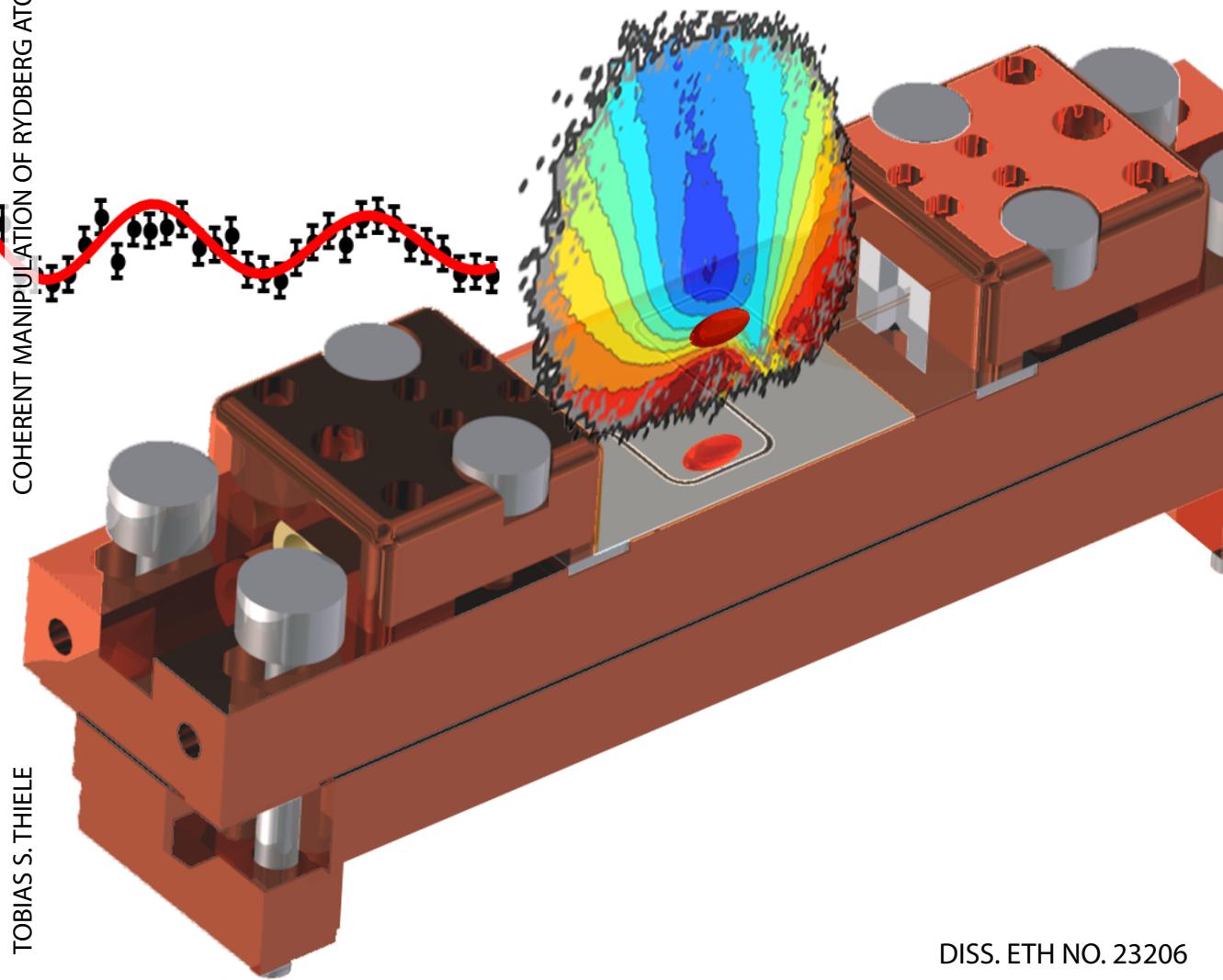


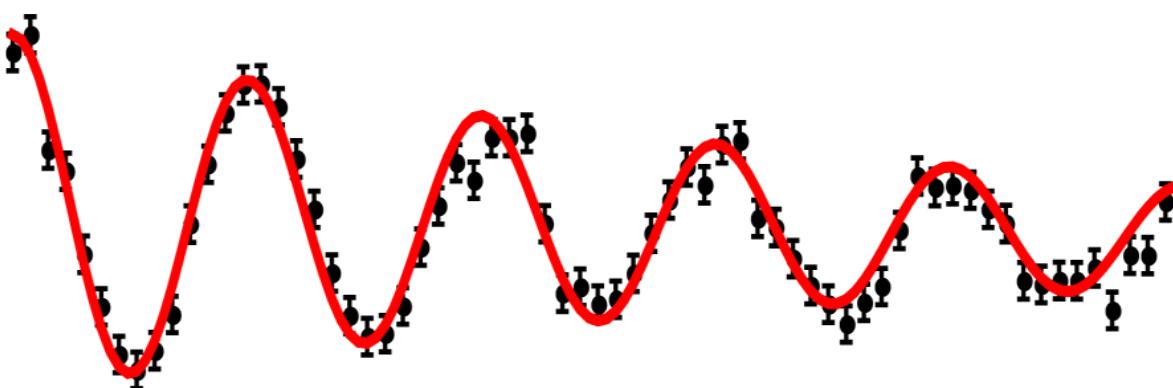
# COHERENT MANIPULATION OF RYDBERG ATOMS CLOSE TO SURFACES AT CRYOGENIC TEMPERATURES

TOBIAS S. THIELE



TOBIAS S. THIELE

DISS. ETH NO. 23206



COHERENT MANIPULATION OF RYDBERG ATOMS CLOSE TO SURFACES AT CRYOGENIC TEMPERATURES

DISS. ETH NO. 23206

# **COHERENT MANIPULATION OF RYDBERG ATOMS CLOSE TO SURFACES AT CRYOGENIC TEMPERATURES**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by  
Tobias Sebastian Thiele  
MSc ETH Physics, ETH Zurich  
born on 24.10.1986  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of  
Prof. Dr. Andreas Wallraff, examiner  
Prof. Dr. Frédéric Merkt, co-examiner  
Prof. Dr. Michel Brune, co-examiner

2016

# ABSTRACT

In recent years, the field of cavity quantum electrodynamics has become increasingly important in the area of quantum information science and technology. The ability to interface single, stationary two-level systems with single, flying photons in a cavity is nowadays exploited in many experiments that aim for a future world, in which quantum technology is used to process and transfer quantum information. So far, several physically different schemes have been identified that perform very well in a small subset of all processing or transfer tasks only. Therefore, the concept of a hybrid system was developed, merging two or more physical implementations into a new system that exhibits optimal performance in a larger set of tasks than the individual entities.

In this thesis we present pioneering works toward a hybrid system, that combines the best of the worlds of atom and solid-state systems. Specifically, we aim at interfacing single or ensembles of atoms in Rydberg states to chip-based microwave photons in a circuit quantum electrodynamics system (circuit QED) operating at cryogenic temperatures. The combined system may exploit the fast processing rate and scalability of circuit QED systems, and the optical interface and long coherence times of Rydberg atoms. The realization of such a hybrid systems has been a longstanding goal, but could not be achieved so far because of fundamental and technical challenges that are linked to the sensitivity of Rydberg atoms to surface imperfections such as patches of adsorbates, local charges or potential differences. Static and time-dependent inhomogeneous stray electric fields emanating from these imperfections result in strong decoherence of the atom cloud and tools to avoid or characterize and compensate these fields need to be developed. We have built a new setup in which decoherence due to stray electric fields that emanate from surfaces at cryogenic temperatures can be measured and reduced. In the new setup, we do not have to rely on specific modifications of the surface to observe coherent population transfer between Rydberg states.

Specifically, helium atoms in Rydberg states have been manipulated coherently with microwave radiation pulses near planar gold surfaces, and near transmission lines patterned onto either a printed-circuit board or onto a superconducting NbTiN surface. All surfaces were cooled to cryogenic temperatures. The

experiments were carried out with a collimated supersonic beam of metastable  $(1s)^1(2s)^1\ ^1S_0$  helium atoms excited with laser radiation to  $np$  Rydberg levels with principal quantum number  $n$  between 30 and 40. The separation between the cold surface and the center of the collimated beam was adjustable between  $250\ \mu m$  and  $2\ mm$ . Short-lived  $np$  Rydberg states were coherently transferred to the long-lived  $ns$  state to avoid radiative decay of the Rydberg atoms between the photoexcitation region and the region above the cold surfaces. Further coherent manipulation of the  $ns$  Rydberg states with pulsed microwave radiation above the surfaces enabled measurements of stray electric fields and allowed studying the decoherence of the atomic ensemble. Adsorption of residual gas onto the surfaces and the resulting slow buildup of stray fields was minimized by controlling the temperature of the surface and monitoring the partial pressures of residual gases in the experimental chamber during the cooldown procedure. Compensation of the stray electric fields to levels below  $100\ mV/cm$  was achieved over a region of  $6\ mm$  along the beam-propagation direction and below  $20\ mV/cm$  over a region of  $1\ mm$ .

Furthermore, static and time-dependent electric fields were measured *in situ* with a new technique. Here, we determined stray-electric-field distributions at distances of less than  $2\ mm$  from patterned surfaces using coherent spectroscopy on Stark shifts in the beam of helium atoms. We demonstrate the capabilities of this technique by characterizing the electric stray field emanating from a structured superconducting coplanar waveguide and exploit coherent population transfer with microwave radiation from the same structure. Modification of this technique also allowed the characterization of the microwave-field distribution above the surface.

The results of this thesis represent important milestones toward a working hybrid system with Rydberg atoms and coplanar microwave resonators. The techniques to avoid and compensate stray electric fields allowed to preserve coherence of the atomic sample for several microseconds above cold, patterned surfaces for the first time without specific modifications of the surface properties. This opens a clear path toward a non-destructive detection of Rydberg atoms using a small number of microwave photons in the waveguide resonator.

Additionally, the developed techniques could be used to build a characterization apparatus that exploits quantum effects to detect static and microwave stray electric fields above planar samples. The detection can be on a mm-scale, with resolutions on the  $\mu m$ -scale, without additional demands for the sample and for temperatures varying from room temperature down to cryogenic levels.

## KURZFASSUNG

In den letzten Jahren hat das Feld der Resonator-Quanten-Elektrodynamik mehr und mehr an Bedeutung im Feld der Quanteninformations-Wissenschaften und -Technologien gewonnen. Heutzutage wird die Möglichkeit einzelne, stationäre Zwei-Level Systeme mit einzelnen, fliegenden Photonen in einem Resonator zu koppeln in vielen Experimenten rege genutzt. Diese Experimente haben das erklaerte Ziel in Zukunft Quantentechnologie für die Verarbeitung und Übertragung von Quanteninformation zu benutzen. Diverse physikalische System wurden bereits identifiziert, welche allerdings nur jeweils einen kleinen Satz aller möglichen Prozess- und Transferaufgaben gut bewältigen. Deswegen wurde das Konzept der Hybridsysteme entwickelt, die zwei oder mehrere physikalische Systeme in eine neue Anwendung zusammenfassen, welche einem grösseren Satz von Aufgaben gewachsen ist als die jeweils einzelnen Teile.

In dieser Arbeit präsentieren wir Pionierarbeiten für ein Hybridsystem, welches das Beste aus den zwei Welten der Atom- und Festkörperphysik kombinieren soll. Das Ziel der Arbeit ist die Kopplung von Einzelnen oder Ensembles von Atomen in Rydberg-Zuständen an Photonen in einem Schaltkreis-Quanten-Elektrodynamik System (Schaltkreis-QED), das bei tiefkalten Temperaturen funktioniert. Das kombinierte System besitzt sowohl die schnelle Prozessier-Rate und Skalierbarkeit der Schaltkreis-QED, als auch die optische Schnittstelle und die langen Kohärenzzeiten der Rydbergatome. Das Ziel, die Realisierung eines solchen Hybridsystems, konnte bis heute noch nicht erreicht werden aufgrund technischer und fundamentaler Schwierigkeiten, die in direktem Zusammenhang mit der Sensitivität von (Rydberg)atomen auf Oberflächendefekte stehen. Heterogene elektrische Streufelder können beispielsweise durch Adsorbate, lokale Ladungen oder Potentialdifferenzen verursacht werden und verursachen starke Dekohärenz in der Atomwolke. Für ein erfolgreiches Experiment ist es deshalb unumgänglich, Werkzeuge zu entwickeln, welche diese Defekte verhindern, charakterisieren oder deren Effekte kompensieren können. Wir haben einen neuen Aufbau entwickelt, welcher es erlaubt, Streufelder an tiefkalten Oberflächen zu messen und zu reduzieren. Dadurch konnten wir kohärenten Besetzungstransfer zwischen Rydbergzuständen beobachten ohne die Oberfläche modifizieren zu müssen.

In den Experimenten wurden Heliumatome in Rydbergzuständen nahe an Oberflächen kohärent mit Mikrowellenstrahlung manipuliert. Sowohl planare Goldoberflächen als auch Platinen und supraleitende NbTiN Oberflächen, in welche eine Transmissionslinie eingelassen waren, wurden verwendet. Die Oberflächen wurden jeweils auf tiefkalte Temperaturen abgekühlt. Die Experimente wurden mit einem kollimierten Überschallstrahl aus metastabilen  $(1s)^1(2s)^1\ ^1S_0$  Heliumatomen durchgeführt. Die Atome wurden in  $np$ -Rydbergzustände angeregt, wobei  $n$  zwischen 30 und 35 lag. Der Abstand zwischen der kalten Oberfläche und dem Mittelpunkt des kollimierten Strahls konnte zwischen 250  $\mu\text{m}$  und 2 mm variiert werden. Kurzlebige  $np$ -Rydbergzustände wurden kohärent zu langlebigen  $ns$ -Rydbergzuständen transferiert, um den radiativen Zerfall der Rydbergatome zwischen der Photo-Anregungsregion und der Region über der kalten Oberfläche zu verhindern.

Kohärente Manipulation der  $ns$ -Rydbergzustände mit gepulster Mikrowellenstrahlung über der Oberfläche ermöglichte (ausserdem) die Messung des elektrischen Streufeldes und erlaubte die Bestimmung der Dekohärenzzeit des Atomensembles. Die Adsorption von Restgas auf der Oberfläche und der daraus resultierende Aufbau von Streufeldern während des Abkühlprozesses wurden durch Regelung der Oberflächentemperatur und durch Überwachen des Partialdruckes des Restgases in der Experimentierkammer minimiert. Durch diese Massnahmen konnten elektrische Streufelder über einen Bereich von 6 mm Länge entlang der Flugrichtung des Atomstrahls auf unter 100 mV/cm reduziert werden. Des Weiteren erlaubte die Korrektur eine Kompensation auf unter 20mV/cm über einen Bereich von 1 mm.

Des Weiteren wurde eine neue Technik zur Messung statischer und zeitabhängiger elektrischer Streufelder entwickelt. Mit Hilfe von kohärenter Spektroskopie von Starkzuständen im Heliumstrahl konnten elektrische Streufeldverteilungen in Distanzen von weniger als 2 mm von geprägten Oberflächen gemessen werden. Durch die Charakterisierung von elektrischen Streufeldern, die von einem supraleitenden, koplanaren Wellenleiter ausgehen, zeigen wir die Möglichkeiten dieser Technik auf, indem wir kohärenten Populationstransfer ausnutzen. Dieser wird durch Mikrowellenstrahlung getrieben, die von derselben Struktur ausgeht.

Die Resultate dieser Arbeit setzen neue Meilensteine bezüglich eines funktionierenden Hybridsystems aus Rydbergatomen und koplanaren Mikrowellenleitern. Die Kohärenz von Atomwolken nahe kalten, geprägten Oberflächen während einiger Mikrosekunden wurde durch die beschriebenen Techniken zur Verhinderung oder Kompensierung elektrischer Streufelder erstmals ermöglicht ohne die spezifische Anpassung der Oberflächeneigenschaften. Dies eröffnet einen

klaren Weg hin zu einer nicht-destructiven Detektion von Rydbergatomen mit einer kleinen Anzahl von Mikrowellenphotonen in einem Mikrowellenleiter.

Zusätzlich können die in dieser Arbeit entwickelten Techniken genutzt werden um statische elektrische Felder und elektrische Mikrowellenfelder mithilfe von Quanteneffekten zu detektieren. Diese Methode erlaubt eine Feldcharakterisierung über mehrere Millimeter mit einer Auflösung im Mikrometerbereich ohne zusätzliche Anforderungen an die zu untersuchenden Oberflächen. Zudem ist sie in erster Ordnung temperaturunabhängig, sodass die Temperatur der Oberfläche zwischen Raumtemperatur und tiefkalten Leveln variieren kann.