



Schlussbericht Innovationsprojekt QC Next

Entwickelt im Rahmen des

Förderprogrammes

»Entwicklung digitaler Technologien«

des

Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz

Anmerkung

Dieses Dokument wurde im Rahmen des Förderprogramms »Entwicklung digitaler Technologien« des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) in Begleitung des DLR-Projektträgers für das Innovationsprojekt QC Next erstellt.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz



DLR Projektträger

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Autoren

Philipp Kunst¹

Dr. Anne-Sophie Tombeil¹

Jürgen Falkner¹

Dimitri Evcenko¹

Dr. Michael Falkenthal²

Benedict Wenzel²

Michael Wurster²

Prof. Dr.-Ing. Ina Schaefer³

Tim Bittner³

Joshua Ammermann³

Luke Southall³

¹ Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (IAO)

² Kipu Quantum GmbH

³ Karlsruher Institut für Technologie – Institut für Informationssicherheit und Verlässlichkeit

Inhaltsverzeichnis

1	Management Summary	1
Teil I – Arbeitsbericht		3
2	Ausgangslage, Recherchen und Ergebnisse.....	4
2.1	Förderpolitische Ausgangslage.....	4
2.2	Förderpolitische Ziele.....	6
2.3	Wissenschaftliche und konzeptionelle Ziele	7
2.4	Wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Stand der Technik	8
3	Wissenschaftliche und technische Ergebnisse	9
3.1	Kartierung konzeptioneller Ansätze	9
3.2	Bestandsaufnahme technisch-infrastruktureller Lösungen	12
3.3	Vision und Governance für Leitprojekte.....	14
3.4	Abschlussbemerkung zu Teil I	17
Teil II – Innovationskonzept QC Next		18
4	Notwendige innovatorische Schritte.....	20
4.1	Referenzarchitektur und Vorgehensmodelle	20
4.2	Referenzimplementierung und Ausgestaltung der Schichten	22
4.3	Blueprints als Konzept für spezifische Stack-Instanziierungen.....	24
4.4	Aktivierung des Ökosystems: Mit einem gemeinsamen Leitgedanken zu einer starken Community.....	26
5	Transferstrategien: Vom Konzept in die Umsetzung	30
5.1	Herausforderungen der Governance eines Leitprojekts	30
5.2	Organisationsstruktur eines Leitprojekts	31
6	Abschließende Bewertung.....	33
7	Referenzen	35
8	Anhang	37

1 Management Summary

Quantencomputing (QC) wird sowohl auf nationaler als auch auf EU-Ebene als künftige Schlüsseltechnologie eingestuft. Das immense Potenzial dieser Technologie kann disruptive Auswirkungen auf die Wirtschaft und somit für die Souveränität Deutschlands und der EU haben.

Der vorliegende Bericht beleuchtet Aspekte zur Stärkung des deutschen Quantencomputing Ökosystems. Im Fokus steht dabei die digitale Infrastruktur. Der Bericht fasst die Ergebnisse des »Innovationsprojektes QC Next« zum Thema »Quantencomputing Software Stack« zusammen. Das Projekt wurde im Rahmen des Förderprogramms »Entwicklung digitaler Technologien« des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) von einem interdisziplinären Konsortium aus Wissenschaft und Wirtschaft durchgeführt.

Ziel des Projektes war die Eruierung des wissenschaftlichen und technischen Standes der deutschen Quantencomputing Software Infrastruktur sowie die Entwicklung eines darauf aufbauenden Innovationskonzeptes.

Teil I dieses Dokuments ist retrospektiv und fasst als Arbeitsbericht die im Förderzeitraum erzielten Ergebnisse als Grundlage für das Innovationskonzept QC Next zusammen. Dieser Teil orientierte sich an der Arbeitspaketstruktur des konzeptionierenden Projektes (vgl. Abbildung 1) und umfasst insbesondere die folgenden zentralen Analysebereichen:

Konzeptionell-wissenschaftlich Ansätze (AP2): Untersuchung der in der Literatur gängigen Konzepte zum Quantencomputing Software Stack als Grundlagen und Anschlusspunkt. Ergebnis ist eine synthetisierte und um fehlende Elemente ergänzte Darstellung des Quantencomputing Software Stack. Dieser dient als fachliche Basis für das Innovationskonzept QC Next.

Technologisch-infrastrukturelle Analyse (AP3): Identifizierung existierender Quantencomputing Software Komponenten und deren Einordnung in den entwickelten Stack. Diese Analyse dient als anwendungsorientierter Ausgangspunkt für das Innovationskonzept QC Next.

Organisationsstrukturen und Governance (AP7): Recherche und Analyse geeigneter Organisationsstrukturen und Governance-Mechanismen auf Basis von Fachliteratur und bestehenden Leitprojekten. Ableitung von Strukturen und Prozessen, die für die Umsetzung und Verstetigung des Innovationskonzepts in einem Leitprojekt hilfreich und zu empfehlen sind.

Teil II baut auf diesen Erkenntnissen auf, ist prospektiv und präsentiert das Innovationskonzept QC Next. Er befasst sich mit notwendigen innovatorischen Folgeschritten zur Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit des deutschen Quantencomputing Software Ökosystems gegenüber der internationalen Konkurrenz. Dazu gehören unter anderem strategische Ansätze, Ziele und Mehrwerte sowie organisatorische Strukturen eines angestrebten Leitprojektes. Diese umfassen unter anderem die Konsolidierung und Vernetzung bestehender Software-Komponenten entlang des Stacks, um effizientere Instanziierung einer ganzheitlichen Referenzarchitektur und Derivate dieser zu ermöglichen.

Zusammen formen diese beiden Teile sowohl den Bericht über geleistete Arbeiten und erzielte Fortschritte als auch die Vision und deren Operationalisierung nächste Schritte. Aufgezeigt wird ein kohärenter und umsetzbarer Weg zur Entwicklung und nachhaltigen Bereitstellung eines Quantencomputing Software Stacks für künftige Endanwender aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Damit wird zur Stärkung der künftigen Schlüsseltechnologie Quantencomputing und somit zur deutschen und europäischen Souveränität beigetragen.

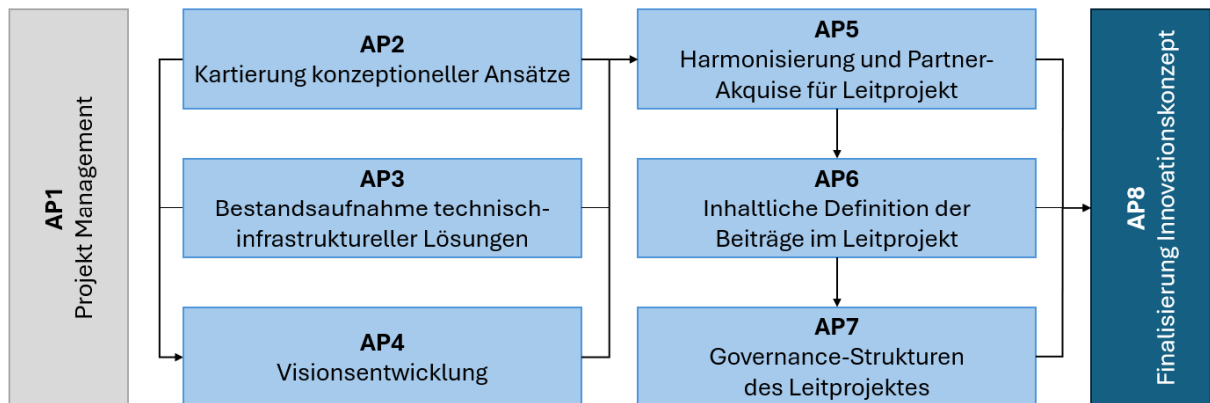


Abbildung 1: Übersicht Arbeitspakete aus der Gesamtvorhabensbeschreibung (GVB).

Teil I

Arbeitsbericht

2 Ausgangslage, Recherchen und Ergebnisse

Quantencomputer gehören im Hinblick auf ihr wirtschaftliches Potenzial zu den vielversprechenden Technologien des 21. Jahrhunderts. Wenngleich sie derzeit noch nicht leistungsfähig genug sind, um einen unmittelbar wirtschaftlich relevanten Mehrwert zu bieten, der Wettlauf um diese künftige Schlüsseltechnologie ist in vollem Gange.

Im Januar 2025 hat das European Quantum Industry Consortium (QuIC) seinen zweiten Bericht zu Patentanmeldungen im Bereich Quantentechnologien veröffentlicht.¹ Patente sind nur ein Indikator, anhand dessen sich der Wettlauf um diese Technologie veranschaulichen lässt. Gleichwohl ist er sinnbildlich für den aktuellen Stand der deutschen Forschung und Entwicklung (FuE) im Bereich Quantencomputing: Schaut man auf die Rangliste der 50 Akteure mit den meisten Patenten, findet man dort ein einzelnes europäisches Unternehmen – auf Platz 50. Die Liste wird von China und den USA angeführt. Bemerkenswert ist außerdem, dass die EU als einzige in dem Bericht aufgeführte Region ihren eigenen Heimatmarkt in puncto Patentanmeldungen nicht dominiert, sprich es werden mehr Patente ausländischer Unternehmen in Europa angemeldet als von europäischen Unternehmen. Das erste EU-Unternehmen im Ranking der Patentanmeldungen in der EU findet sich auf Platz 9, das erste deutsche Unternehmen auf der Liste ist mit Platz 24 die Fraunhofer Gesellschaft. Die Autoren des QuIC-Berichts betonen die negativen ökonomischen und innovatorischen Folgen für Europa, die diese Verteilung mit sich bringt. Insgesamt untermauert der Bericht die Forderungen nach konsequenten und zielgerichteten Anstrengungen, um im Bereich Quantencomputing konkurrenzfähig zu werden und die eigene Souveränität zu gewährleisten.

2.1 Förderpolitische Ausgangslage

Die Bundesregierung misst der Entwicklung dieser Technologie im Rahmen des im April 2023 beschlossenen »Handlungskonzepts Quantentechnologien« eine zentrale Rolle als Zukunftstechnologie bei (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2023)². Quantencomputing (QC) erfährt seit einigen Jahren eine hohe Aufmerksamkeit von Politik und Investoren. Die Anzahl an Zugängen zu QC-Ressourcen wächst weiter und wird zunehmend heterogener mit Blick auf die zugrunde liegende Hardware – insbesondere die Emulation von Quantencomputern mittels klassischer Prozessoren und die Integration in High-Performance-Computing (HPC)-Cluster tragen zur Technologieentwicklung bei. Die Entwicklung von Anwendungssoftware wird damit erleichtert und zusätzlich durch Projekte beschleunigt, die Softwaretools für High-Level-Programmierung erarbeiten.

Die Zahl an Quantencomputing Anwendungsfällen, für die Proof-of-Concepts erbracht werden, steigt stetig weiter an. In Deutschland wird die Entwicklung von Hard- und Software aktuell vor allem durch staatliche Förderung getrieben. Bis 2026 plant die Bundesregierung, drei Mrd. Euro für die Entwicklung von Quantentechnologien und deren Überführung in Anwendungen zu investieren. Deutschland ist damit auf dem ersten Platz in Europa und nach China auf dem zweiten Platz weltweit. Im Vergleich zum prognostizierten Marktvolumen bis 2030 für QC im

¹ [A Portrait of The Global Patent Landscape in Quantum Technologies 2025](#)

² [Handlungskonzept Quantentechnologien der Bundesregierung](#)

Allgemeinen und Anwendungssoftware im Speziellen fallen die Fördermittel weiterhin relativ hoch aus. In sechs Bundesländern gibt es mittlerweile dedizierte Netzwerke, die das Know-how regional bündeln, Stakeholder aus Wissenschaft und Wirtschaft im Bereich QC und anderer Quantentechnologien vernetzen und mit Landesmitteln fördern. Hierzu gehören die Länder Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Bayern, Hamburg, Berlin und Baden-Württemberg.³

Im Bereich der Privatinvestitionen liegen Deutschland und die EU aber zurück. Der im September 2024 von dem ehemaligen EZB-Chef Mario Draghi veröffentlichte Bericht zur Wettbewerbsfähigkeit der EU benennt Quantencomputing ebenfalls als künftige Schlüsseltechnologie. Zugleich wird aber ein ernüchterndes Bild gezeichnet: Gemessen am Investitionsvolumen der Wirtschaft sind fünf der zehn größten Unternehmen im Bereich der Quantentechnologien, einschließlich Quantencomputing, schon heute in den USA ansässig, vier weitere in China – in der EU kein einziges.

Die amerikanischen Konzerne, die aus der ersten digitalen Revolution hervorgegangen sind, dominieren derzeit den Markt und die Entwicklung von Quantentechnologien. Das über die letzten beiden Dekaden erlangte technologische Knowhow in Bereichen der Digitalisierung und Künstliche Intelligenz in Verbindung mit einer hohen Kapitalkraft verschafft ihnen einen komparativen Vorteil in der Entwicklung von Quantencomputing-Lösungen.

Eine Expertengruppe der EU-Kommission kam Ende Oktober 2024 zu einem ähnlichen Schluss wie der Draghi Report: *»Die EU ist vergleichsweise schwächer als die USA und China, was die Einführung, Kommerzialisierung und Skalierung neuer Technologien angeht.«*⁴

Forschungsaktivitäten zum Thema Quantencomputing werden unter anderem über Förderprogramme wie »Entwicklung digitaler Technologien« des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) oder »Anwendungsorientierte Quanteninformatik« des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

In Deutschland wird Quantencomputing-Software Entwicklung bereits seit einigen Jahren aktiv vorangetrieben. Mit dem Verbundprojekt PlanQK »Plattform und Ökosystem für Quantenapplikationen« (2020-2023) wurde durch das BMWK insbesondere die Entwicklung einer offenen Plattform gefördert, die Entwicklern und Nutzenden Zugriff auf und gemeinsame Arbeit an anwendungsorientierter Software für Quantencomputing ermöglicht⁵. Diese Fördermaßnahme stellte damit einen wichtigen Baustein beim Aufbau souveräner Strukturen in Deutschland und Europa im Bereich Quantencomputing dar, um den Zugang zu QC-Software und QC-Rechenleistung für die mittelständische Wirtschaft zu gewährleisten und entsprechende Kompetenzen aufzubauen. Über den anknüpfenden Förderaufruf (2021-2025) »Quanten-Computing – Anwendungen für die Wirtschaft, Plattformen, Werkzeuge und Methoden für die Erschließung und Integration von Anwendungen des Quanten-Computing« wurde die Entwicklung von Plattformen, Werkzeugen und Methoden für die wirtschaftliche Erschließung und Integration von Anwendungen des Quantencomputings weiter gefördert. Noch bis Mitte 2025 laufende Förderprojekte aus diesem Förderaufruf sind EniQmA⁶, Qompiler⁷ und

³ [Quantencomputing – Markt, Zugang, Perspektiven \(Technologieprogramm des BMWK\)](#)

⁴ Commission: Directorate-General for Research and Innovation, Align, act, accelerate – Research, technology and innovation to boost European competitiveness, Publications Office of the European Union, 2024

⁵ [PlanQK - Plattform und Ökosystem für Quantenapplikationen](#)

⁶ [EniQmA - Ermöglichung hybrider Quantum-Anwendungen](#)

⁷ [Qompiler - Standardisierter Quanten Software Stack](#)

QCHALLENGE⁸. Neben den bereits abgeschlossenen Projekten (z.B. AutoQML⁹ oder SeQenC¹⁰) adressieren sie die verschiedenen Schichten des Quantencomputing Software-Stacks, wobei die einzelnen Software-Komponenten selten aufeinander abgestimmt/standardisiert sind.

Entkoppelt von diesen Entwicklungen wurden darüber hinaus auch durch das BMBF verschiedene Projekte gefördert, die Quantencomputing Software zum Kern haben, wie bspw. das Projekt »QCStack«, in dem eine technologie-übergreifende Middleware entwickelt wird¹¹ und das Projekt QuCUN, welches eine Software-Plattform entwickelt, über die Nutzer u.a. eine Bibliothek mit Implementierungen und Erläuterungen zu Standard-Anwendungsfällen abrufen können und Zugang zu Quantencomputing Ressourcen erhalten¹².

Die Forschungslandschaft in Deutschland ist von einem hohen Fragmentierungsgrad geprägt, auch die FuE-Projekte sind weitgehend autark. Deshalb wird der Bündelung von Ressourcen und Expertise bei der Maximierung des Innovationspotentials eine entscheidende Rolle zukommen.

Im Kontext der oben genannten Ausgangslage hat das BMWK das Konsortium aus Fraunhofer IAO, KIT und Kipu Quantum mit der Erarbeitung eines Innovationskonzepts betraut, um den Bedarf weitergehender Förderung für den Quantencomputing Software Stack und dessen Harmonisierung zu eruieren.

Der vorliegende Schlussbericht fasst die Ergebnisse des Projektes QC Next zusammen. In dem Projekt wurde eine tiefgehende Analyse konzeptioneller Ansätze sowie eine Bestandsaufnahme technisch-infrastruktureller Lösungen rund um den Quantencomputing Software Stack erarbeitet. Darauf aufbauend beinhaltet der Bericht ein Innovationskonzept, welches konkrete Maßnahmen zur zielgerichteten Weiterentwicklung deutscher Quantencomputing-Software-Lösungen definiert. Diese beinhalten unter anderem die Entwicklung einer Referenzarchitektur und verschiedener Referenzimplementierungen, Ansätze zur Stärkung des Quanten-Software-Ökosystems, sowie Überlegungen zu Standardisierungen. Dieser Lösungsansatz für einen ganzheitlichen Quantencomputing Software Stack soll den Transfer aus dem Labor in die Anwendung (»from Lab to Fab«) beschleunigen.

2.2 Förderpolitische Ziele

In dem Projekt wurde eine Reihe förderpolitischer Ziele umgesetzt. Diese sind in der nachfolgenden Tab. 1 aufgeführt.

⁸ [QCHALLENGE - Quantum-Classical Hybrid Optimization Algorithms for Logistics and Production Line Management](#)

⁹ [AutoQML – Neue Potenziale für automatisiertes Machine Learning mit Quantencomputing](#)

¹⁰ [SeQenC - Souveränität für Quantenlösungen in der Cloud](#)

¹¹ [Projekt QCStack - Zentraler Softwarestack für Quantencomputer](#)

¹² [QuCUN - Das Quantum Computing User Network in Deutschland](#)

Ziele der Ausschreibung	Zielerfüllung im Projekt
Digitale Transformation der Wirtschaft, um die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Wirtschaft bei Angebot und Nutzung digitaler Technologien zu erhöhen.	- Investition in Forschung und Entwicklung sowie Förderung von KMU - Erweiterung des Ökosystems - Wissenstransfer in Industrie
Adressierung aktueller Trends und Entwicklungen, konkreter Bedarfe der Wirtschaft und des Markts im Bereich der Digitalisierung inkl. zeitnahe Umsetzung.	Analyse von Anforderungen aus Wissenschaft und Wirtschaft
Ausbau und der Stärkung von Zukunftstechnologien, digitalen Innovationen sowie Infrastrukturen.	- Beitrag zur Quantum Awareness und Quantum Readiness in Deutschland und Europa - Erweiterung des Ökosystems
Beitrag zur Stärkung der Souveränität und zum Erhalt der Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und Europas.	- Erarbeitung eines belastbaren Rahmenkonzepts für den Quantencomputing Software Stacks - Förderung von Orientierung, Systematisierung und Anschlussfähigkeit
Reduktion von Entwicklungsrisiken im marktnahen Forschungsbereich.	Erarbeitung eines belastbaren Rahmenkonzepts für den Quantencomputing Software Stacks
Realisierung von Spillover-Effekten.	- Einbindung von Wissenschaft und Wirtschaft und gemeinsame Eruierung relevanter Anforderungen - Wissenstransfer in die Industrie - Weiterentwicklung von Initiativen und Netzwerken - Nachfolgeprojekt und Folgeinvestitionen
Realisierung von Nachhaltigkeitszielen	Hochqualifizierte Arbeitnehmer am Arbeitsort (%)
In Projekten entwickelte Lösungen in Fachöffentlichkeit und Gesellschaft sichtbar machen	- Veröffentlichungen - Präsentation des Förderprogramms auf Messen, Konferenzen und Workshops - Ökosystem & Outreach

Tab. 1: Förderpolitische Ziele und deren Erfüllung im Innovationsprojekt QC Next.

2.3 Wissenschaftliche und konzeptionelle Ziele

Das Projekt hatte das Ziel, ein Innovationskonzept für den Quantencomputing Software Stack zu formulieren. Dieses Innovationskonzept (vgl. Teil II dieses Berichts) soll als Grundlage für die Gestaltung und Umsetzung eines Leitprojekts dienen. Zunächst wurden bestehende konzeptionelle Ansätze und Infrastrukturen kartiert und analysiert, um eine solide Grundlage für die Erstellung des Innovationskonzeptes zu schaffen. Anschließend entwickelte das interdisziplinäre Konsortium eine Vision für den künftigen Quantencomputing Software Stack, in der durch eine konsistente Referenzarchitektur die Innovationsdynamik im Quantencomputing gestärkt und die technologische Souveränität Deutschlands gezielt ausgebaut wird.

Die frühzeitige Einbindung und breite Beteiligung der Community fördert die Akzeptanz der geplanten Referenzarchitektur und unterstützt die Überführung von Technologien aus dem Labor in die praktische Anwendung (»Lab to Fab«). Die grundlegenden Arbeiten, die daraus gezogenen Schlüsse und die Vision wurde daher in Workshops Vertretern aus Wirtschaft und Forschung vorgestellt und mit diesen erörtert, um Akzeptanz zu schaffen, Feedback einzuholen und Partnerschaften für zukünftige Projekte zu initiieren.

Zusätzlich wurden zentrale Forschungsfragen definiert, die als Basis für weitere Entwicklungen dienen sollen. Die genannten Bestandteile wurden in dem »Innovationskonzept QC Next« ausformuliert welches in Teil II dieses Schlussberichts präsentiert wird.

2.4 Wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Stand der Technik

Umsetzung von Quantenalgorithmen. Die heute verfügbare Quantenhardware (NISQ-Hardware) umfasst eine begrenzte Anzahl fehlerbehafteter Qubits (Größenordnung 10-1000), eine geringe Schaltkreistiefe und eingeschränkte Konnektivität zwischen den Qubits [1]. Industrienähe Anwendungsfälle umfassen beispielsweise die Simulation von Molekülen mittels Variational Quantum Eigensolver (VQE) [2] Methoden, dem am weitesten verbreiteten NISQ-Algorithmus [3]. Er wurde bereits erfolgreich für kleine chemische Moleküle mit verschiedenen Hardwarearchitekturen demonstriert [4, 5]. Allerdings haben die ursprünglich verwendeten Ansätze hohe Hardwareanforderungen [6, 7]. Die bisher zur Verfügung stehenden Systemgrößen sind jedoch zu gering, um mit klassischen Methoden konkurrenzfähig zu sein [8].

Im Gegensatz zur aktuellen fehleranfälligen Hardware sind fehlerkorrigierte Systeme in der Lage, deutlich längere und komplexere Schaltkreise auszuführen. Hierfür werden mehrere physikalische Qubits über Fehlerkorrekturcodes zu logischen Qubits verschaltet. Kürzlich wurden große Fortschritte in diese Richtung demonstriert [9] und einige Unternehmen im Bereich der Quantenhardware (z.B. Xanadu, QuEra) arbeiten intensiv an der Realisierung fehlerkorrigierter Hardware [10, 11]. Einer der Algorithmen, welche nur auf fehlerkorrigierter Hardware ausgeführt werden kann, ist der Quantum Phase Estimation Algorithmus (QPE) [12], der z.B. auch in Shors Factoring Algorithmus [13] verwendet wird. Mithilfe von Qubitization [15] oder anderen Approximationen an die Zeitentwicklung [16] ist es möglich, die Hamilton-Operatoren auf Quantencomputern als unitäre Matrix darzustellen, um QPE anzuwenden.

Quanten-Software-Plattformen. Bei der Entwicklung von Software-Plattformen gibt es Initiativen, welche unterschiedliche Bereiche der Nutzung von Quantencomputern abdecken. Plattformen zum Lösen von spezifischen Problemen werden zum Beispiel von PLANQK [17], sowie von Anbietern wie D-Wave und Quantagonia [18] abgedeckt, welche es Nutzern ermöglichen mathematische Problemformulierungen anzugeben und mit Simulatoren, Quantum Annealern, aber auch auf echten Quantenrechnern zu lösen. Hierbei wird die Quantenebene in der Regel als ‚Blackbox‘ betrachtet. Der Nutzer muss (und kann) diese also nicht im Detail einsehen und verstehen und muss sich bei der Nutzung auf vordefinierte Anwendungsfälle und eingeschränkte Übertragbarkeit einstellen. Nutzer, die stärkere Einsicht bei der Auswahl ihrer Lösungsverfahren haben wollen, müssen diese aktuell noch selbst implementieren. Hierfür gibt es speziell entwickelte Frameworks, bspw. IBM’s Qiskit-Algorithmen [19] oder das vom Fraunhofer FOKUS entwickelte Qrisp Framework [20], welche allerdings starkes Expertenwissen voraussetzen. Einen allgemein nutzbaren Werkzeugkasten mit wiederverwendbaren und anpassbaren quantenalgorithmischen Verfahren für (Teil-)Optimierungsprobleme, sowie kombinierten Lösungsansätzen für komplexe Optimierungsprobleme gibt es bislang nicht.

Quantencomputing Software Stacks. Die etabliertesten Quantencomputing Software Stacks haben ein stark monolithisches Design und sind eng gekoppelt an spezifische Hardwarehersteller. Sie beinhalten passende Runtime-Infrastruktur und formen eher geschlossene Ökosysteme. Mehrere aktuelle Forschungsprojekte zielen auf modularere Software-Stacks in Kombination mit erweiterbaren Runtimes ab, die in der Lage sind, die verschiedenen Schichten im Stack zu entkoppeln. Beispiele hierfür sind der Munich Quantum Software Stack [21], die Software des Quantum Delta um die TU Delft und der Superstaq der University of Chicago, der jetzt durch Inflection unterstützt wird [22].

3 Wissenschaftliche und technische Ergebnisse

3.1 Kartierung konzeptioneller Ansätze

Als erster grundlegender Arbeitsschritt bei der Konzeption eines belastbaren Innovationskonzepts für den Quantencomputing Software Stack erfolgte eine systematische Literaturrecherche zu bestehenden Konzeptionierungen von Quantencomputing Software Stacks. Erarbeitet wurde ein detaillierter Überblick über Quantencomputing Software Stacks. Dabei hat sich das Projektkonsortium auf die Identifizierung und Analyse von Schlüsseldefinitionen, wiederkehrenden Komponenten und Architekturmustern in akademischen, kommerziellen und theoretischen Quantencomputing Software Stacks konzentriert. Das primäre Ziel war es, diese konzeptionellen Ansätze zu extrahieren und zu verstehen, wie verschiedene Software Stacks aufeinander abgestimmt sind oder sich gegenseitig ergänzen.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung bieten Einblicke in die Gemeinsamkeiten und Unterschiede zwischen den untersuchten Quantencomputing Software Stacks. Darüber hinaus dienen die Erkenntnisse als Grundlage für Workshops und die Gestaltung potenzieller Partnerschaften, die die Entwicklung eines umfassenden Quantensoftware-Ökosystems ermöglichen.

Die wissenschaftlichen Publikationen bieten verschiedene Perspektiven auf Quantum Software Stacks. Der folgende Abschnitt fasst ihre wichtigsten Aspekte zusammen: Begriffsdefinitionen, Schichten und Empfehlungen oder Anforderungen.

3.1.1 Begriffsdefinition Quantencomputing Software Stack

Obwohl es keine strenge, allgemein anerkannte Begriffsdefinition gibt, beschreibt die wissenschaftliche Literatur Quantencomputing Software Stacks als einen strukturierten Ansatz zur Überbrückung der Kluft zwischen High-Level-Quantenalgorithmen und der physikalischen Implementierung von Quantencomputern. Quantencomputing Software Stacks bieten einen mehrschichtigen Rahmen, der oft von klassischen Computerarchitekturen inspiriert ist und alle Software (und manchmal auch Hardwarekomponenten) umfasst, die für die Entwicklung, Kompilierung und Ausführung von Quantenalgorithmen auf Quantengeräten erforderlich sind.

Einige Arbeiten beschreiben Quantensoftware-Ökosysteme, ein breiteres Konzept, das nicht nur den Stack selbst, sondern auch Akteure, Werkzeuge und Interaktionen um ihn herum umfasst. Dazu gehören Aspekte wie Algorithmen-Entwurf, Ergebnisverarbeitungswerkzeuge, Compiler-Optimierung, Integration mit klassischen HPC-Umgebungen und Benutzerzugriffsmodelle.

3.1.2 Schichten des Quantencomputing Software Stacks

Die einzelnen Ebenen und ihre innere Organisation können in den verschiedenen Arbeiten variieren, was die historische Entwicklung von Quantencomputing Software Stacks widerspiegelt. Es lassen sich jedoch gemeinsame Themen erkennen:

- 1. Anwendungsschicht:** Diese Schicht stellt die höchste Abstraktionsebene dar, auf der die Benutzer Probleme und Algorithmen definieren, ohne tiefgreifende Kenntnisse über die zugrunde liegende Quantenmechanik oder Hardware zu benötigen. Diese Schicht umfasst:
 - *Anwendungen:* Benutzerseitige Software, die QC für bestimmte Aufgaben nutzt.
 - *Algorithmen:* Verfahren zur Lösung von Berechnungsproblemen unter Verwendung von Quantenprinzipien.
 - *High-level Programmiersprachen:* Werkzeuge zum Ausdrücken von Quantenalgorithmen in einem für den Menschen lesbaren Format, wie z. B. Quipper, Scaffold und Q#.
 - *Quanten-Software-Entwicklungskits (SDKs):* Frameworks wie Cirq und Qiskit, die die Entwicklung und Ausführung von Quantenschaltungen vereinfachen.
- 2. Systemschicht:** Diese Schicht fungiert als Vermittler zwischen der Anwendungsschicht und der physischen Hardware und übernimmt Aufgaben wie Kompilierung, Optimierung und Ressourcenverwaltung. Zu den Komponenten gehören:
 - *Compiler:* Sie übersetzen High-Level-Code in Low-Level-Befehle, die von Quantenprozessoren ausgeführt werden können.
 - *Runtimes:* Für die Ausführung der kompilierten Quantenprogramme und die Integration in Nicht-Quanten-Systeme wird eine Ausführungsumgebung benötigt, möglicherweise in Form einer virtuellen Quantenmaschine.
 - *Quanten-Befehlssatzarchitektur:* Definiert die grundlegenden Operationen, die ein Quantenprozessor ausführen kann und weitere Figures of Merit¹³, die für die Bereitstellung von Schaltkreisen relevant sind (Gate-Sets, Kohärenzzeiten, etc.).
- 3. Physikalische Schicht:** Diese Schicht umfasst die physikalische Realisierung der Quantenberechnung. Dazu gehören:
 - *Quanten-Fehlerkorrektur:* Techniken zur Abschwächung von Rauschen und Fehlern, die in den derzeitigen Quantengeräten auftreten.
 - *Steuerelektronik:* Erzeugung von Signalen zur Manipulation und Messung von Qubits, um die Lücke zwischen klassischen Kontrollsystemen und dem Quantengerät zu schließen.
 - *Quanten-Hardware:* Die physikalischen Qubits, ihre Kontroll- und Messsysteme sowie die zugrunde liegende Technologie (z. B. supraleitende Transmon-Qubits, gefangene Ionen).

¹³ Hardwareparameter wie z.B. Kohärenz oder Konnektivität.

4. Schichtübergreifende Aspekte: Einige Aspekte agieren nicht ausschließlich auf einer einzelnen Ebene des Quantencomputing Software Stacks *oder* stellen nützliche, aber nicht essenzielle, Erweiterungen des Stacks dar. Beispiele enthalten:

- *Quanten-Klassik-Spaltung:* Viele Anwendungen beinhalten einen hybriden Ansatz, bei dem klassische Computer Vor- und Nachverarbeitungsaufgaben übernehmen und Quantencomputer spezifische Berechnungen durchführen. Der Stack muss die Kommunikation und den Datentransfer zwischen diesen Domänen erleichtern.
- *Hardwaremodelle und Fehlermodelle:* Die Charakterisierung der spezifischen Eigenschaften und Beschränkungen der zugrundeliegenden Quantenhardware ist entscheidend für die Entwicklung wirksamer Kompilierungs- und Fehlerbehebungsstrategien, ist allerdings schwer auf eine konkrete Schicht zu begrenzen.
- *Verifizierung und Benchmarking:* Es werden neue Werkzeuge benötigt, um die Korrektheit von Quantensoftware zu überprüfen und die Leistung verschiedener Hardwareplattformen zu bewerten.

Basierend auf den analysierten wissenschaftlichen Veröffentlichungen, Diskussionen im Konsortium und den Experteneinschätzungen auf dem veranstalteten Community-Workshop ist der erste Entwurf für einen prototypischen Quantencomputing Software Stack in Abbildung 2 dargestellt. Während dieser »Proto-Stack« überwiegend den obigen Erkenntnissen folgt, geht er in zwei Aspekten über den Stand der Wissenschaft (und Technik) hinaus. Zunächst sind die Übersetzungen, die in der Literatur in der Systemebene angeordnet sind, hier seitlich über mehrere Layer angeordnet, da sie die Transformation zwischen mehreren Ebenen bilden. Außerdem fehlen in vielen wissenschaftlichen Publikationen ein expliziter Ansatz dazu, wie die verschiedenen Ebenen miteinander interagieren. Hierfür müssen entsprechende Schnittstellen, die durch Schnittstellensymbole auf der rechten Seite des Proto-Stacks repräsentiert sind, definiert werden.

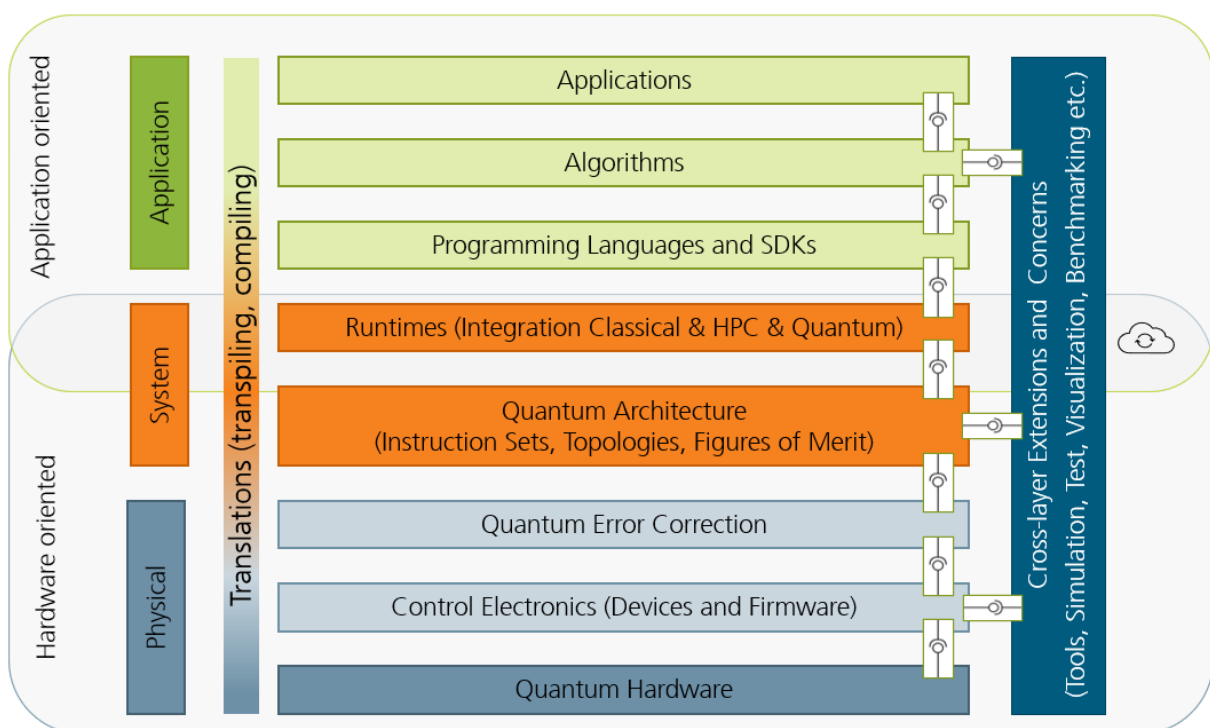


Abbildung 2: Software Stack.

3.1.3 Empfehlungen und Anforderungen

In den Publikationen werden mehrere Empfehlungen und Anforderungen für den Aufbau effektiver Quanten-Software-Stacks genannt. Ihnen ist gemeinsam, dass es bei Quanten-Software-Stacks nicht einfach darum geht, klassische Architekturen zu replizieren. Stattdessen fordern sie neue Ansätze, Abstraktionen und Werkzeuge, um die Leistung der Quantenhardware für Berechnungen effektiv zu nutzen:

1. **Agnostizismus und Kompatibilität:** Der Quantencomputing Software Stack muss idealerweise mehrere Quanten-Hardwareplattformen und Programmiersprachen unterstützen, um Flexibilität zu ermöglichen und eine Bindung an bestimmte Anbieter zu vermeiden.
2. **Koexistenz mit klassischem Rechnen:** Die nahtlose Integration mit bestehenden Hochleistungsrechnersystemen (HPC) ist von entscheidender Bedeutung, um hybride Arbeitsabläufe zu ermöglichen und die Stärken sowohl der klassischen als auch der Quantenressourcen zu nutzen.
3. **Mehrschichtige Abstraktion und Modularität:** Eine klare Trennung der Belange zwischen den einzelnen Schichten ermöglicht eine unabhängige Entwicklung und Optimierung der verschiedenen Komponenten.
4. **Effizientes Ressourcenmanagement:** Quantenressourcen sind knapp und teuer. Der Stack sollte ihre Zuweisung, Planung und Nutzung optimieren.
5. **Fehlerbehandlung und Fehlertoleranz:** Robuste Fehlermodelle und Mitigationsstrategien sind angesichts der verrauschten Natur der aktuellen Quantenhardware von entscheidender Bedeutung.
6. **Benutzerfreundlichkeit und Zugänglichkeit:** Die Abstraktion der Komplexität und die Bereitstellung intuitiver Schnittstellen für verschiedene Benutzergruppen (z. B. Algorithmenentwickler, Anwendungsprogrammierer) sind entscheidend für eine breitere Akzeptanz.
7. **Werkzeugunterstützung für Verifikation, Validierung und Tests:** Die Entwicklung spezialisierter Werkzeuge zur Sicherstellung der Qualität und Korrektheit von Quantensoftware ist unerlässlich.
8. **NISQ-ready und FTQ-proof:** Der Stack muss entworfen sein, um in der aktuellen NISQ-Ära anwendbar zu sein, während er robust genug sein muss, um auch bei Fault-Tolerant-Quantencomputing mit wenig Anpassungen tragfähig zu bleiben.

3.2 Bestandsaufnahme technisch-infrastruktureller Lösungen

Als zweiter grundlegender Arbeitsschritt bei der Konzeption eines belastbaren Innovationskonzepts für den Quantencomputing Software Stack erfolgte eine systematische Betrachtung von am Markt verfügbaren Lösungen und sowie deren Verortung auf den im ersten Schritt erarbeiteten Proto-Stack. Die Ergebnisse der Recherche zu kommerziellen Angeboten und Open-Source-Implementierungen (vgl. Abbildung 3) aus Forschungsprojekten im Bereich Quantencomputing zeigen deutliche Unterschiede in Zielsetzung und Reifegrad der Lösungen. Während kommerzielle Angebote meist darauf abzielen, marktreife und sofort einsetzbare Lösungen bereitzustellen, orientieren sich Forschungsprojekte stärker an der Entwicklung grundlegender Technologien und experimenteller Ansätze.

Die Analyse der kommerziellen Angebote macht deutlich, dass diese oft als proprietäre Systeme, sprich herstellergebundene, in Form von »Black Boxes« entwickelt werden. Das bedeutet, dass der zugrunde liegende Software-Stack für Nutzer nicht transparent einsehbar ist. Allerdings bieten viele Lösungen einen gewissen Grad an Flexibilität an, indem sie z.B. mehrere Hardware-Anbieter unterstützen. Begleitet wird dies durch die Bereitstellung von SDKs und APIs, die meist Open Source sind.

Im Gegensatz dazu fokussieren sich die Open-Source-Implementierungen aus Forschungsprojekten auf die Erforschung und Bereitstellung neuer Werkzeuge, die übergreifende Anforderungen wie Fehlerkorrektur, Simulation, Nachvollziehbarkeit, Reproduzierbarkeit und Benchmarking adressieren. Diese Werkzeuge bieten essenzielle Unterstützung für komplexe Entwicklungsschritte im Quantencomputing, treten jedoch häufig in Form prototypischer Lösungen auf. Die Ergebnisse der Forschung sind oft isoliert und weniger auf Zusammenarbeit oder Marktanpassung ausgelegt. Dennoch haben die Nutzung und Bereitstellung von Open-Source-Technologien hier einen hohen Stellenwert, um die Ergebnisse der wissenschaftlichen Community zugänglich zu machen und die Weiterentwicklung zu fördern.

Zusammenfassend verdeutlicht die Recherche, dass es trotz der Fortschritte bei kommerziellen Lösungen und geförderten Forschungsprojekten einen erheblichen Bedarf an Harmonisierung gibt. Eine stärkere Verknüpfung marktreifer und experimenteller Ansätze und die Konzentration auf standardisierte und interoperable Lösungen könnten das Potenzial des Quantencomputings in Deutschland erheblich steigern. Die Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung sowie die Fokussierung auf Open-Source-Entwicklung sind dafür wichtige Schlüssel.

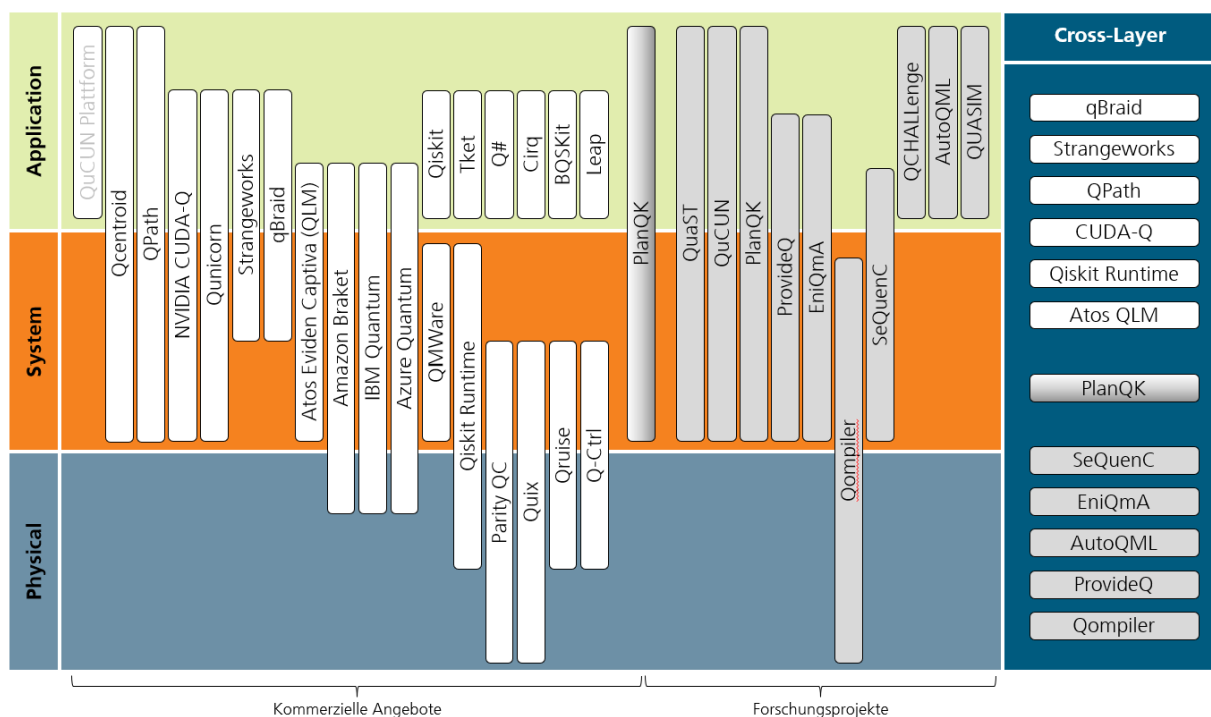


Abbildung 3: Kommerzielle Angebote und Forschungsprojekte entlang des definierten Software Stacks.

3.3 Vision und Governance für Leitprojekte

Aufbauend auf den Ergebnissen zu konzeptionellen Ansätzen und technisch-infrastrukturellen Lösungen stand als dritter Arbeitsschritt die Aufgabe an, eine Vision für das Projekt QC Next zu entwickeln. Hierzu wurde im Kreis der Konsortialpartner ein Workshop durchgeführt. In diesem Workshop wurden die Ergebnisse der vorangegangenen Analysen vorgestellt und die Methode der Visionsentwicklung vermittelt. Innerhalb des vorgegebenen inhaltlichen Rahmens wurden die Schritte der Visionsentwicklung gemeinsam umgesetzt.

Die Schritte der Visionsentwicklung folgten einem bewährten generischen Ansatz:

1. **Analyse des Status quo:** Gemeinsam wurde der aktuelle Stand der Technik, bestehende Herausforderungen und Chancen reflektiert, um ein fachlich fundiertes und klar definiertes Ausgangsbild zu schaffen.
2. **Definition der Zielperspektive:** Es wurde ein langfristiges Zielbild erarbeitet, welches ein Leitprojekt QC Next adressieren sollte.
3. **Identifikation zentraler Bausteine:** Basierend auf den Ergebnissen der Analysen, der erörterten Zukunftsperspektive und langfristigen Ziele wurden die wesentlichen Inhalte und Prinzipien der Vision definiert.
4. **Entwicklung von Leitgedanken:** Leitgedanken und übergeordnete Werte wurden formuliert, um die Vision strategisch auszurichten. Dabei wurde eine Best Practice Sammlung von Visionstexten aus den Kontexten von Unternehmen, Organisationen und Großprojekten zur Orientierung und Inspiration genutzt
5. **Iterative Verfeinerung:** Die erarbeiteten Bausteine wurden in einem iterativen Umlaufverfahren diskutiert, konkretisiert und zu einem konsistenten Visionstext weiterentwickelt.

Ergebnis ist die folgende Vision für das Innovationskonzept QC Next

»Wir beschleunigen und optimieren die Entwicklung und Anwendung von Quantencomputing durch eine ganzheitliche und konsistente Referenzarchitektur.

Die Markteinführungszeit für Quantenlösungen wird signifikant verkürzt, die Schaffung effizienter QC-Wertschöpfungsketten begünstigt und die technologische Souveränität der deutschen Wirtschaft gestärkt.«

Ergänzend zu den genannten Arbeitsschritten der Visionsentwicklung wurde erkundet, wie die Governance im Sinne von Steuerung einer Multi-Akteurskonstellation zur Umsetzung des Innovationskonzeptes QC Next gestaltet werden kann. Einbezogen wurden Erkenntnisse aus der Literatur zur Thematik sowie zwei qualitative Interviews mit Wissensträgern aus Projekten ähnlicher Größenordnung und Konstellation. Die Erkenntnisse sind hier zusammengefasst und werden in Teil II dieses Dokuments als Organigramm Vorschlag vorgestellt.

Die Entwicklung von Quantencomputing-Technologien gehört zu den ambitionierten und vielversprechenden Vorhaben in Forschung und Entwicklung. Das Feld ist geprägt von hoher technischer Komplexität, dynamischen wissenschaftlichen Fortschritten mit einem hohen Grad an Unsicherheiten, von öffentlichen Fördermitteln und globalem Wettbewerb. Hinzu kommt ausgeprägte Interdisziplinarität, die die Zusammenarbeit unterschiedlicher Akteure aus Universitäten, Unternehmen und öffentlichen Institutionen erfordert. Gleichzeitig sind die

Erwartungen hoch, nicht nur technologisch-wissenschaftliche Durchbrüche zu erreichen, sondern diese auch in die Wirtschaft zur Lösung relevanter, letztlich auch gesellschaftlicher Probleme zu überführen. Die Konzeption und Umsetzung von zeitgemäßen Strukturen, Prozessen und Artefakten zur Governance im Sinne einer harmonisierenden Projektsteuerung autonomer und unverzichtbarer Partnerorganisationen ist herausfordernd. »Governance« definieren wir für das Innovationskonzept QC Next als die ganzheitliche Steuerung und Gestaltung der Zusammenarbeit eines Verbundes aus Forschungseinrichtungen und Unternehmen mit unterschiedlichen fachlichen Hintergründen in einem komplexen und dynamischen Themenfeld wie dem Quantencomputing. Konkret umfasst Governance die strukturellen, prozessualen und normativen Regelungen, die die kollektiven Teile der Zielerreichung im Projekt bestmöglich unterstützen. Sie fördert Transparenz, den effizienten Wissenstransfer, die zielorientierte Wissensintegration und die strategische Verwertung von Ergebnissen, während sie gleichzeitig den rechtlichen und ethischen Standards entspricht und im Idealfall Vertrauen und Akzeptanz fördert. Es gilt eine Balance herzustellen zwischen bewährten und etablierten Mechanismen der Steuerung und neuen Elementen, die geeignet sind, koordiniertes und kollaboratives Handeln von zahlreichen Akteuren aus unterschiedlichen Wissensdomänen und mit verschiedenen, teilweise divergierenden, Interessen zu unterstützen.

Im vorliegenden Fall lässt sich Governance in drei wesentliche Dimensionen unterteilen:

1. **Strukturelle Dimension:** Hierzu gehören die klare Rollen- und Verantwortlichkeitsverteilung zwischen Akteuren wie Universitäten, Unternehmen und öffentlichen Institutionen sowie die Einrichtung von Entscheidungs- und Steuerungsgremien, die eine reibungslose Koordination ermöglichen.
2. **Prozessuale Dimension:** Diese umfasst Mechanismen für Kommunikation, Konfliktlösung und Entscheidungsfindung, einschließlich regelmäßiger Berichtszyklen und Meilensteinkontrollen, um die Projektfortschritte zu überwachen und auf Kurs zu halten.
3. **Normative Dimension:** Diese Dimension konzentriert sich auf die Förderung von Transparenz, Ethik und Compliance, insbesondere im Umgang mit öffentlichen Fördermitteln, um das Vertrauen der beteiligten Akteure und der Öffentlichkeit zu gewährleisten.

Ein moderner Governance-Ansatz integriert zusätzlich Prinzipien der Plattformökonomie, um die Effizienz und Flexibilität von F&E-Projekten zu steigern. Im hier vorliegenden Kontext wird der Begriff Plattform im weiteren Sinne verstanden: Plattform ist dann nicht im engeren Sinne eine digitale Lösung, sondern der Plattformbegriff bezeichnet die anzustrebende Multi-Akteur Projektkonstellation selbst. Daher werden die im folgenden genannten Punkte in der Gestaltung der Governance im Rahmen des Innovationskonzepts QC Next berücksichtigt.

- *Interoperabilität durch klare Schnittstellen:* Definierte Prozesse und standardisierte Übergaben schaffen Synergien, fördern die Zusammenarbeit und minimieren Redundanzen.
- *Netzwerkeffekte:* Workshops und Austauschformate verstärken Interaktion und Wissensaustausch und tragen zur nachhaltigen Verankerung von Ergebnissen bei.
- *Partizipative Governance:* Die Einbindung der verschiedenen Stakeholder in Entscheidungsprozesse verteilt Verantwortung, fördert Akzeptanz und innovative Steuerungsansätze.

- *Flexible Ressourcenallokation:* Dynamische Priorisierung und gezielte Anreize ermöglichen eine schnelle Reaktion auf Veränderungen. Dies wird im öffentlichen Förderkontext begrenzt realisierbar sein und spiegelt sich im Konstrukt der Satellitenprojekte wider.
- *Transparenz und Vertrauen:* Offene Kommunikationsstrukturen und regelmäßige Berichterstattung stärken die Zusammenarbeit und das Vertrauen zwischen den Beteiligten.
- *Gemeinsame Werte und Ziele:* Ein klarer Zielkatalog, der technologische und wirtschaftliche Prioritäten integriert, und nicht zuletzt die bereits präsentierte Vision sorgen für Kohärenz und Orientierung.

Aus der Literatur und aus zwei qualitativen Best Practice Analysen wird deutlich, dass die große Herausforderung beim Entwurf einer geeigneten Governance darin liegt, ein Gleichgewicht zwischen klaren Steuerungsstrukturen und der notwendigen Agilität in der täglichen Arbeitspraxis zu finden. Zu den bewährten Mechanismen gehören:

- Eine eindeutig bestimmte leitende *Inстанz der Gesamtsteuerung*, die das Konsortium oder Kollektiv abbildet und integriert.
- *Konsortialverträge:* Klare vertragliche Regelungen, die Rechte und Pflichten sowie Mechanismen zur Konfliktlösung festlegen.
- *Transparente Entscheidungsfindung:* Implementierung klarer Entscheidungsprozesse und Kompetenzregelungen.
- *Regelmäßige Kommunikation:* Prozesse und Instrumente für kontinuierlichen Austausch, wie z. B. digitale Kollaborationstools. Dabei ist der Tatsache Rechnung zu tragen, dass es sich um einen freiwilligen Zusammenschluss autonomer Organisationen auf Zeit und nur mit einem Teil ihrer Ressourcen handelt, die jeweils an ihre eigenen Prozesse, Instrumente und gewohnte Praktiken gebunden sind.
- *Evaluationsmechanismen:* Meilensteinkontrollen und Indikatoren zur Bewertung von Fortschritten.
- *Adaptive Governance:* Ein gewisses Maß an flexible Strukturen, die eine dynamische Anpassung an Veränderungen ermöglichen.

Diese Betrachtungen bilden die Basis für den Entwurf einer Governance Struktur die als Organigramm in Teil II dieses Berichts vorgestellt wird.

3.4 Abschlussbemerkung zu Teil I

Die Ergebnisse der inhaltlichen und fachlichen Recherchen, der eigens entwickelte Quantencomputing Software Stack sowie die Vision wurden der Quantencomputing Community in einem vom Projektkonsortium konzeptionierten und durchgeführten Workshop am Standort Berlin vorgestellt. Dabei konnten Rückmeldungen eingeholt und das gemeinsame Verständnis für die Zielsetzung gestärkt werden. Die Tatsache, dass der Workshop vollständig ausgebucht war, sowie ein zweiter für die Community offener Workshop im März 2025 sehr gut besucht war unterstreicht das Interesse seitens Wissenschaft und Wirtschaft an diesem Thema. In dieser Spiegelung des Proto-Stacks, der Vision und der inhaltlichen Schwerpunktsetzung in der Community wurden keine fundamentalen Bedenken oder Vorbehalte mit dem Stack geäußert. Dies indiziert ein realistisches Vorhaben.

Den folgenden zweiten Teil dieses Schlussberichtes bildet das aus den geleisteten Arbeiten und erzielten Ergebnissen formulierte Innovationskonzept QC Next. In diesem werden die notwendigen innovatorischen Schritte aufgezeigt, die in der Folge und als Antwort auf die hier präsentierten F&E-Ergebnisse unternommen werden müssen. Darin wird dargelegt, wie durch die Bündelung von Expertise, die Aktivierung etablierter Netzwerke und Kooperationen mit Industriepartnern Spillover-Effekte erzeugt werden, die langfristig zur Schaffung eines nachhaltigen Ökosystems für Quantencomputing in Deutschland beitragen.

Teil II

Innovationskonzept QC Next

Aufgabe des Projekts, über das in den vorangegangenen Kapiteln berichtet wurde, war die Entwicklung eines Innovationskonzeptes für künftige Quantencomputing Software Stack Instanziierungen. Dieses Innovationskonzept bildet die Grundlage zur Gestaltung eines Leitprojekts QC Next. Das Innovationskonzept empfiehlt die Entwicklung einer breit akzeptierten Referenzarchitektur mit stabilen Schnittstellendefinitionen, modularen Bausteinen und Referenzimplementierungen in jeder Schicht, welche in Form von Proof-of-Concepts zu validieren sind. Die Umsetzung des Innovationskonzeptes QC Next eröffnet folgende relevante Mehrwerte für die Entwicklung und Anwendung von Quantencomputing-Lösungen:

1. **Konsolidierung und Reduktion von Fragmentierung.** Eine Referenzarchitektur des Quantencomputing Software Stacks inklusive Open-Source-Schnittstellendefinitionen zwischen allen Schichten vereinheitlicht die stark fragmentierte Landschaft von Quantencomputing-Lösungen und schafft eine klare Struktur für interoperable Entwicklungen.
2. **Modularisierung und Austauschbarkeit.** Durch ein modulares Stack-Design werden die Integration und der Austausch von Komponenten – sowohl aus der Open-Source-Community als auch von kommerziellen Anbietern – ermöglicht.
3. **Effizienz und Effektivität.** In Verbindung mit konkreten Blaupausen ermöglicht die Referenzarchitektur verschiedenen Nutzergruppen die vereinfachte und beschleunigte Entwicklung von Quantencomputing Software, wodurch Zeit und Ressourcen gespart werden.
4. **Standardisierung.** Das Framework bildet eine Grundlage zur Schaffung von formal institutionellen Standardisierungen für Schnittstellen und Prozesse auf nationaler und internationaler Ebene (z.B. DIN, CEN-CENELEC, OASIS), die eine nahtlose Zusammenarbeit und Kompatibilität fördern.
5. **Zugänglichkeit und Verfügbarkeit.** Über Git-Repositories und weitere Plattformen erhalten Entwickler und Endnutzer einfachen Zugang zu den Tools, Frameworks und Best Practices und können so aktiv an deren Weiterentwicklung mitwirken.

Mit der Umsetzung dieser Punkte beschleunigt ein Leitprojekt QC Next die strukturierte und kooperative Entwicklung von Quantencomputing-Lösungen und schafft eine nachhaltige Grundlage für Innovation und Wachstum. Im Ergebnis wird die Markteinführungszeit von Quantenlösungen verkürzt, effiziente Wertschöpfungsketten werden gefördert und die technologische Souveränität Deutschlands wird gestärkt.

Ziel des hier vorgelegten Innovationskonzeptes ist das Aufzeigen notwendiger innovatorischer Schritte, die im Rahmen eines Leitprojektes unternommen werden müssen, um die Entwicklung und Anwendung von Quantencomputing (QC) entscheidend voranzubringen. Diese Schritte werden im Folgenden ausformuliert.

4 Notwendige innovatorische Schritte

Das Innovationskonzept QC Next empfiehlt ein nachgelagertes Leitprojekt QC Next inhaltlich in vier zentrale Arbeitsfelder zu gliedern, die gemeinsam eine fundierte und umfassende Grundlage für die Entwicklung und Anwendung von Software-basierten Quantencomputing-Lösungen schaffen. Die folgenden Unterkapitel fassen diese vier leitenden Arbeitsfelder zusammen.

4.1 Referenzarchitektur und Vorgehensmodelle

Um die Leistungspotenziale und Vielseitigkeit von Quantencomputern entfalten zu können ist es erforderlich, dass die einzelnen Schichten des Stacks nahtlos miteinander interagieren. Dabei muss das Zusammenwirken der einzelnen Komponenten effizient, effektiv und innovationsoffen gestalten werden. Ziel ist es, eine standardisierte und klar definierte Struktur für die Schichten festzulegen und insbesondere Open-Source Schnittstellen zwischen allen Schichten des Quantencomputing Stacks zu schaffen. Klar definierte Schnittstellenspezifikationen sind dabei von zentraler Bedeutung für dessen Durchgängigkeit. Robuste Schnittstellen bringen Investitionssicherheit, ermöglichen Modularität und Austauschbarkeit und können gleichzeitig zu einer Quasi-Standardisierung innerhalb des Stacks beitragen.

Die im Projekt zu entwickelnde Referenzarchitektur für den Quantencomputing Software Stack stellt eine einheitliche, modulare Struktur dar, die alle wesentlichen Schichten von der Hardware- bis zur Anwendungsebene umfasst. Perspektivisch soll sie Projektmanagern, Softwareentwicklern, IT-Architekten und IT-Managern bei der effektiven Zusammenarbeit und Kommunikation im Rahmen eines QC-Implementierungsprojekts helfen. Die Referenzarchitektur soll u. a. häufig gestellte Fragen antizipieren und diese, ergänzt durch ein Vorgehensmodell, beantworten. Ziel dieser Referenzarchitektur ist es, in Kombination mit dem Vorgehensmodell, die Entwicklung und Integration von Quantencomputing-Lösungen zu vereinfachen, die Interoperabilität zu fördern und eine langfristige Grundlage für Standardisierung zu schaffen.

4.1.1 Referenzarchitektur und Schnittstellendefinitionen

Die Grundlage für diese Architektur bildet der im vorgelagerten Innovationsprojekt erstellte Proto-Stack (vgl. Abbildung 2). Zusätzlich zur weiteren Ausarbeitung und Festigung der einzelnen Application-, System-, und Physical Layer sind die Schnittstellendefinitionen von zentraler Bedeutung. In dem Projekt sollen entlang des Stacks standardisierte Open-Source-Schnittstellen definiert werden. Dies erlaubt es Anwendern und Programmieren die jeweils benötigten Softwaresysteme und -tools mit eigenen Anwendungen zu koppeln. Vendor Lock-in Effekte, d.h. die Abhängigkeit von einzelnen Unternehmen, sollen so vermieden werden.

Die Schnittstellendefinitionen basieren auf präzisen Spezifikationen, die eine zuverlässige Kommunikation zwischen den einzelnen Schichten ermöglichen. Die Schnittstellen werden modular gestaltet, sodass einzelne Komponenten leicht integriert oder ausgetauscht werden können. Ein besonderes Augenmerk liegt hierbei auf der Bereitstellung von Open-Source-Referenzimplementierungen gemäß dieser Schnittstellen, welche Transparenz und Nachvollziehbarkeit gewährleisten.

Eine wohl-definierte Referenzarchitektur hat zahlreiche Vorteile, die weitere Softwareentwicklung nachhaltig stärkt. Durch die einheitliche Struktur wird eine Konsolidierung erreicht,

die bestehende Fragmentierung von Ansätzen deutlich reduziert und eine gemeinsame Grundlage für Forscher, Entwickler sowie Anwender geschaffen. Gleichzeitig ermöglicht die modularisierte Instanziierung eines Stacks auf Basis der Referenzarchitektur die Austauschbarkeit von Elementen und Erweiterbarkeit des Stacks. Dank klar definierter Schnittstellen können einzelne Bausteine flexibel aktualisiert, ersetzt, und erweitert werden, ohne die Stabilität des Gesamtsystems zu beeinträchtigen.

Besonders kleinere Unternehmen profitieren von dieser Architektur, da sie ihren Fokus auf spezifische Teile des Quantencomputing Software Stacks legen können, anstatt den gesamten Quantencomputing Software Stack selbst implementieren zu müssen. Dies erleichtert ihnen den Einstieg in das Quantencomputing, da sie auf bereits am Markt verfügbare Module zurückgreifen und sich stärker auf ihre Spezialisierungen fokussieren können. Ferner soll der vereinfachte Zugang zu diesem hochkomplexen Technologiefeld auch bei kleineren Akteuren zu mehr Innovation motivieren.

Zudem bildet die Referenzarchitektur eine Grundlage für Standardisierung, was langfristig die Interoperabilität und Kompatibilität zwischen verschiedenen Implementierungen fördert. Die Bereitstellung von Bausteinen und Referenzimplementierungen in Open-Source-Repositories beschleunigt zusätzlich die Entwicklung von Quantencomputing-Lösungen. Open Sourcing schafft dabei nicht nur Transparenz und Vertrauen, sondern unterstützt auch den Wissenstransfer und ermöglicht einer breiten Nutzerbasis den Zugang zu grundlegenden Technologien, wodurch das gesamte Ökosystem gestärkt wird.

4.1.2 Vorgehensmodell

Um die Vorteile einer Referenzarchitektur voll ausschöpfen zu können, sollten geeignete Vorgehensmodelle angewandt werden, die Entwicklungs- und Anwendungsprozesse definieren. Die Erfahrung im klassischen Software-Engineering hat gezeigt, dass Vorgehensmodelle essenziell bei der Planung von Softwareentwicklungsprojekten sind. Sie strukturieren Softwareentwicklungsprojekte, indem sie eine Trennung von zeitlich abgegrenzten Phasen und darin stattfindenden inhaltlichen Aktivitäten vornehmen. Sie verbessern die Kommunikation, indem ein gemeinsames Verständnis über Aufgaben und Verantwortlichkeiten geschaffen wird. Die Projektkontrolle sowie die Harmonisierung von Erwartungen an Projektergebnisse werden durch etablierte Vorgehensmodelle erleichtert.

Während die Referenzarchitektur des Quantencomputing Software Stacks beschreibt, welche Bestandteile bei der Entwicklung einer Quantencomputing-Lösung zu berücksichtigen sind, muss ein Leitprojekt QC Next auch aufzeigen, wie der Stack effizient angewendet wird. Nur so kann sichergestellt werden, dass er tatsächlich von der Community verwendet wird. Ein Resultat der während des Innovationsprojektes durchgeführten Workshops ist, dass ein solches Vorgehensmodell zwischen der betriebswirtschaftlichen Perspektive (Endnutzer) und der technischen Perspektive (Entwickler) unterscheiden muss.

Aus betriebswirtschaftlicher Perspektive steht insbesondere die methodische Beantwortung der Frage im Vordergrund, wann eine Quantencomputing-Lösung für ein Unternehmen ökonomisch sinnvoll ist. Mit dieser Frage ist jedes Unternehmen, unabhängig von seiner Größe, konfrontiert, wenn es über den Einsatz einer Quantencomputing-Lösung nachdenkt. Dabei muss aus betriebswirtschaftlicher Perspektive vor allem ein Weg aufgezeigt werden, wie klassische Praxisprobleme prozessual in Anforderungen an und Formulierungen für eine QC-Lösung

übersetzt werden können. Nur so können Aufwand und Nutzen für deren Realisierung adäquat abgeschätzt und mehr Investitionssicherheit geschaffen werden. Gegebenenfalls sind hierfür neue Bewertungskategorien und -methoden zu erarbeiten, mittels derer gängige Kalkulationsverfahren (z.B. Total Cost of Ownership [TCO]) erweitert werden können.

Die technische Perspektive des Vorgehensmodells muss insbesondere die für eine effiziente Implementierung einer Quantencomputing-Lösung benötigten Prozesse im spezifischen Unternehmensumfeld in Verbindung mit dem Quantencomputing Software Stack aufzeigen. Zwei weitere Resultate der Workshops sind die Bedarfe nach technischen Vorgehensmodellen, die einerseits auf das Zusammenbauen bzw. die Instanziierung eines Stacks und andererseits auf dessen Anbindung an die bestehende IT-Landschaft des Unternehmens ausgelegt sind. Ersteres befasst sich mit Fragen der für einen spezifischen Anwendungsfall relevanten Komponenten, die bei der Instanziierung des Stacks benötigt werden, sowie dem technischen Zusammenführen dieser. Letzteres zielt auf die Eingliederung einer Quantencomputing-Lösung in bereits im Unternehmen angewendete Software-Engineering-Vorgehensmodelle und IT-Landschaften, um dadurch hybride Systeme zu schaffen. Dabei muss auf dem aktuellen Stand der Forschung im Bereich des Quanten Software Engineerings aufgebaut werden. Gegebenenfalls identifizierte blinde Flecken müssen adressiert werden. Entwicklungsprozesse, Modellierungs- oder Validierungsvorgehen aus der klassischen Software-Entwicklung sind nach Bedarf auf die Entwicklung von Quantencomputing-Lösungen anzupassen. Ziel sollte die methodische Konzeption, Realisierung, Anpassung und Wiederverwendung von Quantencomputing-Lösungen sein.

Die oben beschriebenen Perspektiven sollen in einem Quantencomputing Software Lifecycle integriert werden, der ein Ergebnis des Leitprojekts QC Next sein sollte. Die Evaluierung sowohl des Quantencomputing Software Stacks als auch des Lifecycles erfolgt in einem Leitprojekt QC Next gemeinsam mit Anwendungsfälle von Industriepartnern (»vertikaler Durchstich«).

4.2 Referenzimplementierung und Ausgestaltung der Schichten

Ausgehend von der Referenzarchitektur als konzeptioneller Rahmen des Stacks werden Bausteine und Referenzimplementierungen für jede Schicht des Software Stacks entwickelt. Die Strukturierung folgt der Logik des erarbeiteten Proto-Stacks (vgl. Abbildung 2):

1. *Application Layer*: Bausteine für die Entwicklung und Nutzung von Quantenalgorithmen und Applikationen.
2. *System Layer*: Komponenten für die Steuerung und Optimierung der Quantenressourcen.
3. *Physical Layer*: Implementierung der Schnittstellen zu Hardware- und Steuerungssystemen.
4. *Cross-Layer Concerns*: Themen wie Sicherheit, Fehlertoleranz und Benchmarking, die schichtübergreifend berücksichtigt werden.

Die Entwicklung von Referenzimplementierungen und Bausteinen für den Quantencomputing Software Stack wird ein zentraler Bestandteil des Leitprojektes sein. Ziel muss sein, die in der Referenzarchitektur definierten Schichten und Schnittstellen mit einsatzfähigen Modulen zu untermauern, die sowohl als Proof-of-Concept für die Architektur dienen als auch als Grundlage für die Integration in reale Anwendungen genutzt werden können. Hierbei wird, basierend auf einem geeigneten Vorgehensmodell, eine systematische Herangehensweise verfolgt, die auf bestehenden Lösungen aufbaut, neue Implementierungen erstellt und spezifische Funktionen sowohl logisch als auch technisch definiert.

Jede Schicht des Stacks – von der Application- über die System- bis zur Physical Layer – wird gezielt auf die Anforderungen der jeweiligen Nutzungsszenarien hin untersucht, um passgenaue Lösungen zu entwickeln. Dabei werden Funktionen zur Entwicklung und Nutzung von Quantenalgorithmien im Application Layer, Mechanismen zur Steuerung und Optimierung von Quantenressourcen im System Layer sowie Zugriffe auf Hardwarekomponenten und Steuerungssysteme im Physical Layer als zentrale Bestandteile betrachtet. Die Anforderungen dieser Schichten werden mit Blick auf konkrete Anwendungsfälle analysiert, um sie gezielt in funktionsfähige Bausteine zu übersetzen. Verbesserungspotential in den einzelnen Schichten muss in die Referenzarchitektur zurückgeführt werden. So wird der Quantencomputing Software Stack im Rahmen des Leitprojekts stetig weiterentwickelt.

Von zentraler Bedeutung für die Interoperabilität zwischen den Schichten sind klar definierte Schnittstellen aus der Referenzarchitektur. Zu diesen Schnittstellen werden Bausteine durch eine Kombination verschiedener Ansätze implementiert. Vorhandene Lösungen werden, soweit möglich, direkt integriert, während in anderen Fällen sogenannte »Wrapper« entwickelt werden, die bestehende Softwareelemente kompatibel machen. Für Bereiche, in denen keine bestehenden Lösungen verfügbar sind, werden neue Implementierungen erstellt. Dies betrifft insbesondere den Bereich der Compiler und Transpiler, die eine reibungslose Übersetzung von Quantenprogrammen über verschiedene Schichten hinweg ermöglichen, sowie Module zur Fehlerkorrektur oder spezifische Hardware-Treiber. Auch für Compiler sollte der Fokus auf der Wiederverwendung beziehungsweise Erweiterung bestehender Lösungen liegen, um den Entwicklungsaufwand schlank und ökonomisch zu halten.

Um die Akzeptanz und die Weiterentwicklung der Bausteine zu fördern, werden alle Referenzimplementierungen in Open-Source-Repositories bereitgestellt. Dieser offene Ansatz gewährleistet Transparenz, schafft dadurch Akzeptanz, erleichtert den Wissenstransfer und bietet der Entwickler-Community die Möglichkeit, Feedback zu geben und aktiv an der Weiterentwicklung mitzuwirken. Begleitend dazu sollten Onboarding-Programme mit Schulungen und Dokumentationen angeboten werden, um den Zugang zu den entwickelten Modulen zu erleichtern.

Ein weiterer essenzieller Aspekt, der bei den Bestrebungen mitgedacht werden muss, ist der Punkt Maintenance. Um »Legacy-Code« zu vermeiden und einen lebendigen, langfristig funktionierenden Software Stack zu gewährleisten, müssen bestehende Komponenten kontinuierlich gewartet werden. Dies kann beispielsweise in Folge neuer Releases inkludierter Software Packages notwendig sein. Im Idealfall erfolgt Maintenance implizit im Rahmen der Verstetigung des Stacks bzw. der Komponenten. In anfänglichen Entwicklungsphasen sowie bei Komponenten, die von Forschungseinrichtungen entwickelt werden, muss der Aspekt aber explizit mitgedacht werden.

Die Validierung der Bausteine erfolgt durch praktische Anwendungen, die im Rahmen des Projekts definiert werden müssen. Dabei dienen spezifische Use Cases als Testumgebung, um das ganzheitliche Zusammenspiel und die Praxistauglichkeit der entwickelten Referenzimplementierung zu überprüfen und gleichzeitig Verbesserungspotenziale zu identifizieren. Die kontinuierliche Prüfung und Weiterentwicklung der Module stellt sicher, dass sie den Anforderungen realer Anwendungen entsprechen und zur weiteren Stärkung des Quantencomputing-Ökosystems beitragen.

Durch die Entwicklung dieser Referenzimplementierungen und Bausteine wird eine solide Grundlage für die praktische Anwendung der Referenzarchitektur geschaffen. Die Kombination aus bestehender und neuer Software fördert dann Interoperabilität und Modularität und beschleunigt die Entwicklung innovativer Quantencomputing-Lösungen.

4.3 Blueprints als Konzept für spezifische Stack-Instanziierungen

Um die Potenziale von Quantencomputing auszuschöpfen, benötigen Unternehmen skalierbare, flexible und implementierbare Software Stacks, die den besonderen Anforderungen von Quantencomputing gerecht werden. Die im Projekt entwickelte Referenzarchitektur dient dabei als Fundament. Für den konkreten Einsatz muss jedoch zusätzlich der Aspekt betrachtet werden, wie sich die Referenzarchitektur auf spezifische Anwendungsszenarien übertragen und instanzieren lässt. In den Partnerworkshops konnten mit den Bereichen Hochleistungsrechenzentren (High-Performance Computing, HPC), Cloudanbieter und On-Premise-Bereitstellungen in IT-Unternehmenslandschaften bereits drei Einsatzfelder identifiziert werden, für die eine Übertragung der Referenzarchitektur inklusive einer Zusammenstellung notwendiger Softwarekomponenten entlang eines Integrationskonzepts für den effizienten Einsatz notwendig sind. Neben diesen Einsatzszenarien spielen auch typische Einsatzdomänen für Quantencomputing eine Rolle und diktieren ein zielgerichtetes Zusammenspiel von Softwarekomponenten im Referenz-Stack. Hier spielen beispielsweise die Anwendungsdomänen Optimierung oder auch Quantum Machine Learning zentrale Rollen, da in diesen Feldern in naher Zukunft im Regime früher fehlerkorrigierter Quantenrechner Nutzbarkeit von Quantencomputing vermutet werden kann. Im Leitprojekt QC Next sind deshalb sogenannte »Blueprints« als vorkonfektionierte anwendungsfallspezifische Instanziierungen der Referenzarchitektur für relevante Einsatzszenarien und Anwendungsdomänen zu entwickeln.

4.3.1 Anpassung der Referenzarchitektur auf verschiedene Anwendungsszenarien mit Hilfe von Blueprints

Blueprints – ein Konzept, das beispielsweise in den Bereichen der Softwareentwicklung, des Deployments von Softwaresystemen mit einer großen Variantenvielfalt oder auch des Managements von IT-Unternehmenslandschaften verbreitet ist – bieten einen systematischen Ansatz, um komplexe Softwaresysteme an spezifische Anforderungen und Umgebungen anzupassen. Ein Blueprint ist eine vorkonfektionierte Vorlage, die sowohl technische als auch organisatorische Details umfasst und somit in enger Verbindung zum technischen Vorgehensmodell steht. Er bietet eine Grundkonfiguration, die auf die jeweilige Zielumgebung zugeschnitten ist, und enthält Mechanismen zur einfachen Skalierung und weiteren Anpassung.

Im Falle der im Leitprojekt zu entwickelnden Referenzarchitektur des Quantencomputing Software Stacks kann ein Blueprint beispielsweise folgende an konkrete Anwendungsfälle angepasste Bestandteile umfassen:

- *Architektonische Grundstruktur:* Vorab definierte Schichten und Module, die auf bestimmte Hardware-, Middleware- und Anwendungs-Anforderungen zugeschnitten sind.
- *Konfigurationsdaten:* Einstellungen für Hardware-Integration, Performanzoptimierung und Quantenalgorithmen.

- *Kompatibilitätsanforderungen:* Spezifikationen für IT-Infrastruktur, Betriebssysteme und Netzwerke.
- *Automatisierungs-Skripte:* Tools zur schnellen Implementierung, Instanziierung und Bereitstellung eines konfektionierten Teils des Referenz-Stacks in der Zielumgebung.
- *Szenarien für Fehlermanagement und Sicherheit:* Standards und Protokolle für den Schutz sensibler Daten und den Umgang mit Hardwareschwächen.

Durch diesen modularen Ansatz kann die Referenzarchitektur schneller implementiert werden, ohne komplette Neuentwicklungen vornehmen zu müssen. Insbesondere die automatisierte Bereitstellung und Integration von ineinandergreifender Softwarekomponenten stellt hierbei die effiziente Einsatzfähigkeit des Quantencomputing Software Stacks sicher. Die spezifische Ausgestaltung der Blueprints wird dabei von den Anforderungen des jeweiligen Anwendungsszenarios bestimmt.

4.3.2 Beispielhafte Anwendungsszenarien und ihre spezifischen Anforderungen

Hochleistungsrechenzentren (HPC). HPC-Umgebungen zeichnen sich durch massive Rechenkapazität und spezialisierte Hardware aus. Integrierte Quantencomputing-Lösungen in HPC-Zentren erfordern:

- Hybride Architekturen, bei denen Quanten- und klassische Prozessoren nahtlos zusammenarbeiten.
- Optimierte Middleware-Schichten für die Verteilung von Workloads zwischen Quantenhardware und existierenden HPC-Ressourcen.
- Skalierbare Steuerungssysteme, die mit hoher Parallelität und Effizienz arbeiten.

Ein Quantencomputing-Blueprint für HPC-Systeme könnte beispielsweise darauf abzielen, bestehende Hochleistungs-Netzwerkinfrastrukturen einzubinden und spezielle Optimierungen für Hardware-Fehlerkorrektur bei intensiver Nutzung bereitzustellen. Die Implementierung erfolgt durch Integrationstools, die Quantensteuerung und Middleware an bestehende HPC-Orchestrierungssoftware koppeln.

Cloudanbieter. Cloudanbieter ermöglichen typischerweise den Zugang zu Quantencomputing-Ressourcen über eine »Pay-as-you-go«-Philosophie. Die Herausforderungen dabei liegen vor allem in der Multi-Tenant-Infrastruktur, der Verfügbarkeit und der nahtlosen Integration klassischer und quantenbasierter Dienste. Ein Blueprint könnte enthalten:

- APIs und SDKs für Entwickler, um Quantenalgorithmen auf Cloudbasis zu erstellen.
- Eine abstrahierte Hardware-Schicht, die keine spezifischen Fähigkeiten und Kenntnisse seitens der Kunden in der Quantenhardware voraussetzt.
- Sicherheitsprotokolle und Zugriffskontrollmechanismen, um Daten von verschiedenen Cloud-Mandanten zu trennen.

Ein typischer Blueprint für Cloudanbieter würde außerdem auf cloud-native Orchestrierungs- und Ausführungsumgebungen wie z.B. Kubernetes aufsetzen, um Quantenanwendungen in einer hochdynamischen Umgebung auszuführen.

On-Premise-Lösungen in Unternehmensumgebungen. Unternehmen, die Quantencomputing direkt in ihre lokale IT-Infrastruktur (on-premise) integrieren, stehen meist vor anderen Herausforderungen, z. B. der Einbettung in bestehende Netzwerke und der Sicherstellung von Datenschutz- sowie Compliance-Anforderungen. Ein Blueprint könnte Folgendes umfassen:

- Minimalanforderungen an Hardware, um Quantencomputing zukünftig vor Ort zu installieren.
- Standardisierte Schnittstellen zur Anbindung an bestehende Unternehmenssoftware wie ERP- oder CRM-Systeme.
- Sicherheitslösungen, die On-Premise-Erfordernisse wie Firewalls, Datenzugriffsrechte und physische Sicherheit berücksichtigen.

Für den Industrieinsatz konfektionierte Blueprints können dementsprechend darauf ausgelegt werden, dass Unternehmen auf eine vorgefertigte Architektur zugreifen können, die sowohl den Einstieg erleichtert als auch die spätere Skalierung unterstützt.

4.3.3 Verbreitung und Akzeptanz des Software-Stacks mittels Blueprints

Die Verwendung von Blueprints ermöglicht es, die Akzeptanz und den breiten Einsatz des im Leitprojekt entwickelten Quantencomputing Software Stacks erheblich zu fördern, indem zentrale Vorteile realisiert werden. Durch die Bereitstellung vorgefertigter Modelle und vorkonfigurierter Lösungen wird die Komplexität der Entwicklung drastisch reduziert, was nicht nur die benötigte Zeit, sondern auch die Kosten erheblich verringert. Gleichzeitig bietet der Blueprint-Ansatz eine hohe Skalierbarkeit, die es Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Rechenzentren erlaubt, mit einer einfachen Grundkonfiguration zu starten und diese schrittweise an ihre individuellen und wachsenden Anforderungen anzupassen. Darüber hinaus sorgt die Interoperabilität durch definierte Standards und Schnittstellen für eine nahtlose Integration mit bestehenden Systemen, wodurch Kompatibilität und Einsatzmöglichkeiten deutlich erhöht werden. Ein weiterer Vorteil liegt in der Zeitersparnis, da automatisierte Prozesse und Werkzeuge Implementierungszyklen erheblich verkürzen. Insgesamt führt der Einsatz von Blueprints dazu, die Bereitstellung zielgruppenorientierter Instanzen der entwickelten Referenzarchitektur zu demokratisieren, indem Einstiegsbarrieren für Unternehmen reduziert werden und somit Organisationen jeder Größe Zugang zu dieser zukunftsweisenden Technologie erhalten.

4.4 Aktivierung des Ökosystems: Mit einem gemeinsamen Leitgedanken zu einer starken Community

Weitere Kernaspekte in einem Leitprojekt QC Next sind Kommunikation, Wissensintegration, sowie die Positionierung im und die Einbindung von Akteuren des Quantencomputing-Ökosystems. Im vorangegangenen Abschnitt wurde bereits auf die Relevanz der Akzeptanz des entwickelten Quantencomputing Software Stacks eingegangen. Dabei kommt der Community eine zentrale Rolle zu.

Mit »Community« ist hier die Gesamtheit aller Stakeholder, die mit Forschung und Entwicklung entlang des Stacks sowie dessen Nutzung zur Weiterentwicklung desselben beitragen gemeint.

Dies umfasst sämtliche Schichten und Akteure – von den Hardware-Entwicklern bis hin zu den Endanwendern. Die aktive Einbindung letzterer ist dabei essenziell. Interessen, Bedürfnisse und gegenseitige Anforderungen müssen offen kommuniziert werden können. Der Mehrwert einer eng vernetzten Community besteht unter anderem in der Wissensteilung und verminderten Entwicklungsrisiken, ermöglicht z.B. in Form stetiger Kurskorrekturen durch Feedback-Loops. Darüber hinaus können Skaleneffekte generiert werden: Eine Community, deren Produkte und Services kompatibel und aufeinander abgestimmt sind, kann größeren Mehrwert für Endnutzern generieren und somit Akzeptanz und Relevanz gewinnen.

Der Term »Community Building« bezeichnet eine Methode, die Stakeholder einer Branche über verschiedene Kanäle miteinander verbindet, um über Themen zu diskutieren, Ideen auszutauschen zu interagieren und sich gegenseitig zu unterstützen. Gerade in einem jungen und dynamischen Umfeld wie der Quantencomputing Software Entwicklung ist enger und stetiger Austausch aller Beteiligten untereinander unerlässlich, um das Wissen, die Kompetenzen und die Erfahrungen verschiedener Gruppen zusammenzubringen. Eine Stärkung der Verflechtungen innerhalb der Branche trägt dazu bei, Synergien in Form von Kompatibilität entlang der Wertschöpfungskette zu fördern und Silo-Entwicklungen zu vermeiden.

Die Forschung und Entwicklung im Bereich des Quantencomputings ist aktuell durch eine Vielzahl mehr oder weniger isolierter Initiativen geprägt. Um technologische Fortschritte langfristig nutzbar zu machen, ist es notwendig, eine kritische Masse an Akteuren zusammenzuführen und eine übergreifende Referenzarchitektur zu etablieren. Der definierte Software Stack bildet hierfür den zentralen technologischen Bezugspunkt, dessen konzeptionelle Entwicklung und Implementierung als Quasi-Standard für die Quanten-Softwareentwicklung angestrebt wird. Eine der größten Herausforderungen bei der Zusammenführung der Community liegt darin, Akzeptanz und intrinsische Motivation hinsichtlich der Ausgestaltung des Stacks zu fördern, um eine breite und nachhaltige Partizipation sicherzustellen.

Nachhaltige Partizipation setzt voraus, dass die technologischen Entwicklungen nicht nur fachlich exzellent, sondern auch langfristig nutzbar, relevant und interoperabel gestaltet werden. Zudem spielt eine effektive Wissensvermittlung eine entscheidende Rolle, um den Kompetenzaufbau zu beschleunigen und die Nutzung innerhalb der Community zu fördern. Die Zusammenführung der Quantencomputing Software Community basiert auf dem Grundsatz, dass Konsortialpartner sowie weitere interessierte Akteure als Multiplikatoren agieren. Dabei werden drei zentrale Leitgedanken verankert:

1. **Schaffung eines gemeinsamen Verwertungsstrangs:** Durch die Bündelung von Kompetenzen werden Synergien geschaffen, Doppelentwicklungen vermieden und der Fortschritt in der Quanten-Softwareentwicklung gezielt vorangetrieben.
2. **Motivation für Kompatibilität individueller Entwicklungen:** Die Referenzarchitektur bietet im Sinne eines »Setzkastens« den Rahmen, um eine nahtlose Integration unterschiedlicher Komponenten zu ermöglichen.
3. **Technische Umsetzung und Bereitstellung:** Die Referenzarchitektur wird in praxisnahe und zugängliche Softwarelösungen überführt. Eine funktionale, gut dokumentierte Infrastruktur bildet die Grundlage für Transparenz, breite Akzeptanz und langfristige Nutzbarkeit innerhalb der Community.

Insbesondere mit Blick auf die Definition und Bereitstellung von hardwareagnostischen bzw. standardisierten offenen Schnittstellen bedarf es des Bewusstseins, der Akzeptanz und der aktiven Mitwirkung der Community. Um dies zu erreichen, können verschiedene Ansätze verfolgt werden, die durch ein Projektbüro orchestriert zur notwendigen Akzeptanz der QC Next Konzepte führen. Im Folgenden sind einige genannt.

Nationale Ansätze

- Erhöhung der Anzahl an Use Case Partnern im Projekt, die entlang der zu definierenden Schnittstellen, die Ende-zu-Ende Software Werkzeugkette verproben.
- Industrie-Beirat oder alternativ regelmäßige Austauschformate mit dem QUTAC Konsortium, um die Wahrnehmung und Akzeptanz bei den deutschen DAX-Konzernen zu erhöhen.
- Regelmäßige Hackathons unter Industriebeteiligung mit Mini-Referenzimplementierungen.

Europäische Ansätze

- Vernetzung zu IBM Working Groups um mehr Sichtbarkeit zu erzeugen.
- Vernetzung zur Standardisierungsgruppe CEN/CLC/JTC 22 (WG1 Strategic Advisory Group und WG3 Quantencomputing and Simulation). Ggf. auf nationaler Ebene die Erstellung einer DIN-SPEC initiieren.

International

- Als eines der angesehensten gemeinnützigen Normungsgremien der Welt bietet »OASIS Open« Projekten – einschließlich Open-Source-Projekten – einen Weg zur Standardisierung und rechtlichen Genehmigung als Referenz in der internationalen Politik und Beschaffung.

Die Ergebnisse des Projekts sollen nachhaltig in die Quantencomputing-Community eingebracht und breit genutzt werden können.

Durch diese Herangehensweise verbindet das Leitprojekt technologische Exzellenz mit einer breiten Einbindung der Community, um Quantencomputing nachhaltig und zielgerichtet voranzutreiben.

4.4.1 Vorgehen und Maßnahmen

Um eine breite Akzeptanz und Identifikation innerhalb der Community zu fördern, setzt das Projekt auf kontinuierliche Maßnahmen in den Bereichen Zielgruppendefinition, Transparenz, Training und Feedbackmechanismen.

Zielgruppenspezifische Inhalte. Die aktive Einbindung der Community ist von entscheidender Bedeutung, um die Wahrnehmung des Stacks zu steigern und dessen Akzeptanz zu gewährleisten. Aktive Partizipation soll nach Möglichkeit durch geeignete Mechanismen motiviert werden (Badges in Foren, Erwähnung von Beitragenden in Social Media Posts etc.). Die gezielte Definition von Zielgruppen sowie deren Zuordnung zu den funktionalen Schichten des QC Next Proto-Stacks ermöglicht eine strukturierte Einbindung verschiedener Akteursgruppen. Dies erleichtert die gezielte Kollaboration und stärkt insgesamt den Austausch innerhalb der Community.

Zudem ist bei der Etablierung einer lebendigen Community die regelmäßige Bereitstellung relevanter Inhalte essenziell. Wichtig ist dabei, dass Inhalte spezifisch und ausreichend technisch sind. Ziel ist die Einführung neuer Themen und die Diskussion von Ideen. Marketing und »Vendor-Biases« sind zu vermeiden, um die Glaubwürdigkeit und Akzeptanz der Formate nicht zu untergraben.

Transparenz und Kommunikation. Um die Projektidee nachhaltig in der Community zu verankern, wird ein kohärentes Erscheinungsbild entwickelt und durch gezielte Kommunikationsmaßnahmen begleitet. Bestehende Formate der Konsortialpartner werden geöffnet, um eine breitere Beteiligung zu ermöglichen. Ziel soll die übergeordnete Zusammenführung der Community sein, um die benötigte kritische Masse zu erreichen, die Community enger zusammenbringen und den fachlichen Austausch zu fördern. Dazu beitragen kann außerdem eine Zusammenlegung inhaltlich ähnlicher Formate und deren zeitlicher Koordinierung.

Neue Formate sollen nur insoweit geschaffen werden, wie sie echte Innovation mitbringen oder bestehende Lücken füllen, da sie ansonsten zu einer weiteren Fragmentierung der Community beitragen könnten. Ergänzend kann die Bereitstellung einer zentralen Informations- und Knowledge-Plattform erwogen werden, die einen umfassenden Überblick über aktuelle Aktivitäten der Community bietet.

Training und Multiplikation. Zur Förderung von Akzeptanz und Nutzung des QC-Software Stacks werden für die beiden Zielgruppen – Endnutzer und Entwickler – maßgeschneiderte Schulungsformate zum Stack bereitgestellt. So werden Akteure mit dem Konzept des Stacks sowie mit den für sie relevanten Komponenten und Schnittstellen vertraut gemacht (»Onboarding«).

Dazu gehören die Erstellung und Bereitstellung von technischen Dokumentationen, Benutzerleitfäden, Tutorials und Schulungsangeboten, um eine effiziente Nutzung und Weiterentwicklung des Stacks zu ermöglichen.

Partizipation und Feedbackintegration. Ein wesentliches Element ist die frühzeitige Einbindung der Nutzenden durch gezielte Feedbackmechanismen. Rückmeldungen zur technischen und nutzungsbezogenen Gestaltung können über Kommentarfunktionen direkt in Git, in einem Developer-Forum sowie bei systematischen Nutzerbefragungen erfasst und aktiv in die Ausgestaltung des Proto-Stacks integriert werden.

Durch dieses Vorgehen kann es gelingen, die Quantencomputing-Software-Community zum Thema Quantencomputing-Software Stack zusammenzuführen und diesen als Referenzarchitektur nachhaltig zu festigen. Die angestrebte enge Verzahnung von technischer Innovation, kollaborativer Entwicklung und aktivem Wissenstransfer schafft die Grundlage für eine zukunfts-fähige und international wettbewerbsfähige Quantencomputing-Softwarelandschaft.

Zur Koordination und Umsetzung der oben aufgeführten Punkte empfiehlt sich die Etablierung eines Projektbüros. Dieses sorgt für ein geschlossenes Auftreten nach außen, fungiert als zentrale Anlaufstelle für Quantencomputing Software Themen und schafft so zusätzliche Sichtbarkeit für das Vorhaben.

Zudem sind Ressort-übergreifende Abstimmungen und Kooperationen auf Fördergeberseite wünschenswert. Konkret ist damit die interministerielle Verknüpfung von Aktivitäten der zuständigen Ministerien gemeint.

5 Transferstrategien: Vom Konzept in die Umsetzung

Das Innovationskonzept QC Next schlägt die Entwicklung einer offenen, interoperablen und zukunftsfähigen Referenzarchitektur für Quantencomputing-Software vor. Damit leistet es einen zentralen Beitrag zur Stärkung der Quantentechnologien in Deutschland und Europa. Die vorgeschlagene Architektur soll technologische Souveränität stärken, Abhängigkeiten von nicht-europäischen Lösungen verringern und strategische Märkte im Bereich Quantencomputing erschließen.

Gleichzeitig formuliert das Innovationskonzept QC Next das Ziel, mit einem Leitprojekt eine breite Einbindung und Akzeptanz innerhalb der Quantencomputing- und Quantencommunity zu erreichen. Durch die enge Zusammenarbeit von Wissenschaft, Industrie und Politik entsteht eine nachhaltige Innovationsplattform, die den Technologietransfer fördert, die wirtschaftliche Nutzung von Quantencomputing-Technologien in Deutschland und Europa beschleunigt und strategischen Mehrwert schafft.

5.1 Herausforderungen der Governance eines Leitprojekts

Die Umsetzung des Innovationskonzepts QC Next in einem Leitprojekt erfordert eine leistungsfähige Governance, die sowohl eine strategische Steuerung als auch eine agile, operative Zusammenarbeit ermöglicht. Die Governance muss koordinieren, Prioritäten setzen, Ressourcen effizient verteilen und den Wissenstransfer sicherstellen. Dabei muss sie flexibel genug bleiben, um auf neue Entwicklungen und wissenschaftliche Durchbrüche zu reagieren. Dabei sind folgende Aspekte essenziell:

- **Strategische Steuerung:** Ein dediziertes Projektmanagementteam, bestehend aus Vertretern aller eingebundenen Partner sowie des Fördergebers, gestaltet und steuert die Umsetzung der strategischen Ziele. Es gewährleistet eine effiziente Nutzung der Ressourcen und sorgt für eine klare Rollen- und Zuständigkeitsverteilung innerhalb des Projekts.
- **Prozessuale Steuerung:** Klare Kommunikations- und Entscheidungsprozesse fördern den Wissenstransfer und eine kontinuierliche Weiterentwicklung. Durch den Einsatz agiler Methoden und digitaler Tools wird die Zusammenarbeit innerhalb des Projekts unterstützt und eine schnelle Anpassung an neue Herausforderungen ermöglicht.
- **Normative Rahmenbedingungen:** Transparenz, offene Kommunikation und Zugänglichkeit sind essenzielle Prinzipien für eine vertrauensvolle Zusammenarbeit. Sie erhöhen die Akzeptanz für die entwickelte Architektur und schaffen ein gemeinsames Verständnis unter den Projektbeteiligten.
- **Community-Building:** Ein nachhaltiger Projekterfolg erfordert die Vernetzung der relevanten Akteure über das Konsortium hinaus. Durch Workshops, offene Standards und Austauschformate wird die Interoperabilität zwischen verschiedenen Technologien und Organisationen gefördert, wodurch Synergien entstehen.

5.2 Organisationsstruktur eines Leitprojekts

Vor dem dargestellten Hintergrund der Herausforderungen in der Governance für ein Leitprojekt QC Next wird eine Struktur empfohlen, die klare Führungsprinzipien mit flexibler, interdisziplinärer und interorganisationaler Zusammenarbeit verbindet. Abbildung 4 stellt die diese Struktur dar.

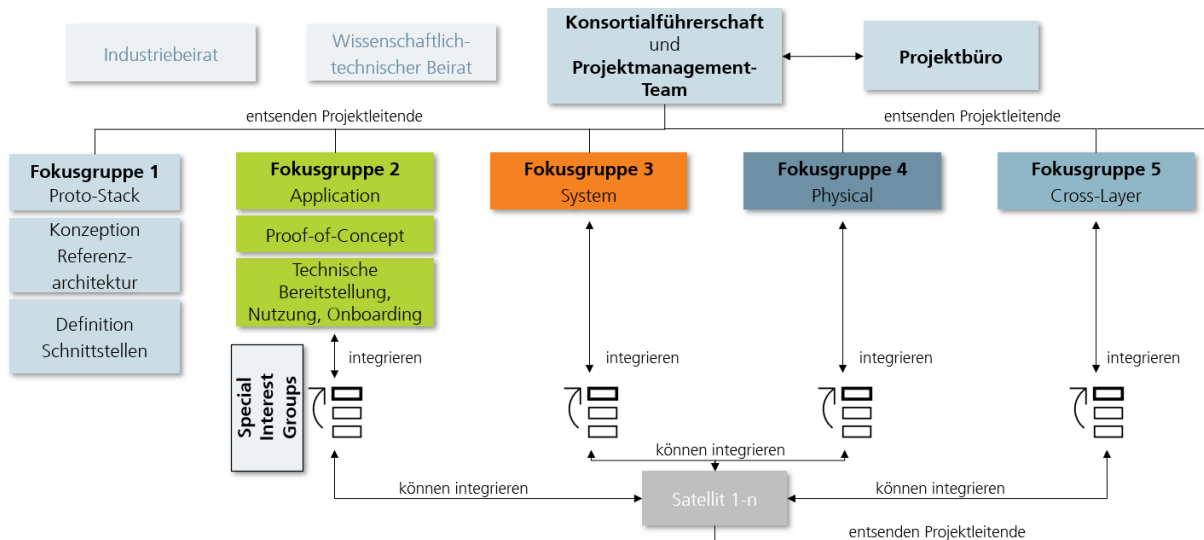


Abbildung 4: Vorschlag für die Governance-Struktur im Leitprojekt QC Next.

Zentrale Steuerungsebene. Ein Projektmanagement-Team bildet das zentrale Steuerungsgremium. Es setzt sich aus den leitenden Akteuren aller Fokusgruppen und Satellitenprojekte zusammen. Die Konsortialführerschaft übernimmt dabei eine moderierende Rolle: sie bringt verschiedene Perspektiven zusammen, strukturiert Diskussionen, sie trifft fundierte Entscheidungen im Einklang mit den strategischen Zielen und repräsentiert das Leitprojekt in seiner gesamtheitlichen Außenkommunikation.

Erwogen werden kann, einen wissenschaftlich-technischen Beirat sowie einen Industriebeirat zu bilden. Diese begleiten das Projekt beratend. Die Beiräte können Impulse geben, den Forschungsfortschritt reflektieren und das Erreichte spiegeln, um sicherzustellen, dass technologische und anwendungsorientierte Meilensteine erreicht werden.

Fokusgruppen und Special-Interest-Groups für zentrale Entwicklungsthemen. Die Fokusgruppen sind als Organisationselement entlang des in diesem Innovationskonzept vorgestellten Proto-Stacks organisiert. Sie bilden dessen Bestandteile vollständig ab. Unter kollegialer Führung der Konsortialpartner arbeiten die Fokusgruppen an zentralen technischen, wissenschaftlichen und anwendungsorientierten Fragestellungen. Dabei gliedern sich die Fokusgruppen in folgende Entwicklungsbereiche:

- Fokusgruppe 1: Referenzarchitektur QC Software-Stack
- Fokusgruppe 2: Application-Layer
- Fokusgruppe 3: System-Layer
- Fokusgruppe 4: Physical-Layer
- Fokusgruppe 5: Cross-Layer Considerations

Die Special Interest Groups sind aus den Fokusgruppen heraus flexibel definierbar und ermöglichen die spezifische Vertiefung ausgewählter Themen für begrenzte Zeit. Eine starke Vernetzung gewährleistet die reibungslose Integration der Arbeitsergebnisse: Nach oben sorgt die Personalunion von Fokusgruppenleitung und Vertretung im Projektmanagement-Team für die strategische Zusammenführung der Bestandteile. Nach unten sorgen die Fokusgruppen für die Gestaltung von Special Interest Groups und die Integration von deren Ergebnissen in die Gesamtarchitektur. Eine enge Abstimmung und ein synergetisches Zusammenwirken zwischen spezialisierten und übergreifenden Ebenen werden auf diese Weise unterstützt.

Projektbüro. Das Projektbüro unterstützt die effiziente Umsetzung des Leitprojekts als organisatorische und koordinierende Einheit. Es ist keine reine Verwaltungsstelle, sondern eine zentrale Schnittstelle für Wissenstransfer, Netzwerkarbeit und Kommunikation nach innen und außen. In enger Abstimmung mit Konsortialführerschaft und Projektmanagement-Team sorgt es für einen strukturierten Informationsfluss zwischen Fokusgruppen und Satellitenprojekten, koordiniert Abläufe und unterstützt die Integration der Arbeitsergebnisse. Als Ansprechpartner für die leitenden Akteure erleichtert es die Zusammenarbeit und fördert die strategische Steuerung. Zudem stärkt es die Außenkommunikation, indem es dazu beiträgt, die Projekterfolge sichtbar zu machen und den Dialog mit Community und Politik unterstützt. In diesem Zusammenhang wird es auch maßgeblich beim Veranstaltungsmanagement involviert sein.

Spezialisierte Satellitenprojekte. Satellitenprojekte sind eigenständig geförderte Vorhaben, die thematisch an den Zielen und Bedarfen des Leitprojekts ausgerichtet sind und ihre Ergebnisse in dessen Gesamtstruktur einbringen. Sie arbeiten unabhängig, sind jedoch dem Leitprojekt verpflichtet und tragen gezielt zur Weiterentwicklung seiner Inhalte bei. Zur Sicherstellung der Anbindung entsenden Satellitenprojekte verpflichtend eine leitende Person in das Projektmanagement-Team und halten Kontakt zum Projektbüro. Auf diese Weise wird die Integration ihrer Arbeitsergebnisse gewährleistet. Zusätzlich besteht die Möglichkeit, dass sich Akteure aus den Satellitenprojekten bei Interesse über die Special Interest Groups in spezifische fachliche Entwicklungen einbringen und Synergiepotenziale mit den Fokusgruppen des Leitprojekts ausschöpfen.

Erfolgsmessung. Empfohlen wird, neben der üblichen Definition von Meilensteinen, eine erweiterte Orientierung an qualitativen und nutzerzentrierten Key Performance Indicators (KPI) zu entwickeln. Diese sollten über rein technische Fortschrittsmessungen hinausgehen und Aspekte wie Zugänglichkeit für und Verwendung durch Entwickler und Endnutzer, Erklärbarkeit und Verständlichkeit der Architektur sowie die Integrationsfähigkeit in bestehende Systeme und von bestehenden Elementen berücksichtigen. Im Fall von Open Source Komponenten könnten dies zum Beispiel Git-basierte Indikatoren sein (Anzahl an Sternen, Kontributoren etc.). Ebenso sind die zuverlässige Bereitstellung und nachhaltige Wartung des Quantencomputing Software Stacks als Wissensprodukt zentrale Faktoren. Zudem sollte die Realisierung eines Co-Design-Ansatzes in der Entwicklung als messbares Kriterium etabliert werden, um eine enge Verzahnung zwischen Hardware, Software und Anwendungen sicherzustellen.

6 Abschließende Bewertung

Quantencomputing hat das Potenzial eine künftige Schlüsseltechnologie zu werden. Im Vergleich zu den USA, wo bereits hohe Investitionen aus der Wirtschaft getätigt werden, allen voran von Konzernen wie Google, Amazon, IBM etc., hinken Deutschland und die EU im Wettlauf um diese Schlüsseltechnologie hinterher. Die Aussage von IBM, einem der führenden Hardware-Herstellern, schon innerhalb der nächsten zwei Jahre erste Quantenvorteile bei einigen speziellen Industrieproblemen zu demonstrieren, zeigt das Momentum, mit dem die Quantencomputing Branche momentan konfrontiert ist.

Henna Virkkunen, Vizepräsidentin der Europäischen Kommission für Technische Souveränität, Sicherheit und Demokratie, unterstrich in ihrer Antrittsrede im November 2024 die entscheidende Bedeutung von Quantentechnologien für die Souveränität, Wettbewerbsfähigkeit und Verteidigungsfähigkeit der EU. Europäische Forscher haben das notwendige Talent, es bedarf nun aber eines umfassenderen gemeinsamen Ansatzes, so Virkkunen.

Um das Potenzial von Quantentechnologien voll ausschöpfen zu können, muss neben der zugrundeliegenden Hardware auch die notwendige digitale Infrastruktur, in diesem Fall der Software Stack, entwickelt und bereitgestellt werden. Dazu rief auch das Quantum Industry Consortium (QulC) in seinem jüngsten Bericht auf.¹⁴

Der vorliegende Bericht legt den aktuellen Stand des deutschen Quantencomputing Software Ökosystems dar. Darüber hinaus zeigt das in diesem Bericht enthaltene Innovationskonzept notwendige Schritte zur Schaffung einer ganzheitlichen Referenzarchitektur auf. Damit nimmt dieser Report den ersten Schritt auf dem Weg zu dem geforderten umfassenden gemeinsamen Ansatz. Er zeigt auf, wie bestehende Kompetenzen und Ressourcen koordiniert und gebündelt werden können, um eine notwendige kritische Masse zu erreichen.

In verschiedenen Expertenreports^{15,16} wurde auf die Notwendigkeit wissenschaftlicher und innovativer Exzellenz sowie die Relevanz von Forschungs- und Innovationsinitiativen für die industrielle Wettbewerbsfähigkeit verwiesen. Außerdem wurde der Wert eines starken europäischen F&E-Ökosystems aus Institutionen, Geldgebern, Infrastrukturen, Innovatoren und Unternehmern hervorgehoben, um bahnbrechende Forschung und Innovation auf globale Märkte zu übertragen.

Das Anwendungspotenzial von Quantencomputing ist stark von der zugrundeliegenden Hardware abhängig. Komplementär dazu muss aber auch die notwendige Software-Infrastruktur bereit sein, um Quantenvorteile für Endnutzer materialisieren zu können. Die Führung in diesen Bereichen beruht auf wissenschaftlicher Exzellenz in Verbindung mit der Fähigkeit, starke integrierte Softwareplattformen zu schaffen und eine bedeutende, skalierbare und effiziente Recheninfrastruktur aufzubauen.¹⁷ Bereits bestehenden Verflechtungen zwischen Akteuren und Akteurinnen sollen gestärkt werden, um die Erfüllung der Anforderungen und die Überwindung bestehender Silos zu ermöglichen.

¹⁴ [Recommendations from the European Quantum Industry Consortium \(QulC\) for the EU Quantum Strategy](#)

¹⁵ [Align, act, accelerate - Publications Office of the EU](#)

¹⁶ [Gutachten zu Forschung, Innovation und Technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2025](#)

¹⁷ [Artificial intelligence and quantum computing white paper](#)

Dieser Ansatz wäre ein starker Impuls in Richtung Realisierung und Kommerzialisierung von Konzepten und Anwendungen im Bereich Quantencomputing in Deutschland und Europa. Ein Aufschub oder Mangel an Investitionen in diese künftige Schlüsseltechnologie würde hingegen das Risiko, in diesem internationalen Wettlauf weiter abgehängt zu werden, steigern und die Stellung außereuropäischer Anbieter zementieren. Neue Abhängigkeiten und die Gefährdung der deutschen und europäischen Souveränität wären die Folge. Es bedarf daher eines entschlossenen Vorgehens, um dem entgegenzuwirken.

7 Referenzen

- [1] J. Preskill, „Quantum Computing in the NISQ era and beyond,” *Quantum*, Bd. 2, p. 79, 2018.
- [2] A. Peruzzo, J. McClean, P. Shadbolt, M.-H. Yung, X.-Q. Zhou, P. J. Love, A. Aspuru-Guzik und J. L. O'Brien, „A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor,” *Nature communications*, Bd. 5, p. 4213, 2014.
- [3] J. R. McClean, M. E. Kimchi-Schwartz, J. Carter und W. A. Jong, „Hybrid quantum-classical hierarchy for mitigation of decoherence and determination of excited states,” *Physical Review A*, Bd. 95, Nr. 4, 2017.
- [4] A. Kandala, A. Mezzacapo, K. Temme, M. Takita, M. Brink, J. M. Chow und J. M. Gambetta, „Hardware-efficient variational quantum eigensolver for small molecules and quantum magnets,” *Nature*, Bd. 549, Nr. 7671, p. 242–246, 2017.
- [5] Y. Nam, J.-S. Chen, N. C. Pienti, K. Wright, C. Delaney, D. Maslov, K. R. Brown, S. Allen, J. M. Amini, J. Apisdorf, K. M. Beck, A. Blinov, V. Chaplin, M. Chmielewski, C. Collins, S. Debnath, K. M. Hudek, A. M. Ducore, M. Keesan, S. M. Kreikemeier, J. Mizrahi, P. Solomon, M. Williams, J. D. Wong-Campos, D. Moehring, C. Monroe und J. Kim, „Ground-state energy estimation of the water molecule on a trapped-ion quantum computer,” *npj Quantum Information*, Bd. 6, Nr. 1, 2020.
- [6] J. Romero, R. Babbush, J. R. McClean, C. Hempel, P. J. Love und A. Aspuru-Guzik, „Strategies for quantum computing molecular energies using the unitary coupled cluster ansatz,” *Quantum Science and Technology*, Bd. 4, Nr. 1, p. 014008, 2019.
- [7] I. G. Ryabinkin, T.-C. Yen, S. N. Genin und A. F. Izmaylov, „Qubit Coupled Cluster Method: A Systematic Approach to Quantum Chemistry on a Quantum Computer,” *Journal of chemical theory and computation*, Bd. 14, Nr. 12, p. 6317–6326, 2018.
- [8] H. Liu, G. H. Low, D. S. Steiger, T. Häner, M. Reiher und M. Troyer, „Prospects of quantum computing for molecular sciences,” *Materials Theory*, Bd. 6, Nr. 1, 2022.
- [9] D. Bluvstein, S. J. Evered, A. A. Geim, S. H. Li, H. Zhou, T. Manovitz, S. Ebadi, M. Cain, M. Kalinowski, D. Hangleiter, J. P. B. Ataides, N. Maskara, I. Cong, X. Gao, P. S. Rodriguez, T. Karolyshyn, G. Semeghini, M. J. Gullans, M. Greiner, V. Vuletić und M. D. Lukin, „Logical quantum processor based on reconfigurable atom arrays,” *Nature*, 2023.
- [10] *Xanadu closes \$100M USD Series C to accelerate development of fault-tolerant quantum computers*, Toronto, 2022.
- [11] *QuEra Computing Releases a Groundbreaking Roadmap for Advanced Error-Corrected Quantum Computers, Pioneering the Next Frontier in Quantum Innovation*, Boston, Massachusetts, 2024.
- [12] N. S. Blunt, L. Caune, R. Izsák, E. T. Campbell und N. Holzmann, „Statistical Phase Estimation and Error Mitigation on a Superconducting Quantum Processor,” *PRX Quantum*, Bd. 4, Nr. 4, 2023.
- [13] P. W. Shor, „Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring,” *Proceedings 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, 1994.
- [14] L. K. Grover, „A fast quantum mechanical algorithm for database search,” *STOC '96: Proceedings of the twenty-eighth annual ACM symposium on Theory of Computing*, p. 212–219, 1996.
- [15] G. H. Low und I. L. Chuang, „Hamiltonian Simulation by Qubitization,” *Quantum*, Bd. 3, p. 163, 2019.

- [16] K. Sugisaki, C. Sakai, K. Toyota, K. Sato, D. Shiomi und T. Takui, „Quantum Algorithm for Full Configuration Interaction Calculations without Controlled Time Evolutions,” *The journal of physical chemistry letters*, Bd. 12, Nr. 45, p. 11085–11089, 2021.
- [17] Linnhoff-Popien, Claudia. „PlanQK—Quantum Computing Meets Artificial Intelligence: How to make an ambitious idea reality.” *Digitale Welt* 4.2 (2020): 28-35.
- [18] Osaba, Eneko et al. „Hybrid Quantum Solvers in Production: how to succeed in the NISQ era?” *ArXiv abs/2401.10302* (2024): n. pag.
- [19] Javadi-Abhari, Ali, et al. „Quantum Computing with Qiskit”. arXiv [Quant-Ph], 2024, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.08810>. arXiv
- [20] Seidel, Raphael, et al. „Qrisp: A framework for compilable high-level programming of gate-based quantum computers.” arXiv preprint arXiv:2406.14792 (2024).
- [21] M. Schulz, L. Schulz, M. Ruefenacht, and R. Wille. „Towards the Munich Quantum Software Stack: Enabling Efficient Access and Tool Support for Quantum Computers.” Poster Proc. IEEE QCE. 2023.
- [22] F. Chong et al. „Superstaq: Deep Optimization of Quantum Programs.” Proc. IEEE QCE. 2023.

8 Anhang

A. Zu den federführenden Institutionen

Das Fraunhofer IAO, mit dem Team Quantencomputing unter Leitung von Dr. Tutschku im Forschungsbereich Digital Business unter Leitung von Dr. Renner nimmt, durch seine Rolle im »Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg« (KQCBW), in der »Initiative QuantumBW« sowie durch das Anbieten des ersten außeruniversitären Quantencomputing Schulungsprogramms in Baden-Württemberg bereits eine zentrale Rolle beim Ausbau und der Stärkung des Quantencomputing Ökosystems ein. In Projekten im Bereich Künstliche Intelligenz wie beispielsweise »SmartAIwork« oder »KI Ultra« wurden für den Bereich des klassischen Computing mit Künstlicher Intelligenz bereits Framework- und Methodenentwicklungen geleistet und mit Industriepartnern pilotiert und evaluiert.

Am Karlsruhe Institute of Technology KIT beschäftigt sich die Forschungsgruppe von Prof. Dr. Schaefer mit unterschiedlichen Fragestellungen im Bereich des Quantum Software Engineerings. Seit 2020 arbeitet die Gruppe intensiv an der Verbesserung der Anwendbarkeit von Quantencomputing, insbesondere an der Entwicklung von Benchmarking Werkzeugen (BMBF-Projekt QuBRA) und an einem hybriden quanten-algorithmischen Baukasten (BMWK-Projekt ProvideQ). Die ProvideQ Toolbox kombiniert klassische mathematische Optimierungstechniken mit neuartigen Quantenalgorithmen und ermöglicht es Nutzern, hybride Quanten-Lösungsverfahren mit Hilfe dieses Baukastens für konkrete Anwendungsfälle einzusetzen.

Kipu Quantum ist ein deutsches Startup-Unternehmen welches Software-Lösungen für Quantencomputer (QC) entwickelt. Die Firma wurde im Jahre 2021 von den drei Geschäftsführern Dr. Daniel Volz (CEO), Prof. Enrique Solano (Chief Visionary Officer) und Dr. Tobias Grab (Chief Strategy Officer) gegründet, um Prof. Solanos Forschungsergebnisse zu quanten-algorithmischen Kompressionsverfahren zu kommerzialisieren. Auf diese Weise sollen bereits innerhalb der nächsten Jahre Lösungen angeboten werden können, welche dem Endanwender einen echten Nutzwert im industriellen Einsatz bieten. Das Team von Kipu Quantum kann auf 25 Jahre Forschungserfahrung im Bereich Quantenalgorithmen und Quantencomputern zurückgreifen. Das kombinierte Wissen aus Hardware und komprimierte Algorithmen erlaubt es Kipu Quantum Lösungen anzubieten, die auf die spezifische Anwendung sowie auf bereits existierende Quantenhardware maßgeschneidert sind. Kipu Quantum gehört zu den führenden Anbietern im Bereich von digitalen, analogen und digital-analog Quantenalgorithmen. Kipus Algorithmen finden ihre Anwendung in verschiedensten Industriesektoren, wie bei Pharma- und Chemieherstellern, aber auch dem produzierenden Gewerbe (Automobil, Luft- und Raumfahrt, etc.), sowie dem Bankwesen und der Versicherungswirtschaft. Hierbei wird ein starkes Augenmerk u.a. auf solche Anwendungsfälle gelegt, denen Optimierungsaufgaben zugrunde liegen.

Durch seine zahlreichen Projekte und Netzwerkaktivitäten kann der Verbund auf einen breiten Pool an möglichen Partner aus verschiedenen Branchen setzen. Somit ist guter Zugang zu und eine frühzeitige Einbindung von weiteren Partnern für das im Folgenden zu planende Leitprojekt gewährleistet.