



Doctoral Thesis

Quantum Harmonic Oscillator State Synthesis by Reservoir Engineering

Author(s):

Kienzler, Daniel

Publication Date:

2015

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010479887> →

Rights / License:

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

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

DISS. ETH NO. 22622

Quantum Harmonic Oscillator State Synthesis by Reservoir Engineering

A thesis submitted to attain the degree of
DOCTOR OF SCIENCE of ETH ZÜRICH
(Dr. sc. ETH ZÜRICH)

presented by

DANIEL KIENZLER

Dipl. Phys., Humboldt Universität zu Berlin

born on 19.03.1983

citizen of
Germany

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. P. Home

Dr. D. M. Lucas

Prof. Dr. J. Faist

2015

Abstract

This thesis describes novel experiments on the dissipative preparation of harmonic oscillator state superpositions, their analysis and subsequent manipulation with unique spin-oscillator couplings. In addition I describe the setup of a trapped ion experiment together with the design and fabrication process of a segmented ion trap.

Following the proposals [CPBZ93, PCZ96] we prepare superpositions of energy eigenstates of the motion of a trapped $^{40}\text{Ca}^+$ ion by environment engineering. The process is implemented by artificial dissipation in form of an effective zero temperature bath combined with tailored spin-oscillator couplings. Using this technique we create coherent, squeezed and displaced-squeezed states of motion.

From the structure of the coherent couplings used in the environment engineering we devise novel spin-oscillator couplings, which operate directly in the eigenbasis of the prepared states. These are used to analyze the prepared states, enabling a phase sensitive measurement. This allows us to give a lower bound on the fidelities of the created states with a fidelity of 0.90(2) for a coherent state with a displacement of $|\alpha| = 2.00(1)$ and a fidelity of 0.88(2) for a vacuum squeezed state with squeezing amplitude of $r = 1.45(3)$ [KLK⁺15].

The novel couplings were used further to manipulate the created states. With this squeezed number states ($r = 1.2(1)$) up to the fourth excited state and a superposition state of the squeezed ground state and second excited squeezed number state were created.

An additional analysis of the prepared squeezed vacuum states based on a spin-state dependent force was implemented. This allowed us to directly measure the phase and quadratures of the squeezed state and led to the creation of ‘squeezed Schrödinger’s cat’ states [LKdC⁺15, Lo].

The ion trap built as part of this thesis was designed to trap linear mixed species ion crystals composed of $^{40}\text{Ca}^+$ and $^9\text{Be}^+$ ions. It features two optimized zones for shuttling and separating ion strings, which connect three zones for manipulation of the ions by laser beams. Segmented bias electrodes close to the trap serve to compensate electrical stray fields optimally in all zones of the trap. The heating rate for a single $^{40}\text{Ca}^+$ ion at an axial trap frequency of $2\pi \times 2$ MHz was measured to be 10 quanta/s.

This is the second edition of the thesis, released on Wednesday 13th May, 2015, with minor correction. The first edition of the thesis was released on Sunday 8th March, 2015, which was the basis of the doctoral defense.

Zusammenfassung

Die hier vorgelegte Abhandlung beschreibt Experimente zur dissipativen Preparation von Superpositionszuständen des harmonischen Oszillators sowie deren Analyse und Manipulation durch einzigartige Spin-Oszillator Kopplungen. Des Weiteren beschreibe ich den experimentellen Aufbau eines Ionen-Fallen-Experiments sowie das Design und den Fabrikations-Prozess einer segmentierten Ionen-Falle.

Den Ansätzen von [CPBZ93, PCZ96] folgend, preparieren wir Superpositionszustände der Energie-Eigenzustände der Bewegung eines gefangenen $^{40}\text{Ca}^+$ Ions durch ‘Environment Engineering’. Diese Technik wird umgesetzt durch eine künstliche Dissipation in Form eines Null-Temperatur Bades kombiniert mit speziell angepassten Spin-Oszillator Kopplungen. Wir verwenden diese Technik um kohärente, gequetschte und versetzt-gequetschte Bewegungszustände zu erzeugen.

Aus der Struktur der kohärenten Kopplungen die im ‘Environment Engineering’ Anwendung finden, leiten wir neuartige Spin-Oszillator Kopplungen ab, die direkt in der Eigenbasis der präparierten Zustände agieren. Wir verwenden diese Kopplungen um die präparierten Zustände zu analysieren, was uns eine phasensensitive Messung ermöglicht. Dies erlaubt uns eine untere Grenze für die Güte der von uns präparierten Zustände anzugeben. Für einen kohärenten Zustand mit einem Versatz von $|\alpha| = 2.00(1)$ messen wir eine Güte von $0.90(2)$. Für einen gequetschten Zustand mit einer Quetsch-Amplitude von $r = 1.45(3)$ messen wir eine Güte von $0.88(2)$ [KLK⁺15].

Des Weiteren verwenden wir die neuartigen Kopplungen um die präparierten Zustände zu manipulieren. Mit einem gequetschten Vakuum-Zustand als Startpunkt erzeugen wir angeregte Zustände bis zum vierten gequetschten Nummerzustand und einen Superpositionszustand aus dem gequetschten Vakuumzustand und dem ersten angeregten gequetschten Nummerzustand.

Eine zusätzliche Analyse speziell für die gequetschten Vakuumzustände wurde umgesetzt. Diese ermöglicht eine direkte Messung der Phase und der Quadraturen eines gequetschten Zustandes und erzeugt neuartige ‘gequetschte Schrödinger’s Katze’-Zustände [LKdC⁺15, Lo].

Als Teil dieser Arbeit wurde eine Ionenfalle gefertigt. Sie wurde designt um lineare Ionen-Kristalle zu fangen, die aus $^{40}\text{Ca}^+$ und $^9\text{Be}^+$ Ionen bestehen. Die Falle besitzt zwei Zonen die für das Bewegen und Spalten von Ionen-Ketten optimiert wurden. Diese verbinden drei Zonen zur Manipulation der Ionen mit Laserstrahlen. Segmentierte Kompensationselektroden nahe der Falle dienen der optimalen Kompensation von elektrischen Streufeldern in allen Zonen der Falle. Die gemessene Heizrate der Falle für ein einzelnes $^{40}\text{Ca}^+$ Ion mit einer axialen Fallenfrequenz von $2\pi \times 2\text{ MHz}$ beträgt 10 Quanten/s.