

Encoding a qubit in the motion of a trapped ion using superpositions of displaced squeezed states

Doctoral Thesis**Author(s):**

Flühmann, Christa

Publication date:

2019

Permanent link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000355836>

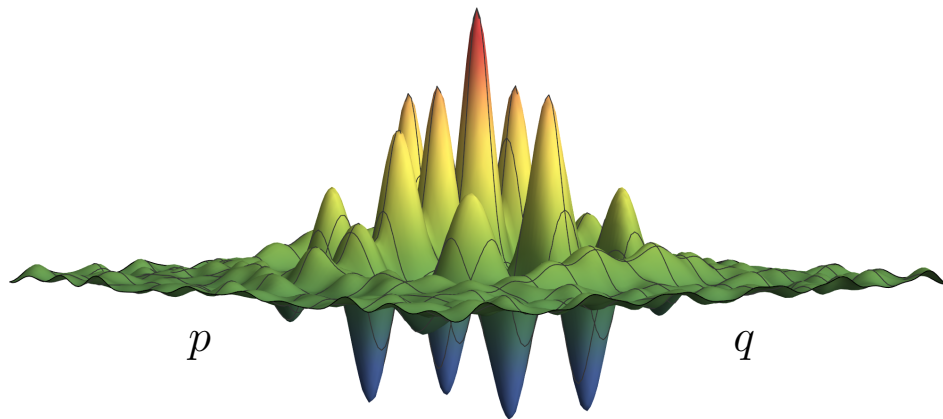
Rights / license:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#)

DISS. ETH NO. 25927

Encoding a qubit in the motion of a trapped ion using superpositions of displaced squeezed states

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



presented by

Christa Flühmann

MSc, ETH Zurich

born on 18.12.1989

citizen of Brienzwiler, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. P. Home

Prof. Dr. P. O. Schmidt

2019

Abstract

Trapped-ions form a promising platform to realize a future large scale quantum computing device. Qubits are typically stored in internal electronic states, which are coupled using their joint motion in the trap potential. In this thesis this control paradigm is reversed. The harmonic motion of a trapped $^{40}\text{Ca}^+$ ion forms the main subject of studies, which is controlled via the internal electronic states.

A number of new techniques are introduced and examined, primarily based on the implementation of modular variable measurements. These are realized combining an internal state dependent optical dipole force with readout of the internal states. Modular measurements are used to investigate large “Schrödinger cat” states of the ion’s motion, to violate Leggett-Garg tests of macroscopic realism, and finally to realize a logical qubit encoded in an error-correcting code based on the trapped-ion oscillator. The latter offers an alternative to the standard qubit based quantum information processing approach, which when embedded in systems of coupled oscillators could lead to a large-scale quantum computer.

Measurements of a particle’s modular position and momentum have been the focus of various discussions of foundational quantum mechanics. Such modular measurements of the trapped-ion’s motion are studied in depth in this thesis, in particular their ability to commute, which forms a key element for the latter work on error-correcting codes. Here we make use of the ability to investigate sequences of measurements on a single harmonic oscillator, and study correlations between their results, as well as quantum measurement disturbances between the measurements.

In order to achieve the major results of the thesis, it was necessary to characterize and control multiple wave packets in phase space. On the characterization side, the need to cope with states with high energy occupations led to the development of multiple new methods for quantum state tomography, including the use of a squeezed eigenstate basis, and the direct extraction of the characteristic function of the oscillator using state-dependent forces. These were used to analyze some of the largest oscillator “Schrödinger cat” states which have been produced to date.

The main result of this thesis is encoding and full control of a logical qubit in the motional oscillator space using a code proposed 18 years ago by Gottesman, Kitaev and Preskill. Logical code states are realized and manipulated using sequences of up to five modular measurements applied to an ion initially prepared in a squeezed motional state. Such sequences realize superpositions of multiple squeezed wave packets, which form the code words. The usage of the oscillator enables to encode and in principle correct a logical qubit within a single trapped ion, which when compared to typical qubit-array based approaches simplifies control and hardware.

While the discussion above focuses on the new physics in this thesis, in addition the work required technical upgrades to the system, improving control of both qubit and oscillator. These form important components which have impact on all experiments in our setup, beyond the bounds of the current thesis.

Zusammenfassung

Gefangene Ionen sind ein erfolgsversprechendes System um in Zukunft einen Quantencomputer zu realisieren. Quantenbits - kurz Qubits - werden typischerweise in internen elektronischen Freiheitsgraden der Ionen gespeichert, welche über die gemeinsame Schwingung im Fallenpotenzial gekoppelt werden. Dieser Ansatz wird in der vorliegenden Dissertation umgekehrt: Der Fokus liegt hierbei auf der Studie der harmonischen Schwingungsmode eines $^{40}\text{Ca}^+$ Ions, welche mithilfe der internen Zustände manipuliert und kontrolliert wird.

Neue Techniken die in erster Linie auf Messungen von modularen Variablen der Schwingungsmode beruhen, werden sowohl vorgeschlagen als auch experimentell untersucht. Eine solche modulare Messung wird durch eine vom internen Zustand abhängige optische Dipolkraft, gefolgt von einer Messung der internen Zustände realisiert. Modulare Messungen werden zur Studie grosser „Schrödinger Katzen“ des Ionenoszillators, wie auch für Makrorealismustests nach Leggett-Garg benutzt. Ausserdem erlauben modulare Messungen die Verschlüsselung eines fehlerkorrigierbaren logischen Qubits im Oszillator. Letzteres ist ein alternativer Ansatz zur Qubitregister basierten Quanteninformationsverarbeitung. Die Kopplung von mehreren logischen Qubits in Schwingungsmoden könnte in Zukunft die Realisierung eines Quantencomputers ermöglichen.

Darüber hinaus standen modulare Positions- und Impulsmessungen eines Teilchens im Fokus verschiedenster Diskussionen fundamentaler Aspekte der Quantenmechanik. Solche modularen Messungen werden ausführlich in der hier vorliegenden Arbeit studiert. Insbesondere wird die Kommutativität solcher Variablen untersucht, welche einen Kernbestandteil der Realisierung eines fehlerkorrigierbaren Qubits bildet. Dafür werden Sequenzen von modularen Messungen des Ionenoszillators genutzt, womit Korrelationen sowie quantenmechanische Messstörungen zwischen den Resultaten analysiert werden.

Um die Hauptresultate dieser Arbeit zu realisieren war es nötig, Überlagerungen aus mehreren Wellenpaketen im Phasenraum zu charakterisieren und zu kontrollieren. Für die Charakterisierung von Zuständen mit hohen Energieanregungen wurden neue Techniken zur Zustandsrekonstruktion entwickelt. Diese umfassen Analysen basierend auf gequetschten Energieeigenbasen sowie die direkte Messung der charakteristischen Funktion des Oszillators mittels zustandsabhängigen Kräften. Diese Techniken wurden zur Analyse von „Schrödinger Katzen“ benutzt, welche zu den grössten bisher in Oszillatormoden realisierten Zuständen gehören.

Das Hauptresultat dieser Dissertation ist die Verschlüsselung und vollständige Kontrolle eines logischen Qubits im Schwingungsraum eines Ions basierend auf der vor 18 Jahre von Gottesman, Kitaev und Preskill theoretisch vorgeschlagenen Methode. Sequenzen von bis zu fünf modularen Oszillatormessungen eines Ions in einem gequetschten Bewegungszustand erlauben die Herstellung und Kontrolle einer Überlagerung aus mehreren versetzten und gequetschten Wellenpaketen, welche die Codewörter realisieren. Die Nutzung der Schwingungsmode erlaubt die Verschlüsselung und im Prinzip die Fehlerkorrektur eines logischen

Qubits, das lediglich auf einem einzelnen gefangenen Ion basiert, welches im Vergleich zu qubitbasierten Ansätzen, einfachere Quantencomputer Hardware und Kontrolle ermöglicht.

Die bisherige Diskussion hat sich auf die neue Physik dieser Arbeit beschränkt. Darüber hinaus wurden dazu benötigte technische Verbesserungen, sowie verbesserte Kontrolle der internen Zustände und Schwingungsmoden umgesetzt. Diese repräsentieren Fortschritte welche die Qualität der präsentierten Ergebnisse ermöglichten und von denen künftige über diese Arbeit hinausgehende Experimente profitieren werden.