

DISS. ETH NO. 23051

Transport Quantum Logic Gates for Trapped Ions

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

presented by

LUDWIG ERASMUS DE CLERCQ

MSc. Phys., University of Stellenbosch

born on 15.01.1986

citizen of
Republic of South Africa

Accepted on the recommendation of

Prof. Dr. J. P. Home
Prof. Dr. T. Schätz

2015

Abstract

One of the most promising methods for scaling up quantum information processing with trapped ions is the quantum CCD architecture [Wineland 98, Kielpinski 02], in which ions are shuttled between many zones of a multiplexed ion trap processor. A primary element of this design is the parallel operation of gates in multiple regions, presenting a formidable challenge for scaling of optical control. In this thesis, I demonstrate a new route which could dramatically reduce these requirements, by transporting ions through laser beams [D. Leibfried 07]. The thesis covers the hardware, software and experiments which were required in order to achieve this goal.

In order to perform these experiments I have developed several hardware and software solutions which are more widely applicable. Firstly, the Electronically Variable Interactive Lockbox (EVIL) which is widely used in our laboratory as a PI-controller. Secondly, the Direct Ethernet Adjustable Transport Hardware (DEATH) developed specifically for the transport experiments. Finally, I devised a simple method to create complex transport experiments which require control over multiple independent potential wells.

The main achievement of this thesis is the demonstration of parallel quantum logic gates involving transport of ions. I have also demonstrated that these gates can be performed sequentially in order to create more complex operations by performing a Ramsey experiment. Additionally I have developed a novel method to estimate time-dependent coefficients of a Hamiltonian containing two non-commuting terms. The problem naturally arises when transporting an ion through a laser beam. The method is sensitive enough that we can detect the curvature of the wavefronts of the Gaussian laser beam.

Zusammenfassung

Eine der vielversprechendsten Methoden, die Quanteninformationsverarbeitung mit gefangenen Ionen zu skalieren, ist die quantenladungsgekoppelte Architektur („quantum charge-coupled device“) [Wineland 98, Kielpinski 02], in welcher Ionen zwischen verschiedenen Zonen eines gemitplexten Ionenfallen-Prozessors hin und her bewegt werden. Ein wichtiges Element dieses Designs ist die gleichzeitige Anwendung von Gatteroperationen in verschiedenen Regionen des Chips, welches erhebliche Schwierigkeiten bei der Skalierung des optischen Aufbaus zur Steuerung der Ionen bereitet. In der vorliegenden Arbeit beschreibe ich einen neuen Weg, welcher diese Beschränkungen stark vereinfacht, in dem Ionen durch statische Laserstrahlen transportiert werden [D. Leibfried 07]. Diese Dissertation beschreibt die Hard- und Software, sowie Experimente, welche benötigt werden, um dieses Ziel zu erreichen.

Um diese Experimente durchführen zu können, habe ich im Verlauf dieser Arbeit verschiedene Hard- und Softwarelösungen entwickelt, welche auch anderweitig anwendbar sind. Nennenswert sind hier die „elektronisch verstellbare, interaktive Lockbox“(EVIL), welche in unserem Labor als PI-Regler genutzt wird, sowie die „direkt über Ethernet anpassbare Transport-Hardware“(DEATH), welche speziell für die Transport-Experimente entwickelt wurde. Schliesslich habe ich eine einfache Methode entwickelt, um komplexe Transport-Experimente zu realisieren, die Kontrolle über mehrere, voneinander unabhängige Potentialtöpfe benötigen.

Die hauptsächliche Leistung dieser Arbeit ist die Demonstration paralleler quantenlogischer Gatter, welche den Transport von Ionen beinhalten. In dem ich diese Methode genutzt habe, um ein Ramsey-Experiment durchzuführen, konnte ich ausserdem zeigen, dass Gatter sequenziell ausgeführt werden können, um komplexere Operationen zu realisieren. Schliesslich habe ich eine neue Technik entwickelt, die es ermöglicht, die zeitabhängigen Koeffizienten eines Hamiltonians, welcher zwei nicht-kommutierenden Terme beinhaltet, abzuschätzen. Eine solche Problemstellung taucht auf, wenn ein Ion durch einen Laserstrahl transportiert wird. Die Methode ist so empfindlich, dass die Krümmung der Wellenfront eines Gauss-Strahls nahe des Fokus gemessen werden kann.