Sachbericht zum Verwendungsnachweis

Vorhabenbezeichnung:

QuaST

Gefördert durch das BMWE (zuvor BMWK)

Zuwendungsempfänger: **Technische Universität München** Vertreten durch Lehrstuhl für Rechnerarchitektur (Prof. Schulz), Chair for Design Automation (Prof. Wille) und Forschungsgruppe Quantum Computing (Prof. Mendl)	Förderkennzeichen: 01MQ22004B
Titel des Teilvorhabens (sofern zutreffend): **Quantum-enabling Services und Tools für industrielle Anwendungen**	
Projektleitung: **Jeanette Lorenz**	
Laufzeit des Vorhabens: von: **01.01.2022** bis: **31.12.2024**	
Berichtszeitraum: von: **01.01.2022** bis: **31.12.2024**	Datum: 24.09.2025

Der Zwischenbericht soll zu folgenden Punkten/Fragen kurzgefasste Angaben enthalten (Beantwortung in Stichworten genügt):

Er ermöglicht dem Zuwendungsgeber die haushaltsrechtlich vorgeschriebene Bewertung der Einzelmaßnahme und ist auch ein Beitrag einer späteren Evaluation des zugrundeliegenden Förderprogramms. Der Erfolgskontrollbericht soll auch Aspekte der Ergebnisverwertung beinhalten, die wesentlich bei der Bewertung des Projekterfolgs sind. Das folgende Schema dient der Vereinheitlichung und zugleich als Hilfestellung für den Zuwendungsempfänger zur Erstellung des Erfolgskontrollberichtes. Dieser soll enthalten:

1. Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen, z.B. des Förderprogramms (ggf. unter Angabe des Schwerpunkts),- soweit dies möglich ist

Quantumcomputing (QC) kann industrielle Optimierungsprobleme, etwa in Logistik und Halbleiterfertigung, revolutionieren. Damit Wirtschaft und Gesellschaft davon profitieren, ist ein niederschwelliger Zugang nötig, der keine tiefgehenden Kenntnisse der Quantenphysik erfordert.

Das Projekt QuaST entwickelt dafür Software, Tools und Services, die QC-gestützte Optimierungslösungen praxisnah nutzbar machen. Wesentliche Ergebnisse sind Methoden zur Evaluation von Quantenanwendungen, Tools zur Verifikation von Algorithmen sowie ein integrierter Evaluations- Verifikations- und Ausführungsablauf, der eine zuverlässige Entwicklung und Anwendung von Quanten-Software ermöglicht.

Diese Entwicklungen stärken die technologische Souveränität, erleichtern den Transfer von QC in die Industrie und ermöglichen eine breite Anwendung ohne Expertenwissen.

2. Wissenschaftlich-technische Ergebnis des Vorhabens, die erreichten Nebenergebnisse und die gesammelten wesentlichen Erfahrungen,

Im Rahmen dieses Projekts wurden zahlreiche Methoden sowohl für die Evaluation als auch die Verifikation von Quantenanwendungen entwickelt. Die erarbeiteten Konzepte und Softwaretools tragen wesentlich zur praktischen Nutzung von Quantencomputing bei, indem sie effiziente Simulations-, Verifikations- und Analysemethoden bereitstellen. Desweiteren wurde an der Anbindung der Arbeiten an den Munich Quantum Software Stack gearbeitet, der langfristig für die low-level Ausführung des QuaST Ansatzes plattformübergreifend ermöglich soll.

Simulation von Quantenprozessen

Die Simulation von Quantenschaltkreisen ist essenziell, da sie Entwicklern ermöglicht, Quantenalgorithmen effizient zu testen und zu validieren, bevor sie auf realen Quantenhardware-Systemen ausgeführt werden. Da aktuelle Quantencomputer fehleranfällig und begrenzt skalierbar sind, bieten klassische Simulationsmethoden eine kontrollierte Umgebung, um Algorithmen zu analysieren, zu optimieren und Fehler zu identifizieren. Insbesondere für NISQ-Quantencomputer (Noisy Intermediate-Scale Quantum) sind Simulationen unverzichtbar, um das Verhalten von Quantenoperationen nachzuvollziehen und ihre Praxistauglichkeit zu bewerten. Im Rahmen dieser Arbeit wurden u.a. neue Methoden für die Simulation unter der Berücksichtigung von Noise, als auch Methoden zur Simulation von Time-Evolutions von Hamiltonians entwickelt. All diese Arbeiten wurden in das open-source Softwaretool MQT DDSIM integriert.

Verifikation von Quantenanwendungen

Neben der Simulation spielt die Verifikation von Quantenalgorithmen eine entscheidende Rolle für die zuverlässige Nutzung von Quantencomputern. Im Rahmen des Projekts wurden u.a. Methoden zur Verifikation von Quantenoperationen entwickelt, die explizit auch Non-Unitary Gates berücksichtigen können. Darüber hinaus hat die enge Zusammenarbeit mit Anwendungspartnern die Verifikation von parameterisierten Operationen getriggert, da diese insbesondere für die aktuellen NISQ Quantuencomputer besonders interessant sind. Hierfür wurden Methoden entwickelt, um den Anforderungen realer NISQ-Use-Cases gerecht zu werden und sind in das Verifikationstools MQT QCEC integriert worden. Damit ist es nun möglich, die Korrektheit und Äquivalenz von Quantenalgorithmen effizient zu überprüfen, selbst wenn sie komplexe nicht-unitäre oder parametrisierte Operationen enthalten.

Weitere Entwicklungen und Nebenergebnisse

Über die Kernentwicklungen hinaus wurden weitere bedeutende Fortschritte erzielt, die es Endnutzern einfacher machen, Quantencomputer zu lösen. Hierbei ist das Ziel, möglichst viele der notwendigen Schritte zu automatisieren während der Entwicklung einer quantencomputerbasierten Lösung für ein Anwendungsprobleme. Hierfür wurden verschiedene Methoden und Tools entwickelt:

- MQT Predictor – Ein Tool zur automatischen Auswahl des bestmöglichen Quantencomputers für eine Anwendung, das einen gegebenen Quantenschaltkreis entsprechend kompiliert.
- MQT Bench – Eine Benchmarking-Bibliothek, die zur Evaluierung von Quantencomputern und Softwaretools eine Vielzahl von Benchmarks zur Verfügung stellt und sich in der Quantum Software Community als häufig genutztes Tool etabliert hat.
- Das MILQ Software Framework für „circuit cutting and scheduling“ für heterogene QPU-Cluster. Eine besondere Fähigkeit ist die Berücksichtigung und Adaptation auf unterschiedlihche Hardware-Eigenschaften und Charakteristiken.
- Eine Methodik basierend auf Resource Estimation die es erlaubt, bereits heute Anwendungen für große und wirtschaftlich interessantere Anwedungen zu untersuchen und zu evaluieren indem die entsprechenden Quantenschaltkreise nicht ausgeführt sondern ihr Resourcenbedarf bestimmt wird.
- Es wurde das I/O Verhalten der QuaST Pipeline untersucht und darauf basierend Voraussetzungen für den skalierbaren Einsatz entwickelt.

Anbindung der QuaST Werkzeuge

QuaST liefert wertvolle Werkzeuge und Ansätze zum zukünftigen praktischen Einsatz von Quantensystemen. Um dies jedoch voll nutzen zu können ist eine Anbindung und Integration der Werkzeuge in ein größeres Ökosystem und in die klassische Rechenumgebung nötig. Zu diesem Zweck wurden an Erweiterungen der QuaST-Entwicklungen gearbeitet, die dies ermöglichen, am Beispiel des Munich Quantum Softwarestacks (MQSS). Dazu wurde evaluiert, inwiefern der QuaST Decision Tree, als Programmier-Template, an die unteren Schichten im MQSS angebunden werden können, sowie nötige Laufzeitkonzepte für eine hybride und effiziente Ausführung für QuaST Anwendungen konzipiert.

3. Fortschreibung des Verwertungsplans.

Diese soll, soweit im Einzelfall zutreffend, Angaben zu folgenden Punkten enthalten (Geschäftsgeheimnisse des Zuwendungsempfängers brauchen nicht offenbart zu werden):

a. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte

Es wurden von uns keine Erfindungen oder Schutzrechtsanmeldungen getätigt.

b. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont)

Unter anderem inspiriert durch das QuaST Projekt und den aktuellen Bedarf nach softwareseitiger Unterstützung sowohl bei Quantencomputerherstellern als auch bei Quantencomputeranwendern, haben wir vor kurzem ein Start-Up, die Munich Quantum Software Company (MQSC), gegründet. Gleichzeitig werden die Ergebnisse auch in die in 2025 zu gründende MQV gGmbH überführt, die eine langfristige Unterstützung der in QuaST entwickelten Komponenten des MQSS Softwarestacks sicherstellen wird.

c. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende (mit Zeithorizont)

Durch das Projekt QuaST wurden ein starkes Fundament für die Weiterentwicklung von Software- und Verifikationstools im Quantencomputing sowie die Anbindung von Anwendungen an HPC-Systeme für HPCQC-Integration geschaffen. Die im Rahmen des Projekts entwickelten Methoden und Tools ermöglichen nicht nur eine effiziente Simulation, Integration und Verifikation von Quantenanwendungen, sondern bieten auch eine wertvolle Grundlage für zukünftige Forschung und industrielle Nutzung.

Ein zentraler Vorteil der Arbeiten liegt darin, dass die entwickelten Ansätze durch den Einblick in reale Anwendungen gezielt auf praxisrelevante Problemstellungen abgestimmt werden

können. Dies ermöglicht eine kontinuierliche Optimierung und Erweiterung der bestehenden Lösungen.

Die bereits gestarteten Entwicklungen – darunter MQT DDSIM, MQT QCEC, MQT Predictor und MQT Bench sowie die HPCQC-Integrationspipeline – werden über das Projektende hinaus weitergeführt. Ziel ist es, diese Arbeiten laufend zu verbessern und in zukünftige Quantencomputing-Workflows zu integrieren. Dabei soll insbesondere die Open-Source-Strategie beibehalten werden, um eine breite Nutzung in Forschung und Industrie zu ermöglichen.

Darüber hinaus wird eine Integration in größere Software-Stacks wie den Munich Quantum Software Stack (MQSS) und Munich Quantum Virtualization (MQV) vorangetrieben, um Synergien mit anderen Forschungs- und Entwicklungsprojekten zu nutzen. Eine enge Zusammenarbeit mit Forschungseinrichtungen, Industriepartnern und Netzwerken, v.a. im Rahmen des Munich Quantum Valleys (MQV) soll dazu beitragen, die entwickelten Technologien in der Praxis zu etablieren und weiter auszubauen.

d. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit für eine mögliche notwendige nächste Phase bzw. die nächsten innovatorischen Schritte zur erfolgreichen Umsetzung der Ergebnisse

Aktualisierter Verwertungsplan:

Lfd. Nr.	Bezeichnung	Zeithorizont
1	Simulations- und Verifikationswerkzeuge aus AP5 liegen vor	12/2023
2	Methoden aus AP1-AP5 wurden in Anwendungen von AP7 integriert.	12/2024
3	Werkzeuge und Ansätze aus WP3-5 werden, soweit wie möglich in den Munich Quantum Software Stack übernommen bzw. entsprechende Schnittstellen werden geschaffen	2025/26

Ggf. kurze Erläuterung zu den einzelnen Verwertungsmaßnahmen.

4. Angaben zu Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Alle Arbeiten wurden erfolgreich abgeschlossen.

5. Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

Alle im Projekt entwickelten Tools wurden als Python-Packages sowie als Open-Source-Repositories auf GitHub veröffentlicht. Dadurch sind die Ergebnisse für die wissenschaftliche Community und die Industrie frei zugänglich und können direkt in eigene Anwendungen integriert werden.

Die Verbreitung der Ergebnisse wurde durch Präsentationen auf Fachkonferenzen und Anwenderveranstaltungen unterstützt, darunter:

- IEEE Quantum Week (QCE) und weitere Quantencomputing-Konferenzen, um die entwickelten Simulations- und Verifikationsmethoden vorzustellen.
- HPC Konferenzen (z.B. SC und ISC), in denen v.a. die HPCQC und die QC Pipeline präsentiert wurden.

- Design Automation Conferences, in denen insbesondere die entwickelten Tools für die Verifikation und Optimierung von Quantenanwendungen präsentiert wurden.
- Industrie-Workshops und Netzwerke, um den Transfer in praxisnahe Anwendungen zu ermöglichen.
- Die Seminar-serie EQS3 (European Quantum Software und System Summit), die von QuaST PIs mitveranstaltet wird

Zur nachhaltigen Nutzung der Ergebnisse wurde zudem das MQT Handbook als Dokumentationspaper veröffentlicht, um eine umfassende Einführung in die entwickelten Softwaretools und deren Anwendungsmöglichkeiten zu bieten.

6. Angaben über die Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Alle Arbeitspakete wurden entsprechend des Ausgaben- und Zeitplans abgearbeitet und erfolgreich abgeschlossen.