

In dieser Arbeit werden experimentelle Untersuchungen zur Schätzung von Quantenzuständen und zur Charakterisierung von Quantenkanälen vorgestellt.

Ein Qubit - das quantenmechanische Äquivalent zum Bit der konventionellen Informationstheorie - wird durch die Hyperfein-Niveaus des Grundzustands $2S_{1/2}$ eines in einer elektrodynamischen Ionenfalle gespeicherten einzelnen $^{171}\text{Yb}^+$ Ions dargestellt. Es wird durch Mikrowellenstrahlung der Frequenz 12,6 GHz kohärent manipuliert. Sein Zustand wird durch Laserlicht der Wellenlänge 369 nm zustandsselektiv detektiert. Das Licht ist auf den Dipol-Übergang zwischen den Niveaus $2S_{1/2}$ ($F = 1$) und $2P_{1/2}$ ($F = 0$) abgestimmt und bewirkt optisches Pumpen in das Niveau $2S_{1/2}$ ($F = 0$), was gleichzeitig zur Präparation des Qubits dient. Die Laserkühlung des Ions erfolgt auf demselben Dipolübergang. Durch Mikrowellenstrahlung der Frequenz 12,6 GHz werden dabei die Hyperfein-Niveaus miteinander gekoppelt und optisches Pumpen in das Niveau $2S_{1/2}$ ($F = 0$) vermieden. Zusätzlich wird durch kontinuierliche Beleuchtung des Ions mit Laserlicht der Wellenlänge 935 nm das Niveau $2D_{3/2}$ entleert.

Im ersten Teil der Arbeit wird das Qubit dazu benutzt, das Schätzen von Quantenzuständen experimentell zu untersuchen. Dazu werden 12 identisch präparierte Qubits nacheinander erzeugt und in einer Basis gemessen, die durch einen von vier untersuchten Algorithmen zur Zustandsschätzung bestimmt wird: den selbstlernenden Algorithmus nach Fischer u. a. (2000), zufällige Messrichtungen und orthogonale Messrichtungen mit und ohne Kompensation ungleicher Effizienzen für den Nachweis der Zustände $F = 0, 1$. Beim selbstlernenden Algorithmus hängt die Wahl der Messbasis bei jedem der 12 zur Verfügung stehenden Qubits von den Ergebnissen der vorangegangenen Messungen ab. Die Leistung der Algorithmen wird anhand der mittleren erzielten Fidelity - der Überlappung zwischen präpariertem und geschätztem Zustand - charakterisiert und in Abhängigkeit vom zu schätzenden Zustand, von der Effizienz für den Nachweis der Zustände $F = 0$ und $F = 1$, von der Effizienz der Präparation des Ions im Zustand $F = 0$ und von der Anzahl der zur Verfügung stehenden identisch präparierten Qubits untersucht. Bei gleichen experimentellen Bedingungen erzielt der selbstlernende Algorithmus nach Fischer u. a. von allen untersuchten Algorithmen die höchste mittlere Fidelity.

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Charakterisierung von Quantenkanälen. Dazu werden verschiedene Quantenkanäle experimentell realisiert und anhand ihrer Wirkung auf den Bloch-Vektor des Qubits charakterisiert: der inhärente Quantenkanal des Experiments, die ungestörte zeitliche Propagation als Quantenkanal, ein polarisationsdrehender Quantenkanal, phasendämpfende Quantenkanäle und ein kombinierter Quantenkanal aus Phasendämpfung und Polarisationsdrehung. Die experimentell bestimmten Parameter der untersuchten Quantenkanäle werden mit theoretischen Modellen verglichen. Es zeigt sich, dass die Wirkung der Quantenkanäle gut verstanden werden kann und sich das Experiment als „Simulator“ für Quantenkanäle eignet.

This thesis presents experimental research regarding the estimation of quantum states and the characterization of quantum channels.

A qubit - the quantum mechanical equivalent to the conventional information theory bit - is represented by the ground state hyperfine levels of a single $^{171}\text{Yb}^+$ ion confined in an electrodynamic ion trap. The ion is coherently manipulated by microwave radiation at 12.6 GHz. State selective detection is realized by irradiation of laser light at 369 nm. The laser light is tuned to the dipole transition between the levels $2S_{1/2}$ ($F = 1$) and $2P_{1/2}$ ($F = 0$) and causes optical pumping into the level $2S_{1/2}$ ($F = 0$), which serves at the same time for preparation of the qubit. The ion is laser cooled on the same transition. Microwave radiation at 12.6 GHz couples the hyperfine levels and prevents optical pumping into the $2S_{1/2}$ ($F = 0$) level. Additionally, continuous illumination of the ion with laser radiation at 935 nm depletes the level $2D_{3/2}$.

In the thesis' first part the qubit is used to experimentally investigate the estimation of quantum states. Therefore 12 identically prepared qubits are created successively and measured in some basis that is determined by one of four investigated algorithms for quantum state estimation: the self-learning estimation by Fischer et. al. (2000), random measurement directions, orthogonal measurement direction with and without compensation of biased detection for the states $F = 0, 1$. With the self-learning estimation the choice of measurement basis at each of the 12 available qubits depends on the outcomes of the previous measurements. The performance of the algorithms is judged by the reached mean fidelity - the overlap between prepared and estimated state - and the dependence on the state to estimate, on the detection efficiency for the states $F = 0$ and $F = 1$, on the preparation efficiency for the state $F = 0$ and of the number of available identically prepared qubits. At the same experimental conditions the self-learning measurement by Fischer et. al. reaches the highest mean fidelity of all investigated algorithms.

The second part of this thesis deals with the characterization of quantum channels. Therefore different quantum channels are experimentally realized and characterized by their action on the Bloch vector of the qubit: the inherent quantum channel of the experiment, the undisturbed time evolution as quantum channel, a polarization rotating quantum channel, phase damping quantum channels, and a combined quantum channel of phase damping and polarization rotation. The experimentally determined parameters of the investigated quantum channels are compared with theoretical models. It appears that the action of the quantum channels is well understood and the experiment is suitable as a ``simulator'' for quantum channels.