



Doctoral Thesis

## Quantum Networks with Superconducting Circuits

**Author(s):**

Kurpiers, Philipp

**Publication Date:**

2019

**Permanent Link:**

<https://doi.org/10.3929/ethz-b-000378338> →

**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. 26152

# QUANTUM NETWORKS WITH SUPERCONDUCTING CIRCUITS

A thesis submitted to attain the degree of  
DOCTOR OF SCIENCES of ETH ZÜRICH

(Dr. sc. ETH Zurich)

presented by

Philipp Kurpiers

MSc ETH Physics, ETH Zurich

born on 02.02.1988

citizen of Germany

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Andreas Wallraff

Prof. Dr. David Schuster

2019

# Abstract

Our modern information society relies on high-performance local information processing and global information distribution. Complementing today's information technology with quantum networks promises exponentially faster computation, and more efficient and secure communication. First quantum networks have been investigated during the last decades showing the feasibility to utilize quantum technologies locally and globally. In this thesis, we present the experimental implementation of a local quantum network in a circuit quantum electrodynamic (circuit QED) architecture, which has become one of the leading platforms for quantum information processing. Extending the circuit QED framework by reliable, high-bandwidth quantum communication techniques thus paves the way towards distributed quantum computation. Besides quantum computation, combining quantum communication and our fast quantum-state readout techniques provides a basis for studying non-local physics based on Bell tests in circuit QED.

Circuit QED systems with typical transition frequencies in the microwave regime need to be operated at temperatures in the tens of millikelvin range to reduce their thermal population. To build circuit QED-based quantum networks we develop a novel modular design of a cryogenic network. We experimentally investigate two cryogenic prototype systems with a length of 4 meter and 10 meter. Based on these characterizations we perform simulations for systems up to 40 meter. The experimental and simulation results indicate that large-scale cryogenic networks can be realized using our modular design.

In addition to cryogenic networks, reliable quantum communication at high transfer rates requires low-loss information transmission between distant quantum systems. For that purpose, we characterize coaxial cables and rectangular microwave waveguides down to millikelvin temperatures using a resonant-cavity technique. With this technique we measure attenuation constants down to 1 decibel/kilometer at the single photon level. These low attenuation constants show the potential to perform quantum communication with microwave photons over several tens of meters.

In the next part, we realize a direct quantum channel between two remote circuit QED nodes on separate chips. We utilize a fully microwave controlled interaction between a quantum system and a resonator to emit time-symmetric single itinerant photons from the first node and absorb them at the second node. To characterize the performance of the direct quantum channel we transfer quantum states directly and generate entangled states between the remote nodes. We experimentally investigate two different mappings of local quantum states to the itinerant photons. First, we map

local quantum states to the Fock-state-basis of the itinerant photons and realize the first deterministic quantum communication between two remote quantum systems. Second, we show that quantum communication errors can be detected by mapping quantum states to a time-bin superposition of a single photon. To herald quantum communication errors by an ancilla quantum systems in future experiments, we test a novel all-microwave interaction between two quantum systems. Quantum gates based on this all-microwave interaction can also be used in more advanced quantum communication algorithms like quantum teleportation or error-correction schemes like entanglement distillation. For all remote quantum communication experiments, we validate the high level of experimental control by observing an excellent agreement with numerical master equation simulations.

In conclusion, we present a framework for modular cryogenic quantum networks based on low-loss direct quantum channels for future quantum information processing applications and fundamental studies of non-local physics.

# Zusammenfassung

Unsere moderne Informationsgesellschaft basiert auf lokalen Hochleistungscomputern und weltweiter Informationsverteilung. Quantennetzwerke, welche die heutige Informationstechnologie ergänzen können, versprechen sowohl exponentiell schnellere Berechnungen als auch eine effizientere und sicherere Kommunikation. Während der letzten Jahrzehnte sind erste Quantennetzwerke erforscht worden, die eine zukünftige Nutzung von Quantentechnologien lokal und weltweit ermöglichen könnten. Die vorliegende Arbeit untersucht die experimentelle Realisierung von lokalen Quantennetzwerken in supraleitenden Schaltkreisen, welche sich zu einer der führenden Plattformen für Quanteninformationsverarbeitung entwickelt haben. Wir erweitern supraleitende Schaltkreise um zuverlässige Techniken zur Quantenkommunikation mit hoher Bandbreite und schaffen somit die Grundlage für verteilte Quantencomputersysteme. Neben Anwendungen im Rahmen der Quanteninformationsverarbeitung schafft die Kombination von Quantenkommunikation und den von uns entwickelten schnellen Messtechniken von Quantenzuständen die Grundlage, um nicht-lokale physikalische Phänomene mit Hilfe bellscher Ungleichungen in supraleitenden Schaltkreisen zu untersuchen.

Quantensysteme in supraleitenden Schaltkreisen müssen aufgrund ihrer Übergangsfrequenzen im Mikrowellenbereich auf Temperaturen von einigen zehn Millikelvin abgekühlt werden, um ihre thermische Anregung zu reduzieren. Um zukünftig supraleitenden Quantennetzwerke aufzubauen, entwickeln wir ein neues modulares Design für kryogene Netzwerke. Wir untersuchen experimentell zwei kryogene Prototypsysteme mit einer Länge von 4 Meter und 10 Meter und nutzen diese Charakterisierungsmessungen, um Systeme bis zu 40 Meter Länge zu simulieren. Die experimentellen Ergebnisse und Simulationen deuten darauf hin, dass gross angelegte kryogene Netzwerke mit unserem modularen Design realisiert werden können.

Zusätzlich zu kryogenen Netzwerken benötigt eine zuverlässige Quantenkommunikation mit hoher Transferrate eine verlustarme Informationsübertragung zwischen entfernt liegenden Quantensystemen. Wir charakterisieren hierzu Mikrowellenkoaxialkabel und Rechteckhohlleiter bis zu Temperaturen im Millikelvin-Bereich mit Hilfe einer Resonanz-Kavität-Messmethode. Mit dieser Technik messen wir Absorptionskoeffizienten kleiner als 1 Dezibel/Kilometer bei einer Signalstärke auf dem Niveau von einzelnen Photonen. Diese niedrigen Absorptionskoeffizienten zeigen das Potential, dass breitbandige Quantenkommunikation mit Mikrowellenphotonen über mehrere zehn Meter durchgeführt werden kann.

Im nächsten Teil dieser Arbeit realisieren wir einen direkten Quantenkanal zwi-

schen zwei entfernt liegend, chip-basierten supraleitenden Schaltkreisen. Wir verwenden eine vollständig durch Mikrowellensignale kontrollierte Wechselwirkung zwischen einem Quantensystem und einem Resonator, um einzelne, zeitsymmetrische, sich ausbreitenden Mikrowellenphotonen von einem Netzwerkknoten zu emittieren und an einem zweiten zu absorbieren. Um diesen direkten Quantenkanal zu charakterisieren, übermitteln wir Quantenzustände direkt zwischen zwei Netzwerkknoten und erzeugen verschränkte Zustände zwischen diesen. Wir untersuchen experimentell zwei verschiedene Übertragungsverfahren der lokalen Quantenzustände auf die sich ausbreitenden Mikrowellenphotonen. Zum einen übertragen wir lokale Quantenzustände auf die Fock-Zustands-Basis der sich ausbreitenden Mikrowellenphotonen und realisieren damit die erste deterministische Quantenkommunikation zwischen zwei entfernt liegenden Quantensystemen. Zum anderen zeigen wir, dass Quantenkommunikationsfehler detektiert werden können, indem die lokalen Quantenzustände auf die Superposition von Zeitintervallen eines einzelnen Photons übertragen werden. Um Quantenkommunikationsfehler durch ein Hilfsquantensystem in zukünftigen Experimenten anzuzeigen, testen wir eine neue, mikrowellen-kontrollierte Wechselwirkung zwischen zwei Quantensystemen. Quantengatter, die auf dieser Wechselwirkung basieren, können auch in erweiterten Quantenkommunikationsalgorithmen wie der Quantenteleportation oder zur Fehlerkorrektur mit Hilfe der Verschränkungs-Destillation genutzt werden. In allen Quantenkommunikationsexperimenten belegt eine ausgezeichnete Übereinstimmung mit numerischen Simulationen der Mastergleichung ein hohes Mass an experimenteller Kontrolle unserer Quantensysteme.

Zusammenfassend präsentieren wir ein Design für ein modulares kryogenes Quantennetzwerk, das auf verlustarmen Quantenkanälen basiert und das zukünftige Anwendungen im Bereich der Quanteninformationsverarbeitung und der Grundlagenforschung zu nicht-lokalen physikalischen Phänomenen ermöglicht.