



Doctoral Thesis

## Quantum Teleportation and Efficient Process Verification with Superconducting Circuits

**Author(s):**

Steffen, Lars

**Publication Date:**

2013

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-010050047> →

**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. 21517

# Quantum Teleportation and Efficient Process Verification with Superconducting Circuits

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

Lars Steffen

Dipl. Phys., ETH Zurich

born July 29, 1983

citizen of Bellikon AG, Switzerland

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Andreas Wallraff, examiner  
Prof. Dr. Leonardo DiCarlo, co-examiner

2013

## Abstract

Quantum information processing has long been a field in which progress has been made mostly on its theoretical aspects. In the last decades, however, superconducting circuits have proven to be a promising candidate for the implementation of a scalable quantum information processing architecture.

In this thesis, several quantum information processing experiments with superconducting circuits are demonstrated. In order to perform quantum experiments with superconducting circuits, a setup is needed that protects the circuits from uncontrolled interactions with their environment, while still allowing to manipulate and measure the quantum state. The setup, as well as the design and fabrication of chips containing such circuits are discussed.

The building blocks of every quantum algorithm are quantum gates. We demonstrate and characterize several gates, including our realization of the Toffoli gate. This is a three-qubit gate that can be used to implement universal quantum computing and is an important part in quantum error correcting schemes.

The standard method for characterizing quantum gates and processes is known as quantum process tomography. However, with increasing system size, quantum process tomography becomes infeasible. The number of experiments to be performed as well as the computational cost for post-processing the experimental data increases exponentially with the number of qubits. In this thesis, an alternative approach known as Monte Carlo process certification is implemented on different two- and three-qubit gates and compared to quantum process tomography.

In the final part of the thesis, the implementation of quantum teleportation in superconducting circuits is discussed. Quantum teleportation is an algorithm which transfers an unknown quantum state between two parties without transferring the physical carrier of information itself. For the realization of this experiment, the setup has been extended with quantum limited amplifiers allowing to faithfully measure the qubit state in every single experiment and feed-forward electronics performing operations on a qubit based on measurement outcomes analyzed in real-time. This realization constitutes the first implementation of the complete teleportation protocol in any solid-state system and shows the highest rate of successful teleportation events observed so far in any system.

The presented results demonstrate the power of the superconducting circuit architecture for quantum information processing applications and constitute a small step further along the way of realizing a quantum computer.

## Zusammenfassung

Quanteninformatonsverarbeitung war lange ein Forschungsgebiet, auf dem der Fortschritt hauptsächlich theoretischer Natur war. Innerhalb der letzten Jahrzehnte haben sich jedoch supraleitende Schaltkreise als potentielle Kandidaten erwiesen, um eine skalierbare Architektur zur Quanteninformatonsverarbeitung zu realisieren.

In dieser Abhandlung werden verschiedene Experimente aus dem Gebiet der Quanteninformatonsverarbeitung mit supraleitenden Schaltkreisen vorgestellt. Um Experimente durchzuführen, welche erlauben Quanteneffekte in supraleitenden Schaltkreisen zu beobachten und zu kontrollieren, wird ein spezieller Messaufbau benötigt. Dieser muss einerseits die Schaltkreise von unkontrollierten Wechselwirkungen mit der Umgebung abschirmen, andererseits aber auch das Manipulieren und Auslesen der Quantenzustände erlauben. Der Messaufbau und das Design sowie die Herstellung von Chips mit supraleitenden Schaltkreisen werden in dieser Abhandlung diskutiert.

Die Grundbausteine jedes Quantenalgorithmus sind die Quantengatter. In dieser Abhandlung werden verschiedene Quantengatter in supraleitenden Schaltkreisen realisiert und charakterisiert, unter anderem auch unsere Implementation des Toffoli-Gatters. Dieses Gatter wirkt auf drei Quantenbits. Es bildet die Grundlage für universelle Berechenbarkeit im quantenmechanischen Sinne und ist ein wichtiges Element in der Quantenfehlerkorrektur.

Quantenprozess-Tomographie ist die herkömmliche Methode, um Quantengatter und Quantenprozesse zu charakterisieren. Diese Methode wird allerdings undurchführbar bei wachsender Systemgröße. Die Anzahl Experimente, die durchgeführt werden müssen und auch die für die Nachbearbeitung nötige Rechenleistung steigt exponentiell mit der Anzahl involvierter Quantenbits. In dieser Abhandlung wird eine alternative Methode, Monte Carlo Quantenprozess-Zertifizierung, implementiert. Verschiedene Quantengatter werden mit dieser Methode und mit Quantenprozess-Tomographie charakterisiert und die Resultate miteinander verglichen.

Im letzten Teil der Abhandlung wird die Implementierung von Quantenteleportation mit supraleitenden Schaltkreisen diskutiert. Quantenteleportation erlaubt den Transfer eines unbekanntes Quantenzustandes zwischen einem Sender und einem Empfänger, ohne dass dabei der physikalisch Informationsträger selbst übermittelt werden muss. Um dieses Experiment zu

realisieren wurde der Messaufbau erweitert. Quantenlimitierte Verstärker erlauben das genaue Auslesen der Quantenbits bei jeder Einzelmessung und eine vorwärtsgekoppelte Regelung kontrolliert den Zustand der Quantenbits aufgrund von Messresultaten, die in Echtzeit ausgewertet werden. Diese Realisierung der kompletten Quantenteleportation ist die erste überhaupt in einem Festkörpersystem und weist die höchste Rate an erfolgreichen Teleportationsereignissen auf, die bis anhin gemessen wurde.

Die vorliegenden Resultate demonstrieren das Potential von supraleitenden Schaltkreisen für die Anwendung im Bereich der Quanteninformationsverarbeitung. Die Arbeit ist ein kleiner Schritt auf dem Weg zur Realisierung eines Quantencomputers.