

DISS. ETH NO. 22892

# **Bang-bang Control of a Trapped-Ion Oscillator**

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZURICH  
(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

FLORIAN MICHAEL LEUPOLD

Dipl.-Phys., Freie Universität Berlin  
BSc (Hons), Victoria University of Wellington

born on 27.12.1981  
citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. P. Home  
Prof. Dr. C. Ospelkaus

2015

# Abstract

Trapped atomic ions are currently among the most advanced systems for quantum state engineering and quantum information processing. In the quest for a useful quantum computer, all of the required operations on quantum bits stored in the internal states of ions have been demonstrated in small-scale implementations. Full scalability, however, remains a challenge and requires transport of information throughout the processor. In the proposed architecture of a quantum charge-coupled device, this means physically shuttling the ions, which has been limited to long timescales compared to the natural frequency of the ion oscillation.

This thesis describes experiments performed with a new setup in which we realize bang-bang control of a trapped-ion oscillator by switching the trapping potentials on nanosecond timescales, much faster than the ion can respond. Technically this involves a novel method of placing CMOS electronics in our cryogenic vacuum system close to the trap itself. In a first exploration of this technology, we have demonstrated control of coherent states with up to 10 000 quanta of energy and have used these displaced states to verify the Franck-Condon coefficients for the light-atom interaction far outside the usual regime for trapped-ion work. Sub-nanosecond timing control of the switching process allows us to verify the coherence of the excited states by returning them to the ground state of motion. A similar scheme is expected to facilitate ion transport over distances comparable to trap electrode dimensions within less than one period of oscillation.

The experiments were carried out on an entirely new apparatus for experiments with trapped  $^{40}\text{Ca}^+$  ions built at ETH Zurich. The centerpiece is a microfabricated surface-electrode trap mounted in an ultra-high-vacuum chamber inside a pulse-tube cryostat. Light for photoionization, cooling, manipulation, and detection of ions is derived from diode lasers. Relevant lasers are frequency-stabilized and computer-controllable via acousto-optic modulators. Ions are imaged through a custom-designed cryo-compatible achromatic in-vacuum objective. Experimental sequences are executed in real time by a field-programmable gate array.

Besides describing the main experiments and the experimental setup, this thesis reviews the trapping of ions in a linear radio-frequency trap with a planar electrode geometry; addresses interaction of lasers with atoms; presents basic experimental techniques specific to our setup and routine calibration methods; and discusses the possibility for applying bang-bang control to speed up transport in trapped-ion quantum processing and other opportunities for quantum state engineering.

# Zusammenfassung

Gefangene Ionen gehören derzeit zu den vielversprechendsten physikalischen Systemen auf dem Gebiet der Quanteninformationsverarbeitung. Auf dem Weg zu einem vollwertigen Quantencomputer wurden mit in Ionen kodierte Quantenbits bereits alle fundamentalen Operationen exemplarisch durchgeführt. Eine fortbestehende Herausforderung dabei ist jedoch die Skalierbarkeit hin zu vielen Quantenbits und die Informationsübertragung zwischen ihnen innerhalb eines Quantenprozessors. In einer möglichen quantenladungsgekoppelten Architektur (“quantum charge-coupled device”) würde dies durch das physische Bewegen von Ionen durch eine Matrix von Mikrofallen geschehen, was bislang auf lange Zeitskalen im Vergleich zu der Eigenfrequenz der Ionenschwingung beschränkt war.

Die vorgelegte Arbeit beschreibt Experimente, in denen die Schwingungszustände von Ionen durch abrupte Änderungen der Fallenpotentiale (“bang-bang”) manipuliert werden. Dies wird ermöglicht durch die Integration von elektrischen CMOS-Schaltern in die Spannungsversorgung der Fallenelektroden in unmittelbarer Nähe zu dem Ionenfallenchip. Im Rahmen erster Erkundungen dieser Technologie haben wir kohärente Zustände mit bis zu 10 000 Energiequanten kontrolliert erzeugt. Mit ihrer Hilfe liessen sich die Franck-Condon-Koeffizienten für die Wechselwirkung zwischen Laserlicht und Ionen weit ausserhalb des üblichen Regimes nachweisen. Sub-Nanosekunden-Auflösung in den Schaltvorgängen erlaubt uns, die Kohärenz der angeregten Zustände durch Rückführung in den Grundzustand der Bewegung zu bestätigen. Ein ähnliches Schema sollte den Ionentransport über mit den Elektrodenabmessungen vergleichbare Entfernungen innerhalb von weniger als einer Schwingungsperiode ermöglichen.

Die beschriebenen Versuche wurden in einem an der ETH Zürich neu errichteten Aufbau für Experimente mit gefangenen  $^{40}\text{Ca}^+$ -Ionen durchgeführt. Das Herzstück ist eine mikrogefertigte Oberflächenelektroden-Falle in einer Ultrahochvakuumkammer, die von einem Pulsröhrenkryostaten gekühlt wird. Licht zur Photoionisation, Kühlung, Manipulation und Detektion von Ionen wird aus Diodenlasern gewonnen. Relevante Laser sind frequenzstabilisiert und über akusto-optische Modulatoren verstimm- und schaltbar gemacht. Die Ionen werden durch ein selbst designtes, kryo-kompatibles, vakuumtaugliches Objektiv abgebildet. Versuchssequenzen werden in Echtzeit mittels eines “Field Programmable Gate Arrays” gesteuert.

Neben der Beschreibung der Bang-bang-Experimente und des Versuchsaufbaus werden in dieser Dissertation das Speichern von Ionen im elektrischen Wechselfeld einer linearen Paul-Falle mit ebener Elektrodengeometrie beschrieben, die Wechselwirkung von Lasern mit Atomen theoretisch dargelegt, für unseren Aufbau spezifische Techniken und Kalibri-

## ZUSAMMENFASSUNG

erverfahren erläutert und die Möglichkeit der Nutzung abrupter Potentialverschiebungen zum schnellen Ionentransport in der Quanteninformationsverarbeitung diskutiert.