**Mit supraleitenden Qubits auf dem Weg zum Quantencomputer**

Der Bau eines zukunftsweisenden Quantenprozessors basierend auf supraleitenden Qubits mit neuartigen Eigenschaften – das ist das erklärte Ziel des vom BMBF mit 14.5M€ geförderten Verbundprojekts GeQCoS („German Quantum Computer based on Superconducting Qubits“), das innerhalb von vier Jahren erreicht und am Walther Meißner-Institut der Bayerischen Akademie der Wissenschaften an einem Prototypen demonstriert werden soll.

Deutschlands führende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler auf dem Gebiet der supraleitenden Quantenschaltkreise haben sich in diesem Verbundprojekt die Entwicklung innovativer Konzepte für den Bau eines verbesserten Quantenprozessors zum Ziel gesetzt. Basierend auf neuartigen Materialien und Fabrikationsmethoden des Karlsruhe Institute of Technology (KIT), den maßgeschneiderten theoretischen Konzepten der Friedrich-Alexander Universität Erlangen Nürnberg (FAU), den optimierten Kontrollmethoden des Forschungszentrum Jülichs (FZJ) und den Entwürfen zu neuen Architekturen mit höherer Konnektivität am Walther-Meißner-Institut der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (WMI) und an der Technischen Universität München (TUM) soll ein Quantenprozessor mit verbesserter Qualität realisiert werden. Um dieses Ziel zu erreichen, wird Halbleiterhersteller Infineon skalierbare Fabrikationsprozesse entwickeln, während das Freiburger Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF die Entwicklung von optimierten Chipgehäusen vorantreibt. Der Quantenprozessor soll schließlich am WMI getestet und dessen Leistungsfähigkeit anhand eines eigens entwickelten Quantenalgorithmus gezeigt werden.

# Verbesserte Technologie für leistungsfähigeren Quantenrechner

Quantenrechner versprechen, bislang nicht lösbare Problemstellungen effizient lösen zu können. Dazu gehören beispielsweise die Berechnung der Eigenschaften komplexer Moleküle für die Chemie und Pharmaindustrie als auch die Lösung von Optimierungsaufgaben, sei es für Herstellungsprozesse in der Automobilindustrie, oder für Berechnungen aus der Finanzwelt. Schon heute sind Quantenrechner in der Lage, kleine spezifische Problemstellungen zu meistern und die grundlegende Funktionsweise zu zeigen. Das langfristige Ziel, einen sogenannten universellen Quantencomputer zu entwickeln, der wichtige Rechenprobleme exponentiell schneller als ein klassischer Computer berechnet, liegt jedoch noch in der Zukunft. Eine geeignete Architektur zur Berechnung praxisrelevanter Probleme kann nur durch grundlegende Verbesserungen sowohl der Hardware als auch der Software realisiert werden.

Im Rahmen des GeQCoS Verbundprojekts soll ein Quantenprozessorprototyp entwickelt werden, der aus einigen wenigen supraleitenden Qubits mit jedoch grundlegend verbesserten Bauelementen besteht. Bei dieser Technologie werden die grundlegenden Bausteine eines Quantencomputers, die Quantenbits, durch widerstandslos fließende Ströme in supraleitenden Schaltkreisen realisiert. Diese Ströme sind relativ robust gegenüber äußeren Störeinflüssen und können die Quanteneigenschaften über lange Zeiten beibehalten. Zusammen mit zuverlässigen und skalierbaren Fabrikationsmethoden hat sich dadurch eine der führenden Quantentechnologien entwickelt, die erfolgreich zum Bau von ersten Quantenprozessoren eingesetzt wird.

Die geplanten Verbesserungen betreffen zum einen die Erhöhung der Konnektivität, die Anzahl an Verbindungen zwischen den einzelnen Qubits, als auch Verbesserung der Qualität der Qubits und damit der Möglichkeit schnell und effizient die gewünschten Quantenzustände herstellen zu können. „Durch den Einsatz von neuartigen Materialien zur Herstellung der Qubits erwarten wir eine bessere Reproduzierbarkeit und eine höhere Qualität der Qubits,“ stellt Ioan Pop (KIT) fest. „Zudem müssen wir die Fabrikationsmethoden verbessern um Störstellen zu vermeiden, die die Qualität der Qubits nachhaltig beeinflussen.“ fügt Alexey Ustinov (KIT) hinzu.

Ein besonderes Augenmerk legen die Forscherinnen und Forscher auf den Schulterschluss zwischen Hardware und Software, in dem sie Algorithmen entwickeln die ideal auf die Hardware, d. h. die Art der Qubits und der Operationen sowie den vorhandenen Verbindungen zwischen den Qubits abgestimmt sind. „Nur so können die derzeit und in näherer Zukunft verfügbaren Hardwareressourcen optimal ausgenutzt werden“ meint Michael Hartmann (FAU). „Wir werden aber insbesondere auch effizientere und präzisere Methoden für die Kontrolle der Qubits und die Modellierung des Gesamtsystems entwickeln“, fügt Frank Wilhelm-Mauch hinzu, der vor kurzem an das Forschungszentrum Jülich gewechselt ist und dort gemeinsam mit David DiVincenzo und Pavel Bushev am Aufbau eines Quantencomputerzentrums arbeitet. Schlussendlich gilt es aber auch die Grundlagen für eine rasche Industrialisierung und Kommerzialisierung der Quantentechnologie zu schaffen. Dazu gehören eine reproduzierbare Fertigung von skalierbaren Quantenschaltkreisen nach industriellen Maßstäben. „Infineon kann mit seiner langjährigen Erfahrung in der Herstellung von Spezialhalbleiterchips hier maßgeblich zur Verbesserung der supraleitenden Schaltkreise beitragen und dabei auch auf Quantentechnologieexpertise im Bereich der Ionenfallen zurückgreifen, einer zweiten sehr vielversprechenden Quantencomputerplattform“, erklärt Sebastian Luber von Infineon. Um die hochsensitiven Quantenschaltkreise optimal ansteuern und gleichzeitig von der Umgebung abschirmen zu können werden im Projekt auch optimierte Prozessorgehäuseentwickelt. „Die Skalierung zu einer großen Anzahl an Qubits und deren Operation bei tiefen Temperaturen stellt auch große Herausforderungen an die Aufbau- und Verbindungstechnik. Hier können wir aber sehr gut die vorhandenen Werkzeuge aus traditionellen Feldern adaptieren und im Bereich der Quantentechnologien anwenden“, erwähnt Sébastien Chartier (IAF).

Schlussendlich sollen neuartige Kopplungsmechanismen erarbeitet werden, die es erlauben die Anzahl der benötigten Operationen zu minimieren. Mit diesen Maßnahmen soll es am Walther-Meißner-Institut gelingen die verbesserte Leistungsfähigkeit anhand eines geeigneten Algorithmus zu zeigen. Das Projekt soll somit die Skalierbarkeit hin zu Quantencomputing-Architekturen mit einer größeren Qubit-Anzahl als nächsten Schritt sicherstellen und so die Voraussetzungen für eine Entwicklung fehlerkorrigierter Quantencomputer erarbeiten.

# Keimzelle für die zukünftige Quantencomputerentwicklung

Die entwickelten Technologien werden nicht nur zu neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen führen, sondern durch eine enge Verknüpfung mit Unternehmen auch das Quantenökosystem in Deutschland und Europa stärken. Ein konkretes Ziel ist es, den entwickelten Quantenprozessor so früh wie möglich sowohl auf der Hardware- als auch auf der Softwareebene innovativen Erstnutzern zur Verfügung zu stellen. Durch zahlreiche Unternehmen mit starken Forschungs- und Entwicklungsabteilungen ist Deutschland in einer idealen Ausgangsposition, um zu einem führenden Zentrum von Nutzern und Profiteuren von Quantencomputing zu werden. Durch den Zugang zu dem, im Projekt entwickelten, Prozessor sollen daher gezielt Unternehmen im Quantentechnologiebereich gestärkt und Neugründungen gefördert werden.

Darüber hinaus soll das Vorhaben als Keimzelle der aktuellen Bundesinitiative zum Bau eines Quantencomputers „made in Germany“ dienen. Der enge Zusammenschluss zwischen Wissenschaft und Industrie ist ein klares Bekenntnis zur Förderung von Technologietransfer und zur Etablierung eines deutschlandweiten Netzwerkes basierend auf supraleitenden Qubits. Die Orientierung des Projekts an der Schnittstelle zwischen Ingenieurwissenschaften, der Informatik und der Physik trägt der Interdisziplinarität des Feldes der Quanteninformationsverarbeitung Rechnung und dient der Aus- und Weiterbildung von hochqualifizierten Wissenschaftlern als wichtiger Bestandteil der deutschen Technologielandschaft.

**Munich Quantum Valley**

Dieses Projekt steht auch in engem Zusammenhang mit dem Munich Quantum Valley, einem Zusammenschluss der Bayerischen Ministerien, der Bayerischen Akademie der Wissenschaften, der Fraunhofer-Gesellschaft, der Ludwig-Maximilians-Universität München, der Max-Planck-Gesellschaft und der Technischen Universität München, das der Freistaat Bayern in den nächsten drei Jahren mit 300 Millionen Euro fördern wird.

[München spezifisch]

 „Wir sind auf dem richtigen Weg, um mit Hilfe der Quantentechnologie bislang unlösbare Rechenaufgaben lösen zu können. Wir können das enorme Potential von Quantencomputern heute noch gar nicht abschätzen, es steht aber außer Frage, dass wir mit dieser Technologie langfristig sowohl neue wissenschaftliche Erkenntnisse gewinnen können, als auch wirtschaftlich völlig neue Impulse setzen können“ schließt Stefan Filipp, der als Professor an der TU München und Direktor am WMI das Projekt koordiniert.

Das **Walther Meißner-Institut** **(WMI)** der **Bayerischen Akademie der Wissenschaften** leistet in enger Kollaboration mit der **Technischen Universität München** seit fast 20 Jahren Pionierarbeit im Bereich der Quantenwissenschaften und Quantentechnologien (QWT) mit supraleitenden Schaltkreisen und ist federführend in einer Vielzahl von Quanteninitiativen im Münchener Raum beteiligt.

Das **Forschungszentrum Jülich (FZJ)** adressiert Quantencomputing in den Säulen Quantenmaterialien, Quantencomputing Devices und der Quantencomputing User Facility JUNIQ mit dem Ziel, Grundlagen, Prototypen und Anwendungen im Quantencomputing zu entwickeln und beinhaltet das Zentrallabor des Europäischen Flagschiffprojekts OpenSuperQ.

Am **Karlsruhe Institute of Technology (KIT)** wird seit 2008 experimentelle Pionierarbeit zur Multiplex-Qubit-Auslese, Zwei-Niveau-Defekten, Quantensimulatoren und Quantenmetamaterialien geleistet sowie die Entwicklung von Quantenschaltungen weiter vorangetrieben.

Die **Universität Erlangen Nürnberg (FAU)** ist eine der innovationsstärksten Universitäten weltweit. In der Arbeitsgruppe von Prof. Hartmann wird neben der Entwicklung von Kopplungsschaltkreisen und Qubits, die Entwicklung von Algorithmen für NISQ Quantencomputer vorangetrieben.

**Infineon Technologies** AG ist ein weltweit führender Anbieter von Halbleiterlösungen mit einem der breitesten Produktportfolios der Branche. Das Unternehmen verfügt über eine hohe Kompetenz in Konzeption, Design und Herstellung von Spezialtechnologien und ist an mehreren Konsortien zu Quantentechnologien beteiligt, u.a. PIEDMONS zu Ionenfallen-basierten und QUASAR zu Silizium-basierten Quantencomputern.

Das **Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF** beherrscht die gesamte Wertschöpfungskette auf dem Gebiet der III/V-Halbleiter und verfügt über langjährige Erfahrung im Aufbau von Mikrowellen- und Submillimeterwellenmodulen sowohl in Hohlleitern als auch auf Leiterplatten. Im Bereich des Quantencomputings beteiligt sich das IAF unter anderem am EU-Projekt „SEQUENCE“ (Entwicklung kryogener Elektronik) und koordiniert das Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg.

**Kontakt:**

**Pressebild:** Visualisierung eines Quantenprozessors basierend auf supraleitenden Qubits. ©Chris Hohmann.

# With superconducting qubits on the way to the quantum computer

Building quantum processor with novel properties based on superconducting qubits - this is the aim of the four year project GeQCoS ('German Quantum Computer based on Superconducting Qubits') funded by the BMBF.

In this joint project, Germany's leading scientists in the field of superconducting quantum circuits have teamed up to develop innovative concepts for the construction of an improved quantum processor. They aim to realize a quantum processor with improved quality based on new materials and manufacturing methods by the Karlsruhe Institute of Technology (KIT), tailor-made theoretical concepts of the Friedrich-Alexander University Erlangen Nürnberg (FAU), optimized control methods of the Forschungszentrum Jülichs (FZJ) and concepts for new architectures with higher connectivity at the Walther-Meißner-Institute (WMI – Bavarian Academy of Sciences and Technical University of Munich). In order to achieve this goal, semiconductor manufacturer Infineon will develop scalable manufacturing processes, while the Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics (IAF) in Freiburg is promoting the development of optimized chip packages. The processor performance will eventually be demonstrated using a specifically developed quantum algorithm at the WMI.

# Improved technology for more powerful quantum computers

Quantum computers hold the promise to efficiently solve problems that are intractable with conventional computers. This includes, for example, the calculation of the properties of complex molecules for the chemical and pharmaceutical industry as well as the solution of optimization tasks, e.g. for manufacturing processes in the automotive industry or for calculations in the financial world. Already today, quantum computers have demonstrated their basic functionality by mastering small, specific problems. The long-term goal of a quantum computer that calculates exponentially faster than a classic computer, however, is still in the future. A suitable architecture for calculating practical problems can only be realized through fundamental improvements in both the hardware and the software.

Within the GeQCoS project, a quantum processor prototype is to be developed that consists of a few superconducting qubits with fundamentally improved components. In this technology the basic building blocks of a quantum computer, the quantum bits or qubits, are implemented by means of currents flowing without resistance in superconducting circuits. These currents are relatively robust to external interference and can retain their quantum properties over relatively long time scales. Together with reliable and scalable manufacturing methods, this has resulted in one of the leading quantum technologies that is already successfully used to build the first quantum processors.

The planned improvements concern, on the one hand, the qubit connectivity, the number of connections between the individual qubits, and the quality of the qubits to enhance the capability to quickly and efficiently produce the desired quantum states. 'By using new types of materials, we expect better reproducibility and a higher quality of the qubits,' says Prof. Ioan Pop (KIT). “We will also improve the manufacturing methods in order to avoid imperfections that effect on the quality of the qubits,” adds Prof. Alexey Ustinov (KIT).

The researchers pay special attention to the interplay between hardware and software, in which they develop algorithms that are ideally matched to the hardware, i.e. the type of qubits and operations as well as the existing connections between the qubits. 'This is the only way to make optimal use of the hardware resources currently available and in the near future,' says Prof. Hartmann (FAU). 'In particular, we will also develop more efficient and precise methods for characterizing the qubits and modeling the overall system,' adds Prof. Wilhelm-Mauch, who recently moved to Forschungszentrum Jülich and is working there with Prof. DiVincenzo and Dr. Bushev on setting up a quantum computing center. Ultimately, however, it is also important to lay the foundations for rapid industrialization and commercialization of quantum technology. This includes a reproducible production of scalable quantum circuits according to industrial standards. 'With its many years of experience in the manufacture of special semiconductor chips, Infineon can make a significant contribution to improving superconducting circuits. To achieve this goal, we can draw also on our quantum technology expertise in the field of ion traps, a second very promising quantum computer platform,' says Sebastian Luber from Infineon. In order to be able to control the highly sensitive quantum circuits accurately and at the same time shield them from the environment, optimized processor housings are being developed in the project. , Scaling to a large number of qubits and operating them at low temperatures also poses great challenges to the packaging technology. Here, however, we can very well adapt the existing tools from traditional fields and apply them to the field of quantum technologies ‘, mentions Sébastien Chartier (IAF).

# A nucleus for future quantum computer development

The technologies developed within GeQCoS will not only lead to new scientific knowledge, but also strengthen the quantum ecosystem in Germany and Europe through close links with companies. A specific goal is to make the quantum processor available to first-time users both on the hardware and on the software level as early as possible. Thanks to numerous companies with strong research and development departments, Germany is in an ideal starting position to become a leading center for users and beneficiaries of quantum computing. With access to the processor developed in the project, companies in the quantum technology sector should be strengthened and new start-ups should be promoted.

In addition, the project may serve as the nucleus of the current federal initiative to build a quantum computer 'made in Germany'. The close association between science and industry is a clear commitment to the promotion of technology transfer and to the establishment of a Germany-wide network based on superconducting qubits. The orientation of the project at the interface between engineering, computer science and physics takes into account the interdisciplinary nature of the field of quantum information processing and serves as an important component of the German technology landscape for the training and further education of highly qualified scientists.

[Munich specific]

This project is also closely related to the Munich Quantum Valley, an alliance of the Bavarian ministries, the Bavarian Academy of Sciences, the Fraunhofer Society, the Ludwig Maximilians University of Munich, the Max Planck Society and the Technical University of Munich, which was recently announced by Prime Minister Markus Söder.

[Munich specific]

'We are on the right track to be able to solve previously unsolvable arithmetic problems with the help of quantum technology. We cannot yet estimate the enormous potential of quantum computers, but there is no question that with this technology we will be able to gain new scientific knowledge in the long term and also set completely new economic impulses, 'concludes Stefan Filipp, who is as professor at the TU Munich and director at the WMI coordinating the project.

The **Walther Meißner Institute (WMI)** of the Bavarian Academy of Sciences has been doing pioneering work in the field of quantum sciences and quantum technologies (QWT) with superconducting circuits in close collaboration with the **Technical University of Munich** for almost 20 years and is involved in a large number of quantum initiatives in the Munich area in a leading role.

**Forschungszentrum Jülich (FZJ)** addresses quantum computing in quantum materials, quantum computing devices and with the quantum computing user facility JUNIQ. It covers both fundamental research and applications in quantum computing. It also hosts the central laboratory of the European flagship project OpenSuperQ.

At the **Karlsruhe Institute of Technology (KIT),** experimental pioneering work on multiplexed qubit readout, two-level defects, quantum simulators and quantum metamaterials has been carried out and the development of quantum circuits has been advanced.

The **University of Erlangen Nuremberg (FAU)** is one of the most innovative universities in the world. In the group of Prof. Hartmann, besides the development of coupling circuits and qubits, the development of algorithms for near-tearm quantum computers is advanced.

**Infineon Technologies AG** is a leading global provider of semiconductor solutions with one of the broadest product portfolios in the industry. The company has a high level of expertise in the conception, design and manufacturing of special technologies and is involved in several consortia on quantum technologies, including PIEDMONS on ion trap-based and QUASAR on silicon-based quantum computers.

The **Fraunhofer Institute for Applied Solid State Physics IAF** offers the entire value chain in the field of III/V semiconductors and has many years of experience in the realization of microwave and submillimeter wave modules both in waveguides and on printed circuit boards. In the field of quantum computing, Fraunhofer IAF participates, for example, in the EU project "SEQUENCE" (development of cryogenic electronics) and coordinates the Competence Center Quantum Computing Baden-Württemberg.