

Künstliche Intelligenz als Treiber für volkswirtschaftlich relevante Ökosysteme

Technologieprogramm des Bundesministeriums
für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)

QUANTENCOMPUTING – MARKT, ZUGANG, PERSPEKTIVEN

Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm „Künstliche Intelligenz
als Treiber für volkswirtschaftlich relevante Ökosysteme“ (KI-Innovationswettbewerb)

IMPRESSUM

Die Studie „Quantencomputing – Markt, Zugang, Perspektiven“ wurde durch die Begleitforschung zum KI-Innovationswettbewerb im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) erstellt und im April 2024 veröffentlicht.

Herausgeber

Technologieprogramm KI-Innovationswettbewerb
des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)
Begleitforschung
iit-Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
Dr. Steffen Wischmann
Steinplatz 1
10623 Berlin
wischmann@iit-berlin.de

Autoren

Benedict Wenzel
Dr. Christoph Grzeschik

Gestaltung

LHLK Agentur für Kommunikation GmbH
Hauptstraße 28
10827 Berlin
KI-Innovationswettbewerb@lhlk.de

Stand

März 2024

EXECUTIVE SUMMARY

Das vorliegende Update zur Studie „Quantencomputing – Software für innovative und zukunfts-fähige Anwendungen; Potenziale, Entwicklung, Zugang“, die 2022 im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des KI-Innovationswettbewerbs erschienen ist, gibt einen aktualisierten Blick auf das Wertschöpfungspotenzial und Marktgeschehen bezüglich anwendungsorientiertem Quantencomputing (Finsterhölzl et al. 2022). Diskutiert werden Anbietermarkt, Zugänge sowie aktuelle Ansätze und Perspektiven für die Nutzung der Technologie. Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über wichtige aktuelle wirtschaftliche Kennzahlen und Prognosen bezüglich der Technologie Quantencomputing, die für das Studien-Update via Desk Research erhoben wurden.¹

	Marktvolumen für Quantencomputing-Technologien (in Euro)		Wertschöpfungspotenzial durch den Einsatz von Quantencomputing* (in Euro)		Kumulierte staatliche Investitionen in Quantentechnologien (in Euro)	Private Investitionen (in Euro)	Start-up-Anzahl 2023
DEUTSCHLAND	n. a.	n. a.	0,6 Mrd. (2030)	10,2 Mrd. (2040)	7,4 Mrd.	0,03 Mrd. (2022) 0,02 Mrd. (2023)	19
EUROPA	0,8 Mrd. (2030)	10 Mrd. (2040)	n. a.	n. a.	17,4 Mrd.	0,6 Mrd. (2022) 0,6 Mrd. (2023)**	45
WELTWEIT	6,5 Mrd. (2030)	83 Mrd. (2040)	8,8 Mrd. (2030)	150,4 Mrd. (2040)	46 Mrd.	1,6 Mrd. (2022) 0,8 Mrd. (2023)	168

* Dargestellt sind Best-Case-Szenarios für das Wertschöpfungspotenzial.

** Die Zahlen beziehen sich auf die EMEA-Region (Europe, Middle East, Africa).

Aktuelle Entwicklungen der Technologie

Quantencomputing (QC) erfährt nach wie vor 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. Auch steigt die Zahl an Anwendungsfällen weiter, für die Proof-of-Concepts hinsichtlich QC erbracht werden, obgleich wirtschaftlich relevante Überlegenheit von QC gegenüber klassischem Computing bisher noch nicht praktisch gezeigt werden konnte. Nach wie vor versprechen die technologischen Fortschritte, insbesondere bei den Plattformen basierend auf neutralen Atomen, supraleitender Schaltkreise und Ionenfallen, ein hohes Wertschöpfungspotenzial, insbesondere für die Branchen Chemie, Logistik, Produktion und Finanzwesen.

Marktprognosen

Die Prognosen zur Entwicklung des weltweiten Marktvolumens für QC-Technologien und daraus erzielbarer Wertschöpfung werden mit sehr breiten Spannen beziffert (bspw. zwischen acht bis 83 Mrd. Euro Marktvolumen bis 2040 (McKinsey & Company 2023)). Hier spiegeln sich die großen Unsicherheiten bezüglich der zu erwartenden technologischen Fortschritte wider. Eine

¹ Die Quellen werden im Fließtext referenziert.

verlässliche Aussage über die mittel- bis langfristige Entwicklung kann zum jetzigen Zeitpunkt nicht getroffen werden. Im Vergleich zum maximal prognostizierten Wert von 7,6 Mrd. Euro aus dem Jahr 2019 fällt die Prognose für das Marktvolumen im Jahr 2030 um rund 17,6 Prozent auf 6,5 Mrd. Euro weltweit.

Die Prognosen zum weltweiten Wertschöpfungspotenzial 2030 belaufen sich auf 8,8 Mrd. Euro, wobei für Deutschland eine Wertschöpfung von ca. 600 Mio. Euro prognostiziert wird. Bis 2040 wird dann ein Anstieg weltweit auf bis zu 150 Mrd. Euro und deutschlandweit auf bis zu zehn Mrd. Euro prognostiziert.

Staatliche und private Investitionen

Investitionen durch private Geldgeber fokussieren sich weltweit noch immer in erster Linie auf die Hardwareentwicklung. Diese ist nach wie vor sehr kostenintensiv und benötigt daher hohe Investitionen, ein Indiz dafür, dass auch weiterhin hohe Forschungs- und Entwicklungsaufwände nötig sind, um QC-Technologie wirtschaftlich nutzbar zu machen. In Deutschland werden momentane Entwicklungen von Hard- und Software 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 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 und 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.

Start-ups

Die Zahl der Start-ups zur Entwicklung von Anwendungssoftware stieg in den letzten Jahren stetig, wobei hardwarespezifische Systemsoftware vorrangig von den Hardwareentwicklern bereitgestellt wird. Entfielen im Zeitraum von 2002 bis 2018 weltweit noch rund 58 Prozent der kumulierten Gründungen auf software- oder service-zentrierte Start-ups und 42 Prozent auf hardware- bzw. komponenten-fokussierte Start-ups, waren es im Zeitraum 2018 bis 2022 rund 74 Prozent Start-ups mit Fokus auf Software und Services und 26 Prozent mit Fokus auf Hardware und Komponenten. Von weltweit über 150 Start-ups fokussiert sich dabei etwa ein Drittel auf die Entwicklung von Systemsoftware und zwei Drittel auf die Entwicklung von Anwendungssoftware. Deutschland belegt dabei aktuell mit knapp 20 Start-ups im Jahr 2023 Platz drei im internationalen Vergleich, hinter den USA und Kanada. Insgesamt hat sich die Rate an QC-Start-up-Gründungen leicht verlangsamt. Sollte in Zukunft hinreichend leistungsfähige QC-Hardware verfügbar werden, so ist davon auszugehen, dass ein hoher Anteil der Wertschöpfung im Bereich der Entwicklung von Anwendungssoftware liegen wird, analog zur Entwicklung im klassischen Computing. Private Investitionen in deutsche QC-Start-ups fielen bisher vernachlässigbar klein aus gegenüber den staatlichen Fördersummen. Weltweit halbierten sich die Venture-Capital-Investitionen in QC-Start-ups von 1,6 Mrd. Euro 2022 auf 0,8 Mrd. Euro 2023. Von dem starken Rückgang war mit 80 Prozent vor allem die US-amerikanische Start-up-Landschaft betroffen.

INHALT

EXECUTIVE SUMMARY	3
Aktuelle Entwicklungen der Technologie	3
Marktprognosen	3
Staatliche und private Investitionen	4
Start-ups	4
1 EINLEITUNG	7
2 MARKT	9
2.1 Volumen	9
2.2 Wertschöpfungspotenzial	11
2.3 Private Investitionen und Unternehmensgründungen	13
2.4 Fördermittel im internationalen Vergleich	16
3 ZUGANG	19
3.1 Anbieterlandschaft	19
3.2 Regionale Initiativen und Anlaufstellen	22
4 PERSPEKTIVEN	26
Software-Hardware-Co-Design	27
Variationelle Quantenalgorithmen	28
HPC-Integration	28
Standardisierung	29
LITERATURVERZEICHNIS	31

1 EINLEITUNG

1 EINLEITUNG

Quantencomputer gehören im Hinblick auf ihr wirtschaftliches Potenzial zu den vielversprechendsten Technologien des 21. Jahrhunderts, wenngleich sie derzeit noch nicht leistungsfähig genug sind, um einen wirtschaftlich relevanten Mehrwert zu bieten. 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).

Im März 2022 erschien im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) im Rahmen des KI-Innovationswettbewerbs die Studie „Quantencomputing – Software für innovative und zukunftsfähige Anwendungen; Potenziale, Entwicklung, Zugang“. In dieser Studie wurden u. a. das technische und wirtschaftliche Potenzial von QC-Software anhand verschiedener Anwendungsfälle aus dem Projekt „PlanQK – Plattform und Ökosystem für Quantenapplikationen“ illustriert und die bestehenden Zugänge zu QC-Ressourcen auf dem Markt thematisiert. Prognostiziert wurde hierbei für Deutschland eine ab 2050 jährliche Wertschöpfung von bis zu 53,1 Mrd. Euro durch Endanwendungen, basierend auf Analysen der Boston

Consulting Group aus dem Jahr 2019. Seitdem gab es zahlreiche technologische Fortschritte auf Hardware- und Softwareebene, die auch Auswirkungen auf das Wertversprechen „Quantencomputing“ und die damit verbundenen Markterwartungen haben.

Das vorliegende Update zu dieser Studie bietet einen aktuellen Einblick in die Entwicklung des Wertschöpfungspotenzials und des Marktgeschehens bezüglich anwendungsorientiertem QC in Kapitel 2. Dabei werden Unternehmensgründungen und private Investitionen betrachtet und staatliche Fördermittel im internationalen Vergleich dargestellt. Ebenso werden Initiativen und regionale Netzwerke als Kompetenzträger und Anlaufstellen für Interessierte aufgelistet. Kapitel 3 bietet einen Überblick, welche Zugangsmöglichkeiten es für Entwicklerinnen und Entwickler von Anwendungssoftware gibt. Abschließend wird in Kapitel 4 ein Ausblick auf die sich aktuell bietenden Perspektiven bei der wirtschaftlichen Nutzbarmachung der Technologie QC gegeben.

Die Autoren bedanken sich herzlich bei Dr. Sophia Helmrich, Hanna Kolkmann und Dr. Johann Schmidt vom DLR Projektträger für die wertvollen Kommentare und Diskussion.

2 MARKT

2 MARKT

2.1 Volumen

2022 lag das weltweite Marktvolumen für QC (Hardware, Software und Services) zwischen ca. 635 und 719 Mio. Euro (Fortune Business Insights; Vantage Market Research).² Die Beratungsgesellschaft McKinsey & Company prognostizierte in ihrem Quantum Technology Monitor 2023 eine Spanne für das weltweite QC-Marktvolumen 2040 von acht bis 83 Mrd. Euro (McKinsey & Company 2023). Ausgehend vom Mittelwert des Marktvolumens 2022 (0,7 Mrd. Euro), lässt sich damit auch die Marktentwicklung bis 2030 für zwei Fälle abschätzen: Der Base Case ist gegeben durch eine jährliche Wachstumsrate von 15,6 Prozent. Der Upside Case ist gegeben durch eine jährliche Wachstumsrate von 32,6 Prozent (siehe Abbildung 1). Für das Jahr 2030 wäre dann mit einem Marktvolumen von 2,2 Mrd. Euro im Base Case und von 6,5 Mrd. Euro im Upside Case zu rechnen.

Im Vergleich zum prognostizierten Marktvolumen 2030 von 7,6 Mrd. Euro jährlich aus dem Jahr 2019 (Kirkpatrick 2019) fällt die Prognose für das Marktvolumen um rund 17 Prozent im Upside Case und um rund 27 Prozent im Base Case geringer aus. Die große Spanne bei dem prognostizierten Marktvolumen bis 2040 spiegelt die hohen Unsicherheiten bezüglich des technologischen Fortschritts wider. Vereinfachend wurden lineare jährliche Wachstumsraten angenommen und eine Gleichverteilung des Marktvolumens auf die einzelnen Segmente Hardware, Software und Services.

Das Marktforschungsunternehmen DBMR prognostiziert für Europa ein Marktvolumen von 0,8 Mrd. Euro bis 2030, bei einer zugrundeliegenden jährlichen Wachstumsrate von 29,6 Prozent (Data Bridge Market Research 2022). Eine Extrapolation, unter der vereinfachten Annahme einer gleichbleibenden Wachstumsrate, ergibt für 2040 ein Marktvolumen für Europa von ca. zehn Mrd. Euro. Dies entspräche etwa einem Anteil von zwölf Prozent des weltweiten QC-Marktvolumens. Der Großteil an Erlösen aus dem Verkauf von QC-Technologie würde damit zukünftig außerhalb Europas erwirtschaftet.

² Ursprüngliche Angaben in Dollar – umgerechnet mit durchschnittlichem Dollar/Eurokurs der vergangenen fünf Jahre: 1,13.

Marktvolumen für QC-Technologie weltweit

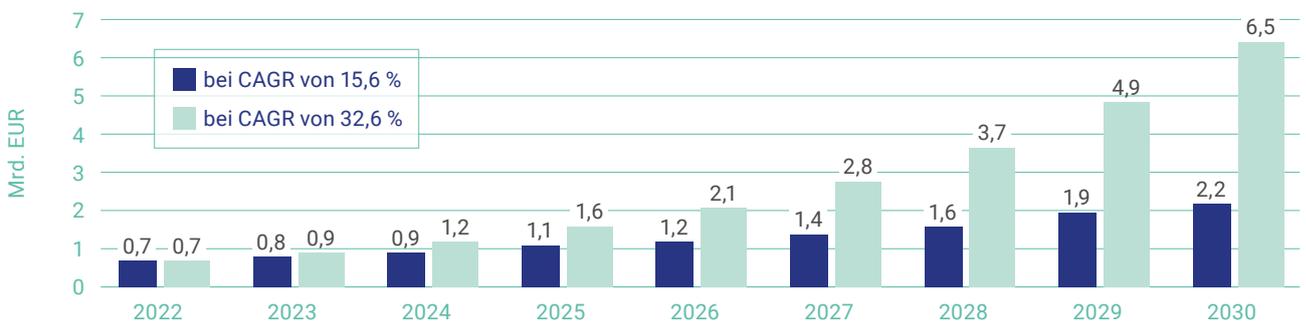


Abbildung 1: Prognosen für die Entwicklung des weltweiten Marktvolumens für QC-Hardware, -Software und -Services bis 2030, basierend auf den Studien von Vantage Market Research 2022, Fortune Business Insights 2022 und Daten aus dem McKinsey Quantum Technology Monitor 2023 entlang zweier Technologieentwicklungs-Szenarien mit unterschiedlicher jährlicher Wachstumsrate (CAGR).



Der Anteil von QC-Software(-Solutions) und (QC-Cloud-and-Consulting-)Services am Marktvolumen für QC wird anhand einer Studie von Polaris Market Research abgeschätzt (Polaris Market Research 2022). Demnach wurde 2021 in diesen Segmenten weltweit ein Umsatz von ca. 85,5 Mio. Euro erzielt. In der Prognose bis 2030 (siehe Abbildung 2) geht man von einer jährlichen Wachstumsrate von 30,9 Prozent aus, womit sich diese Prognose an Wachstumsraten vom Upside Case für den Gesamtmarkt (siehe oben) orientiert. Geht man zunächst von annähernd gleichen Wachstumsraten für Hard- und Softwareumsätze aus, beläuft sich der Anteil von QC-Software- und -Services mit ca. 1,1 Mrd. Euro im Jahr 2030 auf ca. 27,5 Prozent vom Gesamtmarkt, unter der vereinfachenden Annahme, dass die Segmente Hardware, Software und Service sich über den Betrachtungszeitraum zu gleichen Anteilen auf das Gesamtvolumen verteilen.

Dem Fokus auf anwendungsbezogene Entwicklung von QC-Software und der damit verbundenen Nutzung von Quantencomputern stehen derzeit noch hohe Kosten und technische Hürden in der Hardwareentwicklung gegenüber. Daher ist zunächst mit der Entstehung eines Marktes für kombinierte Leistungsangebote aus Software, Rechenkapazitäten und ergänzenden Services wie Datenaufbereitung und anwendungsfallspezifischen Konfigurationen von Algorithmen zu rechnen, den Anbietende für Software künftig erschließen können. Zieht man einen Vergleich mit der Entwicklung des klassischen Software- und Hardwaremarktes, ist es nicht unwahrscheinlich, dass sich der Umsatz mit Quantensoftware und Services deutlich rasanter entwickeln wird als jener durch den Verkauf von Hardwaresystemen. Diese Prognose wird zudem gestützt durch die Tatsache, dass alle derzeitigen Hardwareentwicklungsfirmen im Rahmen von Quantum-as-a-Service Zugriff auf ihre Plattformen via Cloud ermöglichen (siehe Kapitel 3.1).

Weltweites Marktvolumen für QC-Software und -Services

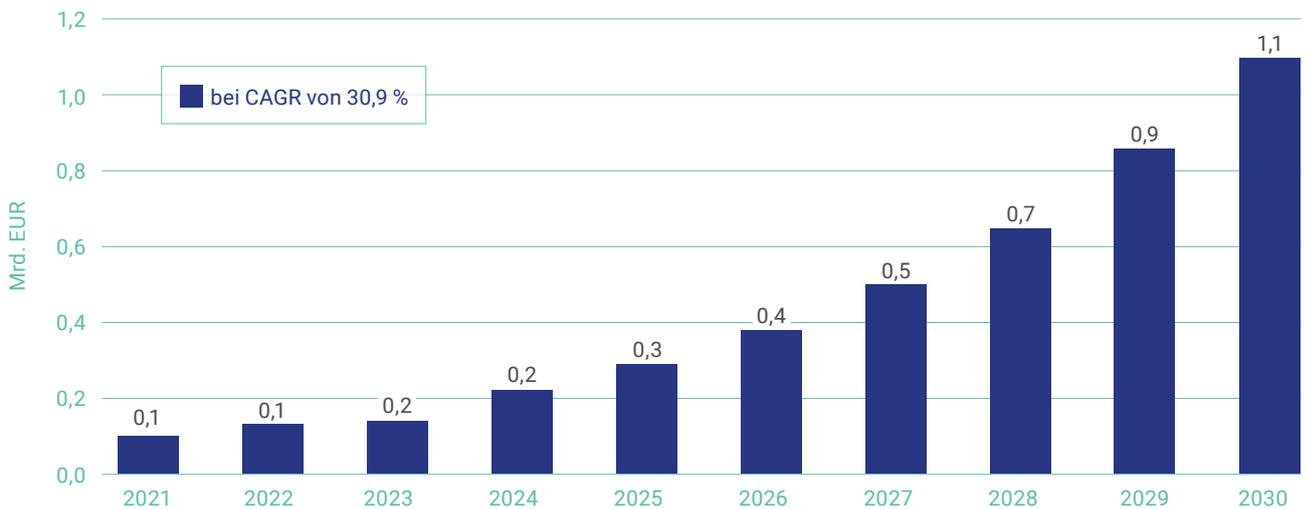


Abbildung 2: Entwicklung des weltweiten Marktpotenzials für QC-Software und -Services mit einer jährlichen Wachstumsrate von ca. 30,9 Prozent, basierend auf dem generierten Umsatz in diesen Sektoren im Jahr 2021.*

* Basierend auf den Zahlen von (Polaris Market Research 2022)



2.2 Wertschöpfungspotenzial

Das Wertschöpfungspotenzial durch QC für Unternehmen ist gegeben durch potenzielle Umsatzsteigerungen und das Einsparpotenzial aufseiten der anwendenden Unternehmen. Das Wertschöpfungspotenzial von QC-Technologie zu beziffern, obwohl noch unklar ist, welche Verfahren sich tatsächlich etablieren werden und vor allem wann mit entsprechenden Durchbrüchen in der Entwicklung zu rechnen sein wird, ist mit hohen Unsicherheiten verbunden. Die Prognose des wirtschaftlichen Potenzials ist vom technologischen Fortschritt abhängig – vor allem davon, wann die wesentlichen Meilensteine bezüglich Quantenvorteil beziehungsweise Fehlerquote, Rechenzeit und Problemkomplexität erreicht werden. So haben sich bspw. Prognosen zwischen 2019 und 2024 von weltweit jährlich 1,8 bis 4,4 Mrd. Euro Wertschöpfung für Endnutzerinnen und -nutzer durch den Einsatz von QC nicht bewahrheitet. Kurzfristig, bis etwa 2030, prognostiziert die Boston Consulting Group (BCG) nun ein Wertschöpfungspotenzial von 4,4 bis

8,8 Mrd. Euro (Boston Consulting Group 2021). Langfristig geht BCG in ihren Analysen allerdings nach wie vor von einem Wertschöpfungspotenzial von insgesamt ca. 400 bis 750 Mrd. Euro netto im Jahr 2050 für Endnutzer aus (Boston Consulting Group 2023). Dieser Prognose liegt die Annahme zugrunde, dass bis dahin fehlerkorrigiertes und nahezu beliebig skalierbares QC möglich und die Technologie grundsätzlich bis 2035 marktreif ist.

Von den Schätzungen für die Jahre 2030 und 2050 ausgehend, wurde das weltweite Wertschöpfungspotenzial für 2040 extrapoliert (siehe Abbildung 3, links). Die Aussicht auf ein hohes Wertschöpfungspotenzial durch den Einsatz von QC wird gestützt durch zahlreiche Anwendungsfälle aus verschiedenen Branchen und Proof-of-Concepts bezüglich ihrer Implementierung (siehe Tabelle 1 und Vorgängerstudie (Finsterhölzl et al. 2022)). Insbesondere für Anwendungsfälle, die die Problemkategorien Optimierung und chemische Simulation betreffen, verspricht der Einsatz von QC nach wie vor langfristig das höchste Wertschöpfungspotenzial.

Anwendungsdomäne	Anzahl Anwendungsfälle 2018-2022	Jährliches Wertschöpfungspotenzial in Mrd. EUR im Jahr 2050	Problemkategorie
PRODUKTION UND LOGISTIK	48	44-88	Optimierung
FINANZWESEN	34	53-101	Maschinelles Lernen, Optimierung
LUFT- UND RAUMFAHRT	9	27-62	Optimierung
PHARMAINDUSTRIE	58	35-71	Chemische Simulation
AUTOMOBILBRANCHE	<9	0-9	Maschinelles Lernen
MATERIALWISSENSCHAFTEN UND CHEMIE	46	18-44	Chemische Simulation
ENERGIEWIRTSCHAFT	20	9-27	Optimierung

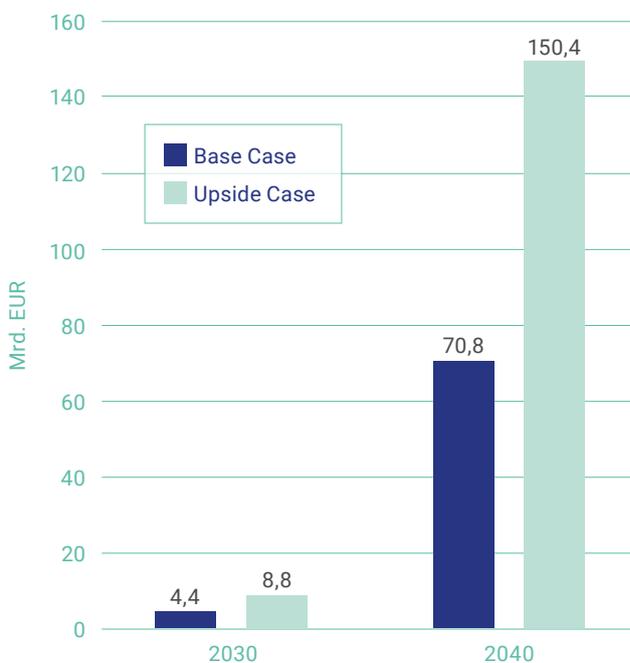
Tabelle 1: Anwendungsdomänen für QC und geschätztes jährliches Wertschöpfungspotenzial 2050 weltweit (Boston Consulting Group 2023).

Deutschland könnte daher zukünftig von dem Einsatz von QC profitieren. Zu den vier größten deutschen Industriezweigen gehören Automobil und Chemie (Orth 2023). Für die Abschätzung des Wertschöpfungspotenzials für deutsche Unternehmen wurden zwei Fälle betrachtet. Insofern es sich bei den geschätzten Effekten um Produktivitätssteigerungen handelt, liegt es zunächst nahe, den Anteil Deutschlands am weltweiten (kaufkraftbereinigten) Bruttoinlandsprodukt (BIP) als Vergleichsgröße hinzuzuziehen. Dieser betrug im Jahr 2022 rund 3,27 Prozent. Multipliziert mit dem oben dargestellten Wertschöpfungspotenzial im Base-Case-Szenario aus der zitierten BCG-Studie ergibt dies die Erwartung von jährlich 2,3 Mrd. Euro Wertschöpfungspotenzial 2040 durch QC für deutsche Unternehmen, ausgehend von einer durchschnittlichen Adaptionsrate der Technologie.

Jedoch ist der Anteil Deutschlands am Welthandel in vielen Branchen, die erwartungsgemäß stärker von QC profitieren werden, wie bspw. Chemie, deutlich höher,

sodass hier auch mit einem größeren Effekt auf die Wertschöpfung deutscher Unternehmen zu rechnen ist. Um diesem Sachverhalt Rechnung zu tragen, wird das Wertschöpfungspotenzial aus dem oben gezeigten Upside Case mit dem Anteil Deutschlands am Welthandel (WH) ins Verhältnis gesetzt. Der Welthandelsanteil Deutschlands belief sich im Jahr 2022 auf rund 6,8 Prozent. Auf diese Weise kann eine optimistischere Erwartung für die Potenziale des QC für deutsche Unternehmen abgeschätzt werden – vorausgesetzt, dass die Unternehmen der betreffenden Branchen aktiv die Adaption der neuen Technologie vorantreiben. In diesem Fall könnte mit einem Wertschöpfungspotenzial von ca. zehn Mrd. Euro 2040 gerechnet werden. Langfristige Prognosen sind aber aufgrund der ungewissen Geschwindigkeit beim technologischen Fortschritt auf Hardwareseite mit hohen Unsicherheiten verbunden. Weitere Abschätzungen zur wirtschaftlichen Bedeutung von QC-Technologie lassen sich anhand von Unternehmensgründungen und privaten Investitionen vornehmen.

Weltweites Wertschöpfungspotenzial durch den Einsatz von QC-Anwendungen



Wertschöpfungspotenzial durch den Einsatz von QC-Anwendungen in Deutschland

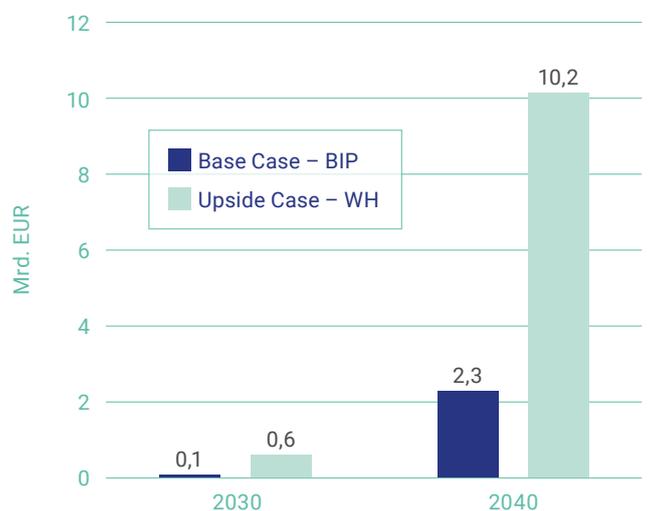


Abbildung 3: Wertschöpfungspotenzial durch QC-Anwendungen für 2030 und 2040 (extrapoliert); links: weltweit; rechts: für Deutschland, mit dem Base Case berechnet, basierend auf dem Anteil Deutschlands am weltweiten Bruttoinlandsprodukt (BIP), und mit dem Upside Case berechnet, basierend auf dem Anteil Deutschlands am Welthandel (WH).



2.3 Private Investitionen und Unternehmensgründungen

Die privaten Investitionsvolumina und staatlichen Forschungsbudgets für QC-Softwareentwicklung fallen bislang deutlich geringer aus als für die Hardwareentwicklung. So entfiel 2022 mit 76 Prozent des weltweiten Investitionsvolumens der Großteil auf hardwareorientierte Start-ups (McKinsey Digital 2023b). Allerdings hat sich die Anzahl an Gründungen in den vergangenen vier Jahren weiter in Richtung Software und Services verschoben (vgl. Abbildung 4). Entfielen im Zeitraum von 2002 bis 2018 weltweit noch 57,8 Prozent der kumulierten Gründungen auf software- oder service-zentrierte Start-ups und 42,2 Prozent auf hardware- bzw. komponenten-fokussierte Start-ups, waren es im Zeitraum 2018 bis 2022 73,8 Prozent Start-ups mit Fokus auf Software und Services und 26,2 Prozent mit Fokus auf Hardware und Komponenten.

Insgesamt hat sich die Rate der öffentlich gemachten Unternehmensneugründungen im Bereich QC in den letzten fünf Jahren verlangsamt. Ein möglicher Grund für den abflachenden Trend könnte einerseits ein Fachkräftemangel sein, der sich mit der steigenden Anzahl an Unternehmensgründungen weiter verschärft hat und nun weitere Gründungen bremst. Andererseits werden mittlerweile alle derzeit sinnvoll erscheinenden Hard-

wareansätze von gleich mehreren Hardware-Start-ups abgedeckt, sodass eine Unternehmensgründung in diesem Marktsegment aufgrund zu großer Konkurrenz und ggf. mangelnder technologischer Innovation wenig vielversprechend erscheint. Auch verfügen Investoren nur über begrenzte Budgets oder haben mittlerweile bereits in Hardware-Start-ups investiert.

Darüber hinaus gab es weltweit einen mit ca. 35 Prozent klaren Rückgang an Venture Capital (VC) Investments innerhalb der letzten zwei Jahre: Waren es 2021 ca. 620 Mrd. Euro VC, die in Early-Stage-Unternehmen flossen, waren es 2022 nur noch ca. 405 Mrd. Euro. Weniger als ein Prozent wurde davon in Quantentechnologien investiert, von denen QC nur eine Säule darstellt.

Die privaten Investitionen für Quantentechnologien im Allgemeinen reduzierten sich weltweit leicht von 2,1 Mrd. Euro 2021 um fünf Prozent auf zwei Mrd. Euro 2022. Hiervon flossen ca. 46 Prozent in Start-ups, die Quantencomputer bauen und 36 Prozent in Start-ups, die Software für den Bereich Quantentechnologien entwickeln, was einer Summe von insgesamt ca. 1,6 Mrd. Euro für diese beiden Segmente entspricht (The Quantum Insider 2023). Das amerikanische Start-up SandboxAQ, welches u. a. quanten- und KI-basierte Methoden in Software implementiert, um Simulations- und Optimierungsprobleme zu lösen, erhielt dabei allein

Zahl der gegründeten Start-ups (kumulativ)

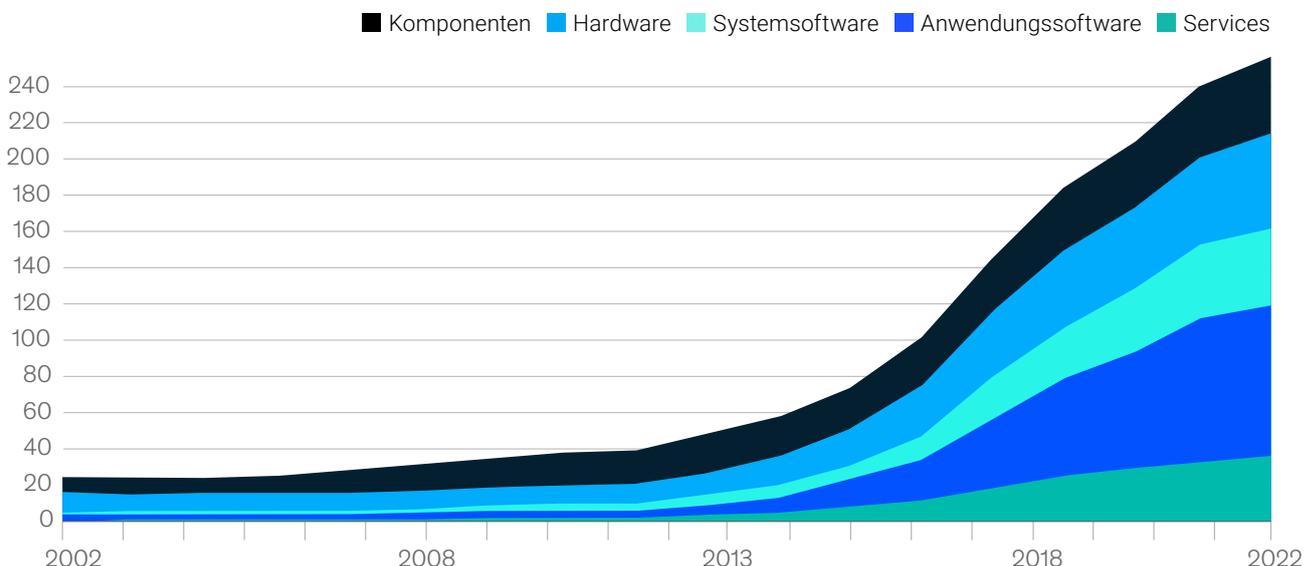


Abbildung 4: Entwicklung von QC-Unternehmensgründungen im Zeitraum 2002 bis 2022, aufgeteilt nach Wertschöpfungsgliedern (©McKinsey & Company).



knapp 440 Mrd. Euro. SandboxAQ führt damit die Liste der höchsten VC-Investitionen im Bereich QC 2022 an. Anzumerken ist, dass das Start-up bisher nur quanteninspirierte Algorithmen in verteilten Netzwerken entwickelt und zusammen mit KI-Algorithmen auf klassischer Hardware implementiert und ausführt. Inwieweit es sich also um ein „QC“-Unternehmen handelt, kann im Rahmen der vorliegenden Studie nicht ausreichend diskutiert werden.

Die zweit- bis fünfhöchsten Start-up-Investitionen verteilten sich weltweit ausschließlich auf Hardwareunternehmen. Hier setzt sich der Trend der vergangenen Jahre fort. Die Hardwareentwicklung ist nach wie vor sehr kostenintensiv und benötigt daher hohe Investitionen. Dies ist ein Indiz dafür, dass auch weiterhin hohe Forschungs- und Entwicklungsaufwände nötig sind, um QC-Technologie wirtschaftlich nutzbar zu machen. In Deutschland wurden 2022 ca. 30 Mio. Euro Venture Capital in Start-ups investiert und 2023 ca. 20 Mio. Euro.³ Die Förderung von QC-Start-ups in Deutschland wird damit derzeit nahezu ausschließlich durch den Staat bereitgestellt (siehe Abschnitt 2.4). Der Rückgang der VC-Investitionen um ca. ein Drittel in Deutschland folgt dem weltweiten Trend.

Demnach sind zwischen 2022 und 2023 die VC-Investitionen in Quantentechnologie-Start-ups um 50 Prozent auf rund eine Mrd. Euro gefallen (IQM 2024). Unter der vereinfachenden Annahme, dass sich die VC-Investitionen nach Quantentechnologiesegmenten ähnlich verteilten wie 2022, flossen damit etwa 0,8 Mrd. Euro in QC-Start-ups. Die Investitionen gingen hierbei allerdings mit ca. 80 Prozent nahezu ausschließlich in den USA zurück. Die EMEA-Region kann gemäß einem aktuellen Report des finnischen QC-Start-ups IQM sowie den europäischen VC-Investoren OpenOcean und Lakestar einen leichten einstelligen Anstieg an VC-Investitionen verzeichnen (Leprince-Ringuet 2024).

Trotz jüngster Entwicklungen im Bereich der VC-Investitionen ist die Anzahl der Start-ups weltweit nach wie vor in den USA am höchsten. Deutschland belegt dabei aktuell mit 19 Start-ups im Jahr 2023 Platz drei im internationalen Vergleich, hinter den USA und Kanada (siehe Abbildung 5, Quelle: Desk Research, Crunchbase).

Anzahl QC-Start-ups weltweit 2023

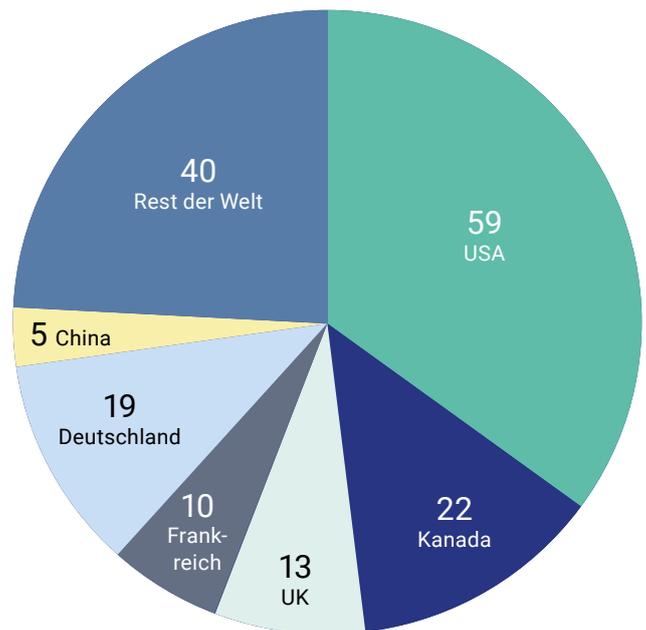


Abbildung 5: Anzahl an Start-ups aus dem Bereich QC weltweit, aufgeteilt nach Ländern (Quelle: Desk Research, Crunchbase).

Qualitativ lässt sich insbesondere im Bereich der Start-ups mit Software- und Service-Fokus eine Variation im Produktportfolio ablesen: Die Entwicklung und Bereitstellung von Software-as-a-Service (SaaS) erfolgt größtenteils hardware-agnostisch. Eine exemplarische Übersicht über derzeit aktive deutsche Quantensoftware-Start-ups und deren inhaltliche Ausrichtung findet sich in Tabelle 2.

3 Crunchbase-Auswertung, öffentlich einsehbare Investitionen.

Start-up	Art der Software/Geschäftsmodell	Anwendungsbereiche
ANAQOR AG https://www.anaqor.io/platform	Klassische SW-Infrastruktur zur Bereitstellung, Weiterentwicklung und Monetarisierung von Quantencode und damit verbundenen Dienstleistungen	Plattform für verschiedenste Anwendungsfälle aller für QC relevanten Branchen
AQARIOS GMBH https://aqarios.com	Plattform für Entwicklung und Bereitstellung von methodischem Wissen, Algorithmen und Entwicklungswerkzeugen	Optimierung
HQS GMBH https://quantumsimulations.de/solutions	Anwendungssoftware Entwicklung von Quantenalgorithmen zur Vorhersage molekularer Eigenschaften für Hochleistungswerkstoffe, Spezialchemikalien und Pharmaunternehmen	Chemie- und Pharmaindustrie
JOS QUANTUM GMBH https://jos-quantum.de/solutions	Anwendungssoftware Bereitstellung von Softwarepaketen, Systemintegrationsdiensten; Research-as-a-Service-Beratungsdienste für Wissenstransfer und Softwareintegration	Optimierungsprobleme in der Finanzdienstleistungsbranche: <ul style="list-style-type: none"> • Risikomanagement • Betrugserkennung • Handel
KIPU QUANTUM GMBH https://kipu-quantum.com	Anwendungssoftware Entwicklung anwendungs- und hardware-spezifischer Quantenalgorithmen, die in Softwareprodukte verpackt werden; hardware-spezifische Digital-Analog-Kompression; Kundinnen und Kunden können den Algorithmus nutzen, indem sie die Software-Implementierung lizenzieren oder ihn als Dienst auf der Kipu-Plattform nutzen	<ul style="list-style-type: none"> • Pharma & Biotech (Proteinfaltung) • Finanzsektor (Portfolio-Optimierung) • Logistik (kombinatorische Optimierung) • Chemie & Pharma (elektronische Struktursimulation)
QUANTAGONIA GMBH https://www.quantagonia.com	Anwendungssoftware Hybrider Solver, der auf einer Kombination aus klassischer Hardware und Quantenhardware ausgeführt werden kann	<ul style="list-style-type: none"> • Simulation • Optimierung • Künstliche Intelligenz • Quanteninspirierte Algorithmen • Finanzen • Logistik
QRUISE GMBH https://qrui.se.com	Systemsoftware Algorithmen, einschließlich Optimierer, Simulatoren, Werkzeuge für maschinelles Lernen und andere Softwarekomponenten, die die Entwicklung von Quantentechnologien beschleunigen und ihre Anwendung verbessern sollen	<ul style="list-style-type: none"> • QC-Hardware-Design • Probleme bei der Steuerung der aktuellen Generation von NISQ-Geräten und Verbesserungen der Betriebstreu

Tabelle 2: Exemplarische Übersicht über deutsche Start-ups, die im Bereich der Softwareentwicklung für QC tätig sind.

Laufende Entwicklungen von Anwendungssoftware werden derzeit noch immer schwerpunktmäßig in der Wissenschaft und durch eine Vielzahl an Start-ups vorangetrieben. Die Systemsoftware bzw. Firmware, die notwendig ist, um einen Quantencomputer grundsätzlich in den Betrieb versetzen zu können, wird größtenteils von den großen Hardwareanbietenden selbst entwickelt (bspw. IBM, IQM, Google). Eine Auswertung der Datenbank Crunchbase verbunden mit Desk Research im Rahmen dieses Studien-Updates hat ergeben, dass von weltweit 152 Start-ups 88 grundsätzlich im Bereich der Softwareentwicklung tätig sind, was knapp 60 Prozent entspricht. Von diesen 88 Start-ups fokussieren sich ca. 26 Prozent auf die Entwicklung von Systemsoftware und 74 Prozent auf die Entwicklung von Anwendungssoftware. Die Schlüsselakteure sind diejenigen, die sowohl Software als auch Hardware entwickeln und Full-Stack-Lösungen anbieten (McKinsey Digital 2023a). Diese konzentrieren sich vor allem auf Anwendungsfälle aus dem Finanzwesen sowie der Pharmazie- und Chemieindustrie.

2.4 Fördermittel im internationalen Vergleich

Im April 2023 erschien das Handlungskonzept der Bundesregierung für die strategische Entwicklung von Quantentechnologien bis 2026 (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2023). In diesem wird u. a. die Erschließung praxistauglicher Anwendungen in Wirtschaft, Verwaltung und Gesellschaft zum Ziel gesetzt. Dabei sollen alle aufeinander aufbauenden Komponenten und Ebenen des QC betrachtet werden (Full Stack). Dazu zählt neben der Hardware auch die Entwicklung von Algorithmen und Anwendungssoftware. Mit der seit Mitte 2021 ausgeschriebenen Förderung des anwendungsorientierten QC durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) wird bereits die Forschung und Entwicklung zu QC-Software und ihre wirtschaftliche Erschließung gefördert (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 2021). Die frühzeitige Einbindung von Anwendern ist dabei von größter Bedeutung. Insgesamt sollen entlang des Handlungskonzepts Fördermittel in Höhe von ca. drei Mrd. Euro bis 2026 für die Erforschung und Entwicklung von Quantentechnologien und deren Überführung in Anwendungen zur Verfügung stehen (Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)

2023). 2,18 Mrd. Euro sind in der Finanzplanung der Ressorts vorgesehen sowie 850 Mio. Euro durch die institutionell durch die Bundesregierung mitfinanzierten Wissenschaftsorganisationen geplant. Die „Quantum Computing Initiative (QCI)“ des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde mit Mitteln in Höhe von 740 Mio. Euro aus dem Konjunktur- und Krisenbewältigungspaket 2020 ausgestattet, um prototypische Quantencomputer sowie Software und Anwendungen zu entwickeln. 350 Mio. Euro wurden bereits 2021 bis 2023 über Aufträge an Start-ups vergeben.⁴ Im Rahmen von Haushaltsverhandlungen im Sommer 2023 wurden Mittel für die QCI des DLR jedoch um 200 Mio. Euro gestrichen (Gillmann 2023).

Im Vergleich zu den staatlichen Investitionen Deutschlands wurden im gleichen Zeitraum in den USA im Rahmen des 2018 beschlossenen National Quantum Initiative Act zur staatlichen Förderung von Quantentechnologien etwa 750 Mio. Euro für die Forschung und Entwicklung im Bereich QC bereitgestellt (National Science & Technology Council 2023). Zusätzlich wurden im Rahmen des „CHIPS and Science Act“ bis 2027 855 Mio. Euro für wissenschaftliche Programme im Bereich Quantentechnologien autorisiert (quantum.gov 2022). China hat seit 2016 u. a. bereits 8,8 Mrd. Euro in den Bau seines National Laboratory for Quantum Information Science investiert. Japan hat allein für das Jahr 2022 ein Budget für Quantentechnologien in Höhe von 490 Mio. Euro verwendet, vor allem für die Entwicklung seines ersten eignen Quantencomputers (Kaur 2022). Die britische Regierung plant weitere staatliche Förderungen in Höhe von 2,9 Mrd. Euro über die nächsten zehn Jahre, wobei ca. 1,2 Mrd. Euro durch Unternehmen bereitgestellt werden sollen. Von den bis 2025 zunächst eingeplanten ca. 287 Mio. Euro soll ein großer Teil im Bereich QC investiert werden. Hierzu soll u. a. auch das National Quantum Computing Centre zur Beschleunigung der Entwicklung von Quantencomputern weiter mit 23 Mio. Euro finanziell unterstützt werden (Department for Science, Innovation & Technology UK 2023). Auf europäischer Ebene werden Quantentechnologien durch das 2018 gestartete „Quantum Flagship“ mit insgesamt einer Mrd. Euro über einen Zeitraum von zehn Jahren durch die Europäische Kommission gefördert (European Commission 2023).

⁴ Eine detaillierte Aufschlüsselung der vergebenen Mittel an die jeweiligen Start-ups liegt aktuell nicht vor.

Insgesamt positioniert sich Deutschland bei den kumulierten staatlichen Investitionen in Quantentechnologien im weltweiten Vergleich mit anderen Ländern an zweiter Stelle (siehe Abbildung 6). Die geplanten öffentlichen

Fördermittel fallen dabei im Vergleich zum prognostizierten Marktvolumen bis 2030 für QC im Allgemeinen und Anwendungssoftware im Speziellen weiterhin relativ hoch aus.

Kumulierte staatliche Investitionen in Quantentechnologien (Mrd. EUR)

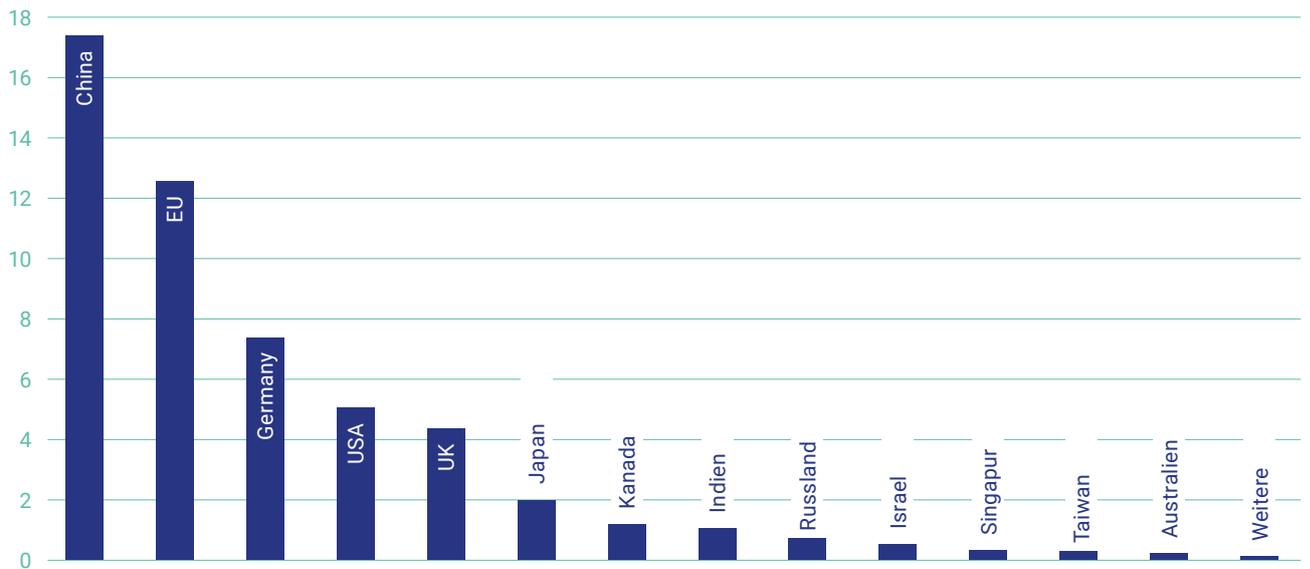


Abbildung 6: Kumulierte staatliche Investitionen in Quantentechnologien nach Ländern.*

* Daten aus Quantum Technology Monitor, McKinsey & Company April 2023, erweitert durch beschriebene aktuelle Investitionen in Deutschland, USA, UK



3 ZUGANG

3 ZUGANG

3.1 Anbieterlandschaft

Quantencomputer stehen bisher größtenteils in den Laborräumen von Universitäten und Technologiekonzernen. Die Hersteller bieten aber Zugang zu ihrer Quantenhardware via Cloud und stellen zudem oft auch klassische Rechenressourcen für die Emulation von Quantenprozessoren bereit. Sowohl etablierte IT-Konzerne wie Google und IBM als auch reine „Quanten“-

Start-ups, wie Xanadu oder Infleqtion bieten diesen Service, der als Quantum-as-a-Service (QaaS) bekannt ist, an, wie in Abbildung 7 für eine exemplarische Auswahl an Unternehmen dargestellt. Neben dem reinen Zugriff auf Backends stellen die Unternehmen dabei oftmals auch Open-Source-Software-Frameworks und Software-Entwicklungskits für die Programmierung der Hardware bereit.

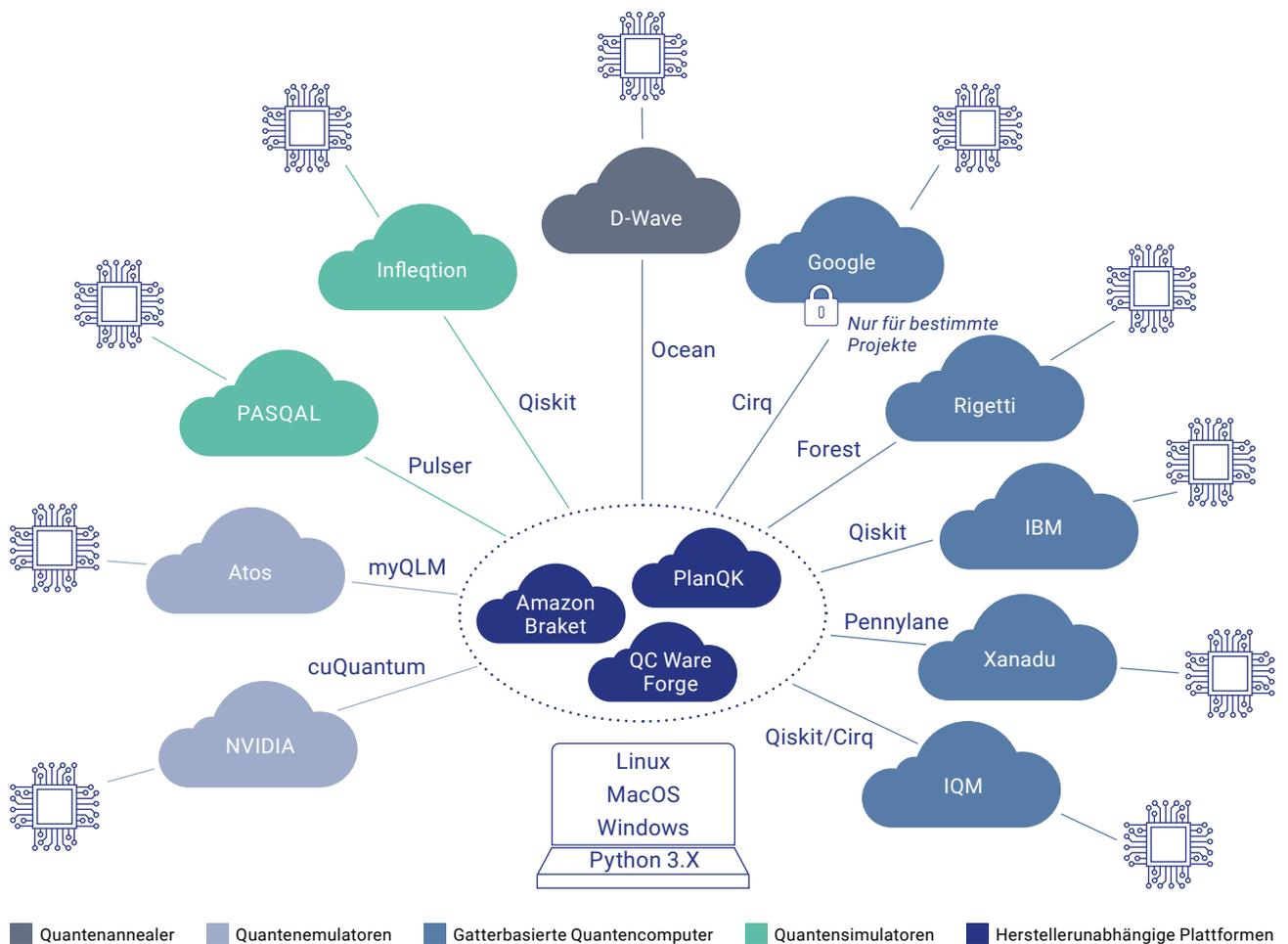


Abbildung 7: Überblick über verschiedene QC-Anbieter. Der Zugriff auf die verschiedenen QC-Ressourcen erfolgt cloudbasiert, entweder direkt über Cloudservices der Hardwareanbieter oder über vermittelnde Plattformanbieter. Die Programmierung kann zumeist über python-basierte und oft open-source-verfügbare Programmiersprachen erfolgen.

Im Vergleich zur sehr kostspieligen Anschaffung von Quantencomputern sowie On-Premise-Lösungen, bietet QaaS für Nutzende einige Vorteile (Quantum Zeitgeist 2023; QuEra 2023) wie:

- Zugänglichkeit von spezialisierter Hardware, Software und Fachwissen
- Keine teuren Anschaffungs-, Einrichtungs- oder Wartungskosten
- Möglichkeit, nur nach Nutzung der Ressourcen zu zahlen
- Freiheit, mit einer Vielzahl von Technologien und Algorithmen zu experimentieren
- Möglichkeit, Ressourcen hinzuzufügen und Problemstellungen je nach Bedarf zu vergrößern
- Möglichkeiten zur Zusammenarbeit mit Teammitgliedern auf der ganzen Welt
- Doppelfunktion als Personalentwicklungsinstrument, das den Umgang mit Quantencomputern lehrt

Mit einem herkömmlichen PC können Entwickelnde Programmcode für einen Quantencomputer schreiben und anschließend auf verschiedenen Hardwareplattformen testen. Es gibt dabei mehrere Wege, ein fertiges Programm auszuführen und Algorithmen über Quantenschaltkreise zu testen (Ezratty 2023):

- Zugriff auf reale, anbieterspezifische Quantenhardware (gatterbasierte QC, Annealer und Simulatoren) unmittelbar über deren Cloud-Services
- Zugriff auf anbieterspezifische Quantenhardware über Plattformbetreiber via Cloud-Services
- Zugriff auf Supercomputer, die die Emulation der Schaltkreise erlauben (bis zu 100 Qubits mithilfe sogenannter Tensornetzwerke (de Castro 2023))
- Lokale Emulation der Schaltkreise auf dem eigenen PC (je nach CPU/GPU bis ca. 20 Qubits)

Hierfür bieten die Hersteller in der Regel umfangreiche Open-Source-Software-Frameworks, Tutorials und Codedokumentationen auf ihren Webseiten zum Download an (qosf.org). Für das lokale Programmieren auf dem PC ist die Installation einer der aktuellen Python-Versionen erforderlich. Nach Download eines anbieterspezifischen Software-Development-Kits (SDK) stehen Anwendenden zumeist Compiler, Assembler, Bibliotheken, Quantenemulatoren und Programmierschnittstellen (APIs) zur Verfügung. Über die Bibliotheken lassen sich

bereits etablierte Quantenalgorithmen einfach in den eigenen Programmcode einbinden. Die Bibliotheken TensorFlow Quantum von Google oder PennyLane von Xanadu stellen darüber hinaus Schnittstellen für die nahtlose Integration von Quantenalgorithmen in Machine-Learning-Frameworks wie TensorFlow oder Pytorch bereit. Die webbasierte interaktive Umgebung Jupyter Notebook kann die Entwicklung und das Testen des Python-Programmcodes erleichtern. Sie ermöglicht es unter anderem, die Ergebnisse des ausgeführten Programmcodes einfach zu visualisieren. Jupyter-Notebook-Vorlagen werden in den meisten Fällen über den jeweiligen Cloudservice der Anbieter zur Verfügung gestellt. Zu den QC-nativen Hochsprachen, die besonders häufig genutzt werden, zählen Q# (Microsoft), Qiskit (IBM), Cirq (Google), Forest (Rigetti). Open-Source-Software-Frameworks wie Eclipse XACC10, ProjectQ11 oder bspw. das deutsche Qrisp (Fraunhofer-Gesellschaft 2023) verfolgen einen hardware-agnostischen Ansatz, bei dem mittels einer Hochsprache wie Python auf verschiedene QC-Hardwareplattformen als Backends zugegriffen werden kann.

Soll der Programmcode debuggt werden und/oder im Fall von kleineren Programmen, kann die Ausführung auf sogenannten QC-Emulatoren vorteilhaft sein. Diese können lokal auf der eigenen CPU oder GPU ausgeführt werden. Falls die Ausführung sehr rechenintensiv ist, besteht die Möglichkeit, über entsprechende Cloud-Zugänge der Anbieter auf Hochleistungsrechner zuzugreifen. Da die QC-Emulatoren klassische Hardware nutzen, treten grundsätzlich keine Fehler aufgrund verrauschter Qubits auf. Zunehmend zum Einsatz kommt derzeit aber auch QC-Emulatorensoftware, in der Rauschmodelle für bestimmte Hardwareplattformen implementiert sind, um Quantencode möglichst hardwarenah, aber kostengünstig testen zu können. Im Gegensatz zum Rechnen mit physischen Qubits, bei dem beim Auslesen der Qubits deren Zustand zerstört wird, lässt sich mittels Emulationssoftware auch der Superpositionszustand der Qubits nach der Ausführung von Gatteroperationen anzeigen. Diese Vorhersagbarkeit erleichtert das Schreiben von Quantenprogrammen insbesondere für Neulinge, da die Fehlersuche leichter wird. Darüber hinaus bieten Emulatoren die Möglichkeit, vollverknüpfte Qubits (engl.: all-to-all connectivity) auf einer klassischen CPU zu simulieren. Solche Topologien können in realen Quantencomputern bisher noch nicht realisiert werden.

Geschäftsmodelle anhand einiger Beispiele

Neben der Inhouse-Entwicklung von hardware-spezifischer Software durch die Hardwarehersteller gibt es eine wachsende Zahl von Unternehmen, die ihr Geschäftsmodell in Richtung Plattform-as-a-Service (PaaS) und Software-as-a-Service (SaaS) ausrichten. Beispiele hierfür sind etablierte Unternehmen wie Microsoft und Amazon, die mit Azure Quantum bzw. dem AWS-basierten Braket QC-Cloud-Dienste anbieten, mittels derer Kundinnen und Kunden via Pay-As-You-Go⁵ Software entwickeln und diese auf Backends verschiedener Hardwareanbieter testen können. Auch das öffentlich geförderte Projekt PlanQK, das seit Anfang 2024 durch die deutsche Anaqor AG weiter betrieben wird, setzt auf einen Plattformansatz mit Bezug auf den Zugang zu verschiedenen Backends. Im Vergleich zu den bereits etablierten Angeboten amerikanischer Konzerne bietet die Plattform noch weitere Funktionalitäten.

PlanQK zielt darauf ab, eine Plattform und ein Ökosystem für Quantenapplikationen zu entwickeln. Entwicklerinnen und Entwickler können über die Plattform quantengestützte Softwarelösungen für Anwendende anbieten. Im Gegensatz zu bestehenden Plattformansätzen, wie Amazon Braket oder QC Ware Forge, können Entwickelnde ihren Softwarecode in sogenannten Containern als API-Produkte anbieten (Red Hat 2023). Nutzende können dann durch Erwerb der API die Anwendungssoftware als Service in ihre bestehende Software-Infrastruktur einbinden und ausführen. Neben dem Marktplatz zum Vertrieb von Quantenlösungen in Containern gibt es auch einen kostenfreien Wissensspeicher. Dieser bietet freien Zugang zu Quantenalgorithmen, Implementierungen und Entwurfsmustern (Workflowpatterns), die von der Community gemeinsam entwickelt wurden. Weiterhin bietet PlanQK die Möglichkeit, komplette Workflows zu entwickeln, zu implementieren und den Quantencode auf einer Pay-per-Use-Basis auf verschiedenen Quantenprozessoren (Quantum Processor Unit, QPU) auszuführen und zu testen (PaaS). Der Quantencode kann außerdem mit anderen Entwicklern und Entwicklerinnen oder der eigenen Organisation geteilt werden.

Das US-amerikanische Unternehmen QC Ware fokussiert sich mit seiner QC-Plattform Forge insbesondere auf Software-as-a-Service (SaaS). Auf der Plattform werden Entwickelnde, wie Finanzanalysten und Datenwissenschaftlern, Softwaretools zur Implementierung, Simulation und Ausführung verschiedener Quantenalgorithmen aus den Bereichen maschinelles Lernen, binäre Optimierung und lineare Algebra angeboten. In Abgrenzung zu PlanQK gibt es u. a. keinen Marktplatz und die Implementierung erfolgt nicht in Containern. Gemeinsam haben beide Plattformen hingegen, dass Entwickelnde in Code implementierte Algorithmen über Amazon Braket auf unterschiedlichen QPUs bspw. von IonQ, Rigetti und QuEra ausführen und testen können. Voraussetzung ist eine Registrierung auf der Homepage von QC Ware Forge. Hierbei besteht auch die Möglichkeit, Quantenschaltkreise klassisch auf GPUs von NVIDIA emulieren zu lassen. Pro Stunde Rechenzeit berechnet das Unternehmen dafür 88,50 Euro. Rechenzeit auf QPUs hingegen kostet zwischen 4.500 und 13.700 Euro pro Stunde.⁶ Ähnliche Preise finden sich beim indischen Unternehmen Silicofeller Quantum.⁷ Die Anaqor AG hat ein anderes Preismodell für die Nutzung von Backends. Im Prinzip zahlen Entwickelnde hier pro auszuführenden Task 0,60 Euro sowie einen vom Backend abhängigen Betrag pro Ausführung, mit der ein Quantenschaltkreis ausgeführt wird (zwischen 0,0007 und 0,06 Euro). Alternativ können Entwickelnde auch über Microsoft Azure Quantum auf QC-Ressourcen zugreifen, wobei sie dann nur per Ausführung zahlen. Auch die Nutzung klassischer Hardware über NVIDIA ist bei PlanQK möglich, hier auf Sekundenbasis. Wie viel Zeit die Ausführung von Quantencode für einen Anwendungsfall auf unterschiedlichen Hardwareplattformen benötigt, ist abhängig von verschiedensten Parametern (wie der Schaltkreistiefe, Anzahl der zur Verfügung stehenden Qubits etc.). Demnach ist auch eine pauschale Abschätzung für die anfallenden Kosten nicht möglich. Schon kleinste Schaltkreise ohne praktischen Nutzen benötigen allerdings mehrere Sekunden Laufzeit, sodass Softwareentwicklung schnell sehr kostenintensiv werden kann. Der kommerzielle Zugang zu Quantenhardware ist damit zunächst für kleinere Unternehmen und Privatpersonen eher weniger attraktiv. Ausnahmen stellen einige wenige kostenfreie oder zumindest kostenreduzierte Zugänge aufgrund von Forschungs Kooperationen dar.

5 <https://www.fakturia.de/lexikon/pay-as-you-go>

6 <https://forge.qcware.com/pricing/>

7 <https://silicofeller.com/buy>

Zwischenfazit

Quantum-as-a-Service im oben erläuterten Sinne ist derzeit das gängige Geschäftsmodell, innerhalb dessen zahlreiche Forschungseinrichtungen staatlich gefördert Forschung an Algorithmen und deren Implementierung auf verschiedenen Hardwareplattformen betreiben und Großunternehmen Anwendungsfälle austesten. Dieses Geschäftsmodell haben bereits auch Konzerne, wie NVIDIA und Atos, mit klassischem Computing als Kerngeschäft, für sich entdeckt und stellen entsprechende Ressourcen zur Verfügung. Mit wachsenden Zugangsmöglichkeiten wächst gleichzeitig das Ökosystem rund um QC, was wiederum einen positiven Einfluss auf private und staatliche Investitionen hat.

3.2 Regionale Initiativen und Anlaufstellen

Deutschland verfügt über zentrale Bestandteile für ein zukünftiges QC-Ökosystem. Auf Bundes- sowie Landesebene haben sich zahlreiche Initiativen und Netzwerke entwickelt, die Kompetenzen bündeln, verschiedene Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft verknüpfen und in der Außendarstellung als Leuchtturm operieren. In Tabelle 3 sind regionale und auch bundesweite Initiativen und Netzwerke mit ihren jeweiligen Schwerpunkten aufgelistet⁸ und in Tabelle 4 werden diese bezüglich verschiedener Kennzahlen gegenübergestellt. Typischerweise adressieren die meisten Netzwerke nicht nur Akteure aus dem Bereich des QC, sondern aufgrund der hohen Querschnitte im weiteren Sinne auch andere Quantentechnologien, z. B. die Bereiche Sensorik und Kommunikation. Um bereits bestehende regionale Forschungscluster haben sich beispielsweise das Munich Quantum Valley und auch das Quantum Valley Lower Saxony gebildet. Auch sind zahlreiche Fraunhofer-Institute in ganz Deutschland mit verschiedenen thematischen Schwerpunkten im Bereich QC-Hardware und -Software im Kompetenznetzwerk Quantumcomputing organisiert. Dabei binden die regionalen

Cluster auch Unternehmen ein, um den Transfer von Forschungsergebnissen in die Wirtschaft vorzubereiten (siehe Tabelle 4 bezüglich wichtiger Industriepartner). Ebenso fördert die DLR Quantumcomputing-Initiative die Entwicklung von QC-Hardware und -Software. Das Quantum Business Network unterstützt die Vernetzung und Einbindung von Akteuren aus der Wirtschaft in ein zukünftiges Quantentechnologie-Ökosystem in Deutschland und darüber hinaus. Das Quantum Technology and Application Consortium (QUTAC) erarbeitet als Zusammenschluss deutscher Industriekonzerne Referenzanwendungsfälle für Quantencomputer. Ebenso gibt es auf europäischer Ebene mit dem European Quantum Industry Consortium (QuiC) eine Non-Profit-Organisation, die neben Unternehmen auch wissenschaftliche Forschungseinrichtungen und Vereine über nationale Grenzen hinweg zusammenführt. Dabei soll das wachsende europäische Innovationsökosystem im Bereich der Quantentechnologien gestärkt und strategisch koordiniert werden. Schließlich gibt es mit PlanQK eine Plattform, die nicht nur Quantenapplikationen anbietet, sondern auch den Zugang zu einer Community von Entwicklenden und Anwendenden bietet und Zugriff auf verschiedene QC-Rechenressourcen ermöglicht. In ähnlicher Weise zielt auch QuCUN darauf ab, Interessierten Zugang zu Quantencomputern zu ermöglichen und die Einstiegshürden für zukünftige Anwendende zu verringern. Die aufgelisteten Initiativen und Netzwerke dienen interessierten Entwicklerinnen und Entwicklern sowie zukünftigen Anwendenden als zentrale Anlaufstelle für die Kontaktetablierung und -vermittlung zu einschlägigen Fachexpertinnen und -experten. Dabei sollte die regionale Verortung der Netzwerke auf Landesebene bei der Kontaktaufnahme nicht als hinderlich gesehen werden, da diese sich in erster Linie durch die Koordinierung landeseigener Förderungen von FuE-Vorhaben durch die entsprechenden Initiativen begründet. Unabhängig davon besteht ein hohes Interesse der jeweiligen regionalen Akteure und Initiativen an einer Vernetzung über die Landesgrenzen hinaus. Eine umfassende Übersicht über die überregionale Vernetzung von Wissenschaft und Wirtschaft bietet die Aktivitätenlandkarte Quantumcomputing von Fraunhofer IMW.⁹

⁸ Ohne Gewähr auf Vollständigkeit. Aktuell unterliegen die Ökosysteme einer hohen Entwicklungsdynamik.

⁹ <https://www.quantencomputing-deutschland.de/#>

Region	Name	Schwerpunkte	Website
EUROPA	European Quantum Industry Consortium (QuiC)	Koordinierung, Austausch und strategische Ausrichtung des europäischen Innovations-ökosystems im Bereich Quantentechnologien	https://www.euroquic.org/
BUNDESWEIT	DLR Quantencomputing-Initiative	Förderung der Entwicklung von QC-Hardware und -Software	https://qci.dlr.de/
	Fraunhofer-Kompetenznetzwerk Quantencomputing	Anwendungsnahes Forschungsnetzwerk verschiedener Fraunhofer-Institute mit Expertise im Bereich QC-Software und -Hardware, Zugang auf IBM Quantencomputer in Ehnningen auch für Externe	https://www.fraunhofer.de/de/institute/kooperationen/fraunhofer-kompetenznetzwerk-quantencomputing.html
	PlanQK – Plattform und Ökosystem für Quantenapplikationen	QC-Applikationen und Entwicklercommunity, Zugang zu verschiedenen QC-Rechenressourcen	https://planqk.de/
	Quantum Business Network UG	Vernetzung von Unternehmen im Bereich Quantentechnologien	https://qbn.world/
	QuCUN – Quantum Computing User Network	QC-Applikationen und Entwicklercommunity	https://www.qucun.de/
	Quantum Technology and Application Consortium (QUTAC)	Entwicklung von Referenzanwendungsfällen für die Industrie	https://www.qutac.de
BADEN-WÜRTTEMBERG	Quantum ^{BW}	Netzwerk aus Wissenschaft und Wirtschaft im Bereich Quantentechnologien	https://www.quantumbw.de/
BAYERN	Munich Quantum Valley e.V. (MQV)	Netzwerk aus Wissenschaft und Wirtschaft im Bereich Quantentechnologien (speziell supraleitende Schaltkreise, Ionenfallen und neutrale Atome)	https://www.munich-quantum-valley.de/
BERLIN	Berlin Quantum Alliance (BQA)	Netzwerk aus Wissenschaft und Wirtschaft im Bereich Quantentechnologien (vor allem Optik und Photonik)	https://qt-berlin.de
HAMBURG	Hamburg Quantum Innovation Capital (HQIC)	Netzwerk und Koordinierung im Bereich Quantentechnologien in der Wissenschaft und Wirtschaft (speziell mit Bezug auf Quantencomputing, basierend auf neutralen Atomen und Ionenfallen)	https://www.hqic.de/
NIEDERSACHSEN	Quantum Valley Lower Saxony e. V. (QVLS)	Netzwerk aus Wissenschaft und Wirtschaft im Bereich Quantentechnologien (insbesondere Quantencomputing auf Basis von Ionenfallen; photonische und elektrische Integration)	https://qvls.de/
NORDRHEIN-WESTFALEN	QT.NMWP.NRW / EIN Quantum NRW	Vernetzung und Technologietransfer im Bereich Quantentechnologien (speziell supraleitende Schaltkreise, Ionenfallen, Photonen oder halbleiterbasierte Ansätze)	https://quantentechnologien.nrw/

Tabelle 3: Übersicht von Netzwerken und Clustern im Bereich Quantentechnologien und -computing in Deutschland.

Regionale Netzwerke und Cluster	Munich Quantum Valley e.V. (MQV)	Berlin Quantum Alliance (BQA)	Hamburg Quantum Innovation Capital (HQIC)	QT.NMWP.NRW / EIN Quantum NRW	Quantum BW	Quantum Valley Lower Saxony e.V. (QVLS)
START	2022	2021	2022	2019/2022	2023	2020
FÖRDERPERIODE	2022 bis 2024	2021 bis 2026	2022 bis 2028	2022 bis 2026	2023 bis 2027	2023 bis 2026
FÖRDERVOLUMEN (IN EURO)	>83,3 Mio.	25 Mio.	3 Mio.	20 Mio.	31,1 Mio.	15 Mio.
DURCHSCHNITT PRO JAHR (IN EURO)	41,6 Mio. (bis 2024)	5 Mio.	0,5 Mio	5 Mio.	7,8 Mio.	5 Mio.
INDUSTRIEPARTNER (BEISPIELHAFT)	Airbus, BMW Group, Infineon Technologies, TOPTICA	TOPTICA	Airbus, NXP, Lufthansa Industry Solution, Otto Group	Osram International, Atos, Bayer, Fujitsu	IBM Deutschland, Bosch, Carl Zeiss	Deutsche Messe, VW, Infineon Technologies

Tabelle 4: Übersicht über regionale Netzwerke und einige betreffende Kennzahlen.

4 PERSPEKTIVEN

4 PERSPEKTIVEN

Im Jahr 2016 konnten Entwicklerinnen und Entwickler via Cloud auf erste IBM-Quantenprozessoren zugreifen. Seitdem hat IBM entlang seiner „Quantum Roadmap“ bis 2023 in drei Meilensteinen seine auf supraleitenden Schaltkreisen basierende QC-Hardware weiter ausgebaut. Anfang Dezember 2023 präsentierte IBM seinen neuesten Prozessor mit 1.121 Qubits der Öffentlichkeit, bei dem die Qubit-Anzahl gegenüber dem 433-Qubit-Vorgängerprozessor „Osprey“ aus dem Jahr 2022 mehr als verdoppelt werden konnte. Auch schafften es die Forschenden, Verbesserungen in der Fertigung zu erzielen und die Kühltechnik zu optimieren (Castelvecchi 2023). Bislang wurden alle gesteckten Roadmap-Ziele von IBM erreicht und die Roadmap von 2026 auf 2033 erweitert. Doch auch in der neu erschienenen Roadmap legt sich IBM nicht fest, wann genau ein praktischer Nutzen durch den Einsatz von QC erzielt werden kann und wann Unternehmen damit einen wirtschaftlichen Mehrwert erwarten können (IBM 2023).

Neben IBM forscht und entwickelt u. a. auch Google im Bereich QC. Der aktuelle, ebenfalls auf supraleitenden Schaltkreisen basierende Prozessor „Sycamore“ verfügt über 72 Qubits. Die beiden Tech-Konzerne gehören zu den führenden Unternehmen bei der hardware- und softwareseitigen Entwicklung von Quantencomputern.

Eine große Herausforderung für alle Hardwareentwickler auf dem Weg zu einem Quantenvorteil stellt die Skalierung der Hardware hin zu leistungsfähigeren Systemen dar. Dabei müssen verschiedenste Kenngrößen verbessert werden. Dazu zählen beispielsweise die Anzahl der verfügbaren Qubits, deren Zuverlässigkeit sowie deren Vernetzung untereinander. Eine gleichzeitige Verbesserung dieser Kenngrößen ist mit den aktuell verfolgten technologischen Ansätzen extrem herausfordernd.¹⁰

Eine fundamentale Herausforderung bei der Skalierung von Quantencomputern ist dabei die Empfindlichkeit von Qubits gegenüber Störeinflüssen aus der Umgebung (sogenannte Dekohärenz). Durch diese verlieren die Qubits ihre Quanteneigenschaften wie bspw. Interferenz und Verschränkung. Um praxisrelevante Algorithmen auf Quantencomputern implementieren zu können, müssen Qubits über möglichst große Zeiträume von ihrer Umgebung abgeschirmt werden. Nur so können die Gesetzmäßigkeiten der Quantenphysik für Rechnungen genutzt werden, die einen Vorteil gegenüber jenen auf klassischen Computern ermöglichen.

Ende 2017 hat der US-amerikanische Physiker John Preskill daher den Begriff der „Noisy Intermediate-Scale Quantum“ (NISQ) geprägt (Preskill 2018). Darunter versteht man Quantencomputer mit einer Anzahl von wenigen Hundert fehlerbehafteten Qubits.

Innerhalb der NISQ-Ära versuchen Forschende und Entwickelnde, sich gewissermaßen mit den technologisch beschränkten Möglichkeiten zu arrangieren. Dabei werden zwei wesentliche Lösungsansätze zur Erhöhung der Zuverlässigkeit der Berechnungen verfolgt. Bei der sogenannten „Quantum Error Suppression“ werden die Prozessoren und Qubits möglichst detailliert charakterisiert, um anschließend die Steuersignale zur Kontrolle der Qubits zu optimieren. Diesem Ansatz steht auf physikalischer Ebene der Ansteuerungselektronik die sogenannte „Quantum Error Mitigation“ gegenüber. Bei dieser wird auf der Softwareebene versucht, die auszuführenden Algorithmen selbst zu optimieren. Beide Optimierungsansätze haben jeweils zum Ziel, das Auftreten von Fehlern bei den Operationen auf den Qubits möglichst zu unterdrücken oder zu umgehen.

Eine weitere Methode ist die „Quantum Error Correction“. In der klassischen Fehlerkorrektur werden Bits kopiert und eventuell auftretende Fehler an einzelnen Bits durch einen Vergleich der Kopien und Originale identifiziert und korrigiert. Die Gesetze der Quantenphysik verbieten jedoch einen solchen Kopiervorgang mit Qubits. Es können in der Quantenfehlerkorrektur aber ganze Netze aus Qubits so miteinander gekoppelt werden, dass ein fehlerkorrigiertes, sogenanntes logisches Qubit entsteht. Diese Methode benötigt allerdings etliche Hundert physische Qubits, um ein einziges logisches Qubit zu realisieren. Dadurch steigen wiederum die Anforderungen an die zukünftigen Quantenprozessoren. Erst mit mehreren Hundert logischen Qubits bestehen gute Perspektiven für die Umsetzung wirtschaftlich relevanter Anwendungsfälle in der Breite und somit eine Überlegenheit von Quantencomputern gegenüber klassischen Computern in gewissen Bereichen (Quantum Advantage, dt.: Quantenvorteil).

Aktuell wird versucht, Algorithmen auf Hardware mit begrenzter Qubitzahl und -qualität zu entwickeln und erste Vorteile gegenüber klassischer Hardware zu demonstrieren. Führt man jedoch in komplexeren Algorithmen Operationen in mehreren aufeinanderfolgenden Schritten auf den Qubits durch, so summieren sich die Fehlerraten der Qubits durch deren begrenzte Qualität auf. Die Erhöhung der Qubitzahlen bei gleichzeitiger

¹⁰ Dazu gehören u. a. supraleitende Schaltkreise, neutrale Atome und photonische Ansätze.

Verbesserung der Qualität der Qubits ist mit den aktuell verfolgten technologischen Ansätzen eine zentrale Herausforderung. Es stellt sich deshalb die Frage, ob mit den zurzeit verfolgten Hardwareansätzen überhaupt NISQ-Algorithmen einen Quantenvorteil erzielen können oder ob dieser erst mit vollständig fehlerkorrigierten, logischen Qubits erreichbar ist (Fault Tolerant Quantum Computing, FTQC) (Leymann und Barzen 2020).

Erst wenn ein deutlicher Vorteil gegenüber klassischen Computern mit Blick auf Genauigkeit oder Schnelligkeit der berechneten Lösung belegbar ist, wird der Einsatz dieser kostenintensiven Technologie eine Anwendung in der Breite erfahren. Die folgenden Abschnitte zeigen aktuelle Ansätze und Perspektiven für die praktische Nutzbarmachung von QC.

Software-Hardware-Co-Design

Die gegenseitige Anpassung bzw. das abgestimmte Design zwischen Algorithmen, deren Implementierung über Software sowie der zentralen Quantenprozessoreinheit (QPU) und der Ansteuerungs- und Ausleseelektronik als Hardware sind essenziell bei der Entwicklung und Skalierung von Quantencomputern, um mit diesen perspektivisch einen Quantenvorteil zu erzielen.

Die allermeisten derzeit bekannten QC-Algorithmen, wie bspw. jene von Grover oder Shor, wurden vor dem Vorhandensein der erforderlichen Hardware entwickelt. Generell sind für alle wirtschaftlich relevanten Anwendungsfälle die aktuell verfügbaren Hardware-Ressourcen nicht ausreichend. Zur Problemlösung eines bestimmten industriellen Anwendungsfalls ist es daher erforderlich, neue, auf die aktuell verfügbare Hardware angepasste Algorithmen zu entwickeln oder bestehende möglichst so anzupassen oder zu verändern, dass sie auf existierender Hardware mit dessen spezifischen Randbedingungen abgebildet werden können. In umgekehrter Weise kann es jedoch auch sinnvoll sein, zukünftige Hardware auf bestehende Algorithmen zu optimieren und so deren Effizienz zu steigern.

Das Prozessordesign durchläuft dabei verschiedene Schritte, die durch Open-Source-Softwaretools erleichtert werden können. Auch die Hardware, die den Prozessor selbst ansteuert, kann auf spezifische Algorithmen hin optimiert werden. So können Steuersignale an den Prozessor bei gegebenen Algorithmen in Richtung einer möglichst niedrigen Fehlerrate bei den Qubitoperationen

optimiert werden. Der Informationsfluss zwischen den Designern der jeweiligen Komponente des Full Stacks, der Gesamtheit aus Software und Hardware eines Quantencomputers, ist dabei ein integraler Bestandteil und wird als Co-Design verstanden.

Die Notwendigkeit von Co-Design wurde bereits von führenden QC-Unternehmen erkannt. So führt das finnische Unternehmen IQM bspw. im Rahmen der deutschen QC-Initiative des DLR im Projekt ALQU Industriekooperationen hinsichtlich Co-Design durch, bei denen Expertinnen und Experten von QC-Hardware und -algorithmen sowie -software zusammen mit Expertinnen und Experten aus der Industrie arbeiten. Nachdem der spezifische Anwendungsfall ausgewählt wurde, zielt das jeweilige Projekt darauf ab, den Quantenalgorithmus optimal in Bezug auf QC-Hardware und -software zu implementieren, um so die Leistungsfähigkeit zu maximieren.

So kann es in der Chemie- oder Medikamentenentwicklung bspw. hilfreich sein, die Energie eines quantenmechanischen Systems wie bspw. eines Moleküls zu kennen. Klassische Computer scheitern hierbei je nach Problemstellung oder benötigen zu lange, um die Energie zu berechnen. Hintergrund ist hier die mathematische Berechnung der quantenmechanischen Systeme, welche mit zunehmender Größe exponentiell mehr Ressourcen benötigt. Da Quantencomputer selbst auf quantenmechanischen Systemen basieren, können die Problemstellungen direkter auf ihnen abgebildet und einfacher gelöst werden.

Durch den Compiler können die gewünschten Funktionalitäten der zur Verfügung stehenden QC-Software optimal auf der Zielarchitektur abgebildet werden (engl.: Mapping). Hierzu sollten Programmierende in direktem Austausch mit den Hardwareentwickelnden stehen oder zumindest alle hardwarespezifischen Parameter der zugrunde liegenden Plattform kennen.

Andererseits kann auch versucht werden, die Hardware anzupassen, um bestimmte Optimierungstechniken in Compilern zu unterstützen. Um bestehende Mapping-Strategien weiter zu verbessern, sind neben Hardware-Aspekten ebenfalls Eigenschaften der Algorithmen bzw. eine nähere Untersuchung der für sie zur Verfügung stehenden Quantenschaltkreise von Bedeutung. Durch neuartige Methoden wie sogenannte Interaktionsgraphen können Entwickelnde besser testen, warum eine bestimmte Compiler-Methode mit einem Algorithmus besser oder schlechter funktioniert (Bandic et al. 2023).

Insgesamt muss der Compiler sowohl den Limitationen der Hardware und Anforderungen der Software gerecht werden, weshalb bei der Programmierung sowohl Informationen und Anforderungen der höher liegenden Softwareebenen als auch der Hardwarekomponenten einfließen sollten.

Variationelle Quantenalgorithmen

In der NISQ-Ära kommt nur eine sehr begrenzte Anzahl an Algorithmen für die Implementierung auf einem Quantencomputer infrage. Besonders hohe Aufmerksamkeit und Hoffnung erfuhren in den vergangenen Jahren sogenannte variationelle Quantenalgorithmen (VQA), die nützlich sein können für Optimierungs- und Eigenwertprobleme. Sie sind damit für eine Vielzahl von Anwendungsgebieten wie der Chemie, dem Finanzwesen und der Logistik von Interesse. Bei VQAs handelt es sich um Algorithmen, die teilweise auf klassischer Hardware und teilweise auf QPUs laufen und bei denen Parameter iterativ optimiert werden. VQAs haben gemeinsam, dass eine Aufgabe in eine parametrisierte Kostenfunktion kodiert wird, die dann mit einem Quantencomputer ausgewertet wird. Ein auf einem klassischen Computer laufendes Programm optimiert die Parameter im Algorithmus (Khaitan und Parakhiya 2023). Diese Algorithmen sind insofern geeignet, als dass sie u. a. verhältnismäßig geringe Anforderungen an die Qubits stellen und durch mehrere, vergleichbar niederkomplexe Quantenschaltkreise realisiert werden können. Weil der Großteil der Rechnungen bei variationellen Ansätzen auf klassischen Rechensystemen ausgeführt wird, versucht man aktuell verstärkt, QC in HPC-Infrastrukturen zu integrieren (vgl. nächster Abschnitt). Bei der Erforschung und Entwicklung passender Integrationslösungen müssen physikalische Details bzw. Hardwareparameter, Designspezifikationen und Ressourcenanforderungen der QPU in darüberliegenden Ebenen des Stacks den Entwicklenden bekannt sein. Nur so kann die zu entwickelnde Software zur Ansteuerung und Kontrolle der Hardwarekomponenten effizient ausgeführt werden. Auch hier ist ein interaktiver Informationsfluss zwischen allen Entwicklungsebenen erforderlich, um Quantenapplikationen möglichst optimal entwickeln zu können, wie im Abschnitt zu Co-Design erläutert. Zu den derzeitigen Herausforderungen gehören Trainierbarkeit, Genauigkeit und Effizienz der Algorithmen, die sich bei der Anwendung von VQAs auf groß angelegte Anwendungen ergeben (Cerezo et al. 2021).

HPC-Integration

Hochleistungsrechner kommen bei der Berechnung komplexer Probleme zum Einsatz, bei denen eine hohe Rechenleistung nötig ist bzw. ein hoher Speicherbedarf auftritt. Bei diesem sogenannten High-Performance-Computing (HPC) kommen sowohl einzelne Supercomputer als auch zu Clustern zusammengefasste Rechensysteme zum Einsatz. Typische Anwendungsgebiete von HPC liegen dabei häufig im Bereich der Modellierung und Simulation komplexer Systeme wie bspw. in der Wettervorhersage, Strömungsmechanik oder Finanzwirtschaft. Auch in der Forschung wird häufig auf HPC gesetzt, um bspw. Berechnungen im Bereich der Quantenmechanik, Biologie oder Teilchen- und Plasma-physik durchzuführen.

Auch wenn Quantencomputer sich aktuell noch stark in der Entwicklung befinden, gibt es bereits in Europa Bestrebungen, Quantencomputer als sogenannte Beschleuniger bzw. Co-Prozessoren in bestehende HPC-Systeme zu integrieren. Dabei verspricht man sich, die potenziellen Stärken von Quantencomputern im Bereich der Optimierungen, chemischen Simulationen oder im maschinellen Lernen mit denen der klassischen Hochleistungsrechner zu verbinden. So möchte man frühzeitig nicht nur die fachliche Expertise aufbauen, sondern auch für die Industrie und Forschung relevante Anwendungsfälle untersuchen.

Bei der Integration von QC in HPC-Systeme müssen verschiedenste technologische Herausforderungen gemeistert werden. So unterscheiden sich Quantencomputer mit Blick auf Betrieb, Programmierung und Einbindung in bestehende Rechenarchitekturen fundamental von aktuellen klassischen Ansätzen. Aus diesen Bedingungen heraus muss die Anbindung von Quantencomputern an bestehende HPC-Infrastruktur in Form von Softwareschnittstellen und -verbindungen sowie Protokollen definiert werden. Weiterhin muss ein Ressourcenmanagement definiert werden, um die verfügbare QC-Hardware den zu bearbeitenden Rechenaufgaben zuzuweisen. Dies ist insbesondere wichtig, da viele Quantenalgorithmen sich durch einen kontinuierlichen Wechsel zwischen Rechenschritten auf klassischer und QC-Hardware kennzeichnen. Weiterhin müssen Bibliotheken bereitgestellt werden, um den Funktionsumfang durch die zusätzliche QC-Hardware zu erweitern und den Datentransfer zwischen HPC und QC zu managen. Schließlich muss auch die Hardware zur Ansteuerung

des Quantencomputers selbst über passende Middleware mit der HPC-Rechenarchitektur verknüpft werden. Zusammenfassend muss also ein Workflow etabliert werden, der den reibungslosen Einsatz von HPC und QC im hybriden Einsatz vereint.

2018 wurde die gemeinsame Initiative „European High-Performance Computing Joint Undertaking“ gestartet, die durch Unterstützung der EU, europäischen Mitglieds- und assoziierten Staaten sowie privatwirtschaftlichen Mitgliedern ein Supercomputing-Ökosystem in Europa aufbauen soll (EuroHPC JU 2018). Dieses soll wettbewerbsfähig mit den weltweit besten HPC-Systemen sein und auf europäischer Technologie aufbauen.

So sollen Quantencomputer und -simulatoren in die europäische HPC-Infrastruktur integriert werden. Dies entspricht den im Digitalkompass 2030 von der Europäischen Kommission formulierten Ambitionen (European Commission 2021). 2022 wurde ein White Paper mit Herausforderungen und Handlungsempfehlungen für eine europäische HPC/QC-Infrastruktur „EuroQCS“ durch Mitglieder der beiden entsprechenden Communities verfasst (Binosi et al. 2022). Über diese europäische Infrastruktur soll ein Remotezugriff für öffentliche und private Nutzende auf die in Europa zukünftig verteilten Quantenrechnerressourcen ermöglicht werden. Daneben soll es auch die Möglichkeit geben, Quantencomputer mit klassischer Hardware zu emulieren. Dies soll den Entwicklerinnen und Entwicklern die Möglichkeit geben, Quantenalgorithmen auch unabhängig von eventuell nicht verfügbarer Hardware zu entwickeln, indem grundlegende Konzepte der Algorithmik mit einer geringen Anzahl an emulierten Qubits getestet werden können.

Mitte 2023 wurden schließlich die Standorte der sechs Quantencomputer für die EuroQCS-Infrastruktur bekannt gegeben (EuroHPC JU 2023). Die an den jeweiligen Standorten zu integrierende QC-Hardware deckt dabei die aktuell vielversprechenden Technologieansätze wie supraleitende Schaltkreise, gefangene Atome/Ionen und photonische Quantencomputer ab. In Deutschland soll im Rahmen des vom BMBF mit 13,5 Mio. Euro geförderten Projekts Euro-Q-Exa ein Quantencomputer am Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften in Garching in die bestehende HPC-

Infrastruktur integriert werden (Quantentechnologien.de 2023). Das Projekt soll Nutzerinnen und Nutzern die Möglichkeit geben, die technologischen Eigenschaften eines Quantencomputers im Zusammenhang mit der Integration und Beschleunigung von HPC zu erforschen und damit die größten Herausforderungen für die Etablierung einer QC-Industrie in Deutschland zu bewältigen.

Standardisierung

Weltweit laufen seit einigen Jahren verschiedene Standardisierungsaktivitäten bezüglich Quantentechnologien im Allgemeinen und QC im Speziellen. Diese zielen unter anderem darauf ab zunächst geeignete Terminologie und Vokabeln für die Technologien zu finden sowie vornormative Lücken und Standardisierungsbedarfe zu identifizieren. Eine der zentralen Aktivitäten war die Gründung der Focus Group for Quantum Technologies bei den europäischen Normungs- und Standardisierungsorganisationen CEN und CENELEC im Jahr 2020, initiiert u. a. durch die europäische Kommission und das Deutsche Institut für Normung e.V. (DIN). Der Gruppe gehörten über 100 renommierte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie Industrievertreterinnen und -vertreter aus nahezu allen europäischen Mitgliedsstaaten an. Anfang März 2023 veröffentlichte die Gruppe eine Standardisierungs-Roadmap für Quantentechnologien, in der bspw. vornormative Lücken für verschiedene QC-Hardwareplattformen und Standardisierungsbedarfe hierfür identifiziert werden und in der es auch eine Übersicht zu weltweit weiteren Normungs- und Standardisierungsaktivitäten im Bereich QC gibt. Auch veröffentlichte die Gruppe ein Dokument zu Referenzanwendungsfällen, in denen die Standardisierung zukünftig eine Rolle spielen könnte – bspw. im Kontext von cloud-basiertem QC (CEN/CENELEC 2022). Basierend auf den Arbeiten der Fokusgruppe wurde ein Joint Technical Committee unter Leitung von DIN gegründet, in dem zukünftig konkrete Standardisierungsaktivitäten initiiert werden sollen, mit dem Ziel, unter anderem auch die Interoperabilität zwischen den verschiedenen Komponenten eines Quantencomputers zu sichern und damit den europäischen Markt für Quantentechnologien generell vorzubereiten und zu stimulieren.



LITERATUR- VERZEICHNIS

LITERATURVERZEICHNIS

Bandic, Medina; Almudever, Carmen G.; Feld, Sebastian (2023): Interaction graph-based characterization of quantum benchmarks for improving quantum circuit mapping techniques. In: *Quantum Mach. Intell.* 5 (2). DOI: 10.1007/s42484-023-00124-1.

Binosi; Calarco; de Verdière; Corni; Garcia-Saez; Johansson et al. (2022): EuroQCS. European Quantum Computing & Simulation Infrastructure. Online verfügbar unter https://qt.eu/media/pdf/20220202_HPC-QCS-JWP-final.pdf?m=1674828481&, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Boston Consulting Group (2021): What Happens When 'If' Turns to 'When' in Quantum Computing? Online verfügbar unter <https://www.bcg.com/publications/2021/building-quantum-advantage>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Boston Consulting Group (2023): Quantum Computing Is Becoming Business Ready. Online verfügbar unter <https://www.bcg.com/publications/2023/enterprise-grade-quantum-computing-almost-ready>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (2021): Förderaufruf Quanten-Computing – Anwendungen für die Wirtschaft Plattformen Werkzeuge und Methoden für die Erschließung und Integration von Anwendungen des Quanten-Computing. Online verfügbar unter www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/edt_foerderaufruf_quanten_computing_bekanntmachung.pdf, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) (Hg.) (2023): Handlungskonzept Quantentechnologien. Online verfügbar unter https://www.bmbf.de/Shared-Docs/Downloads/de/2023/230426-handlungskonzept-quantentechnologien.pdf?__blob=publicationFile&v=3, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Castelvecchi, Davide (2023): IBM releases first-ever 1,000-qubit quantum chip. In: *Nature* 624 (7991), S. 238. DOI: 10.1038/d41586-023-03854-1.

CEN/CENELEC (2022): Standardization for Quantum Technologies: read our two newly published documents. Online verfügbar unter <https://www.cenelec.eu/news-and-events/news/2023/brief-news/2023-03-22-standardization-for-quantum-technologies/>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Cerezo, M.; Arrasmith, Andrew; Babbush, Ryan; Benjamin, Simon C.; Endo, Suguru; Fujii, Keisuke et al. (2021): Variational quantum algorithms. In: *Nat. Rev. Phys.* 3 (9), S. 625–644. DOI: 10.1038/s42254-021-00348-9.

Data Bridge Market Research (Hg.) (2022): Europe Quantum Computing Market – Industry Trends and Forecast to 2030. Online verfügbar unter <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/europe-quantum-computing-market>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

de Castro (2023): The first on-demand service to simulate neutral atoms quantum processors. Hg. v. Pasqal. Online verfügbar unter <https://www.pasqal.com/articles/the-first-on-demand-service-to-simulate-neutral-atoms-quantum-processors>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Department for Science, Innovation & Technology UK (2023): National Quantum Strategy. Online verfügbar unter https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/1142942/national_quantum_strategy.pdf, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

EuroHPC JU (2018): Discover EuroHPC JU. Online verfügbar unter https://eurohpc-ju.europa.eu/about/discover-eurohpc-ju_en, zuletzt geprüft am 31.10.2023.

EuroHPC JU (2023): One step closer to European quantum computing: The EuroHPC JU signs hosting agreements for six quantum computers. Online verfügbar unter https://eurohpc-ju.europa.eu/one-step-closer-european-quantum-computing-eurohpc-ju-signs-hosting-agreements-six-quantum-computers-2023-06-27_en, zuletzt geprüft am 31.10.2023.

European Commission (2021): 2030 Digital Compass: the European way for the Digital Decade. Online verfügbar unter <https://eufordigital.eu/library/2030-digital-compass-the-european-way-for-the-digital-decade/>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

European Commission (2023): Quantum Technologies Flagship. Online verfügbar unter <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Ezratty, Olivier (2023): Disentangling quantum emulation and quantum simulation. Online verfügbar unter <https://www.oezratty.net/wordpress/2023/disentangling-quantum-emulation-and-simulation/>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Finsterhölzl, Regina; Wittenbrink, Nicole; Wenzel, Benedict; Grzeschik, Christoph; Eisenträger, Marlene; Bürger, Matthias et al. (2022): Quantencomputing – Software für innovative und zukunftsfähige Anwendungen: Potenziale, Entwicklung, Zugang. Hg. v. Technologieprogramm KI-Innovationswettbewerb des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), iit-Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH. Online verfügbar unter <https://www.iit-berlin.de/publikation/quantencomputing-software-fuer-innovative-und-zukunftsfaeheige-anwendungen-potenziale-entwicklung-zugang/>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Fortune Business Insights: Quantum Computing Market Size. Online verfügbar unter <https://www.fortunebusinessinsights.com/quantum-computing-market-104855>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Fraunhofer-Gesellschaft (2023): Quantencomputing zugänglich gemacht: Qrisp High-Level-Programmierframework veröffentlicht. Online verfügbar unter https://www.fokus.fraunhofer.de/de/fokus/news/qrisp-framework-available_2023_05, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Gillmann, Barbara (2023): Bund kürzt Förderung von Quantentechnologie. Hg. v. Handelsblatt. Online verfügbar unter www.handelsblatt.com/politik/deutschland/kritik-von-opposition-bund-kuerzt-foerderung-von-quantentechnologie/29237174.html, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

IBM (2023): IBM Debuts Next-Generation Quantum Processor & IBM Quantum System Two, Extends Roadmap to Advance Era of Quantum Utility. Online verfügbar unter <https://newsroom.ibm.com/2023-12-04-IBM-Debuts-Next-Generation-Quantum-Processor-IBM-Quantum-System-Two,-Extends-Roadmap-to-Advance-Era-of-Quantum-Utility>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

IQM (2024): State of Quantum 2024 Report. Online verfügbar unter <https://meetiqm.com/technology/state-of-quantum-report-2024/>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Kaur, Dashveenjit (2022): Japan's first domestic quantum computer targets 10m users by 2030. Hg. v. Techwire Asia. Online verfügbar unter <https://techwireasia.com/04/2022/japans-first-domestic-quantum-computer-targets-10m-users-by-2030/>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Khaitan, Aastha; Parakhiya, Priyanshu (2023): Variational Quantum Algorithms. Hg. v. Medium. Online verfügbar unter <https://medium.com/@qcgiiitr/variational-quantum-algorithms-66367053a2f3>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Kirkpatrick, Keith (2019): Quantum Computing for Enterprise Markets. Online verfügbar unter <https://omdia.tech.informa.com/om011977/quantum-computing-for-enterprise-markets>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Leprince-Ringuet, Daphné (2024): Funding for quantum startups dropped worldwide in 2023 – but not in EMEA. Hg. v. Sifted. Online verfügbar unter <https://sifted.eu/articles/quantum-startups-funding-2023>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Leymann, Frank; Barzen, Johanna (2020): The bitter truth about gate-based quantum algorithms in the NISQ era. In: Quantum Sci. Technol. 5 (4), S. 44007. DOI: 10.1088/2058-9565/abae7d.

McKinsey & Company (2023): Quantum Technology Monitor. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/de/~ /media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2023/2023-04-24%20qt%20monitor%202023/quantum-technology-monitor-april-2023.pdf>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

McKinsey Digital (2023a): Quantum technology sees record investments, progress on talent gap. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-technology-sees-record-investments-progress-on-talent-gap#/>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

McKinsey Digital (2023b): Quantum technology sees record investments, progress on talent gap. Online verfügbar unter <https://www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/quantum-technology-sees-record-investments-progress-on-talent-gap#/>, zuletzt aktualisiert am 28.02.2024.

National Science & Technology Council (2023): National Quantum Initiative Supplement to the President's FY 2023 Budget. Online verfügbar unter <https://www.quantum.gov/wp-content/uploads/2023/01/NQI-Annual-Report-FY2023.pdf>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Orth, Martin (2023): Industrieland Deutschland – die wichtigsten Fakten. Online verfügbar unter <https://www.deutschland.de/de/topic/wirtschaft/deutschlands-industrie-die-wichtigsten-zahlen-und-fakten>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Polaris Market Research (2022): Quantum Computing Software Market Share, Size, Trends, Industry Analysis Report. Online verfügbar unter <https://www.polarismarketresearch.com/industry-analysis/quantum-computing-software-market>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Preskill, John (2018): Quantum Computing in the NISQ era and beyond. In: Quantum 2, S. 79. DOI: 10.22331/q-2018-08-06-79.

qosf.org: List of Open Quantum Projects. Online verfügbar unter https://qosf.org/project_list/#quantum-full-stack-libraries, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Quantentechnologien.de (2023): Euro-Q-Exa: Europäisches Quantencomputing für Exascale-HPC. Online verfügbar unter <https://www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/weitere-projekte/euroqexa.html>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Quantum Zeitgeist (2023): How much do Quantum Computers Cost? 3 Quantum Computers Available Right Now from Affordable to Expensive. Online verfügbar unter <https://quantumzeitgeist.com/how-much-do-quantum-computers-cost/>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

quantum.gov (2022): Quantum in the CHIPS and Science Act of 2022. Online verfügbar unter <https://www.quantum.gov/quantum-in-the-chips-and-science-act-of-2022/>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

QuEra (2023): Quantum-as-a-Service: Definition, Advantages and Examples. Online verfügbar unter <https://www.quera.com/blog-posts/quantum-as-a-service-definition-advantages-and-examples>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Red Hat (2023): Was ist Containerisierung? Online verfügbar unter <https://www.redhat.com/de/topics/cloud-native-apps/what-is-containerization>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

The Quantum Insider (2023): Quantum Technology Update. Online verfügbar unter https://thequantuminsider.com/wp-content/uploads/2023/02/Quantum-Technology-Investor-Update_vFF.pdf, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

Vantage Market Research: Quantum Computing Market. Online verfügbar unter <https://www.vantagemarketresearch.com/industry-report/quantum-computing-market-2163>, zuletzt geprüft am 28.02.2024.

