

## HDcode

Protecting Quantum Information through high-dimensional Encoding

<b>Programm / Ausschreibung</b>	Quantum Austria 4. Ausschreibung (2024)	<b>Status</b>	laufend
<b>Projektstart</b>	01.10.2024	<b>Projektende</b>	31.01.2026
<b>Zeitraum</b>	2024 - 2026	<b>Projektlaufzeit</b>	16 Monate
<b>Keywords</b>	Quantum Computing, High-dimensional systems, Protection of Quantum Information		

### Projektbeschreibung

Das Gebiet der Quanteninformationsverarbeitung hat in den letzten Jahrzehnten bedeutende Fortschritte gemacht. Es wird jedoch zunehmend deutlich, dass das Übertreffen klassischer Computer in praktischen Anwendungen ein gewisses Maß an Quantenfehlerkorrektur (QEC) erfordert. Die aktuelle Forschung konzentriert sich daher stark auf die Implementierung effektiver QEC in heutigen Geräten. Eine zentrale Herausforderung dabei ist die grundlegende Fehlerrate des Systems. QEC kann nur dann wirksam sein, wenn diese Fehlerrate unter einem durch den verwendeten Fehlerkorrekturcode vorgegebenen Grenzwert liegt, wodurch Rechenfehler durch redundante Codierung auf ein beliebig kleines Maß reduziert werden können. In diesem Projekt erforschen wir eine alternative Form der redundanten Codierung. In fast allen heutigen Quantencomputern bestehen die Quantensysteme aus Mehrzustandsstrukturen, in denen zwei Zustände zur Informationsverarbeitung genutzt werden, während die übrigen weitgehend ignoriert werden. Dieser große Hilbertraum, insbesondere in atomaren und molekularen Ionen, stellt eine wertvolle Ressource für die robuste Codierung von Quanteninformation dar. Wir setzen Methoden des maschinellen Lernens ein, um hardware-optimierte Protokolle für die passive und aktive Stabilisierung der Quanteninformation zu entwickeln.

Die Identifizierung effizienter Alternativen zu den ressourcenintensiven Mainstream-Ansätzen der QEC ist entscheidend für die Entwicklung leistungsfähiger Quantencomputer in naher Zukunft. Die Ergebnisse dieses Projekts tragen durch die detaillierte Untersuchung robuster Codierungen in hochdimensionalen Hilberträumen wesentlich zum Verständnis potenzieller Alternativen bei. Durch die Nutzung bereits in den meisten heutigen Quantencomputersystemen vorhandener Ressourcen bietet dieser Ansatz großes Potenzial, die erheblichen Ressourcenanforderungen herkömmlicher QEC-Methoden deutlich zu reduzieren.

### Abstract

Quantum computing has seen impressive developments over the past decades, yet it is becoming more and more evident that surpassing the limits of classical computers will require at least some degree of quantum error correction (QEC). As a result, great efforts are devoted to realizing beneficial QEC in today's devices. The primary challenge in this endeavor remains to be the basic, raw error rates of the system. Only if these error rates are below a certain threshold, given by the error correcting code, can QEC take effect and reduce them further through redundant encoding into multiple information carriers.

Within this project, we aim to explore a different avenue for redundancy. Virtually all of today's quantum computing systems are inherently multilevel structures of which two levels are used for information processing and the rest is ignored. We will explore ways of using the large Hilbert space of atomic and molecular ions to encode quantum information in a robust fashion. We aim to use machine learning methods to develop hardware-tailored protocols for active and passive protection of quantum information.

Finding efficient alternatives to the resource-hungry mainstream approach to QEC is critical to making useful quantum computing a reality in the near future. The results of this project will inform these developments by investigating the extent to which already available resources in the high-dimensional Hilbert spaces of our quantum information carriers can be exploited to protect the encoded quantum information. If this approach is successful it has the potential to greatly reduce the resource requirements for fault-tolerant quantum computing.

## **Endberichtkurzfassung**

Quantum computing has seen impressive developments over the past decades, yet it is becoming more and more evident that surpassing the limits of classical computers will require at least some degree of quantum error correction (QEC). As a result, great efforts are devoted to realizing beneficial QEC in today's devices. The primary challenge in this endeavor remains to be the basic, raw error rates of the system. Only if these error rates are below a certain threshold, given by the error correcting code, can QEC take effect and reduce them further through redundant encoding into multiple information carriers.

Within the HDcode project, we explored an alternative avenue for redundancy: Virtually all of today's quantum computing systems are inherently multilevel structures, of which two levels are used for information processing, and the rest is ignored. We explored ways to use this large Hilbert space of atomic and molecular ions to encode quantum information in a robust fashion. Through the use of machine-learning methods in combination with advanced control techniques, we developed methods for efficient noise characterization and state preparation in multi-level systems, certification of quantum features including measurements, information storage, and entanglement, and developed strategies for protecting quantum information in multi-level structures. The results of this project thus lay the foundation for more resource-efficient fault-tolerant quantum computing through the use of qudit encoding.

## **Projektkoordinator**

- Universität Innsbruck

## **Projektpartner**

- Technische Universität Wien
- Universität Linz