

## QCN

Quantum Computing with a Neutron

|                                 |                                                                      |                        |            |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|------------------------|------------|
| <b>Programm / Ausschreibung</b> | Quantum Austria, Quantum Austria 4. Ausschreibung (2024)             | <b>Status</b>          | laufend    |
| <b>Projektstart</b>             | 01.10.2024                                                           | <b>Projektende</b>     | 31.10.2026 |
| <b>Zeitraum</b>                 | 2024 - 2026                                                          | <b>Projektlaufzeit</b> | 25 Monate  |
| <b>Keywords</b>                 | quantum computing, multi-state logic, highly isolated quantum states |                        |            |

### Projektbeschreibung

Wir schlagen vor, einen Prototyp eines Neutronen-Quantencomputers (QCN) zu bauen, der auf einem einzigen an einen reflektierenden Spiegel gebundenen ultrakalten Neutron basiert. Ziel des Projekts ist der Bau eines Q-N-its-Systems mit höheren logischen Zuständen ( $N \geq 2$ ), das darüber hinaus auch das Rechnen mit mehreren Q-N-its ermöglicht. Wir machen uns die multiplen Quantenzustände der Neutronen im Gravitationspotential der Erde zunutze, mit denen alle Kriterien eines QC erfüllt werden. Im Vergleich zu anderen Quantencomputern ermöglicht der QCN Mehrzustandslogiken und weniger komplexe Gatteroperationen.

Da Neutronenquellen begrenzt sind, bietet ein neutronenbasierter Quantencomputer ein hohes Potenzial für sicherheitsrelevante Anwendungen und garantiert einen exklusiven Zugang. Die Experimente sind am Institut Laue-Langevin in Grenoble an der Strahlposition PF2 vorgesehen. Dabei sind wir bestrebt, zukünftige kommerzielle Partner und mögliche Investoren bereits in einer frühen Projektphase einzubinden. NXP Semiconductors in Gratkorn und in Hamburg haben ihr Interesse bekundet, sich im Falle einer erfolgreichen Prototypenerprobung an späteren Projektphasen zu beteiligen. Auch die Bundesdruckerei GmbH, Berlin, hat Interesse am Quantencomputing unseres Konsortiums auf der Basis eines Multi-Logic-State-Ansatzes bekundet. TU Wien und ILL werden einen Prototypen an der Strahlposition PF2 bauen und installieren. Die Universität Heidelberg wird an Magnetfeldgradienten arbeiten, die sowohl für CNOT-Operationen als auch zur Neutronenspeicherung genutzt werden können. Die TU Wien untersucht auch komprimierte Zustände, während sich die Uni Wien auf die gebundene Verschränkung konzentrieren wird, eine Frage, die mit der Dimension des Hilbert-Raums zusammenhängt. Die Firma QUBITFLOW wird dann höherdimensionale Quantenlogik-Algorithmen bereitstellen. Bisher müssen zur Durchführung von Operationen die Q-Bits miteinander in Kontakt treten z. B. über Laser oder andere Methoden, was mit zunehmender Anzahl von Q-Bits zu einer Herausforderung wird und die Skalierbarkeit von Quantencomputern einschränkt. Bei einem QCN ist die Vernetzungsfähigkeit unabhängig von der Anzahl der Q-Bits. Wir dehnen die Architektur auf höherdimensionale Zustandsberechnungen mit Q-N-its,  $N \geq 22$ , aus und werden Quantenalgorithmen von der experimentellen und theoretischen Seite her erforschen. Als Projektziel konstruieren wir ein System mit mehreren Q-2- bis Q-5-its, an dem wir SWIFT-Operationen als ersten Schritt in Richtung Quanten-Fouriertransformation durchführen.

Die höherdimensionalen Gate-Operationen haben einen weiteren entscheidenden Vorteil. Insbesondere bei einem Q-16-it-

System werden wir zeigen, dass die Verwendung von komprimierten Zuständen dazu beiträgt, die Komplexität um einen Faktor 32 zu reduzieren. Die Anzahl der Zustände - gegeben durch eine unendliche Anzahl von Airy-Funktionen mit praktisch keinem Top-Cover - hat grundsätzlich eine große Expansionsfähigkeit bei gleichzeitiger Beibehaltung eines hochisolierten Quantensystems. In dieser Hinsicht treten andere Aspekte hochdimensionaler Quantenzustände in den Vordergrund. Es gibt keine allgemeine Methode, um zu bestimmen, inwieweit solche Quantenzustände verschränkt sind. Wir untersuchen den Prozess der Destillation, ein Problem, das eng mit einer speziellen Form der Verschränkung verbunden ist und als gebundene Verschränkung (BE) bezeichnet wird, im Gegensatz zu schwach oder frei verschränkten Zuständen.

## Abstract

We propose to build the prototype of a neutron quantum computer (QCN) based on a single ultra-cold neutron bound on a reflecting mirror. The project goal is to construct a multi (logic)-level Q-N-it system, with  $N \geq 2$ , which in addition enables computing with multiple state operations as well. We take advantage of multiple quantum states of the neutrons in the gravity potential of the earth, where all criteria of a QC can be fulfilled. Compared to other quantum computers, the QCN enables multiple-state logic and less complex gate operations.

As neutron sources are limited, a neutron-based quantum computer offers a high potential for security-relevant applications and guarantees exclusive access. The experiments are foreseen at the European Neutron Source at the Institut Laue-Langevin in Grenoble at the beam position PF2. The team endeavors to bind in future commercial partners and possible investors even in an early project phase. NXP Semiconductors, Austria, in Gratkorn and NXP Semiconductors, Germany, in Hamburg have expressed their interest to join later project phases in case of the successful prototype phase. Even the Bundesdruckerei GmbH, Berlin, has expressed their interest in quantum computing based on a multi-logic state approach. At first the consortium consists of groups from TU Wien and ILL. They will build and install a prototype at beam position PF2. Second, University of Heidelberg will work on magnetic field gradients that can be used for CNOT-operations together with a ucn storage technique. TU Wien will also work on compressed states whereas Uni Wien will concentrate on bound entanglement, a question which is related to Hilbert space dimension. QUBITFLOW as a third party contributor will provide higher dimensional quantum logic algorithms.

So far quantum computers require Q-bits to be interconnected e.g. via lasers or other means for performing operations, which becomes challenging as the number of Q-bits increases and limits the scalability of quantum computers. For a QCN the interconnect ability is the same independent of the number of Q-bits. More important, we will extend the architecture to higher dimensional state-computing using Q-N-its,  $N \geq 22$ , exploring higher dimensional quantum algorithms from the experimental and theoretical side. As project aim we will construct a multi Q-2- to Q-5-it systems, where we will perform SWIFT operations as a first step towards quantum fourier transformation.

The higher dimensional gate operations have another decisive advantage. In particular with our Q-16-it system, we will show that the use of compressed states can help to reduce complexity by another factor of 32. The number of states - given by an infinite number of Airy functions with practically no top-cover - has basically a large expansion capability while keeping a highly isolated quantum system. In this respect other aspects of high-dimensional quantum states come into focus. No general method exists to determine to what extent such higher dimensional quantum states are entangled. We will study the process of entanglement distillation, a problem which is strongly connected to a special form of entanglement called bound entanglement (BE) in contrast to weakly or free entangled states.

## Projektkoordinator

- Technische Universität Wien Atominstitut

## Projektpartner

- Institut Max von Laue - Paul Langevin
- Universität Heidelberg Physikalisches Institut
- Universität Wien Fakultät für Physik