

# Quanten-Computing

Anwendungen für die Wirtschaft

QU



BIT



# Impressum

**Herausgeber****DLR Projektträger**

Europäische und Internationale Zusammenarbeit  
Digitale Strategien und Entwicklung

**Redaktion**

Dr. Johann Schmidt  
Dr. Sophia Helmrich  
Isabel Tadayon

**Gestaltung**

Kompetenzzentrum Öffentlichkeitsarbeit  
des DLR-PT

Bonn, April 2024

**Bildnachweise**

Titel: Production Perig/ stock.adobe.com



# Einleitung

Die Bundesregierung möchte mit langfristiger, zielgerichteter Unterstützung Deutschland und Europa in den Quantentechnologien international in eine führende Position bringen. Im Fokus steht dabei, technologische Souveränität zu sichern, Wertschöpfungspotenziale zu heben und die vielfältigen Nutzungsmöglichkeiten der Technologie in Wirtschaft und Gesellschaft zu erschließen.

Mit dem Technologieprogramm „Quantencomputing – Anwendungen für die Wirtschaft“ zahlt das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) auf diese Ziele ein. Gefördert werden neun Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, welche die technische Machbarkeit und die wirtschaftliche Tragfähigkeit des Quantencomputing am Beispiel von relevanten, praktischen Anwendungsfällen nachweisen und demonstrieren.

Diese Broschüre soll einen kompakten Überblick über die neun Förderprojekte bieten. Jedes Projekt wird durch eine kurze Beschreibung der Ziele und der Zusammensetzung des Konsortiums vorgestellt. Eine knappe Auflistung der bis Anfang 2024 erreichten Ergebnisse bietet eine kurze Einschätzung zur Relevanz des Projektes für den

Leser oder die Leserin. Links zur Projektwebseite geben die Möglichkeit, bei tiefergehendem Interesse mehr zu erfahren und gegebenenfalls Kontakt zu den verantwortlichen Personen aufzunehmen. Für übergreifende Themen steht die Programmbegeleitung des DLR Projektträgers gern zur Verfügung.

## Ziele des Programms

Quantencomputer können durch gezieltes Ausnutzen quantenmechanischer Phänomene Berechnungen und Simulationen für Systeme ermöglichen, die selbst mit Hochleistungscomputern klassischer Bauart aufgrund der Komplexität der Problemstellung nicht bzw. nicht in akzeptabler Zeit durchführbar sind. Daraus erwächst die Hoffnung auf weitreichende Effizienzsteigerungen in zahlreichen Anwendungsbereichen von der Optimierung von Verkehrsflüssen oder Produktionsabläufen bis hin zu Modellrechnungen in der Klimaforschung. Speziell in den Bereichen der chemischen Simulation, der Prozessoptimierung und des maschinellen Lernens werden bereits in wenigen Jahren Vorteile durch den Einsatz von Quantencomputern erwartet



Demonstration technischer Machbarkeit von relevanten Anwendungsfällen



Erleichterter Zugang zu Quantencomputing in der Praxis



Methoden und Tools, um QC-Lösungen für reale Anwendungen zu schaffen

Abbildung 1: Ziele des Technologieprogramms „Quantencomputing - Anwendungen für die Wirtschaft“



Aufgrund der essenziellen Unterschiede zu klassischen Computern existieren jedoch einige Hemmschwellen, die es zu beseitigen gilt, um die Potenziale des Quantencomputing auf breiter Front zu realisieren. Die in [Abbildung 1](#) dargestellten Ziele des Technologieprogramms „Quantencomputing – Anwendungen für die Wirtschaft“ adressieren explizit einige der zentralen Hindernisse. Erforderlich sind insbesondere der Aufbau von Kompetenzen und die Generierung von Wissen in Unternehmen sowie die Entwicklung von Werkzeugen und Engineering-Methoden, welche die breite Nutzung von Quantencomputern erleichtern. Darüber hinaus wird der Betrieb von Quantenrechnern aufgrund der technologischen Herausforderungen zunächst spezialisierten Unternehmen und Einrichtungen vorbehalten sein. Deshalb muss für Anwender der Zugang zu solchen Systemen unter wirtschaftlich tragfähigen Bedingungen und gleichzeitiger Wahrung von Souveränität über Anwendungen und Daten gesichert werden.

Das Ziel des Technologieprogramms „Quantencomputing – Anwendungen für die Wirtschaft“ ist daher, Plattformen, Werkzeuge und Methoden für die wirtschaftliche Erschließung des Quantencomputing zu entwickeln. Potenzielle Nutzer, insbesondere auch aus der mittelständischen Wirtschaft, sollen in die Lage versetzt werden, kommerziell verfügbare Quantencomputer schnell und effektiv für eigene reale Anwendungen einsetzen zu können.

Dafür adressieren die neun geförderten Projekte den gesamten Softwarestack zwischen der sich schnell weiterentwickelnden Quantencomputing-Hardware und der letztendlichen wirtschaftlichen Anwendung, wie schematisch in [Abbildung 2](#) dargestellt. Auf tiefer Ebene werden Methoden des Hardware-Software-Co-Design vorangetrieben oder Compiler und Schnittstellen entwickelt. Anwendungsnähere Entwicklungen beinhalten Werkzeuge zur systematischen Zerlegung von geeigneten Problemen oder Programmbibliotheken zur automatischen Auswahl relevanter Algorithmen. Zusätzlich entstehen unterschiedlichste Softwarebausteine, wie eine höhere Quantenprogrammiersprache oder Workflowtools, die eine leichtere Erstellung zukünftiger Quantenapplikationen ermöglichen sollen.

Parallel dazu erproben große und kleine Anwendungsunternehmen in mehreren exemplarischen Use Cases potenzielle Einsatzfelder von Quantencomputern, beispielsweise in der Simulation von chemischen Materialien, in der Optimierung von Logistikprozessen oder in der Preisvorhersage von gebrauchten Baumaschinen mittels Maschinellen Lernen.

Zu guter Letzt soll mit der Förderung und der Unterstützung durch die Programmbegleitung das deutsche Quantencomputing-Ökosystem gestärkt und vernetzt werden.

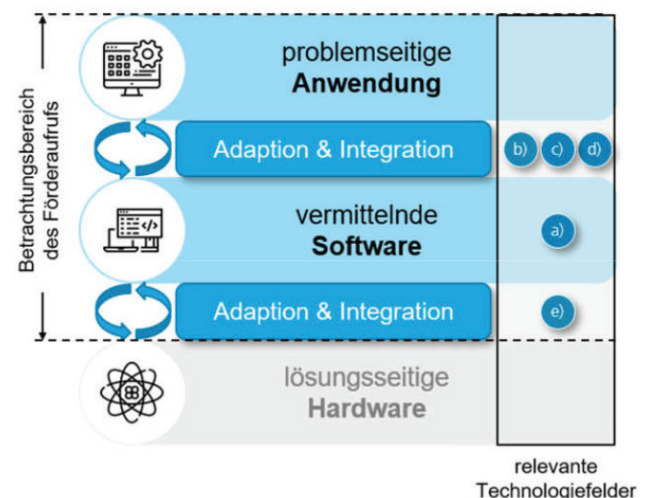


Abbildung 2: Adressierte Technologiefelder des Technologieprogramms „Quantencomputing – Anwendungen für die Wirtschaft“

## Zahlen & Fakten

Für den im April 2021 veröffentlichten Förderaufruf wurden in einem förmlichen Begutachtungsprozess sechs Projekte für die erste Tranche mit Start im Januar 2022 und weitere drei für die zweite Tranche mit Förderbeginn Juni/Juli 2022 ausgewählt. Die hochrangigen Konsortien aus Lösungsanbietern, Anwendern und wissenschaftlichen Forschungspartnern decken einen großen Teil des deutschen Quantencomputing-Ökosystems ab und wurden als besonders geeignet eingeschätzt, einen wichtigen Beitrag zum Aufbau souveräner Strukturen in Deutschland und Europa leisten zu können. Insgesamt beteiligen sich 48 Projektpartner an den neun Projekten, davon acht klei-



ne und mittlere Unternehmen. Insgesamt unterstützt das BMWK die geförderten Projekte bis 2025 mit ca. 35 Millionen €. Tabelle 1 bietet eine erste Übersicht

über alle neun Projekte, die auf den kommenden Seiten tiefergehend vorgestellt werden.

Akronym	Langtitel	Partner	Kurzbeschreibung
AQUAS	Anwendung von Quantensimulationen in der Wasserstoffforschung	HQS Quantum Simulations GmbH, DLR-Institut für Softwaretechnologie, DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Universität Ulm, Fraunhofer IPA	Das Projekt AQUAS strebt eine genauere Modellierung von Elektrolysematerialien durch die Implementierung von Quantencomputer-gestützten Berechnungsmethoden in Softwaretools für chemische Simulationen an.
AutoQML	Developer-Suite für automatisiertes maschinelles Lernen mit QC	Fraunhofer IAO, Fraunhofer IPA, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH+Co. KG, Zeppelin GmbH, in-integrierte informationssysteme GmbH, IAV GmbH, KEB Automation KG, USU GmbH	Ziel des Projektes AutoQML ist es, Ansätze zur Automatisierung von Machine Learning durch Quantencomputing zu erweitern, um Fragestellungen im Produktions- und Automotive-Bereich einfacher und schneller lösen zu können.
EniQmA	Ermöglichung hybrider Quantum-Anwendungen	Fraunhofer FOKUS, Universität Stuttgart, Fraunhofer ITWM, FU Berlin, DB Systel GmbH, umlaut SE	Im Projekt EniQmA soll anhand konkreter industrieller Use Cases ein gezieltes technisches Vorgehen bei der Erstellung hybrider quantenklassischer Anwendungen entwickelt werden. Diese kombinieren klassische Software und Implementierungen von Quantenschaltkreisen.
ProvideQ	Quantum Readiness for Optimization Providers	TU Braunschweig, Leibniz Universität Hannover, Universität zu Köln, Karlsruher Institut für Technologie, GAMS Software GmbH, 4flow AG	Im Projekt ProvideQ soll die Multiplikatorwirkung von Anbietern algorithmischer Dienstleistungen aus dem Bereich der Logistik genutzt werden, indem ihre Produkte um Quantencomputer-basierte Optimierungsverfahren erweitert werden.
QCHALLENGE	Quantum-Classical Hybrid Optimization Algorithms for Logistics and Production Line Management	LMU München, BASF SE, BMW AG, SAP SE, Siemens AG	Das Projekt QCHALLENGE entwickelt Algorithmen, Konzepte und Werkzeuge, um Optimierungsprobleme aus Produktion und Logistik mittels bestehender Quantencomputing-Hardware zu lösen.
Qompiler	Standardisierter Quanten-Softwares-tack	Fraunhofer FOKUS, TU Berlin, eleQtron GmbH, Universität Siegen	Im Rahmen des Qompiler-Projektes werden eine höhere Quantenprogrammiersprache „Qrisp“ und weitere Werkzeuge entwickelt, die auch Nicht-Quantenphysikern das Anwenden von Quantencomputern erleichtern sollen.



Akronym	Langtitel	Partner	Kurzbeschreibung
QUASIM	QC-Enhanced Service Ecosystem for Simulation in Manufacturing	DFKI, Forschungszentrum Jülich GmbH, Fraunhofer IPT, ModuleWorks GmbH, TRUMPF Werkzeugmaschinen GmbH +Co. KG	QUASIM erprobt einen QC-Ansatz, durch den Simulationen für Maschinenparametrisierung in der Fertigungsindustrie beschleunigt und praxistauglicher werden
QuaST	Quantum-enabling Services und Tools für industrielle Anwendungen	Fraunhofer IKS, TU München, Leibniz-Rechenzentrum, IQM Germany GmbH, Parity Quantum Computing Germany GmbH, DATEV eG, Infineon Technologies AG	QuaST entwickelt Software und Werkzeuge, um Anwendern die effizientere Lösung von komplexen Optimierungsproblemen in der Logistik oder der Halbleiterfertigung auf Quantencomputern zu vereinfachen.
SeQuenC	Souveränität für Quantenlösungen in der Cloud	IONOS AG, Universität Stuttgart, Fraunhofer FOKUS, QMWare	Ziel des Projektes SeQuenC ist die wirtschaftliche Erschließung und Integration von Quanten-Software in einer GAIA-X-konformen Cloud. Dazu werden eine Plattform sowie zugehörige Werkzeuge und Services entwickelt.

Tabelle 1: Übersicht über die neun geförderten Projekte des Technologieprogramms „Quantencomputing – Anwendungen für die Wirtschaft“

## Programmbegleitung

Um die geförderten Projekte zu unterstützen und die übergreifenden Förderziele zu sichern, hat das BMWK den DLR Projektträger mit der wissenschaftlichen Begleitung sowie mit Aufgaben in den Bereichen Öffentlichkeitsarbeit und Ergebnistransfer beauftragt. Ziel der Programmbegleitung ist unter anderem, die Querschnittsthemen Benchmarking und Quantum Software Engineering projektübergreifend zu bearbeiten. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Vernetzung: zunächst zwischen den geförderten Projekten, aber auch darüber hinaus, etwa mit dem Projekt PlanQK, das bis Ende 2023 ebenfalls vom BMWK gefördert wurde, und nicht zuletzt mit der deutschen und internationalen Quantencomputing-Community insgesamt.

Für inhaltliche und programmübergreifende Fragen wenden Sie sich gern an:

Dr. Johann Schmidt, wissenschaftlicher Referent

Dr. Sophia Helmrich, wissenschaftliche Referentin

Kontakt: [programmbegleitung@dlr.de](mailto:programmbegleitung@dlr.de)



# AQUAS

Das Projekt AQUAS strebt eine genauere Modellierung von Elektrolysematerialien durch die Implementierung von Quantencomputer-gestützten Berechnungsmethoden in Softwaretools für chemische Simulationen an.

## › Projektbeschreibung

Die Entwicklung neuer Elektrokatalysatoren für die Wasserstoffherstellung gilt als ein Baustein für die erfolgreiche Energiewende in Deutschland. Potenzielle Katalysatematerialien mit Quantencomputern zu simulieren, könnte Entwicklungszyklen verkürzen, so dass geeignete neue Katalysatoren schneller zu identifizieren wären. Im Projekt AQUAS werden Softwaretools implementiert und validiert, um diese quantenmechanischen Simulationen in naher Zukunft auf verfügbaren Quantencomputern durchzuführen.

Die Kombination von klassischen Computern und Quantencomputern erweist sich hierbei als vielversprechend, um gerade bei noch moderat effizienter Quantenhardware erste Fortschritte erzielen zu können. Im Projekt wird dieser hybride Ansatz insbesondere durch den Einsatz variationeller Quantenalgorithmen, die Einbettung von Problemen in den Quantencomputer und die Ergänzung durch Quantum-Machine-Learning-(QML-)Methoden vorangetrieben. Das eröffnet neue Möglichkeiten zur Erforschung und Optimierung von Materialien im Kontext der Energiewende.

Die in AQUAS entwickelten Simulationsmethoden und Software-Tools werden die Leistung existierender Quantencomputer zusammen mit konventionellen Computern nutzen und schon jetzt die Erforschung katalytischer Wasserstoffproduktion ermöglichen.

Dr. Michael Marthaler

## › Projektergebnisse

- Prototyp einer Software-Plattform für die Materialsimulation, die eine einfache Bedienung durch den Endnutzer ermöglicht, beispielsweise durch Visualisierungen und automatisierte Workflows.
- Entwicklung neuer Ansätze und Methoden zur Berechnung der Wasserstoffkatalyse.
- Bereitstellung geeigneter QML-Algorithmen über die Open-Source-Bibliothek sQUlearn.



Dr. Michael Marthaler,  
HQS Quantum Simulations GmbH



<https://quantumsimulations.de/aquas>  
Kurzvorstellung AQUAS



HQS Quantum Simulations GmbH (Konsortialführer), DLR-Institut für Softwaretechnologie, DLR-Institut für Technische Thermodynamik, Universität Ulm, Fraunhofer IPA



**Ziel des Projektes AutoQML ist es, Ansätze zur Automatisierung von Machine Learning durch Quantencomputing zu erweitern, um Fragestellungen im Produktions- und Automotive-Bereich einfacher und schneller lösen zu können.**

## › Projektbeschreibung

Die Implementierung von Quantenalgorithmen zur Beschleunigung und Vereinfachung von Machine-Learning- (ML-)Ansätzen erweist sich oft als stark anwendungsspezifisch und komplex. Der Ansatz des Automated Machine Learning (AutoML) ermöglicht bereits, die Implementierung von ML zu automatisieren und benutzerfreundlicher zu gestalten. AutoQML befasst sich daher mit der Erweiterung dieser Ansätze um Quantencomputingverfahren, insbesondere im Produktions- und Automotive-Bereich.

AutoQML bietet so einen vereinfachten Zugang zu QML-Methoden und bereitet deren Einsatz und Weiterentwicklung im industriellen Kontext vor. Dies beinhaltet die Entwicklung und Einbettung anwendungsfallspezifischer QML-Algorithmen, die Entwicklung von Quantenoptimierungsalgorithmen für eine effiziente (Q)ML-Auswahl sowie die Integration des gesamten Frameworks als Open-Source-Lösung auf dem Quanten-App-Store der PlanQK-Plattform.

*Durch Automatisierung und Integration von Quantenmethoden in klassische ML-Prozesse ermöglicht das Framework »AutoQML« Unternehmen einen niedrighschwelligigen Zugang zu (Q)ML-Verfahren, ohne dabei auf tiefes Expertenwissen zurückgreifen zu müssen.*

*Dr. rer. nat. Christian Tutschku*

## › Projektergebnisse

- Entwicklung eines Frameworks zur Integration von QML-Methoden in klassische AutoML-Bibliotheken.
- Open-Source-Veröffentlichung des unabhängigen Quanten-Machine-Learning-Pakets sQULearn, das QML-Methoden auch für unerfahrene Benutzer leicht anwendbar macht und eine einfache Integration in andere Frameworks ermöglicht.
- Erfolgreiche Implementierung verschiedenster QML-Methoden zur Umsetzung prototypischer Anwendungsfälle (Modellierung von Autoreifen, Vorhersage von Fahrzeugausfällen, Bildanalyse von Laserschneiden, Preisvorhersage von gebrauchten Baumaschinen).



Dr. rer. nat. Christian Tutschku  
Fraunhofer IAO



<https://www.autoqml.ai/>  
Kurzvorstellung AutoQML



**Fraunhofer IAO** (Konsortialführer), Fraunhofer IPA, GFT Integrated Systems, USU, HQS Quantum Simulations, IAV, KEB, Trumpf, Zeppelin





Im Projekt EniQMA soll anhand konkreter industrieller Use Cases ein gezieltes technisches Vorgehen bei der Erstellung hybrider quanten-klassischer Anwendungen entwickelt werden, die klassische Software und Implementierungen von Quantenschaltkreisen kombinieren.

## › Projektbeschreibung

Hybride Quantenanwendungen aus klassischer Software und Implementierungen von Quantenschaltkreisen spielen eine zentrale Rolle in industriellen Anwendungen. Bisherige Entwicklungsprozesse für solche hybriden Systeme sind allerdings sehr aufwendig. Dafür sind Ansätze aus verschiedenen Disziplinen erforderlich, wie Quantenphysik, Anwendungsentwicklung und Betriebsführung von IT-Systemen. Ziel des Projekts EniQMA ist daher, einen strukturierten Rahmen zu schaffen, der diese Entstehungsprozesse vereinfacht und auf konkreten Use Cases basiert. So wird ein systematischer und effektiver Weg für die Entwicklung hybrider Anwendungen in industriellen Kontexten etabliert. Die Hauptaufgabe liegt in der Strukturierung, Definition und Umsetzung workflowbasierter Prozesse für effizientes Quantum Software Engineering. Eine prototypische Umsetzung von Werkzeugketten geht mit einer Evaluierung anhand von Use Cases einher. Hierzu werden verschiedene Techniken und Algorithmen entwickelt, unter anderem zur Vergleichbarkeit von klassischen und quantenbasierten Bausteinen sowie zur Ermittlung der optimalen Nutzung von Quantenressourcen. Hinzu kommt eine Benchmarking-Suite.

Die strukturierte und qualitative Entwicklung hybrider Quantensoftwarekomponenten und -anwendungen ist ein Eckpfeiler für die Einführung des Quantencomputing in größerem Umfang im industriellen Kontext.

Prof. Dr.-Ing. Nikolay Tcholtchev

## › Projektergebnisse

- Vereinfachung der Modellierung von hybriden Quanten-Workflows und prototypische Implementierung mit Verbesserung bestehender Runtimes und kontinuierlichem Monitoring.
- Erarbeitung einer DIN SPEC zum Benchmarken von Quantencomputern.
- Beweis der Existenz von super-polynomiellen Quantenvorteilen im Optimieren.



Prof. Dr.-Ing. Nikolay Tcholtchev  
Gruppenleiter Quality Engineering für Urbane IKT  
und Quantencomputing - Fraunhofer FOKUS



<https://www.eniqma-quantum.de/>  
Kurzvorstellung EniQma



Fraunhofer FOKUS, Fraunhofer ITWM, Universität Stuttgart, Umlaut Solutions, Freie Universität Berlin, Deutsche Bahn / DB System



**Im Projekt ProvideQ soll die Multiplikatorwirkung von Anbietern algorithmischer Dienstleistungen aus dem Bereich der Logistik genutzt werden, indem ihre Produkte um Quantencomputer-basierte Optimierungsverfahren erweitert werden.**

## › Projektbeschreibung

Das Ziel von ProvideQ besteht darin, der deutschen Wirtschaft die Vorteile des Quantencomputing zugänglich zu machen. Eine zentrale Herausforderung liegt in der Komplexität vieler Optimierungsprobleme, die herkömmliche Hochleistungsrechner an ihre Grenzen bringt. Industrielle Nutzer stehen vor der Schwierigkeit, komplexe, spezialisierte Algorithmen zu nutzen, ohne ausreichende Kenntnisse über Potenziale und Anwendbarkeit von Quantencomputern zu haben.

Die Lösung sieht die Einbindung von Dienstleistern aus dem Bereich der Optimierung vor, die Beratung und (mithilfe der ProvideQ-Toolbox) passende Quantenalgorithmen für spezifische Problemklassen anbieten. Die Erweiterung bestehender Modellierungssysteme soll es dabei ermöglichen, Probleme in domänenspezifischer Sprache zu beschreiben und auf (hybriden) Quantencomputern umzusetzen. Die Praxistauglichkeit der theoretischen Ansätze wird durch die Entwicklung neuer Algorithmen gestärkt, die auf realen Anwendungsfällen und Beispieldaten von Partnern basieren.

*Neben verschiedenen methodischen Erfolgen liefert ProvideQ wirtschaftlich relevante Effekte in der Beratung von Industrieunternehmen, womit ein differenziertes Verständnis der Perspektiven und Grenzen von Quantencomputing ermöglicht wird.*

*Prof. Dr. Sandor Fekete*

## › Projektergebnisse

- Implementierung eines Prototyps der ProvideQ-Toolbox zur Analyse von Optimierungsproblemen der Logistik.
- Beschreibung eines neuen Quantenalgorithmus für Rucksackprobleme mit realistisch abgeschätzten Laufzeitvorteilen gegenüber etablierten klassischen Lösungen.
- Konzeption eines Benchmarkingtools, mit dem für realistische Anwendungsfälle abgeschätzt werden kann, ob der Einsatz von Quantenalgorithmen lohnenswert ist. Das Tool greift auf im Projekt entwickelte Methoden zur Abschätzung der Geschwindigkeit von Quantenalgorithmen zurück.



Prof. Dr. Sandor Fekete  
TU Braunschweig



<https://www.provideq.org/>  
Kurzvorstellung ProvideQ



TU Braunschweig (Konsortialführer), Leibniz Universität Hannover, Universität zu Köln, GAMS Software GmbH, 4flow SE, Karlsruher Institut für Technologie, Johannes Kepler Universität Linz (Unterauftrag)



**Das Projekt QCHALLENGE entwickelt Algorithmen, Konzepte und Werkzeuge, um Optimierungsprobleme aus Produktion und Logistik mittels bestehender Quantumcomputing-Hardware zu lösen.**

## › Projektbeschreibung

QChallenge konzentriert sich auf die Nutzung bestehender Quantumcomputing-Hardware zur Lösung von Optimierungsproblemen in Produktion und Logistik. Durch die Entwicklung von Algorithmen, Konzepten und Werkzeugen werden Use Cases wie Lieferkettenoptimierung und Automatisierung verbessert. Die Implementierung erfolgt hybrid und ermöglicht zeitnahe Lösungen, ohne umfassendes Quantumcomputing-Know-how des Kunden.

Herausforderungen umfassen die Identifikation von Quantenvorteilen bei effizienzbegrenzter Hardware und die Schwierigkeiten unterschiedlicher Software-schnittstellen. Daher sollen bei QChallenge generische Entwicklungswerkzeuge, nutzerfreundliche Anwendungen und Strategien zur Integration von Quantum Computing in bestehende Workflows entstehen.

Ergebnis ist ein Prototyp zur einfacheren Integration von Quantumcomputing in bestehende Softwarelösungen. Daneben entwickelt das Projekt Handlungsempfehlungen für die Industrie und nutzerfreundliche Anwendungen für praxisrelevante Use Cases

*Das Mitwirken bei QCHALLENGE bietet SAP eine hervorragende Gelegenheit, bereits jetzt Expertise in dieser zukunftssträchtigen Technologie aufzubauen, noch bevor das Quantumcomputing zur industriellen Marktreife gelangt.“*

**Andrey Hoursanov**

## › Projektergebnisse

- Identifikation von 13 relevanten Use Cases aus den Bereichen Optimierung, Maschinelles Lernen und Simulation in Produktion und Logistik.
- Implementierung von (hybriden) Quantenalgorithmen für die Use Cases und exemplarische Prüfung des Quantenvorteils unter Nutzung von Benchmarks.
- Testen der Anbindung auf vielfältiger Quanten-Hardware sowie Aufbau der Grobarchitektur des Softwareframeworks mit Automatisierungslösungen.



Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien  
Ludwig-Maximilians-Universität München



<https://qarlab.de/qchallenge/>  
Kurzvorstellung QCHALLENGE



Ludwig-Maximilians-Universität München  
(Konsortialführer), BASF SE, BMW AG, SAP SE, Siemens AG, Aqarios GmbH (Unterauftrag)



Im Rahmen des Qompiler-Projektes werden eine höhere Quantenprogrammiersprache und weitere Werkzeuge entwickelt, die auch Nicht-Quantenphysikern das Anwenden von Quantencomputern erleichtern sollen.

## › Projektbeschreibung

Die Entwicklung von Quantenalgorithmen, die potenziell einen exponentiellen Geschwindigkeitsvorteil gegenüber klassischen Algorithmen besitzen, stößt in Wirtschaft und Wissenschaft auf ein breites Interesse. Bisher fehlt jedoch die Möglichkeit, diese Algorithmen in einer barrierefreien und nutzerfreundlichen Quantenprogrammierung, wie sie aus der klassischen Informatik bekannt ist, umzusetzen. Im Projekt „Qompiler – Standardisierter Quanten Software Stack“ entsteht daher ein Software-Stack mit der höheren Quantenprogrammiersprache „Qrisp“. Diese geht über die aktuell etablierten, assemblerartigen Sprachen hinaus und automatisiert viele der kleinschrittigen Elemente.

Um Programme, die in Qrisp geschrieben wurden, auf einem Quantencomputer ausführen zu können, werden im Qompiler-Projekt auch die weiteren notwendigen Softwareebenen entwickelt. Auf der untersten Ebene entsteht dazu eine Firmware für ionenbasierte Quantencomputer, die direkt an einen Hardware-spezifischen Compiler gekoppelt ist, um die Quantenschaltkreise für ionenbasierte Quantencomputer zu optimieren. Aufbauend darauf wird eine Schnittstelle für höhere Softwareebenen mit einer kategorialen Ebene definiert, welche es möglich macht, die Typkonsistenz der erstellten Quantenprogramme zu prüfen. Übergreifend werden hybride Algorithmen angebunden, um deren gesamte Band-

*Mit der Entwicklung der höheren Quantenprogrammiersprache „Qrisp“ und den dazugehörigen Softwareebenen befähigen wir Entwicklerinnen und Entwickler, komplexe Quantenalgorithmen effizient zu implementieren, um so das volle Potenzial von Quantencomputern auszuschöpfen.*

**Sebastian Bock**

breite an Anwendungspotenzialen zu erschließen. Zentrale Ergebnisse fließen in Standardisierungsaktivitäten ein, um eine weite Verbreitung der Lösungen zu erreichen.

## › Projektergebnisse

- Open-Source-Veröffentlichung der Quantenprogrammiersprache Qrisp (<https://github.com/eclipse-qrisp/Qrisp>, <https://www.qrisp.eu/>) mit benutzerfreundlicher Handhabung und performanter Kompilierung.
- Ansteuerung des eleQtron-Quantencomputers über den Qompiler-Software-Stack und die im Projekt definierten Softwareschnittstellen.
- Integration des ZX-Kalküls in die kategorielle Softwareebene – ein wesentlicher Schritt, um die Typsicherheit von Quantenprogrammen gewährleisten zu können.



Sebastian Bock  
Fraunhofer FOKUS



<https://qompiler.fokus.fraunhofer.de/>  
Kurzvorstellung Qompiler



Fraunhofer FOKUS (Konsortialführer), eleQtron GmbH, Universität Siegen, TU Berlin, Deutsches Institut für Normung e.V. (im Unterauftrag)



**QUASIM erprobt verschiedene Quantencomputing-Ansätze, durch die Simulationen für Maschinenparametrisierung in der Fertigungsindustrie beschleunigt und praxistauglicher werden sollen.**

## › Projektbeschreibung

QUASIM untersucht die Vorteile von Quantencomputern für Anwendungen in der Fertigungsindustrie, insbesondere um höchste Qualitätsansprüche zu erfüllen und Fehler in der Produktion zu vermeiden. Dazu werden verschiedene Quantencomputing-Ansätze zur Beschleunigung von Simulationen sowie deren praxistaugliche Einbettung erprobt. So sollen auch Fertigungsunternehmen mit begrenzter Quantencomputing-Expertise von der Lösung profitieren können.

Ziel ist, Simulationen durch die Kombination numerischer Verfahren mit Quantencomputing zu beschleunigen, denn herkömmliche numerische Methoden stoßen an Laufzeit- und Speichergrenzen (QC + Numerik). Parallel dazu werden alternative Modellierungen durch Quantum Machine Learning (QML) erforscht, wobei Daten aus realen Fertigungs-umgebungen verwendet werden. Aufbauend auf zwei Anwendungsfällen aus den Zerspanungsprozessen Fräsen und Laserschneiden hat das Projekt das Potenzial, innovative Lösungen auf der Basis von Quantencomputing zu entwickeln und in weiteren Anwendungsbereichen verfügbar zu machen.

[01101] >  
*Unsere ersten Untersuchungen haben gezeigt, dass quantenmechanische Funktionsprinzipien und quantenbasiertes maschinelles Lernen die algorithmischen Fragestellungen besser und signifikant schneller lösen können*

**Prof. Dr. Wolfgang Maaß**

## › Projektergebnisse

- Vereinfachte Implementierung eines Quantenalgorithmus und Erarbeitung eines Simulationsmodells im Use Case Fräsen.
- Simulation von thermischer Expansion im Laserschneidprozess auf Basis realer Produktionsdaten für das Training von drei identifizierten QML-Ansätzen.
- Wirtschaftlichkeitsanalyse des Quantencomputing im Rahmen einer Marktübersicht, einer finanztechnischen Analyse sowie einer ersten qualitativen Interviewstudie zum Innovations- und Anwendungspotenzial von Quantencomputing-Ansätzen.



Prof. Dr. Wolfgang Maaß  
DFKI - Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH



Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI) (Konsortialführer),  
Forschungszentrum Jülich GmbH, Fraunhofer IPT, ModuleWorks GmbH, TRUMPF SE + Co. KG (Holding)



<https://www.quasim-project.de/>  
Kurzvorstellung QUASIM



**QuaST entwickelt Software und Werkzeuge, um Anwendern die Lösung von komplexen Optimierungsproblemen in konkreten wirtschaftlichen Anwendungen mittels Quantencomputern zu vereinfachen.**

## › Projektbeschreibung

Das Projekt QuaST konzentriert sich darauf, einen niederschweligen Zugang zu Quantencomputern zu schaffen, ohne dass tiefe physikalische Grundkenntnisse erforderlich sind. Ziel ist, Software und Werkzeuge zu entwickeln, die automatisch Probleme in klassische Hochleistungsrechner- (HPC-) und Quantencomputing-Teile zerlegen.

Die Entwicklung erstreckt sich über den gesamten Software-Stack bis zur Co-Design-Ebene. Dazu gehören Methoden zur optimalen Implementierung auf IQM-Hardware und die Anbindung an das ParityOS-Betriebssystem. QuaST entwickelt außerdem High-Level-Lösungspfade, die algorithmische Bausteine und High-Level-Mapping-Techniken umfassen. Diese ermöglichen die automatische Übersetzung von Anwendungsalgorithmen auf unterschiedliche Quantencomputing-Hardware.

Außerdem optimiert QuaST die Laufzeitumgebung zwischen klassischen Computern und Quantencomputern für eine effiziente Ausführung von Quantenalgorithmen. Werkzeuge zur Optimierung, Validierung und Leistungsanalyse sowie Methoden zur Evaluierung und Verifikation von Anwendungssoftware für einen zuverlässigen Einsatz von QC-Hybrid-Algorithmen runden das Spektrum ab.

*Wir konnten bereits wesentliche Schritte zur automatisierten Lösung von industriellen Optimierungsproblemen entwickeln – damit werden wir die Eintrittsschwelle zur Anwendung von Quantencomputern für industrielle Nutzer nachhaltig absenken können.*

**PD Dr. habil. Jeanette Miriam Lorenz**

## › Projektergebnisse

- Aufbau eines Entscheidungsbaums, um Optimierungsprobleme, wie beispielsweise Routenplanung, optimal auf klassischen und Quantencomputern abzubilden.
- Implementierung von Methoden der Simulation und Verifikation zur leichteren Programmierung von Quantencomputern in der Open Source erhältlichen MQT-Toolbox.
- Erprobung von variationellen Optimierungsalgorithmen an Anwendungsfällen in den Bereichen Netzwerkoptimierung, Softwareverifikation, Routenplanung und betriebswirtschaftliche Prognose. Die Ergebnisse sollen als Best-Practice-Handreichung veröffentlicht werden.



PD Dr. habil. Jeanette Miriam Lorenz  
Fraunhofer IKS



<https://www.quast-quantencomputing.de/>  
Kurzvorstellung QuaST



Fraunhofer IKS (Konsortialführer), TU München, Leibniz Rechenzentrum, IQM Germany GmbH, Parity Quantum Computing Germany GmbH, Infineon Technologies AG, DATEV eG, Fraunhofer AISEC, Fraunhofer IIS, Fraunhofer IISB



**Ziel des Projektes SeQuenC ist die wirtschaftliche Erschließung und Integration von Quanten-Software in einer GAIA-X-konformen Cloud. Dazu werden eine Plattform sowie zugehörige Werkzeuge und Services entwickelt.**

## › Projektbeschreibung

SeQuenC zielt darauf ab, die rechtssichere und souveräne Nutzung von Quantenressourcen in Deutschland und Europa möglich zu machen, insbesondere durch eine Gaia-X-konforme Cloud-Plattform für Quantensoftware.

Die Plattform umfasst einen neu aufgebauten standardbasierten Technologie-Stack, um verschiedenste Quantencomputing-Hardware anzubinden. Dieser stellt auch sicher, dass hybride Quantensoftware unter Einhaltung von Standards und Integration von API-Management erstellt und betrieben werden kann. Zusätzlich umfasst das Projekt eine integrierte Orchestrierungs- und Provisionierungsplattform mit API-Management und Monetarisierungskomponenten für Quanten-Services. Die Einbettung in vorhandene Cloud-Angebote und die Integration in die PlanQK-Plattform über Standard-APIs ermöglicht es, Quantencomputing-Algorithmen einfach in bestehende Software einzubinden. Dies eröffnet zudem neue Vermarktungs- und Verwertungsperspektiven für Entwicklerinnen und Entwickler von Quantenlösungen.

*„Mit SeQuenC schaffen wir die Grundlage der ersten deutschen Quantencloud für Industrieanwender. Wir positionieren Deutschland damit als Vorreiter in dieser Schlüsseltechnologie und stärken die digitale Souveränität Europas.“*

*Rainer Sträter*

## › Projektergebnisse

- Entwicklung des Prototyps einer übergreifenden Softwareschicht, mit der unterschiedliche Quantencomputer-Hardware einheitlich genutzt werden kann.
- Einbindung des Softwareprototypen und eines QMware Hardware Node für hybrides Quantencomputing in die etablierte Cloudumgebung von IONOS.
- Konzeptuelle Beschreibung eines Gaia-X-konformen SeQuenC-Datenraums. Eine Umsetzung ist mit höherer technischer Reife der benötigten Datenraumtechnologie geplant.



Rainer Sträter  
IONOS SE



IONOS SE, Universität Stuttgart, QMware  
GmbH, Fraunhofer FOKUS



<https://sequenc.de/>  
Kurzvorstellung SeQuenc