren Gas isoliert sind, anwenden lässt.

<sup>5</sup>H. Schempp et al., Phys. Rev. Lett. 112, 013002 (2014)

<sup>6</sup>J. Deigmayer et al., Opt. Comm. 264, 293 (2006)

<sup>7</sup>G. Günther et al., Phys. Rev. Lett. 108, 013002 (2012)

<sup>8</sup>G. Günther et al., Science 342, 954-956 (2013)

## 2.4 Sympathetische Ionenkühlung

Das RIM-Spektrometer wird zurzeit für den Einbau in die neue BEC-Kammer vorbereitet. Die alte Kammer wollen wir während der Umbauzeit für erste Experimente der Wechselwirkung von Ionen mit ultrakalten Atomen nutzen. Dazu wurde anstelle des RIMS eine Radio-Frequenz (RF) Ionenfalle in den Aufbau implementiert. Damit ist es möglich gefangene Ionen direkt mit dem Quantengas-Target zu überlagern und Atom-Ion-Wechselwirkungen über lange Zeiträume zu beobachten. Nachdem die Ionen mit den ultrakalten Atomen überlagert sind ist ein Hauptziel die Erforschung der sympathetischen Ionenkühlung. Dies kann interessante Einblicke in die Kollisionsdynamik in RF-Fallen oder auch Ionen-Guides geben, wo RF-Heizung bzw. Intrabeam-Scattering in vielen Fällen starken Einfluss auf die Energieverteilung der Ionen haben. Von uns durchgeführte Simulationen legen nahe, dass die Lokalisierung des Puffergases, wie sie in unserem Experiment leicht realisiert werden kann, eine erhebliche Verringerung der RF-Heizung bewirken kann. Dies spielt besonders bei einem schweren Puffergas eine entscheidende Rolle, wo im Falle einer homogenen Puffergasverteilung extreme Heizeffekte auftreten. Ein wesentlicher Bestandteil dieses Experimentes ist dabei die Entwicklung einer flexiblen Ionenoptik, die es ermöglicht gepulste Ionenpakete möglichst effizient zum Target zu transportieren. Die Ergebnisse aus diesen Experimenten können daher direkt auf spätere Versuche an FAIR übertragen werden.

## 3 Noch ausstehende Arbeiten

Nachdem die Funktionstüchtigkeit des neuen MOTRIMS-Experimentes demonstriert wurde, kann jetzt mit der Planung von Experimenten an der GSI begonnen werden. Sobald die HITRAP-Anlage voll funktionsfähig ist kann unser Experiment in die Beamline integriert werden. Bereits in vorangegangenen Vorhaben wurden Simulationen für Kollisionen zwischen neutralen Rubidium Atomen und  $U^{92+}$  Ionen durchgeführt. Diese Rechnungen basieren auf einem einfachen Over-the-Barrier Modell des Transfers und dienen zur Abschätzung der zu erwartenden Reaktionsraten für die Systeme  $Rb + Ar^{12+}$  und  $Rb + U^{90+}$  für Transfers von mehreren Elektronen, sowie der Abschätzung von Rückstoßimpulsen der Rubidiumionen. Die Resultate dieser Rechnungen zeigen, dass unter realistischen Bedingungen messbare Raten für Transfers bis fünf Elektronen zu erwarten sind.

Neben den Messungen an der GSI wird weiter an der zweiten Ausbaustufe, dem Quantengas Target, gearbeitet. Dabei geht es vor allem darum, die bereits erfolgreich erprobten und ausgiebig getesteten Methoden zur Erzeugung vielfältiger Quantenzustände in den Aufbau zu implementieren. Der Aufbau der dazu nötigen Experimentierkammer wurde zum Ende des Berichtszeitraums abgeschlossen und auch der Aufbau der Dipolfalle ist bereits weit fortgeschritten.

## Publikationen

### Publikationen in Fachzeitschriften

- S. Götz, B. Höltkemeier, C. S. Hofmann, D. Litsch, B. D. DePaola and M. Weidemüller, „Versatile cold atom target apparatus“, Rev. Sci. Instrum. 83, 073112 (2012).
- S. Götz, B. Höltkemeier, T. Amthor and M. Weidemüller, „Photoionization of optically trapped ultracold atoms with a high-power light-emitting diode“, Rev. Sci. Instrum. 84, 043107 (2013).
- B. Höltkemeier, P. Weckesser, H. Lopez and M. Weidemüller, „Buffer-gas cooling of a single ion in a multipole radio frequency trap“, submitted for publication (2015) (arXiv:1505.06909).

### Konferenzbeiträge

- „Double charge transfer between neutral atoms and highly charged ions“  
B. Höltkemeier, Poster, HCI 2012, Heidelberg
- „Sympathetic cooling of OH-ions using Rb atoms in a MOT“  
B. Höltkemeier, Vortrag, DPG Spring Meeting 2013, Hannover
- „Sympathetic cooling of OH-ions using Rb atoms in a MOT“  
H. Lopez, Poster, Enrico Fermi summer school, 2013, Varenna, Italien
- „Sympathetic cooling of OH-ions using Rb atoms in a MOT“  
J. Glässel, Poster, IONTECH 2 workshop, 2013, Paris, Frankreich
- „Trapping molecular anions and ultracold atoms in a high-pole hybrid rf trap“  
M. Weidemüller, Vortrag, Trapped Ions Meeting 2014, Bad Honnef
- „Sympathetic cooling of anions“  
B. Höltkemeier, Vortrag (Poster Price Talk), Trapped Ions Meeting 2014, Bad Honnef
- „Sympathetic cooling of ions in high order rf traps using laser cooled atoms“  
P. Weckesser, Vortrag, DPG Spring Meeting 2014
- „Saturation Absorbtion Imaging of a High Density Dark SPOT“  
J. Glässel, Vortrag, DPG Spring Meeting 2014
- „Sympathetic cooling of OH-ions using Rb atoms in a MOT“  
H. Lopez, Poster, DPG Spring Meeting 2014
- „Sympathetic cooling of OH-ions using Rb atoms in a MOT“  
P. Weckesser, Poster, European Conference on Trapped Ions 2014

- „Symathetic cooling of OH-ions using Rb atoms in a MOT“  
P. Weckesser, Vortrag, Greenhorn Meeting, 2014, Mainz
- „Saturation absorbtion imaging of dense atom clouds“  
B. Höltkemeier, DPG Spring Meeting 2015
- „Sympathetic cooling of ions in radio frequency traps beyond the critical mass ratio“  
P. Weckesser, DPG Spring Meeting 2015
- „Sympathetic cooling of OH-ions using Rb atoms in a MOT“  
S. Paul, DPG Spring Meeting 2015

### **Im Rahmen des Projektes erstellte Abschlussarbeiten**

- „Saturation Absorption Imaging of a High-Density Rubidium Dark SPOT“, J. Glässel, Masterarbeit, Universität Heidelberg, 2014
- „Optimization of the Ion Storage in a Hybrid Atom-Ion-Trap“, S. Paul, Bachelorarbeit, Universität Heidelberg, 2015
- „Laser System of a 87-Rubidium Optical Dipole Trap“, A. Tebben, Bachelorarbeit, Universität Heidelberg, 2015
- „Sympathetic cooling of ions in a radio frequency trap“, P. Weckesser, Masterarbeit, Universität Heidelberg, 2015