ECONSTOR
Make Your Publications Visible.

A Service of

ZBW Leibniz-Informationszentrum Wirtschaft
Leibniz Information Centre for Economics

Kaiser, Oliver S.; Klein, Claudius; Malanowski, Norbert

Working Paper

Quantentechnologien und zukünftige Arbeitswelten

Working Paper Forschungsförderung, No. 314

Provided in Cooperation with:
The Hans Böckler Foundation

Suggested Citation: Kaiser, Oliver S.; Klein, Claudius; Malanowski, Norbert (2023) : Quantentechnologien und zukünftige Arbeitswelten, Working Paper Forschungsförderung, No. 314, Hans-Böckler-Stiftung, Düsseldorf

This Version is available at:
https://hdl.handle.net/10419/281789

Standard-Nutzungsbedingungen:

Die Dokumente auf EconStor dürfen zu eigenen wissenschaftlichen Zwecken und zum Privatgebrauch gespeichert und kopiert werden.

Sie dürfen die Dokumente nicht für öffentliche oder kommerzielle Zwecke vervielfältigen, öffentlich ausstellen, öffentlich zugänglich machen, vertreiben oder anderweitig nutzen.

Sofern die Verfasser die Dokumente unter Open-Content-Lizenzen (insbesondere CC-Lizenzen) zur Verfügung gestellt haben sollten, gelten abweichend von diesen Nutzungsbedingungen die in der dort genannten Lizenz gewährten Nutzungsrechte.

Terms of use:

Documents in EconStor may be saved and copied for your personal and scholarly purposes.

You are not to copy documents for public or commercial purposes, to exhibit the documents publicly, to make them publicly available on the internet, or to distribute or otherwise use the documents in public.

If the documents have been made available under an Open Content Licence (especially Creative Commons Licences), you may exercise further usage rights as specified in the indicated licence.

https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/de/legalcode

WWW.ECONSTOR.EU

Mitglied der Leibniz-Gemeinschaft

Hans Böckler Stiftung
Mitbestimmung · Forschung · Stipendien

WORKING PAPER FORSCHUNGSFÖRDERUNG

Nummer 314, Dezember 2023

Quantentechnologien und zukünftige Arbeitswelten

Oliver S. Kaiser, Claudius Klein und Norbert Malanowski

Auf einen Blick
Es sind gravierende Auswirkungen von aufkommenden Quantencomputern und aufkommender Quantenkommunikation auf die Arbeitswelt der Zukunft zu erwarten. Quantenbasierte Systeme sind nicht einfach die Weiterentwicklung des Bestehenden, sondern haben völlig neue Funktionsweisen im Vergleich zur bekannten digitalen Informations- und Kommunikationstechnologie. Es geht bereits heute darum, möglichst große Gestaltungsspielräume für eine kooperative, menschengerechte Umsetzung bei Unternehmen und ihren Beschäftigten zu nutzen.

FORSCHUNGS-
FÖRDERUNG

© 2023 by Hans-Böckler-Stiftung
Georg-Glock-Straße 18, 40474 Düsseldorf
www.boeckler.de

„Quantentechnologien und zukünftige Arbeitswelten“ von Oliver S. Kaiser, Claudius Klein und Norbert Malanowski ist lizenziert unter

Creative Commons Attribution 4.0 (BY).

Diese Lizenz erlaubt unter Voraussetzung der Namensnennung des Urhebers die Bearbeitung, Vervielfältigung und Verbreitung des Materials in jedem Format oder Medium für beliebige Zwecke, auch kommerziell. (Lizenztext: https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/de/legalcode)

Die Bedingungen der Creative-Commons-Lizenz gelten nur für Originalmaterial. Die Wiederverwendung von Material aus anderen Quellen (gekennzeichnet mit Quellenangabe) wie z. B. von Schaubildern, Abbildungen, Fotos und Textauszügen erfordert ggf. weitere Nutzungsgenehmigungen durch den jeweiligen Rechteinhaber.

ISSN 2509-235

Inhalt

1. Zusammenfassung 5
2. Einleitung 6
3. Entwicklungsstand im Bereich Quantentechnologien 9
3.1 Einordnung 9
3.2 Wie arbeiten herkömmliche Computer? 10
3.3 Was machen Quantencomputer anders? 11
3.4 Wie werden Quantencomputer umgesetzt? 12
3.5 Die Programmierung von Quantencomputern 14
3.6 Quantenannealer 15
3.7 Wie funktioniert Quantenkommunikation? 16
3.8 Die Kernaussagen auf einen Blick 17
4. Zukunftsperspektiven 19
4.1 Quantencomputing 19
4.2 Ziele und Roadmaps für Quantencomputer 20
4.3 Neuromorphe Quantencomputer als Zukunftsvision 22
4.4 Anwendungen des Quantencomputing 23
4.5 Anwendungen der Quantenkommunikation 27
4.6 Die Kernaussagen auf einen Blick 29
5. Fördernde und hemmende Einflussfaktoren 30
5.1 Fördernde Einflussfaktoren 30
5.2 Hemmende Einflussfaktoren 31
5.3 Die Kernaussagen auf einen Blick 33
6. Sozio-ökonomische Aspekte in Gegenwart und Zukunft 34
6.1 Quantencomputing 34
6.2 Quantenkommunikation 36
6.3 Die Kernaussagen auf einen Blick 36

7. Stellung des Standortes Deutschland im internationalen Wettbewerb 37
7.1 Quantencomputing 37
7.2 Quantenkommunikation 39
7.3 Die Kernaussagen auf einen Blick 39
8. Auswirkungen auf zukünftige Arbeitswelten 40
8.1 Quantentechnologien in der Ausbildung an Hochschulen 41
8.2 Ausbildungsberufe 42
8.3 Quantensoftware in Zukunft 43
8.4 Schulbildung 44
8.5 Die Kernaussagen auf einen Blick 45
9. Zehn Thesen für die weitere Diskussion 46
Literatur 49
Autoren 59

1. Zusammenfassung

Quantencomputer und Quantenkommunikation haben aufgrund ihrer radikal anderen Funktionsweise im Vergleich zur elektronischen Digitaltechnik und klassischen optischen Datenübertragung in Zukunft das Potenzial, Prozesse in Wirtschaft, Gesellschaft und zukünftigen Arbeitswelten in manchen Teilgebieten disruptiv zu verändern. Quantenbasierte Systeme sind nicht einfach die Weiterentwicklung des Bestehenden, sondern haben völlig neue Funktions- und Denkweisen im Vergleich zur bekannten digitalen Informations- und Kommunikationstechnologie.

Den mitunter schwer verständlichen Gesetzen der Quantenmechanik folgend, treten an die Stelle der binären Bits und Bytes mit den definierten Zuständen Null und Eins sogenannte Quantenbits mit „Sowohl-als-auch"-Überlagerungszuständen.

Vereinfacht dargestellt kalkuliert ein Quantencomputer alle Ergebnisse der bekannten logischen Operationen gleichzeitig, statt wie ein klassischer Computer nacheinander alle Möglichkeiten abarbeiten zu müssen. Die Lösung spezieller Aufgaben kann dadurch deutlich schneller ermittelt werden als durch das noch so schnelle Abarbeiten der Algorithmen, also der Rechenvorschriften, in herkömmlichen, digitalen Computern. Rechenvorgänge können so z. B. von einigen Wochen auf einige Stunden reduziert werden oder es werden Rechenvorgänge möglich, die bisher unmöglich schienen.

Das Working Paper unterscheidet sich deutlich von rein technologiezentrierten Publikationen zu Quantentechnologien. Es bietet zum einen mit Quantencomputern und Quantenkommunikation eine klare Eingrenzung des breiten Themenfeldes Quantentechnologien, und es werden gut verständlich konkrete Anwendungsbeispiele in Verbindung mit aktuellen und zukünftigen Herausforderungen diskutiert. Zum anderen greift das Working Paper erstmals die Beziehung von Quantentechnologien und zukünftigen Arbeitswelten auf und skizziert damit mögliche Auswirkungen auf Arbeitswelten.

Die konstatierten Auswirkungen von Quantencomputern und Quantenkommunikation auf zukünftige Arbeitswelten sind frühzeitig zu sondieren und zu bewerten, auch wenn diese Technologien gegenwärtig noch nicht im großen Stil in der Anwendung sind. Es geht darum, zum jetzigen Zeitpunkt möglichst große Gestaltungsspielräume einer noch recht frühen Entwicklung kooperativ für Unternehmen und ihre Beschäftigten in Deutschland und Europa nutzen zu können.

2. Einleitung

Die Datenvolumina und neue Möglichkeiten der Datenverarbeitung und -auswertung in der gesamten Informationstechnik sprengen schon heute alle Vorstellungskraft und sind hochkomplex. Steuerbarkeit und Überwachung werden immer komplizierter. Aufgrund der radikal anderen Funktionsweise im Vergleich zur elektronischen Digitaltechnik und optischen Datenübertragung können Quantentechnologien in Zukunft industrielle, wirtschaftliche und gesellschaftliche Prozesse und somit auch die zukünftigen Arbeitswelten disruptiv verändern.

Zum Beispiel kann für bisher nicht lösbare oder sehr komplexe Problemstellungen möglicherweise eine erheblich gesteigerte Geschwindigkeit bei Quantencomputern und Arbeitsprozessen erreicht werden, die gegenwärtig für die meisten Menschen kaum vorstellbar ist.

Der Koalitionsvertrag der neuen Bundesregierung sieht vor, dass Investitionen in die Quantentechnologien und weitere digitale Zukunftstechnologien messbar gestärkt und dabei klare Schwerpunkte gesetzt werden. Auf diese Weise sollen technologische Souveränität und die hinreichende Ausschöpfung der Potenziale der Digitalisierung erreicht werden. Das zentrale Ziel dabei ist es, Marktreife für die Zukunftstechnologien zu erreichen (SPD / Bündnis 90 / Die Grünen / FDP 2021).

In einem Gutachten der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) wird diese Ausrichtung begrüßt, gleichzeitig wird jedoch darauf verwiesen, dass im Koalitionsvertrag keine detaillierte Richtung vorgegeben wird (EFI 2022). Eine Präzisierung findet sich mittlerweile in der „Agenda Quantensysteme 2030“. Hier wird u. a. festgehalten, dass „Forschungsergebnisse aus den Quantentechnologien in wirtschaftlich erfolgreiche Produkte und Dienstleistungen überführt werden sollen“ (VDI 2022). Besonders betont wird, dass neben der staatlichen Förderung auch erhebliche private Investitionen notwendig seien.

Bei Quantentechnologien ist offensichtlich, dass quantenbasierte Systeme keine Weiterentwicklung des Bestehenden sind und in völlig neuen Funktions- und Denkweisen keinen Bezug zur heutigen elektronischen Datenverarbeitung haben (BMBF 2022). Bisher werden die Auswirkungen von Quantentechnologien auf zukünftige Arbeitswelten in Forschungsprojekten nicht oder am Rande thematisiert (siehe z. B. Malanowski 2021).

Allein mit der Ausrichtung auf Fortbildung und Umschulung wird es kaum gelingen – so die Ausgangsthese des vorliegenden Working Papers –, ausreichend dual ausgebildete Fachkräfte wie heutige Fachinformatiker*innen in diesem neuen Technologiefeld und seinen Anwendungsfeldern (u. a. autonome Mobilität, Medizintechnik und Materialprüfung) einzusetzen. Vielmehr sind vor allem Ausbildungsberufe im Rahmen der

dualen Ausbildung und Beteiligungsmöglichkeiten für die Beschäftigten neu zu konzipieren. Erst dann wird es möglich sein, dass volle Potenzial der Quantentechnologien für eine menschengerechte Arbeit in zukünftige Arbeitswelten zu nutzen.

Diese Ausgangsthese ist anschlussfähig an die Überlegungen von Sabine Pfeiffer, die herausgearbeitet hat, dass das gesamte Bildungssystem in Deutschland erstens selbst einem starken Wandel unterliegt und zugleich mit einer sich immer schneller verändernde Arbeitswelt inklusiver ihrer Innovationen und Technologien vorzubereiten habe. Dafür bringt sie die Beschreibung „Berufliche Bildung 4.0“ ein (Pfeiffer 2016). „Der Wandel der Arbeit erfordert mehr und höhere Qualifikationen. Höher bedeutet aber nicht automatisch und ausschließlich akademisch“ (Pfeiffer 2015). Letztere Aussage von Sabine Pfeiffer lässt sich auf die im vorliegenden Working Paper behandelten Quantentechnologien übertragen.

Das vorliegende Working Paper ist vor allem ausgerichtet auf die für Arbeitnehmer*innen gegenwärtig besonders relevanten Quantencomputer und die Quantenkommunikation. Damit wird zum einen eine klare Eingrenzung des breiten Themenfeldes Quantentechnologien vorgenommen, und es werden gut verständlich konkrete Anwendungsbeispiele in Verbindung mit aktuellen und zukünftigen Herausforderungen diskutiert. Zum anderen greift das Working Paper erstmals die Beziehung von Quantentechnologien und zukünftigen Arbeitswelten auf und skizziert damit mögliche Auswirkungen auf Arbeitswelten und Anzeichen für Gestaltungsfragen. Folgende Leitfragen werden adressiert:

- Wie ist der derzeitige Entwicklungsstand bei Forschung & Entwicklung im Bereich Quantentechnologien (Fokus auf Quantencomputing und -kommunikation)? Wo finden sich bereits konkrete Anwendungen für welche Bereiche/Branchen?
- Welche Fortschritte werden in der näheren Zukunft erwartet, die in der Öffentlichkeit noch nicht breit diskutiert werden?
- Welche fördernden und welche hemmenden (sozialen, ökonomischen, politischen, ökologischen oder technischen) Faktoren sind bei (der Anwendung von) Quantentechnologien (Fokus auf Quantencomputing und -kommunikation) zu beobachten?
- Welche sozioökonomischen Aspekte werden gegenwärtig in der Diskussion über Quantentechnologien (Fokus s. o.) thematisiert? Wo kommt es zu neuen Kooperationen oder Konkurrenzen von Akteuren?
- Welche Aspekte sollten in Verbindung mit zukünftigen Arbeitswelten thematisiert werden (u. a. Beschäftigungsentwicklung, Arbeitsorganisation, Qualifizierung, Nutzen für die Beschäftigten)?
- Wie ist gegenwärtig die Stellung des Standortes Deutschland im internationalen Wettbewerb/Vergleich bei diesem Thema zu bewerten?

- Welche weiteren Schritte sind beim Thema „Quantentechnologien und zukünftige Arbeitswelten“ notwendig?

Das vorliegende Working Paper basiert auf einem Impulspapier, in dem Ergebnisse einer Literaturanalyse aufbereitet wurden und bezieht die Diskussion mit ein, die im Rahmen eines Vertiefungsworkshops im Dezember 2021 zum gleichen Thema stattfand. Diese Ergebnisse basieren nicht auf „harten“ Daten und Fakten, sondern spiegeln eher gegenwärtige Einschätzungen, Erwartungen und Thesen von Fachleuten wider. Insofern dienen die Erkenntnisse vor allem dazu, als erste Vertiefung bzw. Deep Dive relevante Trends frühzeitig zu erkennen und diese für eine prospektive Innovations- und Technikgestaltung für menschengerechte zukünftige Arbeitswelten aufzubereiten.

Das Working Paper hat zum einen zum Ziel, erste Antworten auf die oben genannten Leitfragen zu liefern. Zum anderen soll es Denkanstöße für eine breitere öffentliche Diskussion des Themas in einem innnovations- und arbeitspolitischen Kontext liefern. Die Autoren bedanken sich an dieser Stelle sehr herzlich bei den Fachleuten aus Wirtschaft, Wissenschaft, Behörden und Gewerkschaften, die ihr Wissen aus verschiedenen fachlichen Perspektiven im Rahmen des Vertiefungsworkshops offen geteilt und zur Diskussion gestellt haben sowie bereit waren, über den eigenen Tellerrand hinauszuschauen.

Ein Hinweis zum Aufkommen des Themas Quantentechnologien: Bei der Durchführung des von der Hans-Böckler-Stiftung seit 2015 geförderten Projektes „Monitoring Innovations- und Technologiepolitik“ wurde das Thema „Informations- und Kommunikationstechnologien auf Basis von Quanten und Photonen“ als eines von 15 Zukunftsthemen einem ausgewählten Kreis von Fachleuten im August 2017 vorgestellt. Diese Fachleute bewerteten das Thema als eines, das es weiter zu beobachten gelte hinsichtlich seiner Auswirkungen auf zukünftige Arbeitswelten (Malanowski et al. 2018).

3. Entwicklungsstand im Bereich Quantentechnologien

Der Begriff „Quantentechnologie“ beschreibt Methoden, die vollständig auf den physikalischen Phänomenen der Quantenmechanik beruhen. Diese Phänomene spielen in unserer Welt vom Kilometer- über den Millimeter- bis zum Mikrometermaßstab keine maßgebliche Rolle. Hier ist die klassische Physik tonangebend und alles, was die Ingenieurwissenschaften daraus als Technik realisieren.

Daraus zu folgern, dass Quantentechnologien in der heutigen Welt noch gar keine Rolle spielen, wäre jedoch nicht richtig. Es gibt Geräte, die seit Jahrzehnten bereits Quantentechnologien nutzen. Weit verbreitet sind die extrem präzisen Atomuhren, deren Zeitsignal an Funkuhren verbreitet wird. Satellitennavigationssysteme wie GPS, Galileo und Glonass nutzen ebenfalls Atomuhren in Satelliten (Quantum Flagship o. D. a).

Auch Laser, ob sie Stahlplatten zerschneiden, in CD-Spielern verbaut sind oder optische Kommunikation über Glasfaser ermöglichen, sind eine Art Quantentechnologie der ersten Generation. Die Mikroelektronik mit ihren integrierten Schaltungen und Mikroprozessoren, die früher tausende Transistoren und heute viele Milliarden davon enthalten können, ist durch ihre Miniaturisierung inzwischen ebenfalls bereits von Quanteneffekten beeinflusst.

Während diese erste Generation der Quantentechnologien noch mit sogenannten Ensemble-Effekten arbeitet, macht die zweite Generation einzelne Atome nutzbar und spricht deren Zustände individuell an. Als neue, moderne Zweige der Quantentechnologien dieses Jahrhunderts gelten daher Sensorik und Messtechnik, die Quantensimulation, die Quantenkommunikation und Quantencomputer.

3.1 Einordnung

Aufgrund der radikal anderen Funktionsweise im Vergleich zur elektronischen Digitaltechnik und optischen Datenübertragung haben Quantencomputer und Quantenkommunikation in Zukunft das Potenzial, industrielle, wirtschaftliche und gesellschaftliche Prozesse und somit auch die zukünftigen Arbeitswelten in manchen Teilgebieten disruptiv zu verändern. Zum Beispiel könnte für bisher nicht lösbare oder sehr komplexe Problemstellungen eine erheblich gesteigerte Geschwindigkeit bei Quantencomputern und Arbeitsprozessen erreicht werden, die gegenwärtig für die meisten Menschen kaum vorstellbar ist.

Quantenbasierte Systeme sind keine Weiterentwicklung des Bestehenden, sondern haben völlig neue Funktions- und Denkweisen. Allen Methoden in diesem zukünftigen Technologiefeld ist gemeinsam, dass sie auf den physikalischen Gesetzen der Quantenmechanik basieren und sich von Grund auf radikal von der bekannten digitalen Informations- und Kommunikationstechnologie unterscheiden.

Den schwer verständlichen Gesetzen der Quantenmechanik folgend, treten an die Stelle der binären Bits und Bytes mit den zwei definierten Zuständen Null und Eins sogenannte Quantenbits oder Qubits (sprich: kju-bits) mit „Sowohl-als-auch"-Überlagerungszuständen. Dabei geht es um die Durchführung von Berechnungen und Optimierungen (Quantencomputing) und um die Kommunikation (Quantenkommunikation), die verschlüsselt erfolgt bzw. so gestaltet ist, dass das „Mithören" explizit bemerkt wird.

3.2 Wie arbeiten herkömmliche Computer?

Digitale Computer, mit denen wir seit Jahrzehnten arbeiten, kennen zwei Zustände: Null oder Eins, technisch gleichgesetzt mit aus- oder eingeschalteter Spannung. Ein Bit kann eben den Wert Null oder Eins haben, acht Bit stellen ein Byte dar, eine Konvention aus den 1960er-Jahren. In diesem einen Byte lassen sich Zahlen bis 255 darstellen und das Alphabet mit Groß- und Kleinbuchstaben, den Ziffern, Satz- und Sonderzeichen abbilden.

Die wichtigsten Komponenten der Digitaltechnik sind Mikroprozessoren, Mikrocontoller und anwendungsspezifische integrierte Schaltungen (engl. application-specific integrated circuit, ASIC). Sie alle bestehen aus tausenden bis zu einer zweistelligen Milliardenzahl von Transistoren, die ab den 1970er-Jahren als mikroelektronische Schalter die mechanischen Relais und Elektronenröhren der Anfangszeit ersetzt haben.

Das eigentliche Rechnen mit diesen Transistor-Schaltkreisen basiert auf der booleschen Algebra, bei der zwei oder mehr Eingänge allein mit den elementaren, logischen Operatoren UND, ODER sowie NICHT zu einem Ausgang verknüpft sind. Als Zustände an Ein- und Ausgängen sind eben nur Null oder Eins möglich. Das gilt auch für die flüchtigen und dauerhaften Datenspeicher, die RAMs, Festplatten und Flash-Speicher. Das Zusammenspiel dieser elementaren Logikoperationen auf der Mikrochipebene geschieht auf derart komplexe Weise, dass Berechnungen und die Datenverarbeitung etwa von Texten oder Bildern damit sehr schnell durchgeführt werden können.

Was wir im allgemeinen als „Computer“, also als universellen Rechner für die verschiedensten Aufgaben, bezeichnen, nutzt als Konzept die von-Neumann-Architektur, mit einem Rechenwerk, dem Steuerwerk und einem Hauptspeicher (Lackes/Siepermann 2018). Dazu benötigen Computer – aber auch Smartphones – neben einem grundlegenden Betriebssystem noch Software – Programme und Apps –, die bestimmen, welche Aufgaben gelöst werden sollen.

Die elementaren Berechnungen geschehen dabei mit bis zu mehreren Milliarden Operationen pro Sekunde, was die heutzutage übliche Taktfrequenz von Prozessoren im Gigahertz-Bereich andeutet. Trotz der für Menschen enormen und nicht wahrnehmbaren Geschwindigkeit passiert in digitalen Computern alles nacheinander – Schritt für Schritt.

3.3 Was machen Quantencomputer anders?

Die Idee zu Quantencomputern skizzierte der Physiker und Nobelpreisträger Richard Feynman bereits Anfang der 1980er-Jahre. Er wollte das Verhalten einzelner Atome und Moleküle simulieren, deren Verhalten nach den Gesetzen der Quantenmechanik mit herkömmlichen Algorithmen und Computern nicht nachzubilden ist. Also ging er davon aus, dass man diese Aufgabe am besten mit Atomen selbst berechnen könnte. Die praktische Umsetzung geschah jedoch erst im 21. Jahrhundert. In den letzten Jahren wurde die Technik so konkret, dass sie in Kürze kommerzielle Anwendungen ermöglichen wird (Michaels 2019).

Alle Quantencomputer erlauben in ihren Quantenbits nicht nur die exakten Werte Null und Eins, sondern eine Überlagerung dieser Werte – in der Physik wird von einer Überlagerung, einer Superposition, gesprochen. Ein Qubit kann beliebige Werte zwischen Null und Eins einnehmen – mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit.

Während bei einem Bit eines klassisch digitalen Computers stets bekannt ist, welchen Zustand, Null oder Eins, es hat, wird dies bei Qubits erst mit der Messung klar. Das gilt natürlich auch für mehrere Bits „nebeneinander“, die in einem Byte einen Buchstaben oder eine Ziffer repräsentieren. Bei Quantencomputern ist das nicht eindeutig, denn die Überlagerung kann sich auf mehrere Qubits erstrecken, sodass man von einer Verschränkung spricht. Die Eigenschaften mehrerer Qubits beeinflussen sich dann untereinander, ohne dass sie – wie bei digitalen Computern – gezielt manipuliert werden müssen.

Ähnlich wie digitale Computer auch können Quantencomputer eine Abwandlung der logisch-digitalen Operationen der booleschen Algebra verarbeiten. Wichtiger ist jedoch die quantenphysikalische Eigenschaft, mit

Wahrscheinlichkeiten umgehen zu können. Mit der Verschränkung der Qubits untereinander ist zusätzlich ein quasi gleichzeitiges, stark paralleles Rechnen möglich. Die Lösung spezieller Aufgaben kann dadurch deutlich schneller ermittelt werden als durch das noch so schnelle Abarbeiten der Algorithmen, also der Rechenvorschriften, in herkömmlichen, digitalen Computern – selbst wenn diese mit den gern beworbenen, mehreren Prozessorkernen ebenfalls einige Arbeiten parallel erledigen (Calarco/Riedel 2018a).

Das heute klassische Beispiel für den Vorteil von Quantencomputern in einer speziellen Aufgabe ist das Zerlegen großer Zahlen in ihre Primzahlenfaktoren. Gängige Verschlüsselungstechnologien in der Informatik beruhen im Prinzip auf der Multiplikation großer Primzahlen, also der Zahlen, die nur noch durch sich selbst und durch Eins geteilt werden können. Alle anderen Zahlen sind stets aus der Multiplikation mindestens zweier Primzahlen darstellbar. Auf diese Weise werden der Datenverkehr zum Online-Banking, Festplatten als Datenspeicher, zu Hause und in der Cloud, verschlüsselt. Nur wer den Schlüssel dazu kennt, kann die Daten entschlüsseln.

Wer den Schlüssel nicht kennt, muss ihn knacken, indem die Multiplikation der großen Primzahlen rückgängig gemacht wird. Notwendig ist aus der multiplizierten Zahl auf die ursprünglichen Primzahlen zu kommen. Dies dauert für die heutzutage gängige RSA-2048-Verschlüsselung mehrere Millionen Jahre – ein Quantenomputer der näheren Zukunft könnte diese Verschlüsselung in wenigen Tagen errechnen

3.4 Wie werden Quantencomputer umgesetzt?

Es gibt derzeit mehrere Technologie-Ansätze, um Quantencomputer zu verwirklichen. Sechs sollen exemplarisch genannt sein, von denen drei in sogenannten Kryostaten arbeiten, spezielle Kühlgeräte, die sehr tiefe Temperaturen erreichen.

- IBM, Google und einige kleinere Unternehmen nutzen Schaltkreise aus supraleitenden Metallen, die bei einer Temperatur von –273 °C Ströme ohne elektrischen Widerstand leiten. Die Programmierung und das Auslesen der Ergebnisse erfolgen über Mikrowellen. Diese Technologie wird derzeit am häufigsten eingesetzt und wird auch vom größten europäischen Projekt OpenSuperQ angewandt (Hossenfelder 2021).
- Das deutsche Unternehmen Infineon, das US-Unternehmen Honeywell, das Startup IonQ und die Universität Innsbruck halten Ionen, elektrisch geladene Atome, durch Wechselwirkung mit Magneten in ei-

nem Vakuum fest, den Ionenfallen. Laserlicht wird zur Kommunikation mit der Außenwelt verwendet (Grotelüschen 2020). Die Anordnung funktioniert etwa ein Grad über dem absoluten Temperaturnullpunkt und ist daher kühltechnisch besser beherrschbar als supraleitende Systeme, die bis auf hundertstel oder zehntel Grad oberhalb des Temperaturnullpunkts gekühlt werden müssen (Hossenfelder 2021).

- Quantencomputing mit Photonen, also (Laser-)Licht, funktioniert bei Zimmertemperatur. Akteure sind die Firmen Xanadu aus dem Großraum Toronto (Kanada) und PsiQuantum aus Kalifornien sowie seit 2021 das zum deutschen Familienunternehmen Trumpf (Ditzingen) gehörende Start-up Q.ant (Thomä 2021). Photonische Quantenprozessoren werden unter Federführung von Stefanie Barz von der Universität Stuttgart entwickelt (Mayer-Grenu 2022).
- Winzige, speziell bearbeitete Diamanten können als Basis für Qubits dienen, die einzelne Elektronen festhalten und mit Laserlicht und Mikrowellen programmiert und ausgelesen werden. Dies funktioniert bei Raumtemperatur (Grotelüschen 2020). An diesem Ansatz arbeitet man an den Universitäten Leipzig und Stuttgart, am Massachusetts Institute of Technology (USA) sowie beim australischen Startup Quantum Brilliance (Hossenfelder 2021), das im März 2022 mit dem Aufbau einer deutschen Niederlassung in Stuttgart begonnen hat.
- An den Universitäten Sydney (Australien) und Princeton (USA) dient ein Siliziumchip, vergleichbar mit dem der digitalen Computer, als Basis. Hiermit werden jedoch einzelne Elektronen durch äußere elektrische und magnetische Felder manipuliert. Zwar wäre die Herstellung der Quantenchips in Massenproduktion mit einer Chipfabrik für etwa eine Milliarde Euro durchaus mittelfristig machbar, aber für den Betrieb ist hier eine Kühlung auf ein Zehntel Grad über dem absoluten Nullpunkt bei –273 °C nötig. Eine Variante, die nur –271 °C benötigt und den Kühlprozess vereinfachen würde, ist bereits in der Entwicklung (Grotelüschen 2020).
- Microsoft und die niederländische Technische Universität Delft setzen auf eine Kombination von Halbleitern wie in der Mikroelektronik und Supraleitern, aus Indium, Antimon und Niob. Wie die Qubits von außen kontrolliert werden können, steht nicht endgültig fest. Aber auch dieses System braucht eine starke Kühlung nahe des absoluten Temperatur-Nullpunkts (Grotelüschen 2020).

3.5 Die Programmierung von Quantencomputern

Die Mikroprozessoren der klassischen, digitalen Computer und Smartphones werden in Maschinensprache programmiert, die auf den elementaren Logikfunktionen und dem überschaubaren Befehlssatz des jeweiligen Mikroprozessor-Modells basiert. Maschinencode ist für Menschen schwer verständlich und eben sehr nah an der Hardware orientiert.

Das, was unter „Programmieren" einer ausführbaren Datei – einem Programm, einer Software, einer App – verstanden wird, geschieht stets in einer „höheren Programmiersprache", die von den technischen Details der Computer-Hardware abstrahiert und weniger komplex als Maschinensprache ist. Dazwischen arbeiten die sogenannten Interpreter oder Compiler sowie das Betriebssystem des Computers. Höhere Programmiersprachen nutzen eine stark strukturierte und formalisierte Grammatik („Syntax"), die Programmierer sofort verstehen. Bekannte Beispiele sind C++, C#, Java, Python, PHP und JavaScript.

An den Compilern für Quantencomputer wird in der Forschung engagiert gearbeitet; erste Ansätze sind bereits entwickelt. Die Eidgenössische Technische Hochschule Zürich (Schweiz) vermeldete im Sommer 2020, eine zumindest „intuitive" Programmiersprache für Quantencomputer auf den Weg gebracht zu haben (Meyer 2020).

Die Herausforderung liegt generell unter anderem darin, dass der Zustand der Qubits lediglich in Wahrscheinlichkeiten beschreibbar ist, bis er sich durch eine Messung konkretisiert (Schönherr 2020). Die klassische Architektur der Mikroprozessoren und anwendungsspezifischer Mikrochips, die auf den logischen Funktionen UND, ODER, NICHT und den daraus abgeleiteten, mikroelektronischen Logikgattern digitaler Computer basiert, kann nicht einfach auf Quantencomputer übertragen werden.

Grund dafür ist, dass die logischen Funktionen bestimmten mathematische Voraussetzungen wie der Umkehrbarkeit aller Funktionen genügen müssen. Daher sind auch diese digitalen Funktionen mittels Quantengattern – statt Logikgattern – durchaus in Quantenrechnern nachzubilden, benötigen jedoch ein Vielfaches an Quantenbits, um die Fehler zu korrigieren. In Fachzeitschriften gibt es bereits Anleitungen, wie einfache Quantenschaltungen mit Quantengattern entworfen werden können und mit öffentlich verfügbaren Schnittstellen auf Quantencomputern etwa von IBM oder Rigetti Computing zum Laufen gebracht werden (Neukart 2020a).

Da die Qubits Wahrscheinlichkeiten repräsentieren, sind auch die Ergebnisse der Berechnungen mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit falsch. Daher müssen sie vielfach berechnet werden, um das Ergebnis

daraus statistisch zu bestimmen. Während die Bits digitaler Computer beliebig oft ausgelesen werden können, existieren Qubits nur bis zur Messung in ihrem Überlagerungszustand – sind also nur einmalig auslesbar.

Im durchgeführten Vertiefungsworkshop wurde für eine Vertiefung dieses Ansatzes plädiert. Im Vertiefungsworkshop wurde von den Technolog*innen darauf verwiesen, dass zwischen der Programmierung der Firmware und der Programmierung der Software unterschieden werden müsse. Für die Firmware von Quantencomputern müssen Menschen die Quantenalgorithmen und die Quantenfehlerkorrektur selbst entwickeln und dazu komplexe Kenntnisse in Quantenphysik und Informatik besitzen. Diese Quanteninformatiker*innen werden demnach stark spezialisiert sein und vermutlich direkt durch ihr universitäres Studium geprägt, also jünger sein. Sie sind es, die die Firmware für die Quantenhardware schreiben, quasi Maschinensprache (vgl. Analogdesigner für ASICs).

Weiterhin wird es Beschäftigte geben, die die regulären Algorithmen für Quantencomputer in einer Software-Hochsprache schreiben, also die Anwendungen auf Quantencomputern umsetzen. Diese „Quantenprogrammierer*innen“ müssen zwar die Eigenschaften vom Quantencomputern kennen, aber nicht die Quantenphysik dahinter beherrschen. Im Unterschied zu Quanteninformatiker*innen wären Quantenprogrammierer*innen als Entwickler*innen der Anwendungs-Software mit entsprechender Weiterbildung einfacher zu gewinnen.

3.6 Quantenannealer

Eine Art Brückentechnologie zum universellen, frei programmierbaren Quantencomputer stellen anwendungsspezifische Quantenannealer dar, die bereits seit rund zehn Jahren im praktischen Einsatz sind und auf Optimierungsprobleme spezialisiert sind.

Bekannt wurde das kanadische Unternehmen D-Wave durch eine speziellen Quanten-Annealing-Maschine, mit deren Algorithmus der deutsche Automobilkonzern Volkswagen im Jahr 2018 für 10.000 Taxen die Wegstrecken zum Pekinger Flughafen optimierte – und zwar so, dass jedes Fahrzeug auf einer individuellen, schnellen Route unterwegs war und die Umleitungsstrecken nicht ebenfalls verstopft werden.

Die dafür nötigen 200 Milliarden Rechenoperationen benötigen nicht einmal eine zehntel Sekunde – herkömmliche Computer würden das Problem in absehbarer Zeit nicht lösen können. Dabei handelte es sich allerdings um eine nachträglich durchgeführte Simulation. Ein realer erfolgreicher Feldtest fand 2019 im portugiesischen Lissabon mit neun Shuttle-Bussen statt (Gieselmann 2019).

Der Begriff Annealing stammt aus der Werkstoffkunde und meint dort das Ausglühen oder Härten von Metallen und Gläsern. Im übertragenen Sinne werden durch das Erhitzen magnetische Eigenschaften verändert, indem viele Atome in einen Zustand geringer Energie wechseln. Dieses physikalische Energieminimum ist in der Mathematik gleichzusetzen mit einem gelungenen Optimierungsprozess, in dem für gewöhnlich ein Minimum als Lösung sehr vieler Zustände gesucht wird.

Quantenannealer sind nun in der Lage, das tatsächlich kleinste aller Minima („absolutes Minimum“) zu ermitteln. Das zeichnet sie im Vergleich zu Algorithmen auf klassischen Digitalcomputern aus, die oftmals nur nahegelegene, „lokale“ Minima – und damit Lösungen – finden, aber eben nicht das absolute Minimum als beste Lösung (Braun 2019).

Quantenannealer benötigen im Gegensatz zu Quantencomputern keine aufwendige Fehlerkorrektur. D-Wave gibt an, die Anzahl der Qubits jede zwei Jahre verdoppeln zu können, wobei die Rechenleistung wegen zusätzlich verbesserter Peripherie-Technik um den Faktor 100 steigt (Gieselmann 2019).

Inzwischen steht das Advantage-Quantum-System mit 5.000 Qubits bereit (D-Wave Systems 2020). Ein solches System wurde im Januar 2022 am Forschungszentrum Jülich in Betrieb genommen und ist damit das erste außerhalb Nordamerikas. Es ist Teil der Jülicher Nutzer-Infrastruktur für Quantencomputing (JUNIQ) und steht Industrie und Wissenschaft offen. In Japan arbeiten Fujitsu und Hitachi ebenfalls an Quantenannealern (Braun 2019).

3.7 Wie funktioniert Quantenkommunikation?

Quantenkommunikation ist optische Kommunikation mit Licht, wobei wegen der quantenmechanischen Effekte häufig der Begriff „Photonen“ für die elementaren Lichtteilchen erscheint. Kommuniziert wird mittels Laserlicht, in der Regel über Lichtwellenleiter, von denen mehrere in Glasfaserkabeln zusammengefasst sind.

Glasfaser-Verbindungen sind das Rückgrat des gesamten weltweiten Internets, mit Ausnahme der „letzten Meile“, die in Deutschland vorrangig über Kupfer-Kabel abgewickelt wird (DSL) und des Mobilfunks zwischen den Smartphones und dem dichten Netz der Basisstationen. Ebenso kann via Laserlicht auf gerader Linie durch die Luft (und Vakuum) kommuniziert werden, als Punkt-zu-Punkt-Verbindung. Eines der Objekte kann dabei durchaus beweglich sein, wie etwa ein Flugzeug oder ein Satellit im Weltall.

Ähnlich wie bei Qubits ist auch bei Photonen der Verschränkungseffekt wichtig: jedes Auslesen („Abhören“) der Kommunikation durch Dritte führt unverzüglich dazu, dass der eigentliche Empfänger dies bemerkt und die Kommunikation sensibler Daten stoppen kann. Daher gilt Quantenkommunikation grundsätzlich als „abhörsicher“. Dies gilt aus physikalischen Gründen selbst dann, wenn Dritte mithilfe eines Quantencomputers versuchen, mitzulesen.

Eine technische Herausforderung ist die Reichweite der Quantenkommunikation in Glasfasern. Jedes in den Lichtwellenleitern geführte Licht wird mit der Wegstrecke schwächer, sodass es verstärkt werden muss – in der Regel nach 100 bis 200 Kilometern. Dazu gibt es rein optisch funktionierende Verstärker, bei denen das Lichtsignal gerade nicht erst in ein elektrisches Signal zurückgewandelt werden muss, um dann regeneriert optisch weitergeleitet zu werden.

Wegen der Quantenverschränkung ist die optische Verstärkung bei der Quantenkommunikation jedoch nicht möglich – es würde eine Kopie der Photonen angelegt, die quasi dem „Abhören“ entsprechen würde. Also sind spezielle Quantenrepeater nötig, die aus einem Quantencomputer mit nur wenigen Qubits bestehen, der die Signale ohne Entschlüsselung weitergibt, aber kurz zwischenspeichern muss. Diese Speicherung von Photonen ist derzeit noch nicht möglich und weiterhin ein Grundlagenforschungsproblem (Kagermann et al. 2020).

Neben der begrenzten Reichweite der Quantenkommunikation befindet sich auch die Vernetzung selbst erst in der Anfangsphase. Bisher existieren lediglich Punkt-zu-Punkt-Verbindungen zwischen zwei Orten bzw. Teilnehmer*innen. Jedes herkömmliche Netzwerk verbindet natürlich eine Vielzahl von Teilnehmern beliebig untereinander. Im Jahr 2021 wurde erstmals an der University of Science and Technology im chinesischen Hefei ein Quantennetzwerk mit 40 teilnehmenden Computern eingerichtet. Das System ermöglicht gesicherte Verbindungen über wenige Dutzend Kilometer bis zu fünf Minuten lang, ist empfindlich gegen Ausfälle von Komponenten und hat eine geringe Datenrate, die der der analogen Modems um das Jahr 2000 entspricht (Löfken 2022).

3.8 Die Kernaussagen auf einen Blick

- Quantentechnologien der 2. Generation beschreiben die Nutzbarmachung und gezielte Manipulation von einzelnen Quantenzuständen.
- Anwendungsfeld Computing: Durch die Möglichkeit, Qubits statt klassischer digitaler Bits zu verwenden, lassen sich völlig neuartige Algo-

rithmen entwickeln, die mit herkömmlichen Computern bisher unlösbare Probleme lösbar machen.

- Anwendungsfeld Kommunikation: Die klassische optische Kommunikationstechnik als „Rückgrat des Internets“ muss steigende Datenraten bewältigen. Das zentrale Problem ist also ein quantatives Problem. Quantenkommunikation will nicht die Datenrate steigern, sondern die Abhörsicherheit (qualitativ) verbessern.

4. Zukunftsperspektiven

4.1 Quantencomputing

Bei digitalen Computern stellen Marketing-Fachleute gern die Zahl der Prozessorkerne und die Taktgeschwindigkeit des Mikroprozessors, also des Rechners im wortwörtlichen Sinne, in den Vordergrund. Bei Quantencomputern, deren technische Evolution erst begonnen hat, steht deren Qubit-Anzahl im Mittelpunkt – wobei sich mit jedem zusätzlichen Qubit die Rechenleistung weit mehr als verdoppelt (Hartnett 2019).

Es startete bei zwei Qubits im Jahr 2009 und fünf im Jahr 2015. Im Jahr 2017 waren es 17, 2019 schon 72. Damit war eine wichtige Grenze von etwa 50 Qubits überschritten, bis zu der Quantencomputer noch von herkömmlichen, digitalen Supercomputern simuliert werden konnten (Calarco/Riedel 2018a). Googles Quantenprozessor „Sycamore“ konnte mit 53 Qubits im Jahr 2019 erstmals eine Rechenaufgabe in wenigen Minuten weitaus schneller lösen als ein digitaler Computer, der 10.000 Jahre benötigt hätte. Damit wurde die „Quantenüberlegenheit“ („Quantum Supremacy“) öffentlich ausgerufen.

Quantencomputer mit einigen Dutzend Qubits können also ausgewählte mathematische Probleme rasch lösen, für die Supercomputer mit hunderten Milliarden Transistoren lange Zeiträume benötigen (Grotelüschen 2020). Es handelte sich allerdings um ein konstruiertes Problem, ein sogenannter „künstlicher Benchmark“ ohne praktischen Nutzen (science media center 2021b). Zur kurzen Erklärung: Bei einem solchen Benchmark wird ein selbstgeschaffenes, konstruiertes Problem, das sich besonders gut lösen lässt, als besonders gut bewertet.

Verifiziert wurde der Rekord mithilfe eines Supercomputers im Forschungszentrum Jülich, der Googles Quantenschaltungen simulierte (Forschungszentrum Jülich 2019). Bei IBM ging man allerdings eher von 60 Stunden statt 10.000 Jahren herkömmlicher Rechenzeit aus (Wunderlich-Pfeiffer 2019). Möglicherweise war IBM, die zum damaligen Zeitpunkt selbst einen Quantencomputer mit 65 Qubits betreiben konnte, in diesem Fall von Eigeninteresse geleitet (Hossenfelder 2021).

Chinesische Wissenschaftler*innen haben im Jahr 2021 in einer wissenschaftlichen Veröffentlichung von der Quantenüberlegenheit ihres Quantencomputers „Jiuzhang 2.0“ berichtet, der ohne Kühlung mit Photonen arbeitet und im Gegensatz zu Google im Jahr 2019 nicht nur ein konstruiertes, sondern eine reale Aufgabe gelöst haben soll (Choi 2021).

Ein praktisches Problem der Verschränkung, der quantenmechanischen Wechselwirkungen von Qubits untereinander, ist deren Abhängigkeit von äußeren Einflüssen. Zwar ist die Verschränkung eine wesentliche

Eigenschaft von Quantencomputern, doch die Zahl der maximal koppelbaren Qubits und die Länge der abgearbeiteten Algorithmen ist begrenzt und – ein großes Problem – es schaukeln sich Fehler auf, was mit Fehlerkorrektur-Verfahren verbessert werden muss.

Gegenwärtig sind Fehlerraten von einem Prozent üblich, diese Rate muss auf mindestens ein Hundertstel gesenkt werden, damit bei längeren Berechnungen nicht immer weiter vom richtigen Ergebnis abgewichen wird (Strünkelnberg 2021). Allerdings wären Millionen oder gar Milliarden fehlerkorrigierender Qubits nötig, um einige tausend „rechnende“, sog. logische Qubits zu beherrschen – kurzfristig ein noch utopischer Ansatz.

Google berichtete im Sommer 2021 erstmals über eine neue Strategie zur Quantenfehlerkorrektur in ihrer Sycamore-Architektur, die dieses Problem lösen könnte. Dieser Ansatz sei ein wichtiger Schritt zu Praxisanwendungen, wurde in der Fachwelt kommentiert (science media center 2021a). Auch an der ETH Zürich gelang es Ende 2021 erstmals in geringem Umfang, Fehler in Quantensystemen automatisch zu korrigieren, indem entsprechende Fehlertypen wiederholt detektiert als auch korrigiert wurden (Wallraff 2021).

Trotz dieser Fortschritte gilt es, erst einmal stabile NISQ-Maschinen zu entwickeln, wobei NISQ für „Noisy Intermediate Scale Quantum“ steht. Diese Quantencomputer arbeiten mit einer zwei- oder dreistelligen Anzahl von Qubits, sind stellenweise digitalen Computern überlegen („Intermediate Scale“ als Zwischenzustand), leiden aber durchaus noch an der mangelhaften Fehlerkorrektur – dafür steht „Noisy“, im Sinne von rauschend und unruhig (Wootton o. D.).

4.2 Ziele und Roadmaps für Quantencomputer

Gegenwärtig füllen die Quantencomputer mit ihrer bescheidenen, zweistelligen Anzahl von Qubits, ganze große Räume. Die wenigen Qubits sind meist in Apparaturen mit der Größe von Ölfässern untergebracht. Die Peripherie zur Manipulation und zum Auslesen der Qubits ist schrankgroß. Die Kühltechnik für –273 °C mit flüssigem Helium bedingt einen großen technischen Aufwand. Zum jetzigen Zeitpunkt wird der Stand der Technik noch erheblich von der Grundlagenforschung beeinflusst – auch wenn es erste Berichte gibt, in meist neu gegründeten, spezialisierten Unternehmen die Kommerzialisierung voranzutreiben. Parallel sind viele technische Probleme zu lösen, die eine viele Fach-Disziplinen umfassende Ingenieursarbeit verlangen.

Der Quantencomputer der Zukunft soll frei programmierbar sein, mehr Quantenbits besitzen und möglichst fehlerfrei genau die Quantenalgorithmen durchführen, die ihn gegenüber klassisch-digitalen Computern auszeichnen. Der heute in Deutschland arbeitende, US-amerikanische Physiker David P. DiVincenzo schlug bereits 1996 fünf Kriterien vor, die ein funktionierender Quantencomputer dazu erfüllen müsse (DiVincenzo 1996). Sie wurden 2020 in die Strategische Forschungsagenda der EU (European Commission 2020) aufgenommen und um weitere Punkte ergänzt, zu denen die nachfolgend Erwähnten gehören.

Bei der Hardware steht die Skalierbarkeit der Zahl der Quantenbits im Vordergrund – zum Rechnen allein müssen es also mehr werden, „hunderte“ (science media center 2021b) werden häufig genannt, wobei die Fehlerraten um den Faktor 100 und mehr verkleinert werden müssen. Das wiederum verlangt nach „Zigtausenden, wenn nicht Millionen Quantenbits“. Diese müssen auch individuell ansprechbar sein (science media center 2021b).

Ein Rat von Fachleuten aus Wirtschaft und Wissenschaft erstellte für die Bundesregierung die „Roadmap Quantencomputing“, die für Deutschland im Jahr 2025 Quantenrechner mit mindestens 100 individuell ansteuerbaren von insgesamt 500 Qubits erreicht sehen will, in einem abgestimmten Ökosystem. Spätestens 2030 sollen praxisrelevante Anwendungen von Quantenvorteilen profitieren und Deutschland mit eigener Technologie mit an der Spitze des internationalen Wettbewerbs stehen. Für besonders wichtig wird dafür ein Ökosystem gehalten, das idealerweise alle Stufen der Innovations- und Wertschöpfungskette umfasst (VDI Technologiezentrum o. D. a).

Die Quantenüberlegenheit und effektive Fehlerkorrektur müssen sich an einem künstlichen Benchmark als auch konkreten Anwendungen messen lassen. Dazu müssen universelle, fehlerkorrigierte Quantenalgorithmen verfügbar sein (European Commission 2020).

Die Roadmap der maßgeblich mit öffentlichen Mitteln geförderten Europäischen Quantum Flagship-Initiative geht davon aus, mit den oben beschriebenen NISQ-Systemen bis zum Jahr 2023 mit rund 50 Qubits und vor allem akzeptablen Fehlerraten in mehreren Experimenten den Quantenvorteil belegen zu können. Konkrete Anwendungsfelder sollen ermittelt werden und die Wertschöpfungsketten auf Hard- und Software abgestimmt sein (European Commission 2020), S. 46 f.).

Die Roadmap lässt die drei Folgejahre als Puffer aus und nennt die Meilensteine für 2026 bis 2030: Die Fehlerkorrektur funktioniert umfassend; das Hochskalieren aller Systeme ist möglich, weil ein Ökosystem geschaffen wurde, das Komponenten, Montagetechnik und Algorithmen zusammenfügt. Die Fertigungsanlagen beherrschen das Zusammenspiel

von integrierter Photonik, Tieftemperaturtechnik und supraleitender Elektronik (European Commission 2020), S. 46 f.).

Bei den Unternehmen sieht die Roadmap von IBM für 2023 1.000 Qubits vor (Gambetta 2020). Die Entwickler des Unternehmens IonQ möchten ab 2028 mit ihren Ionenfallen-basierten Quantencomputern „ernsthafte Probleme“ lösen können (Hossenfelder 2021). PsiQuantum prognostiziert für sein Photonen-basierten System eine Million Qubits (einschließlich derer zur Fehlerkorrektur) bereits im Jahr 2025, Google für den Ansatz mit supraleitenden Metallen sieht eine Million Qubits erst 2029 (Bobier et al. 2021).

Trotz dieser Fortschritte kann davon ausgegangen werden, dass Quantencomputer klassische, digitale Computer nicht im großen Stil ersetzen, sondern sie eher als „Co-Prozessoren“ ergänzen werden (Neukart 2020b).

Nach Einschätzung mehrerer Technologen, die am Vertiefungsworkshop im Dezember 2021 teilnahmen, ist davon auszugehen, dass Quantencomputer im militärischen Umfeld der USA, Russland und Chinas schon heute mit mehr Qubits ausgestattet sind als in den öffentlich bekannten Forschungsprojekten.

4.3 Neuromorphe Quantencomputer als Zukunftsvision

Eine ganz anders gelagerte Vision haben Wissenschaftler*innen, die das Verschmelzen des Konzepts der künstlichen Intelligenz mit neuromorphen Quantencomputern vorhersehen. Neuromorphe Computer zeichnen sich durch die Aufhebung der Trennung von Speicher und Recheneinheit aus – eine Trennung, die es in den Nervenzellen des menschlichen Gehirns nicht gibt, wohl aber in quasi allen digitalen Computerarchitekturen, wie bei der oben erwähnten von-Neumann-Architektur.

Neuromorphe Computer sind sehr effizient und verbrauchen sehr wenig Energie – wie das menschliche Gehirn auch. Gäbe es gar neuromorphes Quantencomputing, könnte dieses das Gehirn teilweise übertreffen, vielleicht ließen sich sogar Gefühle und soziales Verhalten abbilden. Das sind gegenwärtig wissenschaftliche Gedankenspiele, einen Zeitplan oder eine Idee zur Umsetzung gibt es jedoch bisher nicht (Stölzel 2020).

4.4 Anwendungen des Quantencomputing

Quantencomputer werden digitale Computer nicht vollständig ersetzen können. Das gilt besonders für „Personal Computer“, wie sie seit 40 Jahren in Büros und Werkhallen stehen. Quantenrechner sind und werden vermutlich konzentriert an geeigneten Orten stehen – so wie heutige Supercomputer oder große Rechenzentren. Durch die obligatorische Internetanbindung steht ihre Rechenleistung dennoch uneingeschränkt zur Verfügung.

Eine wichtige Voraussetzung ist eine standardisierte Kommunikation, die den Zugang zu Quantencomputern in speziellen Rechenzentren erleichtert. Zu experimentellen Zwecken können bereits heute selbst Privatpersonen ferngesteuert mit ihnen Experimente durchführen (Neukart 2020a). Letztendlich werden sich Quantencomputer sehr wahrscheinlich nicht zu einer Alternative, sondern zur Ergänzung entwickeln: klassische Algorithmen laufen auf digitalen Computern, Teilprobleme werden in Quantenroutinen gelöst (science media center 2021b).

Die zentrale Fragestellung lautet: was können Mensch, Gesellschaft, Wirtschaft und Wissenschaft mit Quantencomputern erreichen, was bisher nicht möglich ist oder lange Zeit dauert? Die nachfolgende Übersicht soll schlaglichtartig zeigen, was prinzipiell möglich ist und bis 2030 anvisiert wird.

4.4.1 Materialien und Datenbanken

- Wissenschaftliche Anwendungen sind zuallererst in der Quantenphysik selbst zu finden, in der Quantenchemie und in der Hochenergiephysik (Teilchenbeschleuniger) (science media center 2021b).
- Die Simulationen von Molekülen und chemischen Vorgängen in der Chemie, Biotechnologie und Pharmazie werden als Anwendungsbeispiele fast immer genannt (science media center 2021b). Quantencomputer nutzen genau die quantenmechanischen Effekte, die die Eigenschaften einzelner (!) Moleküle definieren. Die Simulation der Dynamik von mikroskopischen Systemen, die sich – wie eben Chemikalien und Materialien – quantenmechanisch verhalten, lässt sich durch ein anderes Quantensystem wie einen Quantencomputer besonders gut bewerkstelligen (Butscher 2021). An der Molekülsimulation arbeitet etwa das Unternehmen BASF (Kuhn 2021a) und erwartet in den Jahren 2023 bis 2025 erste Anwendungen, die nur durch Quantencomputer in Verbindung mit digitalen Höchstleistungsrechnern möglich werden (Grävemeyer 2021).

- Beispielsweise plant Merck, mit Quantencomputern das Verhalten hochkomplexer chemischer Reaktionen zu simulieren und dadurch neue Hightech-Materialien mit spezifischen Eigenschaften zu entwickeln. Merck geht davon aus, dass dies in fünf bis zehn Jahren möglich sein wird (Grotelüschen 2020). Auch die Entwicklung besserer Batterien wird genannt, weil sich langwierige Testreihen durch die Quantensimulation der Batteriechemie ersetzen ließen (Berke et al. 2020).
- Die Nachbildung genetischer Prozesse könnte mit Quantenrechnern möglich werden (Butscher 2021).
- Soll in unsortierten Datenbanken ein gewisser Eintrag gefunden werden, wird es notwendig statistisch die Hälfte der Einträge durchzusehen, bevor der gesuchte Eintrag gefunden wird. Dank des Suchalgorithmus von Lov Grover für Quantencomputer benötigt man wesentlich weniger Suchschritte (Gutberlet 2017).

4.4.2 Terminplanung und Disposition

Diese Anwendungen beruhen stets auf Optimierungsprozessen. Ein oft zitiertes Beispiel ist das Berechnen optimaler Routen, wie es etwa im Außendienst als Traveling-Salesman-Problem bezeichnet wird (science media center 2021b): wie können die Besuche von hunderten von Orten mit möglichst kurzen Routen und ohne Überschneidungen in welcher Reihenfolge verbunden werden (Butscher 2021)? Ähnlich gelagert ist die Fahrtroutenberechnung zukünftiger, großer Flotten autonomer Fahrzeuge, die ihre Fahrgäste rasch und effizient bedienen („Ridehailing“) (Kuhn 2018).

Auch das sog. Rucksackproblem ist ein Optimierungsproblem: Teilmengen von Gütern sollen in Transportbehältern so verpackt sein, dass der Inhalt ein vorgegebenes Gewicht nicht überschreitet, aber einen möglichst hohen Nutzwert hat. Es geht also darum, in einem Containerschiff, Lkw, Zug oder Kleintransporter den begrenzten Laderaum so auszufüllen, dass ein maximaler finanzieller Gewinn erzielt wird. Bei einer dreistelligen Anzahl von Gütern sind selbst Supercomputer überfordert bzw. rechnen zu lange. Quantencomputer könnten das Problem in Sekundenbruchteilen lösen – an der Ludwig-Maximilians-Universität München entwickeln Informatiker*innen dafür Quantencomputer-Algorithmen, das deutsche Unternehmen SAP unterstützt das Vorhaben (Kuhn 2021b).

Ein ähnlich naheliegendes Problem ist die Betriebsplanung an einem typischen Großflughafen: ein Hochleistungscomputer benötigt für ein Terminal mit 50 Gates und 250 täglichen Flügen mehrere Stunden Rechenzeit, um die ankommenden Flugzeuge zu verteilen, um Laufwege, Um-

steigezeiten und Gepäcktransport zu minimieren. Das Problem: nur wenige Verzögerungen bringen den in der Nacht berechneten Plan ins Wanken. Ein Quantencomputer könnte gleich die Betriebs-Optimierung für den ganzen Flughafen berechnen und bei Störungen in kürzester Zeit neu anpassen (Kuhn 2021b).

Im Luftverkehr könnten kurzfristig optimale Routen eines Flugzeugs bei der sogenannten Schlechtwetterumfliegung helfen. Auch die Bestimmung von Geschwindigkeitsprofilen mit geringstmöglichem Treibstoffverbrauch bei der Just-In-Time Navigation kann eine große Rolle spielen, denn diese wird von der International Maritime Organization im Rahmen ihrer Dekarbonisierungsziele im dazugehörigen Leitfaden gefordert.

Eine typische Anwendung für Quantenrechner in der Intralogistik ist das Ermitteln optimaler Fertigungsreihenfolgen im Fahrzeug- oder Sondermaschinenbau (Lok Report 2021). Zusammen mit Künstlicher Intelligenz könnten Quantencomputer für „bestärkendes Lernen“ eingesetzt werden, um später in industriellen Anwendungen etwa die Regelungsoptimierung in der Prozessindustrie zu ermöglichen oder in smarten Fabriken die Produktionsplanung zu verbessern.

Eine flexible Dienstplan-Optimierung im Gesundheitswesen – für rund hundert Schichten – soll möglich werden, wenn Quantenannealer mit 5.000 Qubits verfügbar sind (BMBF o. D. b).

4.4.3 Navigation und Finanzen

- Navigationssysteme, die bei Umleitungen das Verhalten anderer Autofahrer in Echtzeit berücksichtigen und individuelle statt kollektiver Umleitungsrouten berechnen (Butscher 2021). Dieses Beispiel wurde im Kapitel über Quantenannealer vorgestellt.
- Deutsche Bahn Systel engagiert sich, mit Quantenannealern die Fahrpläne der Fernverkehrszüge, deren Wartungsintervalle und Personalverfügbarkeit zu optimieren (Höfling/Ostler 2021).
- Der Finanzkonzern J.P. Morgan testet, wie sich komplexe Risikoberechnungen massiv verbessern lassen (Kuhn 2018). Risikomodelle spielen auch bei Versicherern und Rückversicherern eine Rolle (AssCompact 2021). Dies gilt z. B. auch für die Deutsche Börse. Würden Sensitivitätsanalysen an den makro-ökonomischen Modellen mit ihren hunderten Variablen heutzutage in mehreren Szenarien durchgerechnet, wäre jahrelange Rechenzeit nötig. Zusammen mit dem deutschen Unternehmen Jos Quantum wurde ermittelt, dass Quantencomputer diese Analysen in unter einer Stunde durchrechnen könnten – wenn sie denn wie erwartet ab 2025 verfügbar sind (Mohr 2021).

Vergleichbare Anwendungen funktionieren nicht nur an Finanz-, sondern auch an Energiemärkten.

4.4.4 Entschlüsselung von Daten

Quantencomputer können die existierenden Verschlüsselungsverfahren aushebeln und aufgezeichnete Kommunikation und Dateien lesbar machen (Kuhn 2018). Das Knacken von Verschlüsselungen ist, wie bereits beschrieben, mittels des Faktorisierungsalgorithmus von Shor mit Quantencomputern zu betreiben. Daran interessiert sind gegenwärtig besonders Regierungen und ihre Geheimdienste, die mit diesem Werkzeug auch ihre älteren Datenkopien aus der heutigen Zeit in Zukunft entschlüsseln könnten.

Quantenrechner funktionieren vorteilhaft beim Auffinden von Daten in unstrukturierten Listen und bei der Optimierung von Problemen mit vielen Freiheitsgraden (Calarco/Riedel 2018b). Es wird sicherlich eine „Post-Quantum-Kryptografie“ geben müssen, deren Verschlüsselungstechnik auch vor Quantencomputern sicher sein wird (Killer 2017). Im Umkehrschluss bedeutet das aber auch, dass Unternehmen bereits heute damit beginnen müssten, quantensichere Verfahren in ihre Systeme zu migrieren, damit zukünftige Quantencomputer heute entstandene Datensätze nicht entschlüsseln können.

4.4.5 Quantenannealer

Die technisch bereits fortgeschrittenen Quantenannealer beschleunigen die Simulation neuer Molekülstrukturen (Gieselmann 2019) oder optimieren das Haber-Bosch-Verfahren zur Düngemittelherstellung, das ein bis zwei Prozent des Weltenergiebedarfs benötigt (Calarco/Riedel 2018b).
Das kanadische Unternehmen D-Wave nennt folgende Anwendungen, die bereits funktionieren oder in Entwicklung sind (D-Wave Systems 2020):

- Design spezieller Proteine durch die amerikanische Firma Menten AI
- Optimierung der Warenverteilung bei einer westkanadischen Lebensmitteleinzelhandelskette
- Währungsarbitrage, Kreditbewertung und Handelsoptimierung bei Accenture
- Optimierung der Lackierreihenfolge von Pkw auf möglichst wenig Farbwechseln beim deutschen Automobilkonzern Volkswagen

Ein vergleichbares Optimierungsproblem bei der Fertigung von Pkw wurde beim deutschen Automobilkonzern BMW untersucht: Das Versiegeln von etwa 200 Fugen an Karosserie und im Unterbodenbereich wird von vier Robotern ausgeführt, die ideale Reihenfolge wurde mit einem Quantenannealer, aber auch mit einem digitalen Computer berechnet. Der Annealer war schneller, das Ergebnis jedoch auch mit einem klassischen Rechner in akzeptabler Zeit erzielbar (Vogel 2020).

4.4.6 Unwahrscheinliche Anwendungen

Es gibt auch einige eher unwahrscheinliche Anwendungen. Quantencomputer scheinen ungeeignet, um etwa Additionen und andere elementare Rechenoperationen durchzuführen. Auch Big Data-Analysen mit Quantenrechnern scheinen unwahrscheinlich. Ebenso schwierig sind wohl Berechnungen zu Wettervorhersagen und zum Klimawandel, weil die dazugehörigen Algorithmen unbekannt sind. Wettersimulationen funktionieren auf der makroskopischen Ebene, gewissermaßen dem großen Maßstab, und sind durch die Gesetze der klassischen Mechanik bestimmt, bei deren Berechnung Quantencomputer bisher keinen erkennbaren Vorteil bieten (science media center 2021b).

4.5 Anwendungen der Quantenkommunikation

Quantenkommunikation ist, wie bereits zuvor erwähnt, insofern stets sicher, da das „Abhören“ physikalisch sofort auffällt und die Übertragung unterbrochen werden kann. Für eine großflächige Anwendung fehlt jedoch eine spezielle Quantenkommunikationsinfrastruktur, die vor allem Quantenrepeater enthält. Dennoch gibt es eine weitere Möglichkeit, die klassische und bewährte Kommunikation über Glasfasern mit Quantentechnologien zu kombinieren: die Quantum Key Distribution.

4.5.1 Quantum Key Distribution

Gewissermaßen als hybride Kommunikationsform werden die Kommunikationsinhalte über die herkömmliche Glasfaser-Infrastruktur übertragen. Die Inhalte sind jedoch verschlüsselt und dieser geheime Schlüssel wird über eine spezielle Quantenkommunikationsinfrastruktur ausgetauscht,

die Quantum Key Distribution (QKD). Solche QKD-Netze existieren bereits und werden besonders in China stark ausgebaut.

Ein 2000 Kilometer umfassendes Netzwerk verläuft zwischen Peking und Shanghai und bezieht weitere Orte mit ein, wobei mangels Quantenrepeater sogenannte „Trusted Nodes“, vertrauenswürdige Knotenpunkte, nötig sind – 32 Stück insgesamt. Diese sind jedoch mögliche Angriffspunkte zum Abhören und müssen daher gesichert sein (Kagermann et al. 2020). In der EU bauen 38 Partner aus 13 Ländern in der Initiative OpenQKD ein Netzwerk auf, das nahtlos in existierende Kommunikationsnetzwerke integriert werden soll.

Auch Satellitenkommunikation ist möglich, da hier die Signalverstärkung über längere Distanzen im Gegensatz zu Glasfasern unkritisch ist. Der spezielle, quantenbasierte, chinesische Satellit Micius diente für die QKD als „Trusted Node“, um eine quantenverschlüsselte Videokonferenz über eine herkömmliche Glasfaserverbindung zu führen. Auch hier wäre es sofort aufgefallen, wenn die regelmäßig über den Satelliten ausgetauschten Schlüssel abgehört worden wären (Österreichische Akademie der Wissenschaften 2017).

4.5.2 Post-Quanten-Kryptografie

Quantencomputer werden zukünftig in der Lage sein, die üblichen heutigen Verschlüsselungstechnologien zu überwinden, weil sie letztendlich alle auf Primfaktorzerlegung basieren. Als Reaktion darauf wird es eine Post-Quanten-Kryptografie geben, die auch vor Quantencomputern sicher sein wird, weil völlig andere Methoden eingesetzt werden.

Diese Methoden werden seit Jahren vom US-amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) öffentlich ausgeschrieben, um einen neuen, weltweiten Standard zu definieren. Aus 82 Vorschlägen wurden in drei Runden sieben Kandidaten ausgewählt (Drehling/Tremmel 2021). Vier Sieger wurden im Jahr 2022 benannt (Computer Security Resource Center o. J.). Damit wäre dann in Zukunft die Kommunikation zwischen klassischen Computern über herkömmliche Verbindungen „quantensicher“, ohne dass dabei selbst Quantentechnologien angewandt werden.

4.6 Die Kernaussagen auf einen Blick

- Es gibt erste funktionierende Quantencomputer, dennoch ist noch umfangreiche Grundlagenforschung nötig, um praktische Anwendungen zu ermöglichen.
- Die Zahl der erreichten Qubits ist ein oft genannter Maßstab, wichtiger ist jedoch die Verbesserung der Fehlerkorrektur.
- Quantencomputer werden nicht universell wie heutige Computer eingesetzt, sie lösen dafür spezielle Probleme sehr schnell.

5. Fördernde und hemmende Einflussfaktoren

5.1 Fördernde Einflussfaktoren

Einer der zentralen fördernden Einflussfaktoren ist gegenwärtig die finanzielle Förderung von Quantentechnologien mit öffentlichen Mitteln im Zuge der Innovationspolitik in Europa und Deutschland. Die Europäische Kommission vergibt bis 2028 mit der Leitinitiative zur Entwicklung der Quantentechnik im Programm Horizon Europe, dem Quantum Flagship, eine Milliarde Euro. Im Rahmen des Quantum Flagship werden aktuell über 5.000 Wissenschaftler*innen beschäftigt. Die eine Hälfte der finanziellen Mittel kommt von der Europäischen Kommission, die andere von den Mitgliedsländern der EU (Quantum Flagship o. D. c).

Die europäische Quanten-Flagship-Initiative ist im Oktober 2018 gestartet. Für den Aufbau einer sicheren Quantenkommunikationsinfrastruktur im Rahmen der „European Quantum Communication Infrastructure Initiative“ (EuroQCI) stehen in einem der drei Arbeitsprogramme des Programms „Digitales Europa“ Mittel im dreistelligen Millionenbereich bereit (Europäische Kommission 2021). Alle 27 EU-Mitgliedstaaten haben sich zum Aufbau einer Quantenkommunikationsinfrastruktur verpflichtet, um die europäischen Cybersicherheitsanforderungen zu erfüllen (Kooperation international 2021).

Deutschland ist in der weltweiten Forschungslandschaft einer der größten öffentlichen Geldgeber. Im Jahr 2018 stellte die Bundesregierung bereits 650 Millionen Euro für die Forschung zu Quantentechnologien bereit. Im Sommer 2020 wurden im Rahmen des Corona-bedingten Konjunktur- und Zukunftspakets weitere zwei Milliarden Euro für „den Aufbau von mindestens zwei deutschen Quantencomputern“ bewilligt (Kuhn 2021a). Programmatische Basis ist die von 16 Expert*innen und aus Wissenschaft und Wirtschaft erstellte „Roadmap Quantencomputing“ (Die Bundesregierung 2021). In 19 europäischen Staaten wird zudem an einer hochsicheren Quantenkommunikationsinfrastruktur geforscht (Europäische Kommission 2018).

Auch einzelne Bundesländer in Deutschland fördern Quantenforschung. Das Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching bei München soll Teil eines als Munich Quantum Valley benannten Hubs werden und Quantencomputer auf Basis von Ionenfallen weiterentwickeln. Die Bayerische Staatsregierung will mit 300 Millionen Euro Forschungseinrichtungen, Hochschulen, Unternehmen und Start-ups in Bayern vernetzen und die praktische Anwendung fördern.

Ähnliche Projekte sind in Nordrhein-Westfalen (Koordinierungsstelle Quantentechnologien.NRW im Landescluster NanoMikroWerkstoffePhotonik.NRW) in Berlin (Kuhn 2021a) und in Niedersachsen (Quantum Valley Lower Saxony) angestoßen worden, wo erste Quantencomputer 2025 in Betrieb gehen sollen (Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur 2021).

Als Stärke der Akteure in Europa gelten sehr qualifizierte Komponentenentwickler, meist mittelständische Unternehmen und Hidden Champions. Bei ihnen bestellen auch die gewichtigen Akteure aus den USA ihre Komponenten. Hinzu kommt die enge Kooperation von Forschungsinstituten und Unternehmen (Bönsch 2021). Das große Spektrum der potenziellen Anwenderunternehmen aus unterschiedlichen Branchen gilt ebenso als Vorteil (Kagermann et al. 2020).

5.2 Hemmende Einflussfaktoren

Gegenwärtig haben Quantenrechner im bekannten Hype-Zyklus der Marktforschungsunternehmens Gartner die Phase des „technologischen Auslösers“ verlassen, die sie noch im Jahr 2016 innehatten (Dörner 2016). Bei stets ansteigender öffentlicher Aufmerksamkeit sieht Gartner diese Technologie seit 2020 auf dem „Gipfel der überzogenen Erwartungen“ (Gartner 2020). Werden Versprechen nicht erfüllt, könnte es zu einer Art „Quanten-Winter“ kommen, in dem die Finanzierungsströme schwächer werden (Schubert 2019).

Dabei zu betrachten sind zum einen das Zusammenspiel von erheblichen technischen Problemen, die durch Ingenieure gelöst werden müssen. Zum anderen gilt es die unabhängig davon weiter fortschreitende Grundlagenforschung zur berücksichtigen. Keines der konkurrierenden physikalischen Systeme hat sich bisher durchgesetzt und „den Quantencomputer“ definiert.

Dies ist vergleichbar mit dem Personal Computer von IBM des Jahres 1981, dessen Nachfolger selbst ohne Beteiligung von IBM heutzutage das Konzept des PCs bestimmen. Aus der Grundlagenforschung sind jederzeit noch „Game Changer“ zu erwarten. Das könnte in absehbarer Zeit zum „Tal der Enttäuschungen“ führen, wenn die im vorliegenden Impulspapier skizzierten Anwendungen und Aufgaben nicht zuverlässig und reproduzierbar gelöst werden.

Während die Hardware im Fokus steht, bleibt die Erforschung von speziellen Quantenalgorithmen eine Herausforderung. Erst sie machen tatsächlich den „Quantenvorteil“ aus, mit dem anwendungsrelevante Probleme für ihre jeweiligen Fragestellung effizienter als heutzutage mit Digi-

talrechnern gelöst werden können. Ob das optimale Zusammenspiel von Hardware und Quantenalgorithmen dabei gelingt, wird sich zukünftig noch zeigen müssen (science media center 2021b).

Als kritisch betrachtet wird die Konzentration auf die Zahl der Qubits, die noch nichts über den Grad der Fehlerkorrektur aussagt. IBM sieht als Parameter daher das „Quantenvolumen" vor, das neben der Qubit-Anzahl berücksichtigt, wie viele Rechenschritte fehlerfrei durchgeführt werden können oder ob sich Qubits gegenseitig stören (Bönsch 2021). Ebenso sind physikalische Teilerfolge, wie etwa ein Betrieb bei höheren Temperaturen als knapp über dem physikalischen Nullpunkt – der nur sehr aufwendig und energieintensiv erreicht werden kann – im Gesamtzusammenhang zu bewerten, der in der öffentlichen Wahrnehmung in der Regel fehlt.

Bevor sich eine Technologieplattform durchsetzen wird, werden die unterschiedlichen Ansätze parallel verfolgt werden müssen. Erst bei einer absehbaren Fokussierung können auch die Ressourcen entsprechend fundiert verteilt werden (VDI Technologiezentrum o. D. a). Dabei muss sich nicht unbedingt das beste technische System durchsetzen – eine gute Handhabbarkeit und ein vollständiges Ökosystem werden wichtige Parameter sein.

Da Quantencomputer auf quantenmechanischen Phänomenen beruhen, die in der makroskopischen Lebenswelt aller Menschen keine Rolle spielen, erschließen sich ihre Funktionsweise, Vor- und Nachteile bei weitem nicht intuitiv. Bei der öffentlichen Bewertung dieser Technologie wird gegenwärtig daher nicht nur ein technologisches, sondern auch ein physikalisches Verständnis vorausgesetzt (Merck o. D.). Um die Funktionsweise von Quantencomputern nachvollziehen zu können, ist ein technisch-physikalisches Verständnis nötig – so wie es heute im Grund- oder Leistungskurs Physik der gymnasialen Oberstufe in der Quantenphysik vermittelt wird.

Die Covid-19-Pandemie hat auch bei der Entwicklung von Quantentechnologien ihre Spuren hinterlassen – sie lässt sich kaum aus dem Büro von zu Hause aus umsetzen. Der erste europäische Quantencomputer mit 100 Qubits namens OpenSuperQ sollte mit Stand 2018 binnen drei Jahren in Jülich – in europäischer Zusammenarbeit der Quanten-Flagschiffinitiative – entstehen (Grävemeyer 2018). Das war zum geplanten Projektende im September 2021 nicht möglich, sodass „mehr als 50 Qubits" im Laufe des Jahres 2022 angestrebt werden (Deutscher Bundestag 2021).

5.3 Die Kernaussagen auf einen Blick

- Der zentrale fördernde Einflussfaktor ist die öffentliche Förderung von Quantentechnologien im Zuge der Innovationspolitik in Deutschland und Europa. Ein weiterer fördernder Faktor ist die Stärke der Akteure in Europa als sehr qualifizierte Komponentenentwickler.
- Als ein relevanter hemmender Einflussfaktor gilt, dass Quantencomputer auf quantenmechanischen Phänomenen beruhen, die in der makroskopischen Lebenswelt aller Menschen keine Rolle spielen. Ihre Funktionsweise sowie Vor- und Nachteile erschließen sich dem Menschen nicht intuitiv. Hinzu kommt als wichtiger hemmender Faktor, dass das Zusammenspiel von Hardware und speziellen Quantenalgorithmen noch vor technischen Problemen steht, die zukünftig durch gelöst werden müssen.

6. Sozio-ökonomische Aspekte in Gegenwart und Zukunft

6.1 Quantencomputing

Die Entwicklung von Quantentechnologien und besonders Quantencomputern wird – wie schon oben dargestellt – in den nächsten Jahren stark durch öffentliche Fördermaßnahmen unterstützt. Zusätzlich arbeiten in Deutschland Unternehmen an gezielten wirtschaftsbezogenen Anwendungen von Quantencomputern, nämlich BASF, BMW, Boehringer Ingelheim, Bosch, Infineon, Merck, Munich Re, SAP, Siemens und Volkwagen. Sie bilden seit Sommer 2021 das Konsortium „QUTAC – Quantum Technology and Application Consortium“, um in der Industrie Quantenkompetenzen aufzubauen (QUTAC 2021). Boehringer Ingelheim plant zusätzliche seine Kooperation mit Google auszubauen (Kuhn 2021b).

Die Europäische Kommission sieht die Datenverarbeitung mit Quantencomputern als stark treibende Kraft für die Wirtschaft an, bei der schon kleine technologische Unterschiede erhebliche Wettbewerbsvorteile ausmachen können (European Commission 2020), S. 39. Allerdings sprechen nach Einschätzung der Teilnehmenden des Vertiefungsworkshops die enormen Gesamtkosten gegen die Anschaffung von Quantencomputern in mittelständischen Unternehmen.

Die gegenwärtigen Marktprognosen sind optimistisch, auch wenn sie aufgrund der unterschiedlichen Prognosejahre mitunter stark voneinander abweichen: für das Jahr 2025 prognostizieren Fachleute des Investmentbanking-Unternehmens Morgan Stanley einen jährlichen, mit Quantencomputing erzielten Umsatz von neun Milliarden US-Dollar. Im Vergleich dazu werden für Desktop-PCs weltweit 50 Milliarden US-Dollar Umsatz vorhergesagt, für Mainframes – also Großrechner – drei Milliarden (Welchering 2021).

Andererseits prognostizieren für zwei Jahre danach (2027) Marktforscher*innen von MarketsandMarkets einen viel geringeren Umsatz mit Quantenrechnern von nur knapp 1,8 Milliarden Dollar (Kuhn 2021a). Die Marktforschung der Boston Consulting Group sieht für 2030 sogar 65 Milliarden US-Dollar Umsatz weltweit (Bönsch 2021).

Eines der wenigen Unternehmen, das bereits heute Umsatz aus Verkäufen von Geräten generiert, ist D-Wave in Kanada. D-Wave lieferte im Jahr 2020 sechs seiner Quantenannealer an Forschungseinrichtungen und Militärs (Welchering 2021). Im Gegensatz dazu hat das US-Startup IonQ fast ohne Umsatz (1,1 Mio. Euro im Jahr 2021) aus Verkäufen bei

seinem Börsengang eine Bewertung von rund zwei Milliarden Dollar erzielt (Stölzel 2021).

Von Google ist bekannt, dass im „Quantum Artificial Intelligence Laboratory“ in Santa Barbara an Quantencomputing mehr als hundert Mitarbeiter*innen arbeiten. Gründer und Leiter ist Hartmut Neven, ein deutscher Staatsbürger (Hohensee 2021).

In der weltweiten Rangliste führt China mit seinem Großforschungsprogramm für geschätzte 10 Mrd. Euro, direkt gefolgt von Deutschland mit 2,7 Mrd. Euro, es folgen die USA mit 1,9 Mrd. Euro und Indien mit 1,0 Mrd. Euro. In Japan liegt die Fördersumme bei 0,8 Mrd. Euro, in Südkorea bei weniger als 100 Millionen Euro (Kuhn 2021a).

Ein Monitoring-Bericht von McKinsey sah Ende 2020 die USA als führenden Player im Quantencomputing. Es folgten Kanada und Großbritannien, auf dem vierten Platz Deutschland, anschließend Japan. Maßstab waren die Anzahl der Startups, der etablierten Unternehmen, beteiligten Organisationen und akademischen Arbeitsgruppen (McKinsey & Company 2020c). Insgesamt betrachtet sind die privaten Investitionssummen von Private-Equity-Anbietern und Risikokapitalgebern ins Quantencomputing weltweit seit 2002 um jährlich über 400 Prozent gewachsen, besonders stark seit etwa 2014.

Im Jahr 2020 lag die Gesamtinvestitionssumme bei 0,5 Mrd. US-Dollar – mehrheitlich floss das Geld in die Arbeit von Hardwareanbietern (McKinsey & Company 2020a). Insgesamt sind zwei Drittel aller Gelder erst seit dem Jahr 2018 geflossen, was die große Dynamik zeigt (Bobier et al. 2021). Die Zahl der Quantencomputer-Startups stieg in den letzten fünf Jahren am stärksten in Europa, von 9 auf 51 – und damit sind es mehr als 36 in den USA. Letztere gelten allerdings als besser finanziert (McKinsey & Company 2020b).

Im Vertiefungsworkshop wurde zusätzlich die Frage nach dem Energieverbrauch von Quantencomputern diskutiert. Tatsächlich bedingt vor allem die in einigen Systemen nötige kryostatische Kühlung einen hohen Energieverbrauch, während der Energieanteil für das Quantenrechnen selbst vernachlässigbar ist. Für einen Übergang von einzelnen Demonstratoren zu einer Serienfertigung ist die Steigerung der Rechenleistung maßgeblich, während die Kühltechnik als Ingenieursleistung eher miniaturisiert werden müsste.

Letztendlich würden in Zukunft Optimierungsaufgaben mit Quantencomputern in sehr kurzer Rechenzeit gelöst, die ihrerseits die Energieverschwendung in der Anwendung selbst reduzierten, sodass der Energieverbrauch der Quantencomputer überkompensiert würde. Zusätzlich fallen bei klassischen digitalen Computern immense Abwärmemengen an, die gegengerechnet werden müssten.

6.2 Quantenkommunikation

Die Verschlüsselung von Kommunikation mithilfe von Quantentechnologien hat ein großes Anwendungspotenzial bei Regierungen, beim Militär und in der Finanzbranche, da es hier einen besonderen Bedarf an geheim zu haltender Kommunikation gibt. Der französische Konzern Thales plant ein terrestrisches europäisches Quantenkommunikationsnetzwerk (Schubert 2019). Dieses könnte zusätzlich in das militärische satellitenbasierte Netz „EU Governmental Satellite Communications“ integriert werden (DLR German Space Agency 2016). Aber auch Startups wie die deutsche Mynaric sind in europäische Projekte zur Quantum Key Distribution (QKD) über Satelliten eingebunden (mynaric 2018).

Erste kommerzielle Quantenrepeater für die QKD vertreibt das Schweizer Universitäts-Spin-off ID Quantique (IDQ), das 2020 von einem südkoreanischen Unternehmen aufgekauft wurde (ID Quantique 2020).

Das Marktvolumen für die Quantenkommunikation wird in einem weiten Spektrum eingeschätzt und reicht von mehreren Millionen US-Dollar jährlich über eine Milliarde Euro jährlich bis 2023. Sollten Quantenrepeater aus der Grundlagenforschung breite Marktreife erlangen, sind bis 2026 800 Millionen US-Dollar Umsatz damit denkbar (Kagermann et al. 2020).

6.3 Die Kernaussagen auf einen Blick

- Die Marktprognosen für Quantencomputing und Quantenkommunikation sind optimistisch, auch wenn sie stark voneinander abweichen.
- Deutschland gehört zu den führenden Akteuren im Quantencomputing im internationalen Vergleich mit einer Vielzahl von F&E-Aktivitäten.
- Die enorme Dynamik im Bereich Quantencomputer zeigt sich z. B. an der Zahl der Startups, die in den letzten fünf Jahren besonders in Europa stark angestiegen ist.
- Vor allem die in einigen Systemen nötige kryostatische Kühlung ist mit einem hohen Energieverbrauch verbunden, während der Energieanteil für das Quantenrechnen selbst vernachlässigbar ist.

7. Stellung des Standortes Deutschland im internationalen Wettbewerb

7.1 Quantencomputing

Im Jahr 2020 stellte der von der Bundesregierung bestellte Rat von Fachleuten in seiner Roadmap Quantencomputing fest, dass „Deutschland über hervorragende wissenschaftliche Kompetenzen sowie eine Fülle an potenziellen Nutzern der Technologie verfügt“ (VDI Technologiezentrum o. D. a). Allerdings sei kein Einzelakteur in der Lage, ein ausgereiftes Quantencomputing-System eigenständig zu entwickeln. Die Kompetenzen verteilen sich demnach auf eine Vielzahl von Akteuren, wobei Nachholbedarf in einzelnen Feldern gesehen wird – besonders bei der Hardwareentwicklung, die später einmal hochskaliert werden muss, sowie bei der Systemintegration und Software.

Als problematisch bezeichnet wird der Mangel an Instrumenten und Rahmenbedingungen für einen raschen Technologietransfer von der Forschung in die Industrie. Das liege auch daran, dass die wissenschaftlich-technischen Kompetenzen zu wenig wirtschaftsorientiert seien (VDI Technologiezentrum o. D. a).

Die bereits existierenden Anbieter von Quantencomputing-Systemen sind in Nordamerika angesiedelt. Um den Rückstand in Deutschland aufzuholen, empfiehlt der Expertenrat den Aufbau eines ganzheitlich zu betrachtenden Ökosystems sowie die Abstimmung und Zusammenarbeit mit europäischen Partnern (VDI Technologiezentrum o. D. a).

Die für Deutschland klassischen Verbundprojekte zwischen Wissenschaft und Unternehmen sowie der Förderung von Begleitmaßnahmen und Enabling Technologies wird ergänzt durch sogenannte Hubs für das ganzheitliche Ökosystem, etwa vergleichbar mit den universitären Exzellenclustern. Einige Hubs werden sich jeweils auf eine Technologieplattform fokussieren und für diese den Bau und Betrieb einschließlich Software und spätere Inkubatoren für Firmenausgründungen sicherstellen. Damit wird die Systemintegration sichergestellt, um nicht nur Einzellösungen zu zeigen.

Die Hubs können lokal an einem Ort oder an unterschiedlichen Standorten aufgebaut werden. Auch sind mehrere Hubs zu einer Technologieplattform möglich, wenn trotz eindeutiger Unterscheidungsmerkmale jeweils das Gesamtsystem umgesetzt werden kann. Hinzu kommen Kompetenznetzwerke mit Querschnittsaufgaben, etwa solche für Quanten-

computing-Anwender, die Quanteninfrastruktur oder Bildungsthemen (VDI Technologiezentrum o. D. a).

Eine anvisierte Ausschreibung und Benennung der Hub-Struktur durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung ist bis Oktober 2021 allerdings noch nicht erfolgt (Bönsch 2021). Dies wird sich möglicherweise unter der neuen Bundesregierung im Laufe des Jahres 2022 ändern. Dennoch hat das Bündeln der Kompetenzen begonnen, so hat z. B. die Helmholtz-Gemeinschaft die Plattform „Helmholtz Quantum" mit ca. 500 Forscher*innen an mehreren Helmholtz-Zentren gegründet (Meier 2021).

Neben der Betrachtung von Deutschland als Forschungsstandort stehen Unternehmen im Fokus, die von Quantencomputing-Anwendungen profitieren können. Einige Akteure wurden oben schon im Kapitel „Anwendungsbereiche" benannt, etwa BASF, Merck, Deutsche Bahn Systel und Deutsche Börse. Das ebenfalls erwähnte „Quantum Technology and Application Consortium", QUTAC, vernetzt führende Industrieunternehmen, um Anwendungen zu erschließen und den Transfer in die Praxis zu unterstützen.

Mit dem „IBM Quantum System One" in Ehningen bei Stuttgart steht seit Sommer 2021 „der leistungsstärkste Quantencomputer Europas" mit 27 Qubits außerhalb eines IBM-Forschungslabors zur Verfügung (IBM 2021a). Dieser Quantencomputer wurde 2019 entwickelt (Gambetta 2020). IBM verfügt zwar inzwischen über Quantenprozessoren mit 127 Qubits (IBM 2021b), derjenige mit 27 Qubits sei jedoch „stabil genug für den industriellen Betrieb" (Spiegel Netzwelt 2021).

Der US-amerikanische Konzern mit schweizerischem Quanten-Forschungsstandort in Zürich kooperiert mit der deutschen Fraunhofer-Gesellschaft, diese stellt das System Interessenten aus Forschung und Industrie für rund 10.000 Euro im Monat zur Verfügung (Fraunhofer-Gesellschaft o. D.).

Daimler – kein Mitglied von QUTAC – kooperiert bereits seit 2015 mit IBM, um die grundlegende Batteriechemie der neuartigen Lithium-Schwefel-Batterien zu verstehen. Geforscht wird in den USA bei Mercedes-Benz Research and Development North America, von hier greifen die Mitarbeiter*innen per Fernzugriff auf Quantencomputer am US-Hauptsitz von IBM zu. Sie arbeiten zusätzlich mit einem Quantencomputer im Labor von Google (Mohn 2020). Neben der reinen Anwendung sind bereits Verbesserungen im Algorithmus möglich, um die Batteriechemie mit weniger Qubits als üblich berechnen zu können (Jung 2021).

Die Ergänzung eines Höchstleistungsrechners um eine eigenen 20-Qubit-Quantencomputer bis Ende 2023 ist das Ziel des deutsch-finnischen Projekts Q-Exa. Neben der Hardware soll dabei auch Programmie-

rerfahrung aufgebaut und Anwendungslösungen umgesetzt werden. Damit wären europäische Unternehmen in Zukunft nicht mehr auf US-amerikanische Quanten-Plattformen angewiesen (Grävemeyer 2021).

7.2 Quantenkommunikation

In Deutschland gibt es in der Quantenkommunikation öffentlich geförderte Projekte wie QuNET, Q.Link.X und EuroQCI, in denen Forschungseinrichtungen und Industrie die Quantenkommunikation voranbringen wollen. Als führend in Europa werden die TU Delft in den Niederlanden und das Austrian Institute of Technology und die Universität Wien in Österreich betrachtet. Die globale Führung in der Quantenkommunikation wird China zugeschrieben (Kagermann et al. 2020).

Die erwähnte Forschungsinitiative QuNET (Quantum Network) startete Ende 2019. Unter der Leitung des Fraunhofer Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik engagiert sich vor allem das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für ein nationales, praxistaugliches Quantennetzwerk, bei dem die Quantum Key Distribution über Satelliten erfolgt (DLR 2019). Ab 2027 soll eine industrietaugliche Quantenkommunikation möglich sein (QuNET o. D.).

Im Verbundprojekt Q.Link.X wurde bis Sommer 2021 an den Grundlagen der Quantenrepeater gearbeitet (Lenzen 2020). Der Initiative zur „European Quantum Communication Infrastructure“ (EuroQCI) haben sich inzwischen alle 27 EU-Mitgliedsstaaten angeschlossen, um zertifizierte Quantum Key Distribution-Systeme zu entwickeln und anzuwenden (European Commission 2022). Auch hier wird auf eine Kombination von Satelliten und Glasfaser-Netzwerken gesetzt (European Commission 2021).

7.3 Die Kernaussagen auf einen Blick

- Deutschland gehört zu den führenden Ländern in der Forschung zu Quantentechnologien. Allerdings sind die Anbieter von Quantencomputing-Systemen in Nordamerika angesiedelt. Der Rückstand in Deutschland kann u. a. durch den Aufbau eines ganzheitlich zu betrachtenden Ökosystems sowie der Abstimmung und Zusammenarbeit mit europäischen Partnern aufgeholt werden.
- Über neue Konsortien und Kooperationsnetzwerke sind führende Industrieunternehmen in Deutschland bereits vernetzt, um Anwendungen zu erschließen und den Transfer in die Praxis zu unterstützen.

8. Auswirkungen auf zukünftige Arbeitswelten

Auf einer allgemeinen Ebene kann davon ausgegangen werden, dass im Kontext von Quantencomputern zum einen Arbeitnehmer*innen für die Entwicklung und Produktion der Hardware und zum anderen im Kontext für die Software-Entwicklung neue Beschäftigungsmöglichkeiten entstehen. Da digitale Computer von ihrer Funktionsweise her selbst für die Steuerung von Quantencomputern nötig sein werden und Quantencomputer nur spezielle Probleme berechnen, werden heute etablierte Tätigkeiten in Verbindung mit digitalen Computern kaum wegfallen (Malanowski 2021).

Im Folgenden werden einige bevorstehende Auswirkungen in spezifischen Bereichen zukünftiger Arbeitswelten, insbesondere aus dem Bereich Bildung, anhand konkreter Beispiele diskutiert. Für diese gibt es erste schriftliche Quellen, die für das vorliegende Working Paper ausgewertet wurden.

Gegenwärtig ist davon auszugehen, dass es in den Anfangsjahren kommerzieller Umsetzungen von Quantentechnologien ein starkes Beschäftigungsübergewicht von Akademiker*innen, etwa Quanteningenieur*innen, geben wird, bevor betriebliche Ausbildungsberufe konzipiert werden können und mehr Beschäftigung auch bei nicht akademisch Ausgebildeten bewirken.

Die Frage, welche weiteren betrieblichen und überbetrieblichen sowie innovations- und arbeitspolitischen Schritte in Bezug auf Innovationen von Technologie und Arbeit in zukünftige Arbeitswelten in Verbindung mit Quantentechnologien mittelfristig notwendig werden, ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch offen. Diese Lücke könnte z. B. vorläufig über ein regelmäßiges Monitoring der Thematik zumindest teilweise gefüllt werden.

Im Rahmen des Vertiefungsworkshops wurde insbesondere von Fachleuten aus der Wissenschaft angemerkt, dass die inhaltliche Eingrenzung des Themas auf Quantencomputer und Quantenkommunikation für die zukünftigen Arbeitswelten möglicherweise zu eng sei. Hierbei wurde darauf verwiesen, dass in ca. zehn Jahren die Bedienung eines Smartphones mittels Gedankensteuerung und projizierter, holografischer Bilder eine ganz neue Dimension erreicht haben könnte. Diese Entwicklung würde zukünftige Arbeitswelten stark beeinflussen, obwohl diese Anwendung nichts mit Quantencomputern zu tun hätte.

Da Quantencomputer in den nächsten zehn Jahren zudem eher in Rechenzentren in Betrieb seien als in Endgeräten auf den Schreibtischen oder in den Händen der Nutzer*innen, würden sie den Arbeitsalltag nicht

so direkt beeinflussen, wie das mitunter skizziert wird. Tätigkeiten würden sich verändern bzw. gänzlich neue Tätigkeiten dazu kommen. Somit würde es eher zu einem Aufwuchs an Beschäftigung kommen.

Ferner gehen die Fachleute aus Wissenschaft und Wirtschaft, die am Vertiefungsworkshop beteiligt waren, davon aus, dass der physikalisch-wissenschaftliche Hintergrund der Quantencomputer bei weitem nicht allen Mitarbeiter*innen in entsprechenden Unternehmen oder Abteilungen zugänglich sein müsse. Die Vermittlung entsprechender Praxisbeispiele und ein gewisser Grad von Neugier sei geeignet, zusammengesetzte Teams zu befähigen, die Potenziale und Anwendungsfälle der neuen Technologie zu erfassen.

8.1 Quantentechnologien in der Ausbildung an Hochschulen

Das von deutschen Industrieunternehmen gegründete Konsortium „Quantum Technology and Application Consortium“ (QUTAC) hat den im Jahr 2021 existierenden Fachkräftemangel bei den Quantentechnologien und Quantencomputern für industrielle Anwendungen dokumentiert. Gemäß dieser Dokumentation gab es im Jahr 2021 keine etablierten Studiengänge für Quanteninformationstechnik, dementsprechend auch keine Quanteninformatiker*innen, die z. B. Programme für Quantencomputer schreiben könnten.

Das Unternehmen BMW finanziert an der Technischen Universität München mit fünf Millionen Euro einen Stiftungslehrstuhl „Quantenalgorithmen und -anwendungen“, sodass dort bereits Vorlesungen zu Quantentechnologien der Informationstechnik angeboten werden (Technische Universität München o. D. a). Im Aufbau bzw. etabliert sind Masterstudiengänge „Quantum Science & Technology“ an der TU München (Technische Universität München o. D. b), „Quantum Engineering“ an der Universität Würzburg (Universität Würzburg o. D.), an der Universität des Saarlandes (Universität des Saarlandes o. D.) und der ETH Zürich (ETH Zürich o. D.). SAP engagiert sich an der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) München und unterstützt dort die Lehre zu Quantentechnologien.

Mit diesen Studiengängen und Angeboten als Grundlage und den zwei im Jahr 2021 in Deutschland installierten Quantencomputern in Ehningen und Jülich könnten Quantencomputer von der wissenschaftlichen Grundlagenforschung als Berufsfeld in der Anwendung in Unternehmen und anderen Organisationen schon bald sehr attraktiv werden. Verdeutlicht wird diese bevorstehende Veränderung auch an den Investitionen in Hard- und

Software, die im Jahr 2020 weltweit knapp 680 Millionen US-Dollar betrugen – mehr als dreimal so viel wie noch 2019 (Bobier et al. 2021).

Noch gibt es wenig Beschäftigte, die die Programmierung von praxisnahen Anwendungen wie der Optimierung des Flughafenbetriebs oder von Logistikvorgängen beherrschen. Die Informatikstudiengänge vermitteln gegenwärtig noch kein Verständnis für die Quantenphysik, die Physiker haben noch keine praktischen Kompetenzen in der Programmierung von Quantencomputern.

Um dieses Dilemma aufzulösen, wird an der LMU in München eine Lernplattform namens Caqao (QAR-Lab o. D.) aufgebaut, die spätestens 2024 starten soll. Sie soll es Hochschulabsolvent*innen erlauben, physikalisch-mathematische und Programmierkenntnisse für Quantenrechner zu erwerben (Kuhn 2021b). Bis dahin könnten weitere, neu geschaffene Studiengänge für „Quanten-Ingenieure“ und „Quanten-Informatiker“ angeboten werden – oder weitere Expert*innen entwickeln sich aus der kontinuierlichen Fort- und Weiterbildung der bereits heute Beschäftigten.

Als erste Anlaufstelle für ein derartiges Angebot wird gegenwärtig das sich noch im Aufbau befindliche Quantentechnologie-Kompetenzzentrum an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig gesehen (PTB o. D.). Ebenso adressiert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) das Themenfeld „Netzwerk interdisziplinärer Aus- und Weiterbildungskonzepte in den Quantentechnologien“ in seinem bereits ausgeschriebenem Förderprogramm „Quantum Futur Education“ (BMBF 2021). In der europäischen Maßnahme QTEdu (Quantum Flagship o. D. b) wird ein „Competence Framework for Quantum Technologies“ entwickelt, das Kenntnisse und Fähigkeiten in einer Art Landkarte definiert und derzeit in der ersten Version vorliegt (Greiniert/Müller 2021).

Die Fachleute aus Wissenschaft und Wirtschaft im Vertiefungsworkshopwiesen darauf hin, dass es durchaus einen „War for Talents“ um die wenigen Absolvent*innen gebe. Dieser werde sich ihrer Einschätzung nach mittelfristig nicht verbessern. Das Beispiel der Jacobs University Bremen, die Quantentechnologien als einen ihrer zentralen Schwerpunkte entwickeln will und Anfang 2022 von einem privatwirtschaftlichen russischen Unternehmen aufgekauft wurde (taz 2022), zeigt, wie umkämpft dieses Feld ist. Ebenso weite sich der international harte Wettbewerb um Personal von Studierenden auf Professor*innen aus.

8.2 Ausbildungsberufe

Die Aktivitäten bezüglich Quantentechnologien in der Ausbildung an Hochschulen könnten zeitversetzt die Ausbildungsberufe im dualen Sys-

tem befruchten bzw. helfen, diese zu verändern. Alternativ wäre denkbar, für dual ausgebildete Fachkräfte wie heutige Fachinformatiker*innen von Anfang an einen Ausbildungsgang in diesem neuen Technologiefeld und seinen Anwendungsfeldern neu zu konzipieren. Zu berücksichtigen gilt dabei, dass im Zeitraum zwischen Neukonzeption einer Ausbildungsverordnung und dem ersten Berufseintritt die rasanten Fortschritte bei den Quantencomputern die Inhalte eines neuen Ausbildungsgangs bereits obsolet machen könnte.

In der Roadmap Quantentechnologien der Bundesregierung wird bisher lediglich die universitäre Ausbildung adressiert, die in einem europäisch koordinierten Kompetenznetzwerk Quantenbildung ausgebaut werden soll (VDI Technologiezentrum o. D. b). Die Ausbildung z. B. im dualen Ausbildungssystem bleibt bisher außen vor, soll aber im BMBF-Programm „Quantum Futur Education“ berücksichtigt werden.

Quantentechnologie-orientierte Ausbildungsberufe würden es z. B. ermöglichen – so der Konsens unter den Fachleuten des durchgeführten Vertiefungsworkshop im Dezember 2021 – im Vorfeld berufliche Erfahrungen der Arbeitnehmer*innen aus unterschiedlichen Arbeitswelten zu berücksichtigen. Im Rahmen des Vertiefungsworkshops wiesen zudem einige Fachleute aus Wissenschaft und Wirtschaft darauf hin, dass gerade Studierende, die in Start-up-Unternehmen tätig sind, häufig (scheinbare) Lösungen für Probleme in der Produktion oder für Arbeitsprozesse entwickeln, die jedoch fernab der betrieblichen Realität am Bedarf vorbei entwickelt würden.

8.3 Quantensoftware in der Zukunft

Die Themen Software-Engineering und Programmierung von Quantencomputern nach heutigem Stand wurden bereits in Kapitel „Die Programmierung von Quantencomputern“ erörtert. Die Frage nach einer geeigneten Berufsqualifikation für Programmierer*innen scheint akut, könnte sich jedoch in wenigen Jahren entschärfen. Ähnlich wie heutige Programmierer*innen für Computeranwendungen fast ausschließlich „höhere Programmiersprachen“ nutzen und von der „Maschinenebene“ des digitalen Rechners weit entfernt sind, könnte dies auch für Quantencomputer zutreffen.

IBM hat eine Roadmap für ein sogenanntes Quantensoftware-Ökosystem veröffentlicht, das dreigeteilt ist: Auf der ersten Ebene entwerfen Spezialist*innen die neuartigen Quantenschaltungen und konzipieren die Kommunikation mit dem Quantenprozessor – und benötigen dazu ein tiefes Verständnis der quantenphysikalischen Vorgänge. Dann wird es auf

der zweiten Ebene Expert*innen für genau die Quantenalgorithmen aus den Basisbausteinen, den Quantenschaltkreisen, geben, die es auf digitalen Computern gar nicht geben kann.

Auf der dritten Ebene werden die Entwickler*innen diese Quantenalgorithmen mit Modellen auf reale Probleme anwenden, müssen aber die Quantenalgorithmen selbst dafür nicht unbedingt verstehen, sondern in der Lage sein, die passenden aus einer Bibliothek auszuwählen und anzupassen. Hierbei würde sich der Grad der Qualifikation im Vergleich zu heute zwar um das neue Themengebiet erweitern, wäre aber vermutlich auch für Fachinformatiker*innen umsetzbar.

IBM plant in seinem Ökosystem von vornherein, bis zum Jahr 2023 Werkzeuge und Schnittstellen bereitzustellen, die die Arbeit mit Quantencomputern für viele Entwickler*innen möglich machen werden. Dazu gehört auch der Ansatz, dass Quantencomputer nicht „allein“ genutzt werden, sondern stets in Kombination mit klassisch digitalen Computern (Gambetta/Faro/Wehden 2021). Womöglich ist lediglich in den ersten Jahren ein erhöhter Bedarf an gemischten Qualifikationen und genauer Kenntnis der Quantenhardware notwendig – so, wie heutige Programmierer auch nicht im Detail wissen müssen, wie klassische Mikroprozessoren funktionieren.

Dieses Prinzip der Kapselung wurde von den Fachleuten aus Wissenschaft und Wirtschaft im Vertiefungsworkshop unterstrichen: für die Firmware der Quantencomputer würden neuartige Studiengänge nur für die beschriebene erste und zweite Ebene benötigt. Der alltägliche Umgang und auch die Programmierung, mit an sich vordefinierten Befehlssätzen auf der dritten Ebene könne mit Arbeitnehmer*innen mit bereits vorhandener Computer-Erfahrung und entsprechender Weiterbildung gelingen.

8.4 Schulbildung

Die Entscheidung für eine berufliche Fachrichtung, sei es im Rahmen einer dualen Ausbildung oder eines (dualen) Studiums, fällt häufig schon im Jugendalter. Gegenwärtig werden im Zuge der Maßnahme „Quantum aktiv“ ca. ein Dutzend Projekte gefördert, die Quantentechnologien vielen jungen Menschen näherbringen sollen. Dieser Bildungsansatz zielt unter anderem auf haptische und spielerische Unterrichtskonzepte ab, unterstützt einen Bus als mobiles Bildungsangebot für Quanteninformatik ebenso wie eine Kinderuni und ein außerschulisches Maker-Projekt (BMBF o. D. a).

Ein technisches Bildungsziel versucht Prof. Enrique Solano, Physiker in München, umzusetzen: er arbeitet in einem Startup-Unternehmen

(Kipu-Quantum o. D.) an einem modularen, simplen Quantencomputer, der bei Zimmertemperatur arbeitet, auf einen Schreibtisch passt und mit seinen verschiedenen Bausteinen einige einfache Probleme lösen kann – und für Bildungsinstitutionen bezahlbar ist (Stölzel 2021).

Im Vertiefungsworkshop wurde von wissenschaftlicher Seite skizziert, dass Demonstrator-Aufbauten im Unterricht aufzeigen könnten, was Quantentechnologien leisten können und was eben nicht – und dies sei auch durchaus in nicht technischen Fächern außerhalb des Physik- und Technik-Unterrichts möglich. Alle Lehrkräfte wären auf diese Weise Multiplikator*innen für Quantentechnologien, ohne allein auf sehr abstrakte Konzepte der Quantenmechanik setzen zu müssen. Voraussetzung sei allerdings die Schaffung geeigneter Didaktik-Konzepte, die neben Begeisterung der Schüler*innen eben auch eine Einschätzung der Möglichkeiten von Quantentechnologien erlaube.

8.5 Die Kernaussagen auf einen Blick

- Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass im Kontext von Quantencomputern in der Entwicklung und Produktion der Hardware und im Kontext der Software-Entwicklung neue Beschäftigungsmöglichkeiten Arbeitnehmer*innen entstehen.
- In den Anfangsjahren der kommerziellen Umsetzungen von Quantentechnologien wird es eher ein starkes Beschäftigungsübergewicht von Akademiker*innen, etwa Quanteningenieur*innen, geben. Danach werden betriebliche Ausbildungsberufe konzipiert werden können und auch mehr Beschäftigung bei nicht akademisch Ausgebildeten bewirken.
- Mit neuen Studiengängen und Angeboten und in Deutschland installierten Quantencomputern kann ein neues Berufsfeld entstehen, das im Zuge der Anwendung von Quantencomputern in Unternehmen und anderen Organisationen schon kurz- bis mittelfristig sehr attraktiv wird. Diese Aktivitäten an Hochschulen können zeitversetzt die Ausbildungsberufe im dualen System befruchten bzw. diese verändern helfen.
- Es werden bereits heute Projekte gefördert, die Quantentechnologien möglichst vielen jungen Menschen näherbringen sollen. Dieser Bildungsansatz zielt u. a. auf haptische und spielerische Unterrichtskonzepte ab.

9. Zehn Thesen für die weitere Diskussion

Das vorliegende Working Paper analysiert und diskutiert das weitreichende Innovationsthema „Quantentechnologien“ im Kontext des gegenwärtigen Entwicklungsstandes und der Fortschritte in näherer Zukunft sowie der fördernden und hemmenden Faktoren sowie der sozioökonomischen Bedeutung (u. a. Beschäftigungsentwicklung, Qualifizierung) und der Stellung des Standortes Deutschland. Darüber hinaus bietet es Denkanstöße für eine breitere öffentliche Diskussion des Themas in Verbindung mit zukünftigen Arbeitswelten in einem innovations- und arbeitspolitischen Kontext.

Die Ergebnisse des Working Papers stützen die Ausgangsthese, dass es allein mit der Ausrichtung auf Fortbildung und Umschulung kaum gelingen wird, ausreichend dual ausgebildete Fachkräfte wie heutige Fachinformatiker*innen in diesem neuen Technologiefeld und seinen Anwendungsfeldern (u. a. autonome Mobilität, Medizintechnik und Materialprüfung) einzusetzen. Vielmehr sind vor allem Ausbildungsberufe im Rahmen der dualen Ausbildung und Beteiligungsmöglichkeiten für die Beschäftigten neu zu konzipieren. Erst dann lässt sich das volle Potenzial der Quantentechnologien für eine menschengerechte Arbeit in zukünftigen Arbeitswelten nutzen.

Die Impulse für eine weitere Diskussion werden hier im Rahmen von zehn Thesen eingebracht, die als Erweiterung der bestätigten Ausgangsthese zu betrachten sind. Diese Thesen sollen in ihrer zugespitzten Form vor allem dazu dienen, den Gestaltungsdiskurs über die Herausforderung von Quantentechnologien und zukünftigen Arbeitswelten in Deutschland weiter voranzutreiben.

1. Mit radikal anderer Funktionsweise im Vergleich zur elektronischen Digitaltechnik und optischen Datenübertragung haben Quantencomputer und Quantenkommunikation in Zukunft durchaus das Potenzial, industrielle, wirtschaftliche und gesellschaftliche Prozesse und somit auch die zukünftigen Arbeitswelten disruptiv zu verändern. In welchen Teilbereichen das sein wird, ist heute noch offen. Gleichwohl wird es auch inkrementelle Innovationen durch die Verzahnung von traditioneller elektronischer Datenverarbeitung mit Quantentechnologien geben.
2. Das Verschmelzen des Konzepts der künstlichen Intelligenz mit neuromorphen Quantencomputern ist gegenwärtig visionär ausgelegt. Neuromorphe Computer würden sich durch die Aufhebung der Trennung von Speicher und Recheneinheit auszeichnen, sie wären sehr effizient und verbrauchen sehr wenig Energie. Ein neuromorphes

Quantencomputing könnte sogar das menschliche Gehirn teilweise übertreffen. Allerdings sind das gegenwärtig theoretische Gedankenspiele in der Wissenschaft, denen ein konkreter Zeitplan zur Entwicklung und Anwendung gänzlich fehlt.

3. In Bezug auf die gegenwärtige Förderung von Quantentechnologien mit öffentlichen Mitteln stehen Deutschland und Europa im internationalen Vergleich mit den USA und China recht gut da, auch wenn es bisher nicht zur internationalen Führungsposition reicht.
4. Deutschland kann als Stärke ausgewiesene wissenschaftliche Kompetenzen sowie eine Fülle an potenziellen Nutzer*innen der Technologie vorweisen. Allerdings gilt, dass kein Einzelakteur – anders als in den USA und China – in Deutschland in der Lage ist, ein ausgereiftes Quantencomputing-System eigenständig zu entwickeln.
5. In Deutschland verfügt eine Vielzahl von verschiedenen Akteuren aus Wissenschaft und Wirtschaft über anerkannte Kompetenzen im Bereich Quantentechnologien, sodass enge zielführende Kooperationen notwendig sind, um zukünftig international wettbewerbsfähig zu sein
6. Es ist davon auszugehen, dass Quantencomputer ähnlich gravierende Auswirkungen auf die zukünftigen Arbeitswelten haben, wie klassische Computer sie bei ihrer breiten Einführung in Vergangenheit und Gegenwart hatten bzw. haben. Es werden einige Tätigkeiten wegfallen, andere sich verändern und neue Tätigkeiten bzw. Berufe hinzukommen.
7. Von einer Welle der Arbeitslosigkeit in großem Umfang, verursacht durch den „Kollegen Quantencomputer“, ist gegenwärtig nicht auszugehen, wenn frühzeitig Arbeitnehmer*innen adäquat aus- und fortgebildet werden.
8. Die Auswirkungen von Quantencomputern und Quantenkommunikation auf zukünftige Arbeitswelten sind frühzeitig zu sondieren und zu bewerten, auch wenn diese Technologien gegenwärtig noch nicht im großen Stil in der Anwendung sind. Es geht darum, zum jetzigen Zeitpunkt möglichst große Gestaltungsspielräume einer noch recht frühen Entwicklung hinreichend kooperativ für Unternehmen und ihre Beschäftigten nutzen zu können.
9. Für Gewerkschaften und die Vertretungen der Beschäftigten in Aufsichtsräten sowie Betriebs- und Personalräten ist – wie bei den Industrieunternehmen und anderen Organisationen – einerseits die betriebliche Gestaltungsebene von hoher Relevanz. Anderseits besteht in einer Phase tiefgreifender Transformation in diversen Wirtschaftsbereichen eine besondere Herausforderung. Diese besteht für Arbeitnehmerakteure vor allem darin, sich mit zusätzlichem, betrieblichem und

überbetrieblichem Wissen in innovations- und arbeitspolitische Strategieprozesse und Ökosysteme zu Quantentechnologien einzubringen.

10. Strategieprozesse unter Beteiligung von Politik, Wirtschaft, Gesellschaft und Wissenschaft sind auf regionaler und nationaler Ebene in Deutschland und auch auf europäischer Ebene angestoßen. Sie bedürfen allerdings zusätzlicher Impulse aus betrieblicher Praxis und themen-kompetenter Arbeitsforschung, wenn die zukünftigen Arbeits- und Wirtschaftswelten in Verbindung mit Quantentechnologien im Sinne der Menschen, die in ihnen tätig sind, gestaltet werden sollen.

Literatur

AssCompact (2021): Quantencomputer verändern die Versicherungswirtschaft. www.asscompact.de/nachrichten/quantencomputer-ver%C3%A4ndern-die-versicherungswirtschaft (Abruf am 4.10.2023).

Berke, Jürgen / Hohensee, Matthias / Kroker, Michael / Kuhn, Thomas / Menn, Andreas (2020): Der Neustart. In: Wirtschaftswoche 3/2020, S. 14–21.

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (o. D. a): Fördermaßnahme Quantum aktiv. Intuitive Outreachkonzepte für die Quantentechnologien. www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/quantum-aktiv.html (Abruf am 4.10.2023).

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (o. D. b): Projekt QLindA. Quantum Reinforcement Learning für industrielle Anwendungen. www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/quanteninformatik-algorithmen-software-anwendungen/qlinda.html (Abruf am 4.10.2023).

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2021): Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung von Projekten zum Thema Quantum Futur Education – Netzwerk interdisziplinärer Aus- und Weiterbildungskonzepte in den Quantentechnologien. www.bmbf.de/bmbf/shareddocs/bekanntmachungen/de/2021/03/3442_bekanntmachung (Abruf am 4.10.2023).

BMBF – Bundesministerium für Bildung und Forschung (2022): Forschung. Quantentechnologien. http://web.archive.org/web/20220319175125/www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/forschung-fuer-arbeit/quantentechnologien/quantentechnologien_node.html (Abruf am 27.11.2023).

Bobier, Jean-François / Langione, Matt / Tao, Edward / Gourevitch, Antoine (2021): What Happens When „If“ Turns to „When“ in Quantum Computing? Boston, Chicago, Paris. https://web-assets.bcg.com/89/00/d2d074424a6ca820b1238e24ccc0/bcg-what-happens-when-if-turns-to-when-in-quantum-computing-jul-2021-r.pdf (Abruf am 4.10.2023).

Bönsch, Regina (2021): Teamarbeit für Quantencomputer. In: VDI Nachrichten 16/2021, S. 60–63.

Braun, Alexander (2019): Heißes Eisen? Quanten-Annealer – Vorbote des Quantencomputers. In: c’t Magazin 13/2019, S. 142.

Butscher, Ralf (2021): Rechnen mit Quanten. In: Bild der Wissenschaft 08/2021, S. 82–87.

Calarco, Tommaso / Riedel, Max (2018a): Quantentechnologien vor dem großen Sprung. In: Spektrum der Wissenschaft 6/2018, S. 12–21. www.spektrum.de/inhaltsverzeichnis/quantentechnologien-vor-dem-grossen-sprung-spektrum-6-2018/1516369 (Abruf am 4.10.2023).

Calarco, Tommaso / Riedel, Max (2018b): Quantentechnologien vor dem großen Sprung. In: Spektrum der Wissenschaft 6/2018, S. 19. www.spektrum.de/magazin/die-zweite-quantenrevolution/1561160 (Abruf am 4.10.2023).

Choi, Charles Q. (2021): Two of world's biggest quantum computers made in China. Quantum computers Zuchongzi and Jiuzhang 2.0 may both display „quantum primacy" over classical computers. https://spectrum.ieee.org/quantum-computing-china (Abruf am 4.10.2023).

Computer Security Resource Center (o. J.): Post-Quantum Cryptography. Selected Algorithms 2022. https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography/selected-algorithms-2022 (Abruf am 4.10.2023).

Deutscher Bundestag (2021): Kleine Anfrage Quantentechnologie – Förderung der Bundesregierung und aktuelle Herausforderungen im Wettbewerb um die Quantenüberlegenheit. Berlin. https://dserver.bundestag.de/btd/19/273/1927310.pdf (Abruf am 4.10.2023).

Die Bundesregierung (2021): Bund fördert Quantentechnologien. Lösungen für komplexe Zusammenhänge. www.bundesregierung.de/breg-de/suche/quantencomputing-1836542 (Abruf am 4.10.2023).

DiVincenzo, David P. (1996): Topics in Quantum Computers. https://arxiv.org/abs/cond-mat/9612126 (Abruf am 4.10.2023).

DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2019): Quantentechnologie für sichere Kommunikation. Kick-Off Forschungsinitiative QuNET. Quantentechnologie für sichere Kommunikation. www.dlr.de/content/de/artikel/news/2019/04/20191112_quantentechnologie-fuer-sichere-kommunikation.html (Abruf am 4.10.2023).

DLR – German Space Agency (2016): Informationen der Europäischen Kommission zu GOVSATCOM. Archiv NKS Newsletter 2016, Newsletter 30/2016. www.dlr.de/rd/en/desktopdefault.aspx/tabid-11105/19411_read-48034/ (Abruf am 4.10.2023).

Dörner, Stephan (2016): Was ist eigentlich ein Hype Cycle? https://t3n.de/news/was-ist-der-hype-cycle-757261/ (Abruf am 4.10.2023).

Drehling, Wilhelm / Tremmel, Sylvester (2021): Post-Quanten-Portfolio. In: c't Magazin 16/2021, S. 68–71.

D-Wave Systems (2020): D-Wave kündigt allgemeine Verfügbarkeit des ersten für Unternehmen gebauten Quantencomputers an. www.globenewswire.com/en/news-release/2020/09/29/2100806/0/de/D-Wave-k%C3%BCndigt-allgemeine-Verf%C3%BCgbarkeit-des-ersten-f%C3%BCr-Unternehmen-gebauten-Quantencomputers-an.html (Abruf am 4.10.2023).

EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation (2022): Gutachten zu Forschung, Innovation und Technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands. www.e-fi.de/publikationen/gutachten (Abruf am 4.10.2023).

ETH Zürich (o. D.): Studium: Master Quantum Engineering. https://ethz.ch/de/studium/master/studienangebot/ingenieurwissenschaften/quantum-engineering.html (Abruf am 4.10.2023).

Europäische Kommission – Vertretung in Deutschland (2021): Fast 2 Milliarden Euro für den digitalen Wandel in Europa: Erste Ausschreibungen für Ende November geplant. https://germany.representation.ec.europa.eu/news/fast-2-milliarden-euro-fur-den-digitalen-wandel-europa-erste-ausschreibungen-fur-ende-november-2021-11-10_de (Abruf am 4.10.2023).

Europäische Kommission – Vertretung in Deutschland (2018): Kommission startet 1-Milliarde-Euro-Initiative zur Entwicklung der Quantentechnik in Europa. https://germany.representation.ec.europa.eu/news/kommission-startet-1-milliarde-euro-initiative-zur-entwicklung-der-quantentechnik-europa-2018-10-29_de (Abruf am 4.10.2023).

European Commission (2020): Strategic Research Agenda. https://web.archive.org/web/20201229154053/https://qt.eu/app/uploads/2020/04/Strategic_Research-_Agenda_d_FINAL.pdf (Abruf am 27.11.2023).

European Commission (2021): Quantum communication infrastructure: Questions and answers. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/faqs/quantum-communication-infrastructure-questions-and-answers (Abruf am 4.10.2023).

European Commission (2022): All Member States now committed to building an EU quantum communication infrastructure. https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/all-member-states-now-committed-building-eu-quantum-communication-infrastructure (Abruf am 4.10.2023).

FAZ.net (2021): Trumpf arbeitet an einem „Superchip“ für Quantencomputer. www.faz.net/aktuell/wirtschaft/digitec/trumpf-investiert-millionen-in-superchips-fuer-quantencomputer-17542130.html (Abruf am 4.10.2023).

Forschungszentrum Jülich (2019): Jülicher Forscher trugen zu Googles Nachweis der Quantenüberlegenheit bei. https://web.archive.org/web/20200506093215/https:/www.fz-juelich.de/SharedDocs/Pressemitteilungen/UK/DE/2019/2019-10-23-quantum-Supremacy.html (Abruf am 4.10.2023).

Fraunhofer-Gesellschaft (o. D.): Den Quantencomputer benutzen – aber wie? www.fraunhofer.de/de/institute/kooperationen/fraunhofer-kompetenznetzwerk-quantencomputing/nutzungsbedingungen-qc.html#faq_faqitem_13441874-answer (Abruf am 4.10.2023).

Gambetta, Jay (2020): IBM’s roadmap for scaling quantum technology. https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap (Abruf am 4.10.2023).

Gambetta, Jay / Faro, Ismael / Wehden, Karl (2021): IBM’s roadmap for building an open quantum software ecosystem. https://research.ibm.com/blog/quantum-development-roadmap (Abruf am 4.10.2023).

Gartner (2020): Hype Cycle for Compute Infrastructure, 2020. www.gartner.com/en/documents/3987268 (Abruf am 4.10.2023).

Gieselmann, Hartmut (2019): Quantenpendler. VW will Staus mit Quenten-Annealern reduzieren, c’t Magazin 25/2019, S. 60 f.

Grävemeyer, Arne (2018): Europa entfesselt Quanten-Power. In: c’t Magazin 25/2018, S. 18 f.

Grävemeyer, Arne (2021): Superrechner mit Qubits. In: c’t Magazin 26/2021, S. 38.

Greinert, Franziska / Müller, Rainer (2021): Competence Framework for Quantum Technologies. https://qt.eu/app/uploads/2021/09/CompetenceFrameworkQuantumTechnologiesV1.pdf (Abruf am 4.10.2023).

Grotelüschen, Frank (2020): Quantencomputer. Wettstreit der Systeme. www.deutschlandfunk.de/quantencomputer-wettstreit-der-systeme-100.html (Abruf am 4.10.2023).

Gutberlet, Anna-Lena (2017): Wie programmiert man einen Quantenrechner? www.elektronikpraxis.vogel.de/wie-programmiert-man-einen-quantenrechner-a-652795/ (Abruf am 4.10.2023).

Hartnett, Kevin (2019): A New Law to Describe Quantum Computing’s Rise? www.quantamagazine.org/does-nevens-law-describe-quantum-computings-rise-20190618/ (Abruf am 4.10.2023).

Höfling, Jürgen / Ostler, Ulrike (2021): PlanQk-Messe 2021: „Quanten-Boost für die Optimierung“. www.datacenter-insider.de/planqk-messe-2021-quanten-boost-fuer-die-optimierung-a-1011631/ (Abruf am 4.10.2023).

Hohensee, Matthias (2021): Der Quantenspringer. In: Wirtschaftswoche 40/2021, S. 66–68.

Hossenfelder, Sabine (2021): Rechnen mit Qubits im Jahr 2021. Sechs technische Konzepte für Quantencomputer. www.heise.de/select/ct/2021/17/2117410351882465724 (Abruf am 4.10.2023).

IBM (2021a): IBM und Fraunhofer präsentieren Europas leistungsstärksten Quantencomputer. https://de.newsroom.ibm.com/2021-06-15-IBM-und-Fraunhofer-prasentieren-Europas-leistungsstarksten-Quantencomputer (Abruf am 4.10.2023).

IBM (2021b): IBM Unveils Breakthrough 127-Qubit Quantum Processor. https://newsroom.ibm.com/2021-11-16-IBM-Unveils-Breakthrough-127-Qubit-Quantum-Processor (Abruf am 4.10.2023).

ID Quantique (2020): ID Quantique and SK Telecom move one step forward in their standardization roadmap for quantum key distribution. www.idquantique.com/id-quantique-and-sk-telecom-move-one-step-forward-in-their-standardization-roadmap-for-quantum-key-distribution/ (Abruf am 4.10.2023).

Jung, Jakob (2021): IBM und Daimler erzielen Durchbruch mit Quantumcomputern. www.zdnet.de/88391387/ibm-und-daimler-erzielen-durchbruch-mit-quantumcomputern/ (Abruf am 4.10.2023).

Kagermann, Henning / Süssenguth, Florian / Körner, Jorg / Liepold, Annka (2020): Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. München. www.acatech.de/publikation/innovationspotenziale-der-quantentechnologien/download-pdf?lang=de (Abruf am 4.10.2023).

Killer, Achim (2017): Quantencomputer. Die kommende Gefahr für die IT-Sicherheit. www.deutschlandfunk.de/quantencomputer-die-kommende-gefahr-fuer-die-it-sicherheit-100.html (Abruf am 4.10.2023).

Kipu-Quantum (o. D.): We democratize quantum computing. https://kipu-quantum.com/ (Abruf am 4.10.2023).

Kooperation international (2021): Cybersicherheit: Alle 27 EU-Mitgliedstaaten verpflichten sich zum Aufbau einer Quantenkommunikationsinfrastruktur. www.kooperation-international.de/aktuelles/nachrichten/detail/info/cybersicherheit-alle-27-eu-mitgliedstaaten-verpflichten-sich-zum-aufbau-einer-quantenkommunikations/ (Abruf am 4.10.2023).

Kuhn, Thomas (2018): Die Macht, die aus dem Kühlschrank kommt. In: Wirtschaftswoche 5/2021, S. 58–61.

Kuhn, Thomas (2021a): Entscheidung bei minus 273 Grad. In: Wirtschaftswoche vom 16/2021, S. 60–63.

Kuhn, Thomas (2021b): Hat irgendjemand eine Ahnung davon? In: Wirtschaftswoche vom 25.8.2021, S. 62–65.

Lackes, Richard / Siepermann, Markus (2018): Von Neumann-Architektur. Ausführliche Definition im Online-Lexikon. https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/von-neumann-architektur-49418/version-272651 (Abruf am 4.10.2023).

Lenzen, Marianne (2020): „Extending Quantum Links: Modules for Fiber- and Memory-Based Quantum Repeaters“ von Peter van Loock et al. https://qlinkx.de/2020/11/03/extending-quantum-links-modules-for-fiber-and-memory-based-quantum-repeaters-von-peter-van-loock-et-al/ (Abruf am 4.10.2023).

Löfken, Jan Oliver (2022): Netzwerk mit 46 Knoten. In: MIT Technology Review, deutsche Ausgabe, 1/2022, S. 15.

Lok Report (2021): HOLM: Quantum-Computing im Verkehrssektor. www.lok-report.de/news/deutschland/industrie/item/28256-holm-quantum-computing-im-verkehrssektor.html (Abruf am 4.10.2023).

Malanowski, Norbert (2021): Technologiefelder der Zukunft. In: Lemb, Wolfgang (Hg.): Perspektiven eines Industriemodells der Zukunft. Marburg: Metropolis, S. 81–96. www.metropolis-verlag.de/Perspektiven-eines-Industriemodells-der-Zukunft/1475/book.do (Abruf am 4.10.2023).

Malanowski, Norbert / Bachmann, Gerd / Hutapea, Luciana / Kaiser, Oliver / Rijkers-Defrasne, Sylvie / Ratajczak, Andreas / Reuß, Karsten (2018): Ergebnisbericht Monitoring Innovations- und Technologiepolitik. Working Paper 75. Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung. www.boeckler.de/de/faust-detail.htm?sync_id=HBS-06900 (Abruf am 4.10.2023).

Mayer-Grenu, Andrea (2022): Projekt PhotonQ: Rund 16 Millionen Euro für photonische Quantenprozessoren. https://nachrichten.idw-online.de/2022/01/18/projekt-photonq-rund-16-millionen-euro-fuer-photonische-quantenprozessoren/ (Abruf am 4.10.2023).

McKinsey & Company (2020a): 500 Mio. Dollar: Investitionen in Quanten-Computing erreichen neuen Höchststand. www.mckinsey.de/news/presse/quantum-computing-monitor-marktanalyse-investitionen (Abruf am 4.10.2023).

McKinsey & Company (2020b): McKinsey Quantum Computing Monitor. Facts & Figures, Folie 10. www.mckinsey.de/~/media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2020/2020-12-13%20-%20quantum%20computing%20monitor/mckinseyquantum%20computing%20monitor122020.pdf (Abruf am 4.10.2023).

McKinsey & Company (2020c): McKinsey Quantum Computing Monitor. Facts & Figures, Folie 6. www.mckinsey.de/~/media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2020/2020-12-13%20-%20quantum%20computing%20monitor/mckinseyquantum%20computing%20monitor122020.pdf (Abruf am 4.10.2023).

Meier, Christian J. (2021): Helmholtz Quantum. Eine Aufgabe wie die Mondlandung. www.helmholtz.de/newsroom/artikel/eine-aufgabe-wie-die-mondlandung/ (Abruf am 4.10.2023).

Merck (o. D.): Unendliche Möglichkeiten mit Quanten-Computing. Endlich. www.merckgroup.com/de/research/science-space/envisioning-tomorrow/smarter-connected-world/quantum-computing.html (Abruf am 4.10.2023).

Meyer, Florian (2020): Die erste intuitive Programmiersprache für Quantencomputer. https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2020/06/die-erste-intuitive-programmiersprache-fuer-quantencomputer.html (Abruf am 4.10.2023).

Michaels, Johanna (2019): Durchbruch von Google. Was bedeutet die Überlegenheit des Quantencomputers? www.faz.net/aktuell/wissen/physik-mehr/was-bedeutet-die-ueberlegenheit-von-googles-quantencomputers-16448116.html?printPagedArticle=true (Abruf am 4.10.2023).

Mohn, Holger (2020): Was hinter Quantencomputing steckt, und warum Daimler daran forscht. https://group.mercedes-benz.com/magazin/technologie-innovation/quantencomputing.html?r=dai (Abruf am 4.10.2023).

Mohr, Daniel (2021): Neue Technologien. Deutsche Börse setzt auf Quantencomputer. www.faz.net/aktuell/finanzen/finanzmarkt/boerse-will-risiken-mit-quantencomputer-schneller-rechnen-17236005.html (Abruf am 4.10.2023).

mynaric (2018): Mynaric erhält Auftrag für hochsichere Datenübertagung aus dem Weltraum. https://mynaric.com/news/mynaric-erhaelt-auftrag-fuer-hochsichere-datenuebertagung-aus-dem-weltraum/?lang=de (Abruf am 4.10.2023).

Neukart, Florian (2020a): Hallo, Quantenwelt! Wie man mit Quantengattern programmiert. c't Magazin 6/2020, S. 146–151.

Neukart, Florian (2020b): Quantencomputing: Eine Einführung für Programmierer. c't Magazin 6/2020, S. 142–143.

Niedersächsisches Ministerium für Wissenschaft und Kultur (Hg.) (2021): Erster Quantencomputer wird im Jahr 2025 enthüllt. www.mwk.niedersachsen.de/startseite/aktuelles/presseinformationen/erster-quantencomputer-wird-im-jahr-2025-enthullt-203767.html (Abruf am 4.10.2023).

Österreichische Akademie der Wissenschaften (2017): Erstes abhörsicheres Quanten-Videotelefonat zwischen Wien und Peking geglückt. www.oeaw.ac.at/detail/news/erstes-abhoersicheres-quanten-videotelefonat-zwischen-wien-und-peking-gegluckt-1 (Abruf am 4.10.2023).

Pfeiffer, Sabine (2015): Arbeit und Bildung. In: Hoffmann, Reiner / Bogedan, Claudia (Hg.): Arbeit der Zukunft. Möglichkeiten nutzen – Grenzen setzen. Frankfurt am Main: Campus, S. 363–379.

Pfeiffer, Sabine (2016): Berufliche Bildung 4.0? Überlegungen zur Arbeitsmarkt- und Innovationsfähigkeit. In: Budrich Journals Industrielle Beziehungen 23(1), S. 25–44.

PTB – Physikalisch-Technische Bundesanstalt (o. D.): Mit Metrologie in die Zukunft. Herausforderung Quantentechnologie. www.ptb.de/cms/ (Abruf am 4.10.2023).

QAR-Lab – Quantum Applications and Research Laboratory (o. D.): Learn Quantum Computing. https://qarlab.de/caqao/ (Abruf am 4.10.2023).

Quantum Flagship (o. D. a): Atomic Clocks. https://qt.eu/quantum-principles/basic-science/atomic-clocks (Abruf am 4.10.2023).

Quantum Flagship (o. D. b): QTEdu – Coordination and support action for Quantum Technology Education. https://qt.eu/about-quantum-flagship/projects/education-coordination-support-actions/ (Abruf am 4.10.2023).

Quantum Flagship (o. D. c): The Quantum Flagship: One of the most ambitious long-term research and innovation initiatives of the European Commission. https://qt.eu/about-quantum-flagship/introduction-to-the-quantum-flagship/ (Abruf am 4.10.2023).

QuNET (o. D.): Projektstruktur und Zeitplan der QuNET-Initiative. https://web.archive.org/web/20220516160927/www.qunet-initiative.de/projektstruktur-zeitplan/ (Abruf am 4.10.2023).

QUTAC – Quantum Technology and Application Consortium (2021): Quantencomputing: Führende deutsche Konzerne verständigen sich auf großflächige Anwendung. Pressemitteilung, 10.6.2021. www.qutac.de/quantum-technology-and-application-consortium-qutac/ (Abruf am 4.10.2023).

Schönherr, Maximilian (2020): Neue Computertechnik. Quantencomputer verlangen ganz neue Programmier-Konzepte. www.deutschlandfunk.de/neue-computertechnik-quantencomputer-verlangen-ganz-neue-100.html (Abruf am 4.10.2023).

Schubert, Christian (2019): Im Quantenfieber. www.faz.net/aktuell/wirtschaft/unternehmen/wie-die-quantentechnologie-die-wirtschaft-bewegt-16527306.html (Abruf am 4.10.2023).

science media center (2021a): Fehlerkorrektur bei Quantencomputern: Durchbruch? www.sciencemediacenter.de/alle-angebote/research-in-context/details/news/fehlerkorrektur-bei-quantencomputern-durchbruch/ (Abruf am 4.10.2023).

science media center (2021b): Quantencomputer: Zeitplan, Meilensteine, Herausforderungen, Hype. www.sciencemediacenter.de/alle-angebote/science-response/details/news/quantencomputer-zeitplan-meilensteine-herausforderungen-hype/ (Abruf am 4.10.2023).

SPD / Bündnis 90 / Die Grünen / FDP (2021): Mehr Fortschritt wagen. Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Nachhaltigkeit. Koalitionsvertrag 2021–2025 zwischen SPD, Bündnis 90 / Die Grünen und FDP. www.bundesregierung.de/breg-de/service/gesetzesvorhaben/koalitionsvertrag-2021-1990800 (Abruf am 4.10.2023).

Spiegel Netzwelt (2021): Deutschlands erster Quantencomputer kostet 11.621 Euro Monatsmiete. www.spiegel.de/netzwelt/netzpolitik/ibm-quantum-system-one-deutschlands-erster-quantencomputer-kostet-11-621-euro-monatsmiete-a-eb402a65-d78a-41f7-9411-047bc99db079 (Abruf am 4.10.2023).

Stölzel, Thomas (2020): Das wird merkwürdig für uns. In: Wirtschaftswoche 52/2020, S. 74–76.

Stölzel, Thomas (2021): Quanten für alle. In: Wirtschaftswoche 23/2021, S. 64.

Strünkelnberg, Thomas (2021): Quantencomputer: Milliarden für niedersächsische Forschung. www.heise.de/news/Quantencomputer-Milliarden-fuer-niedersaechsische-Forschung-6178462.html (Abruf am 4.10.2023).

taz (2022): Bremer Universität geht an Investor. Der russische Retter. https://taz.de/Bremer-Universitaet-geht-an-Investor/!5826998/ (Abruf am 4.10.2023).

Technische Universität München (o. D. a): Quantentechnologie. www.tum.de/aktuelles/alle-meldungen/quantentechnologie (Abruf am 4.10.2023).

Technische Universität München (o. D. b): Quantum Science & Technology. www.ph.tum.de/academics/msc/qst/qst/ (Abruf am 4.10.2023).

Thomä, Manuel (2021): Trumpf investiert mehr in Quanten-Startup Q.ANT. www.trumpf.com/de_DE/newsroom/pressemitteilungen-global/pressemitteilung-detailseite-global/release/trumpf-investiert-mehr-in-quanten-startup-qant/ (Abruf am 4.10.2023).

Universität des Saarlandes (o. D.): Studium: Quantum Engineering (M.Sc.). www.uni-saarland.de/studium/angebot/master/quantum-engineering.html (Abruf am 4.10.2023).

Universität Würzburg (o. D.): Fakultät für Physik und Astronomie. Quantum Engineering. www.physik.uni-wuerzburg.de/studium/master/quantum-engineering/ (Abruf am 4.10.2023).

VDI Technologiezentrum (o. D. a): Roadmap Quantencomputing. www.quantentechnologien.de/roadmap-quantencomputing (Abruf am 4.10.2023).

VDI Technologiezentrum (o. D. b): Roadmap Quantencomputing, S. 23 ff. www.quantentechnologien.de/roadmap-quantencomputing (Abruf am 4.10.2023).

VDI Technologiezentrum (Hg.) (2022): Agenda Quantensysteme 2030, S. 4. Düsseldorf. www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Agenda_Quantensysteme_2030_bf_C1.pdf (Abruf am 4.10.2023).

Vogel, Michael (2020): Künftige Anwendungsfälle. Deshalb investiert BMW in Quantencomputing. www.automotiveit.eu/konzern-it-bmw/deshalb-investiert-bmw-in-quantencomputing-344.html (Abruf am 4.10.2023).

Wallraff, Andreas (2021): Meilenstein in Quanten-Fehlerkorrektur erreicht. https://ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2021/12/meilenstein-in-quanten-fehlerkorrektur-erreicht.html (Abruf am 4.10.2023).

Welchering, Peter (2021): Quantencomputer. Computer üben den Quantensprung. www.faz.net/aktuell/technik-motor/digital/computer-ueben-den-quantensprung-17221258.html (Abruf am 4.10.2023).

Wootton, James (o. D.): Was versteht man unter der NISQ-Technologie (Noisy Intermediate-Scale Quantum)? https://qastack.com.de/quantum/1885/what-is-meant-by-noisy-intermediate-scale-quantum-nisq-technology (Abruf am 4.10.2023).

Wunderlich-Pfeiffer, Frank (2019): Quantencomputer. 10.000 Jahre bei Google sind 2,5 Tage bei IBM. www.golem.de/news/quantencomputer-10-000-jahre-bei-google-sind-2-5-tage-bei-ibm-1910-144596.html (Abruf am 4.10.2023).

Autoren

Oliver S. Kaiser, Diplom-Physiker, ist Senior-Technologieberater in der VDI Technologiezentrum GmbH, für die er seit 2007 im Bereich Forschung und Entwicklung tätig ist. Nach fünf Jahren als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Arbeitsgebiet Mikrostrukturtechnik der Universität Dortmund war er anschließend als Applikationsingenieur bei der Intacton GmbH (heute Fraba) mit optischer Messtechnik befasst. Er ist Autor von Studien über die Zukunft des Autos, Elektromobilität und industrielle Ressourceneffizienz. Oliver S. Kaiser arbeitet im von der Hans-Böckler-Stiftung geförderten Projekt „Monitoring Innovations- und Technologiepolitik“ seit 2017 an den Themenfeldern Smart Data und Künstliche Intelligenz, Wasserstoffwirtschaft, Quantencomputer und autonome Klein- und Omnibusse im öffentlichen Verkehr.

Dr. Claudius Klein ist seit 2017 in der VDI Technologiezentrum GmbH tätig. Nach Abschluss seiner Promotion im Rahmen eines Austauschprojektes mit dem Brookhaven National Laboratory im Feld der Festkörperphysik arbeitete er im Bereich der Halbleiterfertigung und war dort als Produktmanager tätig. Seine Tätigkeitsfelder beim VDI Technologiezentrum umfassen die fachliche und strategische Beratung des BMBF hinsichtlich neuer Förderschwerpunkte in den Bereichen Quantensysteme, angewandte photonischer Technologien und Innovationsförderung. Ein spezieller Fokus liegt dabei auf den interdisziplinären Bereichen der Nachwuchsförderung. Die Koordination der Europäischen Forschungslandschaft im Rahmen des Europäischen Quantum Flagships ist eine seiner Kernaufgaben.

Dr. Norbert Malanowski ist als Senior-Technologieberater und Projektleiter in der VDI Technologiezentrum GmbH seit 1999 vor allem in den Bereichen Innovations- und Arbeitspolitik, Vorausschau, Technikfolgenabschätzung sowie Transformation von Wirtschaft, Arbeit und globalen Wertschöpfungsketten tätig. Von 2005 bis 2007 hat er für die Europäische Kommission in Sevilla als Senior Scientific Fellow gearbeitet. Norbert Malanowski war von 2009 bis 2020 als Gastdozent im Bereich Innovations- und Arbeitspolitik sowie Arbeitswelten der Zukunft an der Universität Witten/Herdecke aktiv. Seit 2021 ist er als ehrenamtlicher Richter am Arbeitsgericht Duisburg tätig. Vor seinem Studium der Politikwissenschaft / Politischen Ökonomie an den Universitäten Duisburg und Toronto hat er als Werkzeugmacher gearbeitet.

ISSN 2509-2359