

Quantentechnologien in Unternehmen

Potenziale, Orientierung, Use Cases

Herausgeber

Bitkom e. V.
Albrechtstraße 10
10117 Berlin
Tel.: 030 27576-0
bitkom@bitkom.org
www.bitkom.org

Ansprechpartner

Dr. Natalia Stolyarchuk
T 030 27576-187 | n.stolyarchuk@bitkom.org

Autorinnen & Autoren:

Dr. Roman Bansen (Agentur für Innovation in der Cybersicherheit), Dr. Valeria Bartsch (Fraunhofer ITWM), Dr. Peter Beckerle (Sopra Steria), Dr.-Ing. Alfred Geiger (T-Systems), Dr. Thorsten Gressling (Bayer AG), Holm Landrock (Freier Journalist), Dr. Stefan Kister (IBM), Dr. Jana Lehner (Quantum Brilliance), Dr. Mark Mattingley-Scott (Quantum Brilliance), Manfred Rieck (Deutsche Bahn), Andreas Rohnfelder (Fujitsu), Dr. Stephan Schenk (BASF), Dr. Stefan Ulm (AKKA), Alfred Weingartner (Sopra Steria), Joachim Wierzbinka (ISC), Ingolf Wittmann (QBN)

Satz & Layout

Anna Stolz | Bitkom

Titelbild

© Bartek – stock.adobe.com

Copyright

Bitkom 2022

Diese Publikation stellt eine allgemeine unverbindliche Information dar. Die Inhalte spiegeln die Auffassung im Bitkom zum Zeitpunkt der Veröffentlichung wider. Obwohl die Informationen mit größtmöglicher Sorgfalt erstellt wurden, besteht kein Anspruch auf sachliche Richtigkeit, Vollständigkeit und/oder Aktualität, insbesondere kann diese Publikation nicht den besonderen Umständen des Einzelfalles Rechnung tragen. Eine Verwendung liegt daher in der eigenen Verantwortung des Lesers. Jegliche Haftung wird ausgeschlossen. Alle Rechte, auch der auszugsweisen Vervielfältigung, liegen beim Bitkom.

	Executive Summary	8
A	Allgemeiner Teil	9
	1. Warum sollte man sich jetzt mit Quantentechnologien auseinandersetzen?	10
	2. Wo stehen wir heute?	13
	3. Potenzial der Quantentechnologie	18
	4. Branchen und Industrien, die von Quantentechnologien profitieren können	28
	5. Einstieg und Kompetenzaufbau in Quantentechnologien	43
	6. Ausblick	47
B	Use Cases	49
	1. Einleitung	50
	2. Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei	51
	Management Summary	51
	UC Düngemittelentwicklung	51
	3. Montanindustrie	52
	Management Summary	52
	UC Untergrundanalyse	52
	4. Verarbeitendes Gewerbe	53
	Management Summary	53
	UC Batterietechnik	53
	UC Optimierung von Bewegungsabläufen von Robotern	54
	UC Produktionssteuerung und Job Shop Scheduling	54
	UC Optimierung der Sensorposition	55
	UC Vorserienfahrzeug-Konfiguration	55
	UC Materialumformung in der Produktion	56
	UC Chemische Reaktivität	56
	5. Transport, Kommunikation, Energieversorgung	57
	Management Summary	57
	UC Verkehrsoptimierung	57
	UC Fahrplanoptimierung Bahn	57
	UC Logistik	58
	UC Stromerzeugung und -verteilung	58
	UC Verteilung von Datenpaketen in Netzwerken	59
	UC Lieferketten- und Logistik-Optimierung	59
	6. Finanz-, Versicherungs- und Immobilienwirtschaft	60
	Management Summary	60
	UC Portfoliooptimierung und Risikomanagement	60
	UC IT-Sicherheit – Blockchaintechnologien	61

UC Vorhersage von Finanzkrisen	62
UC Betrugserkennung	63
UC Preisbestimmung von Finanzderivaten	63
UC Arbitrage	64
UC Kreditbewertungsanpassung (CVA)	64
7. Medizinprodukte und pharmazeutische Industrie	65
Management Summary	65
UC Erforschung neuer Medikamente	65
UC Beschleunigung der chemisch-pharmazeutischen Entwicklung	66
UC verbesserte MRT-Diagnostik durch Kombination mit Quantensensorik	67
8. Öffentliche Verwaltung	68
Management Summary	68
UC Verkehrsfluss-Optimierung (öffentlicher Dienst)	68
UC Schutz sensibler Daten	69
UC Aufklärung durch Nachrichtendienste und Sicherheitsbehörden	69
UC Militärische Aufklärung mit Quantenradar	70
9. Zusammenfassung	71
Glossar	72

1	Zauberwürfel: © mart-production – pexels.com	10
2	Wandern: © pexels.com	13
3	Qanten: © Bartek – stock.adobe.de	18
4	Zahnräder: © mypokcik – stock.adobe.de	28
5	Reisen: © veerasak Piyawatanakul – pexels.com	43
6	Rechenzentrum: © christina-morillo – pexels.com	47

- [1] BMBF Quantentechnologien ↗ <https://www.quantentechnologien.de/>
- [2] Agenda Quantensysteme 2030. 2021 ↗ https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Agenda_Quantensysteme_2030_bf_C1.pdf
- [3] Roadmap Quantencomputing: Nationale Strategie für das Quantencomputing. 2021 ↗ <https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Roadmap-Quantencomputing-bf-C1.pdf>
- [4] Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt Rahmenprogramm der Bundesregierung. September 2018 ↗ <https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Rahmenprogramm-Bundesregierung-Quantentechnologie-2018-bf-C1.pdf>
- [5] Förderung von Quantentechnologien. Positionspapier der Deutschen Industrie. Januar 2017 ↗ <https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/F%C3%B6rderung-von-Quantentechnologien-2017-01-bf.pdf>
- [6] Konzeptpapier der Nationalen Initiative zur Förderung der Quantentechnologie von Grundlagen bis Anwendungen (QUTEGA) Quantentechnologie, Grundlagen und Anwendungen. Januar 2017 ↗ <https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Qutega-QT-Grundlagen-und-Anwendungen-01-2017-C1.pdf>
- [7] Erhebung des Lehrangebotes mit Bezug zu den Quantentechnologien an deutschen Hochschulen und hochschulnahen Forschungseinrichtungen Eine Kurzstudie erstellt von bayern photonics e.V. und Optence e.V. Dezember 2018 ↗ <https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Kurzstudie-Lehrangebot-Quantentechnologien-DE-2018-bf-C1.pdf>
- [8] Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Anna Christmann, Kai Gehring, Margit Stumpp, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/ DIE GRÜNEN. 11 Dezember 2020
↗ <https://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/19/252/1925208.pdf>
- [9] Kagermann, Henning, Süssenguth, Florian, Körner, Jorg, Liepold, Annka. Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS. 2020 ↗ <https://www.acatech.de/publikation/innovationspotenziale-der-quantentechnologien/>
- [10] Quantentechnologien. acatech HORIZONTE. 2020
↗ <https://www.acatech.de/publikation/acatech-horizonte-quantentechnologie/>
- [11] Overview on quantum initiatives worldwide. QURECA. July 2021
↗ <https://www.quireca.com/overview-on-quantum-initiatives-worldwide/>

- [12] Pfeiffer, Rüdiger, Lampert James, Hoefnagels, Julia »Die Zukunft des Quantum Computings. Zukunftsstudie des 2b AHEAD ThinkTank«. 2021 ↗ <https://www.zukunft.business/foresight/trendstudien/trendstudie/die-zukunft-des-quantum-computings/>

- [13] Entwicklungsstand Quantencomputer. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik. June 2020 ↗ https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Unternehmen-und-Organisationen/Informationen-und-Empfehlungen/Kryptografie/Quantencomputing/entwicklungsstand-quantencomputer_node.html

- [14] Damour, Thibault, Burniat, Mathieu. Das Geheimnis der Quantenwelt. Knesebeck; 6. Edition (16. Februar 2017)

Executive Summary

Quantentechnologien erfahren in den Unternehmen und in der Öffentlichkeit gegenwärtig sehr viel Aufmerksamkeit durch die Perspektiven, die sich aus ihrem Einsatz ergeben. Dabei lassen sich Quantentechnologien drei Bereichen zuordnen: Quantensensorik, Quantenkommunikation und Quantencomputing¹. Allgemein wird davon ausgegangen, dass durch Quantentechnologien disruptive Effekte im globalen Markt entstehen werden, was die Wettbewerbsfähigkeit und damit den Wohlstand von Firmen und Nationen beeinflussen wird. Zur Förderung dieser Technologien und deren Einsatzszenarien stellen die EU, die Bundesrepublik Deutschland und die Bundesländer Fördergelder zur Verfügung.

Der Leitfaden zeigt anhand exemplarischer Einsatz-Szenarien auf, dass Quantentechnologien für nahezu alle Industrien eine Relevanz haben werden. Auch wenn Quantencomputer in der zu lösenden Rechenproblemgröße heute noch beschränkt sind und bei

Dieser Leitfaden richtet sich an alle, die sich einen Überblick über den Stand der Entwicklung von Quantentechnologien verschaffen möchten, insbesondere an Entscheidende und Führungskräfte, welche Quantentechnologien für ihr Unternehmen, ihre Produkte, ihre Prozesse und ihre Services bewerten und über einen möglichen Einsatz entscheiden müssen.

Quantentechnologien weiterhin Grundlagenforschung erfolgt, so schreiten die Entwicklungen rasant voran. Daher stellt dieser Leitfaden auch einen Aufruf dar, sich bereits heute mit dem Thema auseinanderzusetzen.

Der Leitfaden setzt keine spezifischen Vorkenntnisse voraus, liefert aber entsprechendes Wissen über den Einsatz und Anwendungsbereiche von Quantentechnologien für Quantenrechnern, Kommunikationsnetze und für Sensoren.

¹ Begriffdefinitionen und Beschreibungen der Fachbegriffe im Glossar am Ende dieses Dokumentes.

A Allgemeiner Teil

1. Warum sollte man sich jetzt mit Quantentechnologien auseinandersetzen?

Quantentechnologien sind der nächste bedeutsame technologische Schritt, vergleichbar mit der Einführung von Computern in der Industrie. Dementsprechend beschäftigen sich Unternehmen aus allen Industriebereichen mit der Thematik unter dem Aspekt, Probleme lösen zu können, die mit heutigen Rechensystemen und Anwendungen nicht oder nur eingeschränkt bearbeitet werden können. Dadurch sind Wettbewerbsvorteile und Innovationssprünge für das eigene Unternehmen möglich. Darüber hinaus haben Quantentechnologien Auswirkungen auf die Sicher-



heit von Authentisierungs- und Verschlüsselungsverfahren beim Zugriff auf bzw. bei Übertragung und Speicherung von Informationen.

Einige Beispiele:

- Quantentechnologien ermöglichen neue diagnostische Verfahren in der Medizin. Mit Simulationen können neue Medikamente schneller und kostengünstiger entwickelt werden.
- In der Halbleiterindustrie ermöglichen neue Sensoren und Abbildungsverfahren die Entwicklung von höher integrierten und komplexeren Chips.

- Banken und Versicherungen können mit komplexeren Simulationen sowohl finanzielle als auch umweltbedingte Risiken unter Erfüllung gesetzgeberischer Auflagen genauer berechnen.
- Logistische Herausforderungen für Unternehmen können mit einem größeren Detaillierungsgrad berechnet werden, was neben der Kosteneinsparung auch mit einer geringeren Umweltbelastung einher geht.
- Quantentechnologien ermöglichen eine sichere Authentifizierung, Datenübertragung und Verschlüsselung.
- Anstatt mit langwierigen Versuchsreihen in Laboratorien können zukünftig durch molekulare Modellierung neue Materialien und Grundstoffe noch genauer berechnet werden, die z. B. für effizientere Lithiumbatterien, Tragflächen von Flugzeugen oder Windkraftanlagen Verwendung finden.

Es gibt keinen Industriebereich, der nicht von Quantentechnologien oder -computing profitieren könnte. Relevant ist dabei der ganzheitliche Blick darauf, welchen Einfluss Quantentechnologien haben werden. Wenn beispielsweise im produzierenden Gewerbe die Berechnung der optimalen Verteilung von Fertigungsaufgaben künftig in Echtzeit erfolgen kann, so müssen wesentliche Kernprozesse der Produktion neu aufgesetzt werden, um dies in einen Wettbewerbsvorteil umzuwandeln und gleichzeitig die sich dadurch ergebenden Risiken zu minimieren. Firmen, die sich heute bereits mit dem Thema Quantentechnologien auseinandersetzen, werden die Entwicklung im Einsatz der neuen Technologien mitbestimmen und daher mit der Verfügbarkeit der entsprechenden Quantentechnologie auch einen Wettbewerbsvorteil generieren.

Chancen und Risiken

Der Hype um das Thema Quantentechnologien wird befeuert durch hohe Fördersummen aus der öffentlichen Hand auf Landes-, Bundes, und Europaebene und durch Forschungsanstrengungen bekannter IT-Konzerne und Forschungsinstitute. Dementsprechend gibt es auch einen »Kampf um Talente« zwischen Firmen, welche sich mit der Bedeutung der Technologien für ihre Produkte und Lösungen auseinandersetzen, von akademischen und Großforschungseinrichtungen, welche sich um die Fördermittel für die Grundlagenforschung und die Entwicklung erster industrieller Prototypen bewerben, den Herstellern und Anbietern dieser Technologien aber auch der öffentlichen Hand, welche nicht wie beim Thema Künstliche Intelligenz den Zug verpassen möchte. Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftler haben im Rahmen ihres Studiums Berührungspunkte zu Quantenmechanik und daher entsprechende Grundlagen. Spezialisierte Studiengänge, die das Thema ganzheitlich betrachten, gibt es noch nicht. Bei der Entwicklung von Quantencomputern, Quantennetzwerken und Quantensensorik ist man jedoch auf dieses Wissen angewiesen. Dies gilt sowohl für die Entwicklung von Hardwarekomponenten inklusive der Realisierung der erforderlichen Ansteuerung und Verarbeitung als auch für die Entwicklung von Software, einschließlich dem Entwurf von Algorithmen für konkrete Anwendungen und Problemlösungen. Insbe-

sondere werden hochqualifizierte Fachkräfte mit Kenntnissen in beiden Welten, in der jeweiligen Branche und der Quantenphysik gebraucht, um Quantentechnologien effizient in bestehende Systeme integrieren zu können oder neue Anwendungsfälle zu schaffen bzw. zu unterstützen.

Viele Quantentechnologien stehen derzeit erst am Anfang ihrer Entwicklung. So sind die heutigen Quantenrechner nicht leistungsfähig genug, um reale Fragestellungen zu bearbeiten. Daher werden hybride Ansätze entwickelt, um Quantenrechner baldmöglichst produktiv zur Problemlösung in verschiedenen industriellen Anwendungen einzusetzen – beispielsweise in der Materialforschung und für die Logistik – mittels quantenphysikalischen Simulations- oder Optimierungsverfahren bzw. mittels maschinellen Lernens oder Künstlicher Intelligenz.

Eine weitere wichtige Fragestellung ist die Sicherheit der Verschlüsselung von Daten und Kommunikation in IT-Systemen, die durch Quantencomputer potenziell gefährdet wird. Obwohl die heutigen Quantenrechner in den nächsten Jahren noch zu schwach und ungenau sind, um Verschlüsselungen effizient zu knacken, gibt es heute schon Empfehlungen für eine quantensichere Verschlüsselung. Diese sollten Unternehmen einführen, um ihre Daten auch langfristig zu schützen, sich gegen rückwirkende Entschlüsselungen zu schützen und die teils langen Zeiträume zur erfolgreichen Umstellung zu berücksichtigen.

Der effiziente Einsatz von Quantentechnologien erfordert in den meisten Fällen eine Umstellung oder Anpassung der bisherigen Praktiken in Planung, Produktion, Verteilung und Auswertung. Derartige Veränderungen brauchen entsprechenden Vorlauf und insbesondere eine klare Vision.

Analystinnen und Analysten sagen ein sehr großes Marktpotenzial für die Nutzung von Quantentechnologien voraus.² Das erfordert eine proaktive Auseinandersetzung mit den neuen Möglichkeiten, die sich aus Quantentechnologien ergeben und die Analyse, was deren Einsatz für die heutigen und zukünftigen Produkte und Lösungen sowie die Stellung des Unternehmens im globalen Wettbewerb bedeuten, um entsprechende strategische Entscheidungen und Pläne heute schon entwickeln zu können.



2. Wo stehen wir heute?

Die Untersuchung von Quanteneffekten war lange Zeit eine Domäne der Grundlagenforschung. Selbst wenn es einige Anwendungen in den Produktions- und Consumerbereich geschafft haben, wie beispielsweise der Laser, wurden diese in der Öffentlichkeit nicht primär mit Quantentechnologie in Verbindung gebracht. Nur wenige Unternehmen haben eigene Forschung und Entwicklung betrieben. In den letzten Jahren gab es jedoch einen Umschwung. Der Nutzen von quantenmechanischen Verfahren und Produkten wurde auch außerhalb der Forschung wahrgenommen. Dies zeigt sich unter anderem an der Beteiligung von Unternehmen an Veranstaltungen zu Quantentechnologien, z. B. am Bitkom Quantum Summit, aber auch an der zunehmenden Zahl an Veröffentlichungen für das breite Publikum in den Medien wie Presse, Fernsehen und Internet.

Das umfassende Verständnis der quantenmechanischen Effekte, die technologische Entwicklung für deren Einsatz und der Bedarf an neuen Methoden zum Lösen schwieriger Fragestellungen führt dazu, dass Quantentechnologien Einzug in Produktion und industrielle Anwendungen nehmen. So hat sich die Entwicklung der Quantentechnologien in den letzten Jahren stark beschleunigt. Im Bereich Quantencomputer wurden in den letzten Jahren enorme Fortschritte gemacht. So wurde die Zahl der Qubits, das Analogon zu den Bits eines klassischen Computers, für einen gatterbasierenden Quantencomputer von 2 Qubits im Jahr 1998 auf etwa 50 Qubits im Jahr 2019 erhöht.³

3 ↗ Anzahl der in Quantencomputern erreichten Qubits nach Unternehmen/Organisation von 1998 bis 2021 und Prognose bis 2023. Statista. November 2021

Die Roadmap von IBM für Quantencomputing geht davon aus, dass sich die Zahl der realisierbaren Qubits in den nächsten Jahren jeweils mindestens verdoppeln wird und bis 2023 über 1000 Qubits zur Verfügung stehen werden.⁴ Neben IBM haben hauptsächlich die großen amerikanischen Technologiekonzerne eine Roadmap veröffentlicht. Google zum Beispiel hat angekündigt, bis 2029 einen kommerziell nutzbaren Quantencomputer zu bauen. Dieser soll laut Planung 1 Million Qubits haben. Zurzeit verfügt der Quantencomputer von Google über etwa 100 Qubits.⁵ Andere Unternehmen wie IonQ, Hersteller von Quantencomputern unter Einsatz von Ionenfallen, sagen bis 2028 einen Quantencomputer mit 1024 Qubits voraus.⁶ Bei Quantencomputern mit Ionenfallen sind die Fehlerraten weitaus niedriger als bei den supraleitenden Quantencomputern, weswegen man wohl weitaus weniger (physikalische) Qubits für kommerzielle Berechnungen braucht. Rigetti Computing plant bis 2026 mit 4000 Qubits (1000 in 2024)⁷, Honeywell plant ebenfalls einen kommerziellen Quantencomputer bis 2030⁸. D-Wave ist bekannt für adiabatische Quantencomputer (Quantum Annealer) mit 5000 Qubits. Ein Nachfolger mit 7000 Qubits und verbesserten Verbindungen untereinander ist angekündigt. Interessant ist, dass neben ihrem adiabatischen Quantencomputer auch ein Forschungsprogramm angekündigt ist, um einen gatterbasierenden Quantencomputer zu entwickeln.⁹ Wenn eine so hohe Zahl an Qubits vollumfänglich genutzt werden kann (man spricht dann auch von »logischen Qubits«), ist für reale Anwendungen die Überlegenheit von Quantencomputern, auch als Quantenüberlegenheit bezeichnet, erreicht.

Wir befinden uns zurzeit noch in der NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum Technologies) Ära. Das bedeutet, dass die derzeitigen Quantenrechner hohe Fehlerraten und kurze Kohärenzzeiten haben, was die Programmierung und anwendbare Algorithmen stark einschränkt. Trotzdem geht man davon aus, dass sich ein Vorteil von auf Quantencomputern basierenden Ansätzen in ausgewählten Einsatzszenarien in den nächsten Jahren zeigen wird. Sobald sich ein solcher Vorteil zeigt, werden Hersteller und Zulieferer für Quantencomputer-Systeme ihre F&E-Aktivitäten nochmals verstärken. Es ist wichtig, dass Firmen in Deutschland und Europa an dieser Entwicklung partizipieren.

Die Entwicklungen in den Quantentechnologien werden stark von Firmen und wissenschaftlichen Instituten in den USA und in China geprägt, die sich zurzeit auf Systeme konzentrieren, die das Potenzial für schnelle Skalierbarkeit auf große Quantenprozessoren bieten. So dominieren nordamerikanische Firmen wie Rigetti, IBM, D-Wave oder Google im Quantencomputing und stellen Quantenrechner mit den meisten Qubits her.

4 ↗ »IBM's roadmap for scaling quantum technology«, IBM Blog, 15 September 2020

5 ↗ Google Aims for Commercial-Grade Quantum Computer by 2029. The Wall Street Journal, 18 May 2021

6 ↗ Scaling IonQ's Quantum Computers: The Roadmap. IonQs Blog, 9 December 2020

7 ↗ Rigetti Computing goes public via SPAC merger. TechCrunch, 6 October 2021

8 ↗ Honeywell announces its H1 quantum computer with 10 qubits. TechCrunch, 29 October 2020

9 ↗ D-Wave Details Product Expansion and Cross-Platform Roadmap. HPC Wire, 5 October 2021

Diese sind wegen des aufwendigen Betriebs als zentrale Mainframe-Systeme entwickelt worden. Darüber hinaus werden Quantentechnologien mit 1,2 Milliarden Dollar von den USA gefördert.¹⁰ China hat Quantenkommunikation zu seiner Priorität gemacht und das MICIUS Programm gestartet¹¹, mit dem Ziel, eine Reihe von Boden-Satellit-Experimenten zur Quantenkommunikation durchzuführen. Zusammen mit landgestützten Netzen ist so bereits ein mehrere tausend Kilometer umfassendes Netzwerk für physikalisch sicheren Austausch geheimer Schlüssel entstanden. Weltweit investieren aber auch andere Regionen stark in Programme zur Förderung von Quantentechnologien.

Europa unternimmt erhebliche Anstrengungen, um an der Spitze der Quantentechnologieforschung mitzuhalten. So hat die Europäische Union das Quantentechnologie Flaggschiff¹² mit einem Budget von 1 Milliarde Euro ins Leben gerufen, um quantentechnologische Innovationen zu kommerzialisieren. Bei den nationalen Förderprogrammen in Europa führen die UK und Deutschland.

In Deutschland ist man sich des Potenzials der Quantentechnologien bewusst. Schon 2017 wurden Studien in Auftrag gegeben, die die Situation bewerteten und Handlungsempfehlungen herausgaben.¹³ Auch in der deutschen Industrie wurde die Bedeutung gesehen und in einem Positionspapier formuliert.¹⁴ Weitere Studien folgten, die immer wieder auf die Notwendigkeit der Beschäftigung mit den neuen Technologien hinwiesen.^{15,16} Zudem ist die Förderung von Quantentechnologien im Konjunkturpaket der Bundesregierung¹⁷ verankert. Im Koalitionsvertrag der neu gebildeten Regierung aus SPD, Bündnis 90/Die Grünen und FDP werden Quantentechnologien als Schlüsseltechnologien bezeichnet.¹⁸ Eine Übersicht des deutschen Quantenökosystems ist z. B. auf den Seiten des Bitkom zu Quantencomputing¹⁹ und des BMBFs allgemein zu Quantentechnologien²⁰ zu finden. Die Bewertung des Standes von Quantentechnologien aus deutscher Sicht ist im QUTEGA-Report¹² gegeben. Speziell für das Quantencomputing wurde die Roadmap des Expertenrats der Bundesregierung erstellt.²¹ Der QUTEGA-Report kommt dabei zu dem Schluss: »Im Gegensatz zu immer mehr europäischen und außereuropäischen Ländern gibt es in Deutschland eine noch unzureichende industrielle Umsetzung der Quantentechnologien«. Die Dringlichkeit dieser Umsetzung wird am Beispiel der Quantenkommunikation und des Quantencomputings erläutert.

10 ↗ US National Quantum Initiative Act

11 ↗ QUESS (Quantum Experiments at Space Scale) / Micius. eOPortal Directory

12 ↗ EU Quantum Technologies Flagship

13 ↗ Konzeptpapier der Nationalen Initiative zur Förderung der Quantentechnologie von Grundlagen bis Anwendungen (QUTEGA) Quantentechnologie, Grundlagen und Anwendungen. Januar 2017

14 ↗ Förderung von Quantentechnologien. Positionspapier der Deutschen Industrie. Januar 2017

15 ↗ Kagermann, H., Süßenguth, F., Körner, J., Liepold, A. Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS. 2020

16 ↗ Agenda Quantensysteme 2030. 2021

17 ↗ Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken. Ergebnis Koalitionsausschuss 3. Juni 2020

18 ↗ »Mehr Fortschritt Wagen«: Koalitionsvertrag 2021 - 2025 zwischen SPD, BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN und FDP

19 ↗ Übersicht über das Deutsche Quantenökosystem

20 ↗ BMBF Quantentechnologien: Branchenübersicht

21 ↗ Roadmap Quantencomputing: Nationale Strategie für das Quantencomputing. 2021

Zurzeit gibt es noch keine fehlertoleranten Quantencomputer, die derzeitige Verschlüsselungsverfahren entschlüsseln können. Sobald es aber so weit ist, müssen neue algorithmische oder quantenphysikalische Methoden gefunden worden sein, um Datensicherheit zu gewährleisten. Quantenkommunikation kann ein solches Verfahren sein. An algorithmischen Verfahren wird z. B. am NIST (National Institute of Standards and Technology) in den USA geforscht und es sind bereits mehrere Wettbewerbe für algorithmische Verfahren in der Post-Quanten-Ära ausgeschrieben worden.

In Bezug auf das Quantencomputing fehlt es im Vergleich zu den USA in Deutschland an großen Computerherstellern, die Quantenrechner als natürliches nächstes Geschäftsfeld sehen. Jedoch gibt es in Europa und insbesondere Deutschland verschiedene Ansätze, Quantenhardware jenseits des Mainframe-Ansatzes zu entwickeln. Für eine gemeinsame nationale Strategie wurde in Deutschland durch einen Expertenrat die Quanten-Roadmap aufgestellt²². Exzellenzcluster, Center of Competence und regionale Initiativen unter Einbindung von Startups fokussieren auf F&E in Quantentechnologien. So will die Münchener Initiative »Quantum Valley« in den nächsten Jahren einen eigenen Quantencomputer bauen.²³ Am Forschungszentrum Jülich soll im Rahmen der europäischen »Quantum Flagship«-Initiative ein Quantencomputer entstehen.²⁴ Die Firma Quantum Brilliance arbeitet an einem Ansatz basierend auf Fehlstellen in Diamanten. AQT (Alpine Quantum Technologies) in Österreich setzt auf die Entwicklung von Quantencomputern mit Ionenfallen. Dies sind vielversprechende Ansätze und Technologien, bei denen Europa die Führung übernehmen kann. Hinzu kommen weitere Ansätze, wie z. B. basierend auf topologischen Qubits²⁵ die jedoch noch ihren Weg aus den Forschungslaboren in die Entwicklung und Produktion finden müssen.

Für die technologische Souveränität ist Quantenkommunikation wichtig, da sie eine sichere Verbindung ermöglicht und damit physikalische und nicht nur algorithmische Sicherheit in der Kommunikation garantiert.

Neben der Entwicklung der Hardware werden immer mehr Anwendungen identifiziert, bei denen Quantencomputer eingesetzt werden können, um schneller Ergebnisse zu erhalten oder die durch Quantencomputer überhaupt erst möglich werden. Am Industriestandort Deutschland sind multinationale Firmen in der chemischen Industrie (wie BASF, Covestro) oder Automobilindustrie (wie VW, BMW) stark an der Anwendungsentwicklung interessiert.

22 ↗ BMBF Quantentechnologien: Branchenübersicht

23 ↗ Munich Quantum Valley

24 ↗ Europäischer Quantencomputer soll in Jülich entstehen. April 2021

25 ↗ T. Karzig und B. Bauer, Topologisches Quantenrechnen, Physik Journal, Dezember 2019, S. 34

Es wird davon ausgegangen, dass sich, sobald sich Vorteile der Quantentechnologien zeigen, ein enormer Bedarf an Spezialistinnen und Spezialisten auf dem Gebiet bilden wird. Da es sich bei den Quantentechnologien um relativ junge Technologien handelt, sind Expertinnen und Experten in den relevanten Industrien rar. Die QUTEGA-Studie empfiehlt daher: »Um die industrielle Anwendung zu befördern, sollen Quantentechnologien deshalb in Zukunft gestärkt in die universitäre Ausbildung von Ingenieuren Eingang finden.« Über neue Vertiefungsstudiengänge, Weiterbildungsmaßnahmen von bereits berufstätigen Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftlern oder sogar eigenständige Studiengänge kann der Bedarf an in Quantentechnologien ausgebildeten Fachkräften gedeckt werden. Die Entwicklung dieser Bildungsmöglichkeiten wird zurzeit vom BMBF (Bundesministerium für Bildung und Forschung) unterstützt.²⁶

Als Fazit bleibt, dass die Aktivitäten in Deutschland verstärkt werden müssen, um in der rasanten Entwicklung nicht abgehängt zu werden. Es besteht Handlungsbedarf, wenn Firmen in Deutschland die Zukunft mit Quantentechnologien und darauf basierenden Anwendungen weiterhin mitgestalten möchten.

26 ↗ Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung von Projekten zum Thema Quantum Futur Education – Netzwerk interdisziplinärer Aus- und Weiterbildungskonzepte in den Quantentechnologien. März 2021

3. Potenzial der Quantentechnologie

Quantenmechanische Effekte

Quantenobjekte und ihre speziellen Eigenschaften unterscheiden sich gravierend von dem, was in der gewohnten Umwelt zu beobachten ist. Eine charakteristische Eigenschaft von Quantenobjekten ist die Unbestimmtheit ihres Zustands, die als Überlagerung aller möglichen Zu-



stände beschrieben wird, welche jeweils mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit nachgewiesen werden können. Ein bekanntes Beispiel für die Übertragung dieser Idee auf unsere alltägliche Erfahrungswelt ist Schrödingers Katze, die gleichzeitig lebendig und tot ist.

Zustände von Quantenobjekten können miteinander verschränkt werden. Das heißt, die beteiligten Objekte sind bezüglich einer Eigenschaft so verbunden, dass nur der Gesamtzustand des gesamten Systems bestimmt ist, jedoch der Zustand des einzelnen Objektes unbestimmt bleibt. Diese Verschränkung besteht selbst dann noch, wenn die beteiligten Objekte räumlich weit getrennt werden. Ein Beispiel ist die Erzeugung eines Photonenpaares, das bei Bestrahlung eines

optisch nichtlinearen Kristalls mit Laserlicht entsteht. Die Polarisation der einzelnen Photonen ist unbestimmt, nur die Polarisation des Paares ist festgelegt. Wird jedoch die Polarisation eines Photons gemessen, steht sofort die Polarisation des zweiten Photons fest, selbst wenn es inzwischen weit entfernt ist.

Quantenobjekte können mit sich selbst Interferenz erzeugen. Dies ist möglich, solange die untersuchte Größe unbestimmt ist. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit, einen bestimmten Zustand vorzufinden, verstärkt oder verringert – analog zur Überlagerung klassischer Wellen. Ein Beispiel ist die Interferenz von Photonen am Doppelspalt. Der Ort des Auftreffens der einzelnen Photonen auf einem Schirm hinter dem Spalt ist nicht vorhersagbar. Wird der Prozess genügend oft wiederholt, ist auf dem Schirm ein Interferenzmuster sichtbar.

Ein wesentlicher Punkt der Quantenphysik ist, dass für diese Eigenschaften nur Wahrscheinlichkeitsaussagen getroffen werden können. Der Quantenzustand selbst bleibt so lange unbestimmt, bis eine Beobachtung oder Störung dieses Zustands stattfindet. In dem Fall nimmt das Objekt einen bestimmten Zustand ein und die gesamte Vielfalt aller möglichen Zustände geht verloren. Eigenschaften wie Überlagerung, Verschränkung und Interferenz sind äußerst fragil und nicht direkt zugänglich. Sie können trotzdem genutzt werden, da Quantenzustände erzeugt und gezielt verändert werden können. Die Beobachtung, also Einschränkung auf einen bestimmten Zustand, findet erst am Ende statt und liefert ein mögliches Ergebnis. Um die Wahrscheinlichkeit eines Ergebnisses zu bewerten, muss der Prozess genügend oft unter gleichen Bedingungen wiederholt werden. Dazu muss der Prozess stets erneut ablaufen, denn ein Quantenzustand kann zwar gezielt verändert oder auf ein anderes Quantenobjekt übertragen werden, ein Kopieren ist jedoch nicht möglich.

Die Quantenphysik liefert weiterhin Erklärungen für die Eigenschaften und das Verhalten elementarer Bausteine der Materie und Strahlung und ihrer Wechselwirkung. Für einzelne, wenige oder speziell gekoppelte Quantenobjekte können diese Eigenschaften beschrieben und gezielt genutzt werden. Dies ist ein Vorteil zu einem makroskopischen System, das aus einer Vielzahl von meist ungeordneten Objekten besteht und bei dem die Eigenschaften der einzelnen Objekte mit denen der anderen überlagert und somit nicht mehr direkt zugänglich sind. Das Verständnis auch komplexerer Systeme bleibt weiterhin Gegenstand der Forschung und Erkenntnisse daraus werden zu neuen Anwendungen führen.

Das grundlegende Verständnis der Quantenphysik, die Erkenntnis des Potenzials von Quanteneffekten und die Entwicklung zahlreicher Technologien, Quantenobjekte zu erzeugen und zu beeinflussen, führen derzeit zu einer rasanten Entwicklung der Quantentechnologien. Neue Technologien sind heutzutage mehr denn je gefragt. Herkömmliche Verfahren und Methoden erreichen ihre Grenzen, weitere Verbesserungen können nur mit neuen Ansätzen erreicht werden. Quantentechnologien sind dafür ideal geeignet.

Quantentechnologien

Präzisionstechnologie – Metrologie, Sensorik und Imaging

Idee und Potenzial

Die Eigenschaften von Quantensystemen ändern sich unter Einfluss äußerer, auch sehr schwacher Einwirkungen. Diese Änderung kann mit geeigneten Methoden nachgewiesen werden. Durch die Beschränkung auf einzelne Quantenobjekte können selbst winzige Änderungen sichtbar gemacht werden. Daher eignen sich diese Effekte für Präzisionstechnologien. Dazu gehört die Entwicklung von Quantensensoren, die Verbesserung bisheriger Messtechniken sowie die Entwicklung völlig neuer Verfahren. Diese Effekte finden weiterhin Nutzung in neuen Bildgebungsverfahren zur Analyse von Objekten als auch um hochpräzise Strukturen bereitzustellen. Darüber hinaus besteht das Potenzial zur Miniaturisierung der Geräte.

Die Vielzahl der bekannten quantenphysikalischen Effekte ermöglicht es, für spezielle Anpassung passende Prozesse auszuwählen. So können Effekte in optischen, elektrischen oder magnetischen Systemen aber auch in künstlichen Systemen genutzt werden.

Herausforderung

Für die Nutzung der Quanteneffekte für die Präzisionstechnologie muss der individuell angepasste und gegen Störungen gesicherte Aufbau für das Arbeiten mit dem fragilen Quantensystem aus dem Forschungslabor in ein Alltagsumfeld gebracht werden. Anders als im wissenschaftlichen Experiment zur Untersuchung des Quantenverhaltens steht für die Anwendenden die Nutzung im Vordergrund. Somit liegt der Fokus auf der Entwicklung bedienfreundlicher, robuster und möglichst universell einsetzbarer Geräte.

Entwicklungen, bisherige Praxisrelevanz, Auswirkungen

Laut Einschätzung ist das Technologiefeld Sensorik, Metrologie und Imaging das am weitesten entwickelte im Rahmen der Quantentechnologien.²⁷ Konkrete Anwendungen arbeiten meist mit nur einem Quanteneffekt, dessen Nutzung optimal auf eine spezifische Fragestellung angepasst werden kann. Die technologische Umsetzung kann dabei auch in vorhandene Geräte und Prozesse integriert werden. Eine schrittweise Erhöhung der Komplexität abhängig von den zugrunde liegenden Quanteneffekten bietet weiteres Potenzial. Erste Anwendungen sind kommerziell bereits verfügbar. Kleinere Unternehmen konzentrieren sich eher auf spezielle, auf Quanten basierende Anwendungen. Große Unternehmen integrieren die ihrem Portfolio entsprechende Quantentechnologie in ihre Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. In den nächsten Jahren ist mit weiteren Anwendungsfeldern zu rechnen.²⁸ Ein zukünftiger Schwerpunkt wird auf der kostengünstigeren Produktion dieser Geräte liegen, um einen vielfachen Einsatz zu ermöglichen.

27 ➤ Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A. Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS. 2020

28 ➤ Bekanntmachung der Richtlinie zur Förderung von Projekten zum Thema Quantum Futur Education – Netzwerk interdisziplinärer Aus- und Weiterbildungskonzepte in den Quantentechnologien. März 2021

Die Verwendung neuer, genauerer und effizienterer Verfahren als Basis von Geräten und Verfahren sowie zur Anwendung in Produktionsprozessen kann sowohl beim Hersteller als auch bei den Nutzerinnen und Nutzern in Industrie und Wirtschaft zu entscheidenden Wettbewerbsvorteilen führen. Das gesamte Potenzial wird in den kommenden Jahren sichtbar werden.

Anwendungsfelder:

- Mit Quantenmetrologie werden weitaus **präzisere Messverfahren** möglich. Neben den unmittelbaren Anwendungen werden Quanteneffekte genutzt, um die internationalen SI-Einheiten neu und unabhängig von Referenzobjekten zu definieren. Dadurch werden Eichverfahren vereinfacht, was unmittelbaren Nutzen für zahlreiche Produktionsabläufe bringt.
- Von immenser Bedeutung ist eine **präzise Zeitmessung**. Diese wird beispielsweise in der Navigation zur Standortbestimmung und bei der Synchronisation von Netzwerken und Rechenzentren zur schnelleren Datenübertragung eingesetzt. Zur Anwendung kommen Atomuhren mittels Quantum Logic Clock.²⁹ Neue Messverfahren können weiterhin in der Erdbeobachtung, bei der Bestimmung von Klimaindikatoren, bei der Exploration von Bodenschätzen aber auch bei der Materialprüfung im Produktionsprozess und der Qualitätsprüfung von Sensoren bzw. von Bauelementen für Quantenkommunikation eingesetzt werden.
- Mit **Quantensensoren** ist eine deutlich höhere Empfindlichkeit gegenüber dem Messsignal und somit eine höhere Genauigkeit möglich. Quantensensoren reagieren auf winzig kleine Veränderungen, z. B. des Magnetfeldes oder der lokalen Schwerkraft. Dies ist Voraussetzung für präzisere Messprozesse. Gelingt es weiterhin, den Effekt, an dem nur einzelne oder wenige winzige Quantenobjekte beteiligt sind und deren Verhalten nur durch das Messsignal beeinflusst wird, in ein robustes Umfeld einzubetten, ist es möglich, Geräte zu miniaturisieren oder neue, nicht-invasive Messmethoden zu entwickeln. Beispiele sind die Präzisionsmessung von Magnetfeldern in der medizinischen Diagnose von Herz, Gehirn, Muskeln sowie neuronalen Prozessen, Magnetometer zur Positionsbestimmung unterirdischer Objekte, Sensoren zur Messung elektromagnetischer Strahlung sowie Sensoren zur Prüfung bereits eingebauter Elemente, Messungen der lokalen Schwerkraft mittels Quantum Gravimeter³⁰ als Frühwarnsystem oder Materialuntersuchungen durch Rastersondenmikroskope.
- Mit **Quantenimaging** sind verbesserte sowie komplett neue Bildgebungsverfahren möglich. Hierzu werden die Quanteneigenschaften der Korrelationen und Verschränkung von Photonen genutzt, um mit geringeren Intensitäten bzw. in bislang unzugänglichen Wellenlängenbereichen zu arbeiten. Ein Beispiel ist das Ghost Imaging, bei dem die Untersuchung mit für die Probe ungefährlichem Licht, die Messung hingegen mit für die Sensoren optimalem Licht durchgeführt wird. Das ermöglicht zum einen die Untersuchung immer kleinerer Objekte, zum anderen die Untersuchung fragiler medizinischer und biologischer Strukturen. Auf der anderen Seite können mittels Quantenlithographie durch präzisere Abbildungen immer kleinere Strukturen hergestellt werden.

Technologische Voraussetzungen

29 ↗ AI+ Quantum Logic Optical clock. Institute for Experimental Quantum Metrology

30 ↗ Gravity sensing using matter wave interferometry

Im Zusammenhang mit der Entwicklung verschiedener Systeme wird die allgemeine Bereitstellung von Materialien, Komponenten sowie Mess- und Steuergeräten erforderlich. Mit Fokus auf optischen Effekten, die bei Zimmertemperatur genutzt werden können, sind dies beispielsweise Einzelphotonenquellen, optische Bauteile und Messgeräte sowie Laser.

Kommunikation – Netzwerke, Kryptographie, Quanteninformation

Idee und Potenzial

Sobald Quantensysteme nicht direkt miteinander wechselwirken können, ist eine Übertragung der Information von einem auf das andere System erforderlich. Durch geeignete Wechselwirkung ist es möglich, Quantenzustände von einem auf ein anderes Objekt zu übertragen. Damit können zum einen Quantennetzwerke zur Kommunikation zwischen verschiedenen Anwendungssystemen aufgebaut werden, zum anderen aber auch räumlich getrennte Quantensysteme miteinander verschränkt werden. Bei der Übertragung muss die Quanteneigenschaft erhalten bleiben und somit mit Quantenobjekten erfolgen. Besonders hierbei ist, dass Quantenzustände zwar übertragen, jedoch nicht kopiert werden können, was in der Fachliteratur als Non Cloning Theorem bezeichnet wird.

Allerdings beeinflusst jede Wechselwirkung mit der Umgebung den Quantenzustand und jede Störung im Übertragungsprozesses geht mit einem Verlust an Information einher. Dies ist gleichzeitig Einschränkung und Potenzial. Einerseits müssen für eine stabile und weitreichende Übertragung Wechselwirkungen minimiert werden. Andererseits finden diese Wechselwirkungen nicht unbemerkt statt und geben so Informationen über die Qualität oder eine Störung der Übertragung. Letzteres bildet die Grundlage für Quantenkryptographieverfahren, die eine abhörsichere Übertragung von Schlüsseln ermöglichen und in der heutigen digitalen Welt ein Kernthema sind.

Herausforderung

Um eine den Quantenzustand erhaltende Übertragung aufzubauen, muss die ungewollte Wechselwirkung mit dem Medium der Übertragung (z. B. in Glasfasern für Licht) oder der Umgebung (insbesondere durch deren Temperatur) begrenzt sein und schränkt damit die Reichweite ein. Um den Vorteil der Quantenkommunikation in größeren Netzwerken zu nutzen, müssen die Verluste in Information und Signalstärke ausgeglichen werden. Da Quantenzustände nicht kopiert werden können, ist ein klassisches Verstärken nicht möglich und erfordert neue Ansätze wie die Entwicklung von Quantenrepeatern.

Oft ist für die Übertragung ein anderer Quantenzustand besser geeignet als der im Eingangs- beziehungsweise Ausgangssystem genutzte. Daher muss zunächst die Information von einem auf ein anderes physikalisches System (z. B. Photon zu Phonon, Atomanregung oder Spinzustände zu Photon) bzw. einen anderen Bereich des Parameterraums (Mikrowellenphotonen zu optischen Photonen) übertragen werden. Die Kopplung muss kontrolliert, den Quantenzustand erhaltend und effizient geschehen.

Hierzu werden spezielle Effekte genutzt, oft sind es Prozesse höherer Ordnung mit geringer Kopplung. Durch die Beteiligung von weiteren Quantenobjekten und die zusätzlich erforderliche Wechselwirkung wird der gesamte Übertragungsprozess komplexer und anfälliger für Verluste.

Für die Kommunikation im Rahmen der Quantenkryptographie in größeren Netzen wird die Nutzung der vorhandenen Infrastruktur angestrebt. Diese ist jedoch nicht für Übertragung von Quantenzuständen optimiert. Um den grundsätzlichen Vorteil der Abhörsicherheit zu nutzen, müssen die Unzulänglichkeiten bei der Übertragung ausgeglichen werden. Somit steht der Aufwand einer Quantenkommunikationsinfrastruktur neuen Verfahren der Post-Quantenkryptographie gegenüber.

Entwicklungen, bisherige Praxisrelevanz, Auswirkungen

In Experimenten im Laborumfeld wurde die Teleportation von Quantenzuständen gezeigt. Für die Übertragung von Photonen über weite Strecken liegt derzeit der Fokus auf der Nutzung von Wellenleitern und Photonen im optischen Wellenlängenbereich, da bei Raumtemperatur der Einfluss des Rauschens und die Abschwächung bei der Übertragung gering ist und der Quantenzustand nur minimal gestört wird. Pilotprojekte haben die Übertragung eines Quantenschlüssels über einige Kilometer auf der Erde sowie über deutlich längere Strecken via Satelliten demonstriert. Erste Anlagen sind bereits kommerziell verfügbar.

Für den Aufbau größerer Quantensysteme aus einzelnen Komponenten ist eine stabile Quantenkommunikation eine notwendige Voraussetzung. Damit kann das Potenzial, das lokale Systeme bieten, um ein Vielfaches erhöht werden. Größere Systeme können komplexere Probleme behandeln, die mit isolierten Verfahren nicht lösbar sind.

Ein zentrales Thema ist die Kryptographie. Sichere Verschlüsselungsverfahren sind unbedingte Voraussetzung, um Informationen vor Angriff oder Verlust zu schützen. Die Weiterentwicklung von Kryptographieverfahren ist im fortwährenden Wettlauf mit der Entwicklung von Entschlüsselungsverfahren, die auch durch den zukünftigen Einsatz von Quantencomputern sprunghaft effizienter möglich werden. Protokolle und Standards, die heute festgelegt werden, können über die Sicherheit von Daten in der Zukunft entscheiden.

Anwendungsfelder

- **Kopplung von Quantensystemen:** Die Verbindung von Quantensystemen bringt erhebliche Vorteile. Quantensensoren, zu einem Netzwerk verbunden, können großflächig eingesetzt werden. In Quantenprozessoren, in denen aufgrund des Designs keine direkte Wechselwirkung zwischen den Qubits stattfindet, muss der Quantenzustand von einer elementaren Einheit, dem Qubit, auf eine andere übertragen werden. Im nächsten Level können Quantenprozessoren räumlich getrennter Quantenrechner verbunden werden, um so die Rechenleistung zu erhöhen.
- **Quantenschlüsselübertragung:** Der Austausch sicherer Schlüssel erfordert die Übertragung über weite Strecken. Je nachdem, welche Verfahren genutzt werden, müssen entsprechende Protokolle und Standards definiert werden.
- **Teleportation von Quantenzuständen:** Denkbar ist die Übertragung von Quantenzuständen komplexer Systeme.

Technologische Voraussetzungen

- Bereitstellung von Elementen, die Objekte für Quanteninformation erzeugen und übertragen können (z. B. Einzel-Photon-Quellen, hochwertige Glasfasern, Elektronik, Gerätekomponenten).

Quantencomputer-Berechnungen und -Simulationen

Idee und Potenzial: In herkömmlichen Computern findet die eigentliche Informationsverarbeitung auf dem elementaren Level der Bits statt, deren Zustand nur Null ODER Eins sein kann und der gezielt entsprechend der gewünschten Prozedur verändert wird. In Quantencomputern macht man sich Eigenschaften von Quantenobjekten und ihre spezielle Wechselwirkung zunutze. Die informationstragenden Einheiten, die Qubits, können in einen Zustand der Überlagerung von Null UND Eins gebracht werden. Qubits können miteinander verschränkt werden und in ihrer Wechselwirkung kann Interferenz auftreten. Unter Ausnutzung dieser Eigenschaften wird eine komplexere Verknüpfung der Qubits erreicht. Die Informationsverarbeitung erfolgt durch die gezielte Veränderung der Zustände der Qubits. Das volle Potenzial wird jedoch erst ausgeschöpft, wenn für diese Art der Kodierung der Qubits und deren Wechselwirkung passende Algorithmen entwickelt werden, die die speziellen Eigenschaften quantenphysikalischer Systeme nutzen. Dann können Quantencomputer für bestimmte Probleme heutige High Performance Computer bei weitem übertreffen sowie die Bearbeitung komplexer Fragestellungen überhaupt erst ermöglichen.

Grundsätzlich sind verschiedene physikalische Systeme geeignet, um Qubits und damit Quantenrechner zu realisieren. Von Forschung und Industrie werden verschiedene Technologien untersucht, die unterschiedliche Quantensysteme nutzen und die sich in Stärken und Schwächen unterscheiden. Denkbar ist daher die Optimierung bestimmter Systeme für konkrete Anwendungen.

Herausforderung: Quantencomputer sind sehr komplexe Systeme, die zunächst einen enormen Aufwand in der Entwicklung von Technologien und Verfahren erfordern. Das gilt sowohl für die Bereitstellung und den Betrieb der Hardware, die Verarbeitung der Information über Software, effiziente Algorithmen für Anwendungen sowie die Einbindung in die bestehende IT-Landschaft.

Um komplexe Berechnungen durchzuführen, müssen genügend große Systeme (im Sinne von Anzahl der für die Berechnung nutzbaren Qubits) mit entsprechender Güte verfügbar sein. Das bedeutet, der Quantenzustand der Qubits muss gezielt präpariert werden, lange genug erhalten bleiben, die Änderung des Zustands sowie die Wechselwirkung mit anderen Qubits muss kontrolliert erfolgen und am Ende des Prozesses messbar sein.

Die fragilen Quantenzustände stellen besondere Anforderungen: Neben der speziellen Hardware müssen die Ansteuerung der Qubits sowie die Software zur Steuerung der Informationsverarbeitung entwickelt werden. Um den Informationsverlust durch ungewollte Wechselwirkung mit der Umgebung zu minimieren, sind Methoden zur Fehlerkorrektur erforderlich.

Der Vorteil von Quantencomputern basiert auf der Nutzung quantenphysikalischer Eigenschaften. Um deren Potenzial zu nutzen, müssen die zu lösenden Probleme auf entsprechende, meist komplett neue Algorithmen übertragen werden. Auch hierfür sind komplett neue Ansätze erforderlich.

Entwicklungen, bisherige Praxisrelevanz, Auswirkungen: Das Gebiet der Quantenrechner befindet sich noch in einem frühen Stadium. Erste Systeme sind jedoch schon für die kommerzielle Nutzung verfügbar. Sie werden als NISQ bezeichnet und dienen dazu, die prinzipielle Umsetzbarkeit der Erkenntnisse zu überprüfen. Ziel ist es, schnellstmöglich wirtschaftlich relevante Anwendungen zu entwickeln. Derzeit werden Systeme mit unterschiedlichen Quantensystemen als Basis sowie die daraus resultierenden Vor- und Nachteile untersucht.

Dem Quantencomputer wird das Potenzial zur grundlegenden Änderung bestimmter Geschäftszweige zugeschrieben, in denen die Lösung komplexer Probleme eine zentrale Rolle spielt. Ein deutlicher Wettbewerbsvorteil wird sich für Nutzende mit bislang schwer lösbaren mathematischen Problemen ergeben. Dementsprechend gibt es weltweit zahlreiche Aktivitäten und Förderprogramme, um hier die Entwicklungsrichtung zu beeinflussen.

Die ersten speziell entwickelten Algorithmen haben das grundsätzliche Potenzial von Quantencomputern gezeigt, erfordern jedoch weitaus leistungstärkere Systeme. Inzwischen ist man auf das Identifizieren von in naher Zukunft realisierbaren Use Cases in den verschiedenen Industrien und Branchen übergegangen und führt erste Machbarkeitstests mit nur wenigen Parametern durch. Ziel ist es, baldmöglichst die Überle-

genheit von Quantencomputern zu zeigen und für reale Probleme zu nutzen. Die Weichen für zukünftige Anwendungen werden jedoch schon jetzt gestellt. Um die breite Anwendung von Quantenberechnungen zu ermöglichen, werden universelle Basismodule entwickelt. Hierfür gibt es schon eine Reihe von Algorithmen, die für sich allein oder als Teil komplexerer Module eingesetzt werden können. In Simulationen kleiner Prozesse werden diese Algorithmen bereits getestet.

Parallel zur Hardware wird an Plattformen zur Integration in die bestehende IT gearbeitet. Da der Betrieb von Quantencomputern noch aufwendig ist, liegt der Fokus darauf, die Systeme an wenigen Orten zu betreiben und über Cloud-Anwendungen zugänglich zu machen. Hier wird durch Verwendung bestehender Softwaresysteme eine nahtlose Einbindung angestrebt, so dass Quantencomputer einfach in bestehende Datenverarbeitungsumgebungen eingebunden werden können.

Neben der direkten Anwendung von Quantencomputern spielen die technologischen Voraussetzungen eine bedeutende Rolle. Die hohen Anforderungen an die Funktion und Verfügbarkeit von Komponenten treiben die Entwicklung auch in diesen Bereichen enorm an.

Anwendungsfelder

- **Simulation von Quantensystemen:** Quantencomputer können zur Simulation von Quantensystemen genutzt werden. Dazu wird die Beschreibung des zu untersuchenden Systems, das heißt Zustand und Wechselwirkung, auf den im Quantencomputer genutzten Formalismus übertragen, um dort ausgeführt zu werden. Damit sollen in Zukunft Simulationen von Systemen aus der Chemie, der Materialwissenschaft oder der Teilchenphysik möglich sein. Zudem kann der quantenphysikalische Formalismus auch auf andere Fragestellungen übertragen werden, womit weitere Anwendungsfelder erschlossen werden können.
- **Optimierungsverfahren:** Bei Optimierungsverfahren wird nach einer bestimmten Kombination der Parameter in meist nicht exakt beschreibbaren Datenmengen gesucht, z. B. ein Minimalwert. Diese Suche ist sehr aufwendig und führt nicht zwingend zum besten Ergebnis. Quantenalgorithmen haben das Potenzial, die Suche zu beschleunigen. Verfahren mit Unterstützung durch Quantenalgorithmen werden z. B. in der Finanzindustrie zur Portfoliooptimierung betrachtet.

- **Szenario-Simulationen:** Ein sehr gut untersuchtes Anwendungsgebiet sind die Szenario-Simulationen, im speziellen nichtlineare Optimierungen, die heute meist klassisch mit Monte-Carlo(MC)-Simulationen angegangen werden. In der Finanzindustrie gehören dazu beispielsweise die Risikoanalyse, insbesondere die Kreditrisikoanalyse mit Ermittlung von Risikoindizes wie VaR (Value at Risk) oder CVaR (Conditional Value at Risk)^{31, 32}, sowie die Preisgestaltung von Optionen³³ und Derivaten³⁴. In ersten Studien hat sich die Sensitivitätsanalyse auch in Zukunft als lukratives Anwendungsfeld für die Quantensimulation erwiesen.^{35, 36}
- **Künstliche Intelligenz und maschinelles Lernen:** Bestimmte Prozesse im Ablauf des maschinellen Lernens könnten in Zukunft mit Quantencomputern ausgeführt werden. Erste vielversprechende Beispiele sind im Bereich des Supervised Learnings zu finden, wo variationale Quantenalgorithmen mit der Support-Vektor-Machine-Methode benutzt werden, um eine Datenseparierung mit sehr viel höherer Genauigkeit durchzuführen, wie es mit klassischen Methoden möglich wäre.³⁷ Auch die Veröffentlichung von illustrativen Beispielen mit Quanten-Boltzmann-Maschinen³⁸ oder von qGANs (quantum Generative Adversarial Networks)³⁹ sind erste gute Erfolge, die die zukünftigen Potenziale von Quantencomputern im Kontext von KI/ML sichtbar machen. Beispiele naheliegender Anwendungsbereiche wären z. B. im Finanzsektor neben der Betrugserkennung auch Anti-Geldwäsche-Analyse sowie Credit-Scoring-Verfahren.⁴⁰

Technologische Voraussetzungen: Quantencomputing ist die komplexeste aller Anwendungen und erfordert das Zusammenspiel verschiedenster Technologiesegmente sowohl innerhalb einer Basistechnologie als auch übergreifend (physikalische Realisierungen, technologische Umsetzung, Kodieren und Auslesen, Weiterleiten und Verarbeiten der Information, Integration in bestehende IT-Landschaft, Übertragung der Problemstellung auf Algorithmen und Verarbeitungssysteme. Da Quantencomputing noch in einer frühen Phase ist, finden zahlreiche Entwicklungen statt. Mit der Etablierung von Quantencomputern ist daher auch die Produktion und Bereitstellung der Komponenten und der Infrastruktur von Bedeutung. Hierbei werden hybride Ansätze, d. h. die enge Vermaschung zwischen klassischen Computer-Architekturen und Quantencomputern, eine wesentliche Rolle spielen.

31 ↗ Quantum Risk Analysis. S. Woerner, D. J. Egger

32 ↗ Credit Risk Analysis using Quantum Computers. D. J. Egger, R. Gacía Gutiérrez, J. Cahué Mestre, S. Woerner

33 ↗ Option Pricing using Quantum Computers. N. Stamatopoulos, D. J. Egger, Y. Sun, Ch. Zoufal, R. Iten, N. Shen, S. Woerner

34 ↗ A Threshold for Quantum Advantage in Derivative Pricing. Sh. Chakrabarti, R. Krishnakumar, G. Mazzola, N. Stamatopoulos, S. Woerner, W. Zeng

35 ↗ A Quantum Algorithm for the Sensitivity Analysis of Business Risks. M. C. Braun, T. Decker, N. Hegemann, S. F. Kerstan, C. Schäfer

36 ↗ Towards Quantum Advantage in Financial Market Risk using Quantum Gradient Algorithms. N. Stamatopoulos, G. Mazzola, S. Woerner, W. J. Zeng

37 ↗ Supervised learning with quantum enhanced feature spaces. V. Havlicek, A. D. Córcoles, K. Temme, A. W. Harrow, A. Kandala, J. M. Chow, J. M. Gambetta

38 ↗ Variational Quantum Boltzmann Machines. Ch. Zoufal, A. Lucchi, S. Woerner

39 ↗ Quantum Generative Adversarial Networks for Learning and Loading Random Distributions. Ch. Zoufal, A. Lucchi, S. Woerner

40 ↗ Fraunhofer CCIT: Maschinelles Lernen auf Quantencomputern



4. Branchen und Industrien, die von Quantentechnologien profitieren können

Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischereiwirtschaft

Land- und Forstwirtschaft sowie die Fischerei sind in Deutschland wichtige Branchen – aus ganz unterschiedlichen ökologischen und ökonomischen Aspekten. Die Unternehmen dieser Branche beschäftigen sich mit Ackerbau und Viehzucht und der Aufrechterhaltung der Ökosysteme durch nachhaltiges Wirtschaften.

Ziel	Eine Steigerung der Erträge und eine effiziente Nutzung der Ressourcen kann durch fortgeschrittene Algorithmen bei der Bewirtschaftung von Flächen, beim Einsatz von Dünger und Futter und bei der Renaturierung von Flächen erzielt werden. Für eine zukunftsorientierte Bewirtschaftung, die ebenfalls einen wichtigen Beitrag für die Klimaentwicklung und die Artenvielfalt von Pflanzen und Tieren liefert, ist die Erkenntnisgewinnung durch eine bessere Ermittlung und Analyse der Boden-, Wetter- und Wachstumsdaten (Nutztiere und Nutzpflanzen) zwingend notwendig. Quantengestützte künstliche Intelligenz, Quantensensoren und quantenbasierende Simulationen (Quantenchemie, Quantenbiologie) unterstützen dies. Das wird zu mehr Daten aus existierenden Informationsquellen führen und gleichzeitig werden völlig neue Informationsquellen (z. B. Biosensoren) hinzukommen. Die Verbesserung der Algorithmen und eine Reduzierung der Näherungswerte (Beispielhaft: Annahmen, die getroffen werden müssen, um Berechnungen durch Rechner mit von-Neumann-Architektur für komplexe Berechnungen zu ermöglichen) werden eine tragende Rolle haben.
Voraussetzungen	Verständnis der Mechanismen unter dem Einfluss der vielfältigen Randbedingungen (Klima, Klimaveränderung) und Auswirkung von möglichen Aktivitäten (Handlungsoptionen finden), aber evtl. auch Beobachtung der Situation (rechtzeitiges Identifizieren möglicher Probleme).
Herausforderungen und Probleme	Komplexe Wechselwirkungen, biochemische Prozesse, größere Datenmengen, autonome Systeme
Potenzial der Quantentechnologie	Quantensimulationen in der Chemie und Biologie, Lernstrategien, quantengestützte künstliche Intelligenz, Quantensensoren
Nutzen der Quantentechnologie und mögliche Folgen ohne diese	Düngemittel, Optimierung der Aussaat, Bewässerung, Investitionen in den Fuhrpark, Wettereinfluss. Ein weiteres Beispiel wäre die Auswertung von Luftbildern von Wäldern und Forsten zur Erfassung von Umweltschäden, wobei diese Aufgabe durch Drohnen, digitale Bilder und Sensorik eine neue Qualität gewonnen hat. Auswertung von Wetterdaten für lokale Bewirtschaftungsentscheidungen zur Düngung, Schädlingsbekämpfung und Aussaat.
Anwendungsbeispiele	■ Düngemittelentwicklung

Montanindustrie

Montanindustrie steht als Sammelbegriff für diejenigen Wirtschaftszweige, die sich mit der Gewinnung, der Aufbereitung und der direkten Weiterverarbeitung von Bodenschätzen befassen. Dies beinhaltet insbesondere den Bergbau (z. B. den Kohlebergbau) und die rohstoffverarbeitende Schwerindustrie (wie die Eisen- und Stahlindustrie).

Ziel	Die Montanindustrie sucht nach IT-gestützten Lösungen für die Erkundung von Bodenschätzen durch größere und detaillierte Modelle. Es geht um die Abschätzung der künftigen Verfügbarkeit von Rohstoffen sowie um die Planung und effiziente Ausführung von Gewinnung, Verarbeitung und Transport. Verlässliche Lagerstättenexploration und Reservoiranalyse sind entscheidende Vorarbeiten für eine effiziente Rohstoffgewinnung.
Voraussetzungen	Effiziente Methoden zum Auffinden und zur Bewertung von Lagerstätten sind unabdingbar, um den weltweiten Bedarf nach Rohstoffen abdecken zu können. Optimierungen bei der Förderung, dem Transport und der oftmals energieintensiven Verarbeitung sind notwendig, um den weltweiten Bedarf zu decken und gleichzeitig gesteckte Klimaziele einzuhalten.
Herausforderungen und Probleme	Verschiedene geologische Modelle, unzugängliche Gebiete, Auswahl von spezialisierten, aber kostenintensiven Fördertechnologien, Einhalten von Klimazielen, globaler Wettbewerb
Potenzial der Quantentechnologie	Durch den Einsatz von Quantensensoren sind Vermessungen der Struktur des Untergrundes sowie der Lagerstätten möglich. Der Einsatz von Quantencomputern hilft bei der Optimierung von Arbeitsabläufen im Rahmen der Rohstoffförderung.
Nutzen der Quantentechnologie und mögliche Folgen ohne diese	Die Wahrscheinlichkeit für das Finden neuer Lagerstätten kann durch auf Quantencomputern basierende künstliche Intelligenz und Quantensensorik erhöht werden. Lieferwege lassen sich optimieren und die Ressourcenplanung (sowohl von Komponenten als auch von Arbeitskräften) noch effizienter gestalten.
Anwendungsbeispiele	■ Untergrundanalyse

Baugewerbe

Zum Baugewerbe gehören in erster Linie die Unternehmen des Hoch- und Tiefbaus, die Planungsunternehmen und die Bauträger aus der Privatwirtschaft und der öffentlichen Hand. Die typische Betriebsgröße beträgt in Deutschland etwa acht Personen mit typischer handwerklicher Ausrichtung. Sehr große Bauvorhaben werden oft von mehreren Unternehmen bedient. Damit diese künftig effizienter zusammenarbeiten, halten Computertechnologien Einzug in alle Phasen von der Planung bis zur Instandhaltung von Bauwerken.

Ziel	Wachsende Anforderungen wie eine effiziente Bauweise, stabile Konstruktionen, die Einhaltung von Umwelt- und Lärmschutzauflagen, die Verbesserung von Funktion und Eigenschaften eines Bauwerks, das Auffinden von Schwachstellen und die Planung, insbesondere Bauplatzplanung, erfordern den Einsatz neuer Materialien. Im Bereich der eingesetzten Messtechnik ermöglicht die Quantensensorik hochpräzise Messungen, wodurch eine bessere Beurteilung der Bauplätze sowie eine entfernte Messung unzugänglicher Bereiche wie etwa Strukturelementen ermöglicht wird. Unter Einsatz von exakten Simulationen können neue Bautechniken und Prozesse mit ihren komplexen Wechselwirkungen besser beschrieben und somit leichter korrekt umgesetzt werden, um effizientere Bauweisen zu erzielen.
Voraussetzungen	Entwicklung neuer Materialien und Bautechniken, präzise Simulation der Wechselwirkungen der Bauwerksteile untereinander und mit der Umwelt, verbesserte Messtechnik
Herausforderungen und Probleme	Komplexe Wechselwirkungen bei großen Bauwerken, unzugängliche Lokationen
Potenzial der Quantentechnologie	Simulation, Sensorik
Nutzen der Quantentechnologie und mögliche Folgen ohne diese	Die Entwicklung neuer Materialien, von denen auch das Baugewerbe profitiert, kann durch den Einsatz von Quantencomputern deutlich beschleunigt werden. Auch die Bauwerksimulationen, besonders mit komplexen Wechselwirkungen, führen zu genaueren Ergebnissen dank exakterer Simulationen, wie sie auf einem Quantencomputer möglich sind. Quantensensorik ermöglicht neuartige Sensoren, die auf Grund ihrer höheren Genauigkeit auch unzugängliche Bereiche vermessen können und insgesamt genauere Aussagen über z. B. die Beschaffenheit der Bauplätze ermöglichen
Anwendungsbeispiele	■ Materialprüfung in eingebauten Strukturen: Mit Hilfe von Quantensensoren können unzugängliche Strukturteile vermessen werden. ■ Betongießen im Winter: Durch exakte Simulationen der Wechselwirkungen können Prozesse in den Bauphasen besser beschrieben werden. ■ Neue Materialien mit spezifischen Eigenschaften: Materialsimulationen auf Quantencomputern beschleunigen die Entwicklung neuartiger Materialien.

Verarbeitendes Gewerbe

Im Verarbeitenden Gewerbe finden sich Unternehmen, die Rohstoffe, Halbzeuge, Werkstoffe und Komponenten zu neuen Produkten verarbeiten. In dieser Branche spielt die Nutzung neuer Ressourcen ebenso eine Rolle wie das Finden von Antworten auf neue Bedürfnisse für moderne, innovative Produkte. Ein Beispiel ist die Fertigung von hochfestem Gorilla-Glas für mobile Endgeräte. Das verarbeitende Gewerbe ist in Deutschland eine der wichtigsten Branchen mit zahlreichen Weltmarktführern, gerade auch im Bereich der KMU.

Ziel	Optimale, flexible und dynamisch anpassbare Prozesse in der Verarbeitung, in-time Verfügbarkeit benötigter Elemente, Ersetzen von Materialien.
Voraussetzungen	Optimierung, Materialdesign, Produktions- und Messtechnologie
Herausforderungen und Probleme	komplexe Optimierungen, Automatisierung, E-Mobilität, neue Materialien
Potenzial der Quantentechnologie	Quantensensorik, Quantenkommunikation, Quantencomputing
Nutzen der Quantentechnologie und mögliche Folgen ohne diese	Der Einsatz von Quantentechnologien ist hier über die gesamte Wertschöpfungskette denkbar. Angefangen bei der chemischen und materialwissenschaftlichen Forschung, über Optimierungsprobleme bei der Berechnung von physikalischen und chemischen Vorgängen in den produzierten Gütern bis hin zur Überwachung und Optimierung des Produktionsprozesses. Auch der Bereich Logistik ist ein Einsatzfeld für Quantentechnologie. Insbesondere bieten hybride Optimierungsalgorithmen das Potenzial, schon sehr bald relevant zu werden. Es werden schon diverse Ansätze evaluiert im Bereich der Produktionsprozesse (Job Shop Scheduling Problem, Binary-Paint-Shop-Problem, etc.). Ein anderes, zunehmend interessantes Feld – besonders im Hinblick auf die Herausforderung, die geplanten Klimaziele zu erreichen – ist die Batterieentwicklung. Quantentechnologien versprechen bessere und effektivere Batteriesysteme für die Mobilität von Morgen zu entwickeln. Der Ansatz ist hier, neue Batterien zu entwickeln, bei denen die Faktoren Energiedichte, Gewicht und chemische Zusammensetzung mit Hilfe von Quantenalgorithmen optimiert werden.

Anwendungsbeispiele

- Materialwissenschaft und Chemie: Materialien mit optimierten Eigenschaften (Festigkeit, Gewicht, etc.)
 - Batterieentwicklung – höhere Energiedichte
 - Produktdesign und Entwicklung: verbesserte Simulationen
 - Optimierung des Produktionsprozesses mit Hilfe von Optimierungsalgorithmen
 - Supply-Chain-Management: Optimierte Zuliefer- und Lieferketten
 - Optimierung der Material- und Auslieferungslager
 - Automobilbranche: Optimierung autonomer Fahrzeugflotten
 - Navigation autonomer Systeme
 - Prüfung mikro- und nanoelektrischer Bausteine
 - Prüfung von sensiblen Elementen
 - Prüfung von eingebauten bzw. verdeckten Bauteilen
 - zeitliche Synchronisation von Produktionsprozessen
 - Referenzsystem für Messprozesse
 - Austausch von sensiblen Daten zwischen Produktionsstätten
 - Zusammenschluss von Quantensensoren zu einem Netzwerk
 - Batterietechnik
 - Optimierung von Bewegungsabläufen von Robotern
 - Produktionssteuerung und Job Shop Scheduling
 - Design-Optimierung (z. B. Batterien, Chips, Fahrzeuge)
-

Transport, Kommunikation, Energieversorgung

Dieser Abschnitt umfasst die Erbringung von Personen- oder Güterbeförderungsleistungen im Linien- oder Nichtlinienverkehr auf der Schiene, auf der Straße, auf dem Wasser oder in der Luft sowie damit verbundene Tätigkeiten wie Terminal- und Park-einrichtungen, Frachtumschlag, Lagerung und ähnlichem. Zu diesem Abschnitt ge-hören auch die Vermietung von Transportmitteln, Fahr- oder Bedienpersonal sowie die Post und Paketdienste. Eingeschlossen sind auch die Herstellung und der Vertrieb von Informations- und Kulturprodukten, die Bereitstellung der Mittel zur Übertragung oder Verteilung dieser Produkte sowie die Daten- oder Nachrichtenübermittlung, die Tä-tigkeiten der Informationstechnologie und die Verarbeitung von Daten sowie andere Informationsdienstleistungen.

Ziel	Die Idealwelt einer Versorgung von Bürgerinnen und Bürgern und Industrie mit Waren, Nachrichten und Energie würde stets die richtige Menge am richtigen Ort zur richtigen Zeit liefern. Die Komplexität der dabei zu lösenden Optimierungsaufgaben steigt oft exponentiell mit der Problemgröße und kann mit klassischen Ansätzen meist nicht optimal gelöst werden. Eintretende externe Ereignisse (z. B. Ausfall eines Transportmittels) bedingen eine Neuberechnung der Optimierungsaufgabe in kürzester Zeit. Quantencomputer können bessere Lösungen schneller berechnen. Im Umfeld der Telekommunikation ist außerdem der sichere Transport von verschlüsselten oder unverschlüsselten Informationen eine wesentlichere Herausforderung. Auch hier werden Quantentechnologien Kommunikationen sicherer machen.
Voraussetzungen	datengetriebene Ökonomie, Optimierung, Kombination mit künstlicher Intelligenz (Vorhersagemodelle), sichere Kommunikation
Herausforderungen und Probleme	Verfügbarkeit der Daten, Auswirkungen externer Einflüsse, Kapazitätsschwankungen, komplexe Verteilungspfade, globale Kanäle, Man-in-the-Middle-Attacken
Potenzial der Quantentechnologie	Quantencomputing (Optimierung), quantengestütztes Machine-Learning (höhere Vorhersagequalität), Quantenkommunikation (sicherere Kommunikation)
Nutzen der Quantentechnologie und mögliche Folgen ohne diese	Durch die bessere Optimierung lassen sich bestehende Infrastrukturen effizienter nutzen. Gleichzeitig ergeben sich neue Möglichkeiten überall dort, wo Lösungen in Echtzeit berechnet werden müssen (Beispiel: Dial-a-Ride, d. h. welches Taxi bedient welche Kundinnen und Kunden). Durch Quantenkommunikation kann unmittelbar festgestellt werden, ob eine unbefugte Person Kommunikationsdaten abgreift.
Anwendungsbeispiele	■ Internetversorgung entlegener Gebiete mit Schwarm-satelliten ■ Nutzung des Lastverschiebungspotenzials in der Energieversorgung ■ Gate-Zuweisung an Flughäfen ■ Personaleinsatz-Planung ■ Optimierung der Telekommunikationsinfrastruktur ■ Störungserkennung in Netzen, Routenoptimierung ■ Verkehrsflussoptimierung ■ Fahrplanoptimierung im Bahnverkehr ■ Logistik: Zusammenstellung von Transporten, Flottenoptimierung ■ Stromerzeugung und -Verteilung

Groß- und Einzelhandel

Der Großhandel umfasst den Austausch von Waren und Gütern aller Art, wobei der Handelsgegenstand vom Großhandelsunternehmen nicht verarbeitet oder verändert wird. Typisch für den Großhandel ist die Distribution von Waren von den Herstellerunternehmen zum Einzelhandel sowie der Handel mit Großabnehmern. Die Waren unterliegen oft sehr spezifischen Anforderungen hinsichtlich Lagerung und Transport, wie z. B. einer Kühlkette. Der Einzelhandel umfasst den Verkauf von Waren und Gütern aller Art, wobei er sich überwiegend an die Endverbraucher richtet. Einrichtungen des Einzelhandels sind Kaufhäuser, Supermärkte, Fachgeschäfte, der Versandhandel und Online-Versandhandel.

Ziel	Die Steigerung der Effizienz und Wirtschaftlichkeit von Groß- und Einzelhandel hängt von mehreren Faktoren ab. Zwei wesentliche Einflusswerte dabei sind Bedarfsvorhersage und Optimierung der Lieferkette bis zur einzelnen Filiale oder zum Endverbraucher. Dabei wird die Bedarfsvorhersage mehr und mehr durch künstliche Intelligenz unterstützt. Bei der Optimierung der Lieferkette sind Einflussfaktoren wie die Art der Ware (Beispiel: gekühlt oder nicht gekühlt) oder erlaubte Lieferzeitfenster zu berücksichtigen.
Voraussetzungen	Optimierung von Lieferketten, Optimierung von Warenlagern, Bedarfsvorhersage
Herausforderungen und Probleme	Vorhersagegenauigkeit, Warenengpässe
Potenzial der Quantentechnologie	quantencomputergestützte künstliche Intelligenz (Vorhersage-Modelle), quantencomputergestützte Optimierung (Auslieferung an Filialen, Warenlageroptimierung)
Nutzen der Quantentechnologie und mögliche Folgen ohne diese	Mit Quantencomputern können auf künstlicher Intelligenz basierende Vorhersagemodelle schneller und mit größeren Datenmengen trainiert werden. Effizienzsteigerungen können sich durch bessere Lieferkettenoptimierung mit Quantencomputern ergeben, da es sich hier üblicherweise nicht um ein klassisches TS-Problem (Traveling Salesman, Problem des Handelsreisenden) handelt, sondern weitere Randbedingungen hinzukommen.
Anwendungsbeispiele	■ Planung der Warenbeschaffung ■ Planung der Warenverteilung ■ Vorhersage des Kaufverhaltens ■ Optimierung der Lieferkette ■ Lageroptimierung

Finanz-, Versicherungs- und Immobilienwirtschaft

Dieser Sektor umfasst Tätigkeiten im Bereich Finanzdienstleistungen, einschließlich Versicherungs-, Rückversicherungs- und Rentenfinanzierungstätigkeiten sowie Tätigkeiten zur Unterstützung von Finanzdienstleistungen. Außerdem mit eingeschlossen sind Tätigkeiten im Immobilienbereich, wie z. B. Verkauf oder Kauf von Immobilien.

Ziel	Kennzahlen sind Rentabilität, Liquidität (Zahlungsverpflichtungen jederzeit nachkommen zu können), Unabhängigkeit und Sicherheit. Dabei existieren Zielkonflikte und gesetzliche Vorgaben. So sind ertragreiche Investitionen oftmals mit höheren Risiken verbunden und Mindestrücklagen müssen eingehalten werden. Ziel ist es daher, unter gegebenen Randbedingungen eine möglichst hohe Rendite zu erzielen.
Voraussetzungen	Portfoliooptimierung unter Berücksichtigung gesetzlicher Randbedingungen, Kreditbewertungen, Optimierung bei Arbitragegeschäften, Betrugserkennung
Herausforderungen und Probleme	Größe des Portfolios, einzuhaltende Regularien, Finden von (globalen) Optima, Reaktionsgeschwindigkeit auf veränderte Marktbedingungen
Potenzial der Quantentechnologie	Quantencomputing für Portfolio-Optimierung und Kreditrisikobewertung, Index Fonds Tracking, Transaktions-/Sicherheitenverarbeitung, Preisbestimmung von Optionen/Derivaten, Sensitivitätsanalyse, künstliche Intelligenz zur Betrugserkennung, dynamischere Ansätze (Portfoliooptimierung täglich vs. wenige Male im Jahr).
Nutzen der Quantentechnologie und mögliche Folgen ohne diese	Bessere Lösungsqualität (Portfoliooptimierung, und Kreditrisikobewertung), höhere Profitabilität, höhere Erkennungsrate von Betrugsansätzen, neue Angebote in volatilen Märkten (z. B. Arbitragegeschäfte mit Kryptowährungen).
Anwendungsbeispiele	■ Portfoliooptimierung und Risikomanagement ■ Vorhersage von Finanzkrisen ■ Betrugserkennung ■ Preisbestimmung von Finanzderivaten und Arbitragen ■ Quantum Machine Learning ■ Beurteilung von Vermögenswerten ■ automatisierter Wertpapierhandel ■ Kreditbewertung

Dienstleistungen

Der Dienstleistungssektor, in der Volkswirtschaft auch als tertiärer Sektor bezeichnet, umfasst alle Unternehmen, die sich mit der Vermittlung und Durchführung von Geschäften aller Art – beispielsweise Beratung, Support, Bereitstellung von Leistungen, Reparaturen, usw. – befassen. In Deutschland sind rund 75 Prozent aller Beschäftigten im Dienstleistungssektor tätig und erwirtschaften zwei Drittel des Bruttoinlandproduktes. Da zum einen die Unterscheidung zum primären Sektor (Land- und Forstwirtschaft) und sekundären Sektor (Industrieproduktion) nicht ganz trennscharf ist (auch Industrieunternehmen bieten Dienstleistungen an, die allerdings nicht unabhängig, sondern produktbezogen sind) und zum anderen auf den Staat/öffentlichen Sektor (der dem tertiären Sektor zugeordnet wird) weiter unten dediziert eingegangen wird, ist im Folgenden der Einfluss von Quantentechnologien nur allgemein dargestellt.

Ziel	Nach einer gemäß der Zielsetzung für die Endkundinnen und -kunden transparenten Zielvereinbarung zu vorgegebenen oder individuell ausgehandelten Kosten ist das Ziel für den Dienstleistungsanbietenden die Vereinbarung effizient und qualitativ angemessen umzusetzen.
Voraussetzungen	Zuordnung unterschiedlicher Skills zu beauftragten Service-Angeboten, Planung von Einsätzen der Mitarbeitenden
Herausforderungen und Probleme	Optimale Zusammenstellung von Projektteams, bestmögliche Erstellung von Tages- oder Wochenplänen, kurzfristige Änderungen (z. B. Ausfall aufgrund von Krankheit)
Potenzial der Quantentechnologie	Quantentechnologie-Beratungsangebote, Optimierung der Einsatzplanung, spezielle Service-Angebote basierend auf Quantentechnologie
Nutzen der Quantentechnologie und mögliche Folgen ohne diese	Der Mehrwert durch den Einsatz von Quantentechnologie ist individuell zu prüfen. Während bei kleineren Dienstleistenden beispielsweise eine Einsatzplanung mit klassischen Ansätzen oftmals ausreichend ist, können sich bei größeren Dienstleistenden signifikante Vorteile ergeben, insbesondere wenn unterschiedliche Fähigkeiten auf Projekte verteilt werden müssen.
Anwendungsbeispiele	■ Quantum-as-a-Service (QaaS) ■ Wettervorhersage ■ Einsatzplanung ■ Arbeitsplanerstellung

Medizinprodukte und pharmazeutische Industrie

In der Medizin und in der pharmazeutischen Industrie befinden sich zum einen die Produzenten von Arzneimitteln, angefangen von Forschung und Entwicklung über die Herstellung bis hin zur Inverkehrbringung, als auch die Hersteller von medizinischen Produkten und Anbieter von medizinischen und pharmazeutischen Dienstleistungen. Dabei decken diese nicht nur den Krankenhausbereich ab, sondern umfassen auch Produkte und Services für Endkundinnen und -kunden.

Ziel	Reduzierung der Entwicklungs- und Erprobungszeit bei neuen Medikamenten, personalisierte Medizin zur bestmöglichen, individuellen Behandlung
Voraussetzungen	Einsatz computergestützter Simulationen der Moleküle, auf denen potenzielle Wirkstoffe beruhen
Herausforderungen und Probleme	Simulationen komplexer Moleküle sind mit heutigen IT-Systemen kaum effizient realisierbar
Potenzial der Quantentechnologie	Quantensimulation
Nutzen der Quantentechnologie und mögliche Folgen ohne diese	Mit Hilfe von Simulationen kann eine Vorauswahl getroffen werden, die sonst in aufwendigen Laborexperimenten erfolgen würde. Damit kann eine schnellere Entwicklung neuer Medikamente erreicht werden.
Anwendungsbeispiele	■ Krebsmedikamente ■ Psychopharmaka

Öffentliche Verwaltung

Die öffentliche Verwaltung erstreckt sich von den Bundesministerien bis hin zur kommunalen Verwaltung. Dabei deckt dieser Sektor alle Bereiche des öffentlichen Lebens ab – von Gesundheit, über Bildung und Forschung bis hin zur Sicherheit und Ordnung. Darunter fallen auch der Betrieb und die Überwachung kritischer Infrastrukturen durch Einrichtungen wie das BSI und die Bundesnetzagentur.

Ziel

Die Ziele der öffentlichen Verwaltung unterscheiden sich grundlegend von denen anderer Branchen. Nach dem Grundsatz der Gesetzmäßigkeit der Verwaltung darf sie nur aufgrund gesetzlicher Ermächtigung handeln. Art und Umfang des Handelns werden durch den Gesetzgeber bestimmt. Eigene Geschäftsmodelle, die sich am Markt bewähren müssen, spielen in der öffentlichen Verwaltung kaum eine Rolle.

Die öffentliche Verwaltung erfüllt vielfältige Aufgaben. Wichtig ist bei allen Aufgaben der sorgsame Umgang mit personenbezogenen Daten. Deren Schutz ist eine wesentliche Voraussetzung für das Vertrauen der Bürgerinnen und Bürger in den Staat und seine Verwaltung. Zudem fordert das Haushaltsrecht einen wirtschaftlichen Umgang mit öffentlichen Mitteln.

Aus diesem Grund wird auf allen Verwaltungsebenen sichere und effiziente Informationstechnik benötigt. Laut BMI hat eine »moderne Informationstechnik eine zentrale Bedeutung für das Funktionieren von Staat und öffentlicher Verwaltung. Die deutsche Bundesverwaltung ist zur Bewältigung ihrer Aufgaben auf eine leistungsfähige, sichere und stabile Informationstechnik angewiesen.⁴¹ Diese Aussage für die Bundesverwaltung lässt sich auf alle Ebenen der öffentlichen Verwaltung übertragen.

In Hauptkapitel B werden einige Beispiele aufgeführt, wie das Einbeziehen von Quantentechnologien als Teil der Informationstechnik die öffentliche Verwaltung bei ihren Aufgaben unterstützen kann. Hier sind eher staatliche Aufgaben geeignet als kommunale.

Mit dem Aufkommen von Quantentechnologien übernimmt der Staat als Teil der öffentlichen Verwaltung eine besonders wichtige Funktion. Neben der Förderung von Forschung und industrieller Verwertbarkeit nimmt er vor allem durch das Schaffen geeigneter Rahmenbedingungen Einfluss auf die Verbreitung von Quantentechnologien in Deutschland.

Wichtige Themen:

- IT-Sicherheit
- innere und äußere Sicherheit
- Regulierung und Kontrolle

Voraussetzungen

Bündelung von Kompetenzen, IT-Konsolidierung

Herausforderungen und Probleme

Vor den technischen Herausforderungen kommen die strukturellen:

- Föderalismus (Bund, Länder, Kommunen (Städte, Gemeinden, etc.) und juristische Personen des öffentlichen Rechts (z. B. Anstalten, Stiftungen etc.).
 - Ressortprinzip⁴² und kameralistische Planung und Buchhaltung
 - Kommunalverfassungsrecht: subsidiäre Allzuständigkeit
-

41 ↗ Bundesministerium des Inneren und für Heimat: Informationstechnik des Bundes

42 ↗ Wikipedia: Ressortprinzip

Potenzial der Quantentechnologie	Quantensimulation
Nutzen der Quantentechnologie und mögliche Folgen ohne diese	Nutzen: ■ wehrhafter Staat ■ Schutz der Daten von Bürgerinnen und Bürgern Risiken ohne Quantentechnologie: ■ Opfer von Angriffen (z. B. Spionage, Internet-Erpressung)
Anwendungsbeispiele	■ Verkehrsflussoptimierung ■ Schutz sensibler Daten ■ Aufklärung durch Sicherheitsbehörden ■ militärische Aufklärung ■ Regulierung und Überwachung ■ Verteidigung

Industrieübergreifende Szenarien

Globale Lieferketten führen zu Abhängigkeiten aller Teilnehmenden in einem Ökosystem. Die Havarie eines Schiffes im Suezkanal hatte Auswirkungen auf nahezu alle Branchen – weltweit. Aber nicht nur global, sondern auch lokal nehmen die gegenseitigen Verknüpfungen und Abhängigkeiten untereinander zu. Multimodale Mobilitätsszenarien, d. h. die Verwendung unterschiedlicher Verkehrsmittel, um von einem Ort zum anderen zu kommen, bedingen idealerweise eine enge Abstimmung zwischen allen beteiligten Fahrdienst anbietenden (öffentlicher Verkehr, Individualverkehr, private Anbietende) um alle Reisenden möglichst schnell und energiesparend zum jeweiligen Zielort zu bringen. Ökosysteme, bestehend aus Teilnehmenden unterschiedlicher Industrien, werden umfangreicher und in ihrer Komplexität größer. Damit steigen die Anforderungen an die Beherrschbarkeit und die Vorhersagequalität innerhalb dieser Ökosysteme.

Ziel	Branchenübergreifende Ökosysteme in der Wirtschaft bedingen enge Verknüpfungen der Services und Leistungen, die durch die jeweiligen Partner eingebracht werden. Voraussetzung dafür sind Datenplattformen und eine sichere Kommunikation. Die Qualität der Vorhersage der benötigten Leistungen muss möglichst nah an den tatsächlichen Bedarf kommen. Die angebotenen Leistungen müssen in Echtzeit gegen die gegenwärtigen und erwarteten zukünftigen Bedarfsanfragen optimiert werden, um alle Anfragen gemäß den Optimierungsvorgaben umzusetzen. Letztere können im genannten Beispiel der multimodalen Mobilitätsszenarien »geringste Gesamtwarezeit«, »geringster Energieverbrauch«, »minimaler Individualverkehr« oder ähnliche sein.
Voraussetzungen	Vertrauenswürdiges Zusammenarbeiten von Partnern in einem Ökosystem. Hohe Vorhersagegüte des zu erwarteten Bedarfes und der einzelnen Leistungen. Optimierung in Echtzeit, um Leistungen zeitnah geänderten Bedarfsanfragen anzupassen.
Herausforderungen und Probleme	sichere Kommunikation, Echtzeitorientierung der angebotenen Leistungen gegen qualitative Zielwerte, Bedarfsvorhersage Kommunalverfassungsrecht: subsidiäre Allzuständigkeit
Potenzial der Quantentechnologie	quantencomputinggestützte künstliche Intelligenz zur besseren Vorhersagequalität, Quantencomputing für Echtzeitorientierung innerhalb des Ökosystems, Quantenkommunikation zur sicheren Kommunikation zwischen Partnern.
Nutzen der Quantentechnologie und mögliche Folgen ohne diese	Verbesserte Vorhersagequalität durch Training der neuronalen Netze mit größeren Datenmengen, Optimierung der angebotenen Leistung in Echtzeit, bessere Lösungsgüte der Optimierung, abhörsichere Kommunikation
Anwendungsbeispiele	■ Smart City-Konzepte ■ Multimodale Verkehrskonzepte ■ Logistik

Disruptive Szenarien

Eine disruptive Innovation ist ein Prozess, der in einem unscheinbaren Nischenbereich einer Branche startet. Basierend auf einer neuen Technologie wie z. B. der Quantentechnologie oder eines neuartigen Geschäftsmodells werden durch ein kleines Unternehmen Services oder Produkte entwickelt. Diese sprechen anfangs nur einen kleinen Teil von Kundinnen und Kunden an, verdrängen aber langfristig etablierte, erfolgreiche Unternehmen vom Markt, verändern Berufsbilder oder erfordern zumindest umfangreiche arbeitsmarktpolitische Maßnahmen (Weiterbildung, Beschäftigungsprogramme, Umbildung) oder verändern Verhaltensmuster von Verbraucherinnen und Verbrauchern. Beispiele hierfür sind »von der Filmkamera zur Digitalkamera« oder »von der Schallplatte zu Streamingdiensten«. Die Theorie der disruptiven Innovation hat ihren Ursprung im Buch »The Innovator's Dilemma« von Clayton Christensen.

Ziel	Sowohl die Grundlagenforschungen im Umfeld der Quantentechnologien als auch darauf aufsetzende Produkte und Dienstleistungen können disruptive Innovationen generieren. Doch auch, wenn die Innovation nicht einen ganzen Markt verändert, so können sich neue Wachstumsfelder und Möglichkeiten ergeben.
Voraussetzungen	Offene Beantwortung von Fragen wie »Was bedeutet Quantentechnologie für mein heutiges Geschäft?« oder »Welche neuen Möglichkeiten ergeben sich daraus?«. Christoph Keese konstatiert in seinem Bestseller »Silicon Valley«: »Innovation entsteht durch den freien, ungehemmten Austausch von Menschen auf kleinstem Raum... Menschen werden kreativ, wenn sie beruflich so arbeiten dürfen, wie sie privat leben: eng verwoben, in freundschaftlichem Abstand, im ständigen Dialog, im freien Spiel der Ideen.«
Herausforderungen und Probleme	Hinterfragen des Status Quo, Offenheit für neue Ideen und deren Verifizierung im Rahmen von agilen Ansätzen.
Potenzial der Quantentechnologie	Alle Quantentechnologien und die darauf aufsetzenden Produkte und Services
Nutzen der Quantentechnologie und mögliche Folgen ohne diese	Wettbewerbsvorteile, neue Marktfelder
Anwendungsbeispiele	■ »Hier könnte ihr Anwendungsfall stehen« Innovationen sind so vielfältig wie die Leserschaft dieses Leitfadens. Die Autorinnen und Autoren hoffen Sie, liebe Leserinnen und Leser, zum Nachdenken angeregt zu haben – und wer weiß, vielleicht steht ja Ihre Idee in einer zukünftigen Version dieses Dokuments.

5. Einstieg und Kompetenzaufbau in Quantentechnologien

Quantentechnologien haben das Potenzial, tiefgreifende Veränderungen anzustoßen. Quantencomputer können bislang unlösbare oder zeit- und ressourcenaufwendige Probleme lösen. Quantenmetrologie und Sensoren ermöglichen bisher unmögliche, hochpräzise Messungen sowie



den Einsatz an bislang unzugänglichen Objekten. Mit Quantenkryptographie lassen sich sichere Verbindungen aufbauen. Unternehmen, die sich diese Technologien zunutze machen, können damit entscheidende Wettbewerbsvorteile erlangen. Nachdem Quantentechnologien die ersten Schritte in den Laboren einiger weniger Unternehmen in der Vorreiterrolle gemacht haben, gibt es derzeit einen regelrechten Hype, der die weitere Entwicklung enorm beschleunigt.

Quantentechnologie wird sich als neuer Wirtschaftsbereich etablieren. Um eine wirtschaftliche und technologische Abhängigkeit von einigen wenigen, führenden Marktteilnehmenden zu vermeiden, ist ein frühzeitiger und konsequenter Einstieg notwendig.

Auch wenn Quantentechnologien noch am Anfang der Entwicklung stehen, wird damit bereits jetzt die Notwendigkeit eines raschen Einstiegs deutlich.

Zum einen geht es um die Entwicklung und Bereitstellung der Technologie einschließlich der Komponenten und Herstellungsverfahren. Dies kann durch Eigenentwicklungen aber auch über Industriepartnerschaften geschehen. Zum anderen erfordert der spezifische Ansatz auf Basis der Quantenphysik die Entwicklung von neuen Methoden für die Anwendung. Hierbei müssen die spezifischen Probleme der Branchen so formuliert werden, sodass sie mit quantentechnologischen Methoden und Verfahren bearbeitet werden können. Wie in der klassischen IT-Welt ergibt sich der wesentliche Mehrwert erst in der optimalen Kombination mit Anwendungen, die die spezifischen Vorteile von Quantencomputern, -sensoren und -netzwerken nutzen.

Im Bereich des Quantencomputings fokussiert die Europäische Union die Entwicklung und den Bau eigener Quantencomputer. Damit soll die Unabhängigkeit von anderen Regionen in dieser Welt gewahrt werden und Europa als führender Technologiestandort erhalten bleiben. Dieses Ziel wird in Deutschland aufgegriffen und in eigenen Programmen fortgeführt. Sowohl auf EU-Ebene als auch in Deutschland gibt es diverse Unterstützungen in Form von kurz- und langfristigen regionalen und europäischen Förderprogrammen. Am Ende des Leitfadens ist eine Übersicht der wesentlichen, langfristigen Fördermaßnahmen und der wichtigsten Anlaufstellen gegeben. Aufgrund der besonders hohen Dynamik in diesem Bereich ist eine detaillierte und vollständige Auflistung nicht möglich.

Einstiegsbarrieren

Die Quantentechnologien stehen derzeit noch in der Anfangsphase, entwickeln sich jedoch rapide. Institutionen oder Unternehmen können diese grüne Wiese nutzen, um an der Erarbeitung von De-facto- und Industrie-Standards und Normen mitzuwirken. Nahezu täglich gibt es Veröffentlichungen zu wissenschaftlich-technischen Neuerungen, aber auch Darstellungen zu Marketingzwecken.

Während erfahrene IT-Expertinnen und -Experten neue IT-Trends schnell bewerten und für sich adaptieren können (z. B. Cloud, Blockchain, Container), besteht bei den Quantentechnologien insbesondere beim Quantencomputing eine psychologische Barriere. Quantenphysikalische Phänomene sind für unseren menschlichen Verstand, der durch die sinnliche Wahrnehmung makro-physikalischer Phänomene trainiert wurde, nicht intuitiv genug. Damit sind die den Quantentechnologien zugrunde liegenden physikalischen Prinzipien nur wenigen Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie Anwendungsentwickelnden verständlich. Das erschwert die realistische Bewertung der zahlreichen Veröffentlichungen.

In der Anfangsphase sind zum Teil sehr hohe Investitionen ohne gesicherte Rendite erforderlich. Obwohl zahlreiche Förderprogramme aufgelegt werden, ist der langfristige Schutz der Investitionen nicht garantiert. Kleinere oder mittlere Unternehmen mit heute erfolgreichen Geschäftsmodellen ohne Quantentechnologien werden sich eher abwartend verhalten.

Kompetenzen

Um diese Barrieren abzubauen, muss zu Beginn vor allem in den Aufbau von Verständnis und Wissen investiert werden. Der effiziente Einsatz von Quantentechnologien erfordert in der Anfangsphase Personal mit sehr speziellen Kenntnissen, die auf dem Arbeitsmarkt nur bedingt zu finden sind. Die erforderliche Anpassung des Bildungssystems wird nicht sofort geeignete Fachkräfte hervorbringen. Neben dem Verständnis der neuen Technologien, die durch die Nutzung quantenphysikalischer Effekte ermöglicht werden, ist es für Unternehmen wichtig, die eigenen Prozesse und Methoden zu hinterfragen: Welche Probleme lassen sich schwer lösen, sind aber kritisch für den Unternehmenserfolg? Lassen sich Prozesse und Methoden durch den Einsatz von Quantentechnologien effizienter darstellen? Für den Einstieg ist es weiterhin von Bedeutung, den Markt zu verstehen. Welche Standards muss es geben, um Komponenten sinnvoll integrieren zu können? Welche Firmen können diese Komponenten entwickeln und liefern?

Einstiegsszenarien und Brückentechnologien

Quantentechnologien haben ein disruptives Potenzial: Firmen, die dieses frühzeitig erkennen und sich damit befassen, können nicht nur in ihren Märkten wettbewerbsfähiger werden (beispielsweise durch einen anhand von Quantencomputing optimierten Einsatz von Ressourcen), sondern auch komplett neue Märkte erschließen oder erschaffen. Ein Warten, bis Quantentechnologien einen Mainstream-Status erreicht haben – das heißt eine komplett etablierte Technologie sind – bewirkt keine Wettbewerbsvorteile und wesentliche neue Märkte sind dann bereits besetzt. Darüber hinaus bedarf die Integration neuer Technologien in bestehende Prozesse oft eines signifikanten zeitlichen Vorlaufs. Als Beispiel sei hier Job-Shop-Scheduling (Zuweisung von Produktionsjobs zu unterschiedlichen Maschinen mit dem Ziel der kürzesten Gesamtproduktionszeit) genannt, bei dem diese Zuweisung mit Quantencomputern auch für große Szenarien in Echtzeit erfolgen könnte.

Daher sollten Firmen mindestens die folgenden drei Fragen für ihre Situation beantworten:

1. Welche Möglichkeiten ergeben sich aus der Quantentechnologie?
2. Welcher potenzielle Return on Invest ergibt sich aus den einzelnen Möglichkeiten?
3. Welche sonstigen Faktoren spielen eine Rolle bei der Einführung und Nutzung von Quantentechnologien?

Neben der Beratungskompetenz von Industrieunternehmen gibt es in einzelnen Bundesländern entsprechende Zentren. Ein Beispiel ist das QT.NMWP.NRW⁴³ Nordrhein-Westfalen, das einen Überblick über die in NRW vorhandene Expertise in der Quantentechnologie gibt sowie den Kontakt zu relevanten Akteurinnen und Akteuren und Einrichtungen anbietet. In Bayern bietet Bayern Innovativ⁴⁴ [Bayern] ähnliche Services an.

Für das Quantencomputing gibt es drei Einstiegspunkte:

- Quantencomputer mit einer dreistelligen Anzahl an Qubits, durch die Anwendungen bis zu einer bestimmten Problemgröße umgesetzt werden können
- Quantensimulatoren (z. B. ATOS Quantum Learning Machine⁴⁵), welche einen Quantencomputer bis zu einer bestimmten maximalen Anzahl an Qubits auf Standard-Hardware simulieren
- Quantenemulatoren (z. B. Fujitsu Digital Annealer⁴⁶), bei denen Quanteneffekte in spezieller Siliziumtechnologie emuliert werden.

Für Unternehmen gibt es verschiedene Wege, die Quantentechnologien zu erschließen. Zum einen ist es die aktive Beteiligung an der Entwicklung neuer Technologien. Zum anderen ist es der Einsatz der vorhandenen und zukünftig verfügbaren Quantensysteme und -anwendungen im Unternehmen. Selbst wenn Unternehmen keinen unmittelbaren Einstieg in die Quantentechnologie auf diesen beiden direkten Wegen sehen, ist es möglich, an der Bereitstellung notwendiger Komponenten mitzuwirken, weil die Quantentechnologien zum Teil völlig neue Ansätze erfordern und auch eine Reihe neuer Produkte benötigen.

43 ↗ Quantentechnologien in Nordrhein-Westfalen

44 ↗ Bayern Innovativ - Quantentechnologie

45 ↗ Quantum Learning Machine

46 ↗ Digital Annealer



6. Ausblick

Quantentechnologien können in vielen Bereichen der Wirtschaft tiefgründige Veränderungen bewirken. So können sich durch Quantencomputing signifikante Beschleunigungen der Rechenleistung in den drei Bereichen Simulation, Optimierung und beim Maschinellen Lernen ergeben. Erreichbar wird das durch effizienteres Lösen algebraischer Probleme und die Exploration parallelisierbarer Lösungsansätze.

Allerdings sind auf dem Weg dorthin einige Herausforderungen zu meistern. Die größten Herausforderungen sind das Konstruieren von Qubits mit hoher Stabilität und einfacher Bedienung sowie die Entwicklung der Algorithmen, die Probleme der realen Welt in Probleme großer Zustandsräume übersetzen. Es ist zu erwarten, dass unterschiedliche Technologien entwickelt werden, die sich für eine spezifische Aufgabe jeweils optimal eignen. Das könnten beispielsweise zentrale Systeme für komplexe Anwendung oder kleinere Hybrid-Systeme zur Optimierung lokaler Applikationen sein. Die Verknüpfung der Algorithmenentwicklung mit der Performance und den besonderen Eigenschaften realer Qubits ist evident. Die Entwicklung der Qubits bleibt ohne Algorithmen-Entwicklung ziellos. Deutschland hat einzigartiges Potenzial – es gibt vielseitige und langjährige Erfahrung in hochqualifizierter Forschung, Entwicklung und Produktion, insbesondere im Bereich der Quantentechnologien und der Algorithmik.

Eine Zukunft mit Quantentechnologien »Made in Germany« oder sogar »Invented and Made in Germany« ist erreichbar und sollte ein wesentliches Ziel der staatlichen Fördermaßnahmen sein.

Es gibt regionale Unterschiede in den Erfahrungen, Fähigkeiten und Kapazitäten zur Quantentechnologie. Die Herausforderung in Deutschland wird es sein, bundesweit zu denken und zu handeln. Erfolg bedarf einer koordinierten Vorgehensweise. Das heißt, die aktive Unterstützung der Produktion und Entwicklung durch die Bundesländer sowie der Verzicht auf taktische Blockaden durch andere Bundesländer oder Bundesministerien sind essenziell für den Erfolg der Quantentechnologie. Politisch bedarf es daher sehr klarer und deutlicher Signale aus Berlin und allen Bundesländern mit einem klaren Bekenntnis zur Unterstützung einer kritischen Quanten-Engineering- und -Manufacturing-Infrastruktur durch gezielte Förderung. Auch die unmittelbare Verbindung zwischen Investitionen und Arbeitsplätzen in der Wirtschaft ist offensichtlich.

Der Aktionsplan für die Industrie: Unternehmen müssen sich mit der Quantentechnologie sowie deren technologischen Voraussetzungen und erforderlichen Materialien auseinandersetzen. Neben der Entwicklung neuartiger Systembestandteile sind insbesondere die grundlegenden Qubit-Technologien bedeutsam. Bis auf wenige Ausnahmen kommen marktführende Software-Anwendungen gegenwärtig nicht aus Deutschland – Quantencomputing bietet auch hier neue Chancen. In vielen mittleren und größeren Unternehmen gibt es Mitarbeitende, die einen mathematischen bzw. physikalischen Hintergrund zum Thema Quantenmechanik haben. Diese Kolleginnen und Kollegen können die Keimzelle in der Auseinandersetzung mit Quantentechnologien sein, um erste Schritte zu gehen und die Chancen und Risiken für das Unternehmen einzuschätzen.

Der Aktionsplan für die Politik: Es müssen die wirtschaftlichen und sozialen Chancen erkannt und konsequent umgesetzt werden, um einen großen, robusten und zukunftssicheren Wirtschaftszweig einschließlich erforderlicher Lieferketten aufzubauen.

B Use Cases

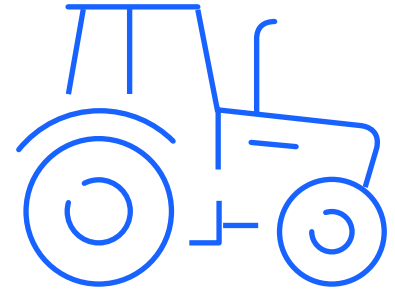
1. Einleitung

Die folgende Sammlung von Anwendungsbeispielen gibt einen Überblick über mögliche Einsatzszenarien von Quantentechnologien wieder und liefert eine kurze Einordnung der Bedeutung des Beispiels für die wichtigsten Branchen der deutschen Wirtschaft aus einer technischen oder volkswirtschaftlichen Perspektive. Die Sammlung stellt einen Auszug bekannter Use Cases dar. Die Sammlung soll dazu anregen, sich mit der möglichen Bedeutung der Beispiele auseinanderzusetzen und daraus Ideen für weitere Einsatzszenarien der Quantentechnologie zu finden.

2. Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Fischerei

Management Summary

Insbesondere quantenchemische Berechnungen liefern ein besseres Verständnis von chemischen Produkten und Prozessen, die in der Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei zum Einsatz kommen. Quantencomputer können in Zukunft die Qualität und damit Vorhersagekraft dieser Simulationen entscheidend verbessern.



UC Düngemittelentwicklung

Um den Ernährungsproblemen im Hinblick auf die wachsende Weltbevölkerung zu begegnen, ist eine Optimierung der Produktion von Düngemitteln von großem Interesse.

Düngemittelproduktion basiert seit jeher und bis in unsere Zeit auf einem Kernprozess, nämlich der Produktion von Ammoniak nach dem über hundert Jahre alten Haber-Bosch-Verfahren. Dieser chemische Produktionsprozess wandelt Wasserstoff und Stickstoff in Ammoniak um. Ein Problem ist der hohe Energieverbrauch in dem Produktionsprozess. Seit der Entdeckung des Prozesses wurden diverse optimierte Verfahren entwickelt, die das Problem des extremen Energiebedarfs aber nicht lösen konnten. Die Quantentechnologie bietet die Chance, durch die Simulation von alternativen Produktionsprozessen Energie einzusparen. Ein vielversprechender Ansatz hierbei ist es, Naturprozesse wie das Binden von Stickstoff durch Bakterien zu simulieren. Hierbei müssen hochkomplexe Molekülreaktionen simuliert werden, was mit Quantenalgorithmen beschleunigt werden kann.

Mit steigenden Energiepreisen und dem Streben nach einer Reduktion des CO₂-Ausstoßes bietet sich für die chemische Industrie hier ein Potenzial zur Entwicklung neuer Prozesse im Interesse ihrer Kundinnen und Kunden aus Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei.

Nutzen: Optimierung des Produktionsprozesses, dadurch hohe Einsparung von Energie

Opportunitätskosten: Es wird zu viel Energie für die Düngemittelproduktion verbraucht im Hinblick auf die Klimaziele.

Referenz: ↗ Markus Reiher, Nathan Wiebe, Krysta M. Svore, Dave Wecker, and Matthias Troyer. »Elucidating reaction mechanisms on quantum computers« PNAS Vol. 114 | No. 29 (July 18, 2017)

3. Montanindustrie

Management Summary

Die verlässliche Lagerstättenexploration ist für eine effiziente Rohstoffgewinnung wichtig. Durch den Einsatz von Quantensensoren sind Vermessungen der Struktur des Untergrundes sowie der Lagerstätten möglich. Der Einsatz von Quantencomputern hilft bei der Optimierung von Arbeitsabläufen bei der Rohstoffförderung und -verarbeitung.

UC Untergrundanalyse

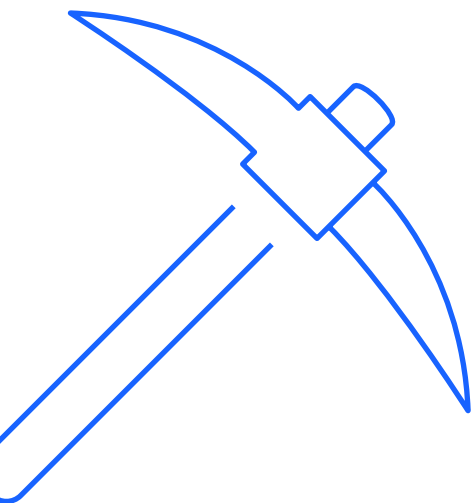
Eine neue Art von Sensoren stellen Quantengravimeter dar, die auf dem Prinzip der atomaren Interferometrie beruhen. Diese Sensoren können extrem kleine Unterschiede im Magnetfeld der Erdoberfläche messen und eignen sich daher für sehr genaue gravimetrische Messungen. Dadurch kann man Lagerstätten und Rohstoffvorkommen sehr genau identifizieren, da verschiedene Rohstoffe unterschiedliche gravimetrische Eigenschaften besitzen. Erste mobil verwendbare Prototypen sind in der Erprobung. Ziel ist es, diese für die Exploration von Rohstoffen auf Schiffen und in Flugzeugen einzusetzen.

Nutzen: höhere Empfindlichkeit und Genauigkeit bei der Suche nach Rohstoffvorkommen

Weiterführende Ideen: Mit dieser Technologie sind weitere Anwendungsmöglichkeiten denkbar, zum Beispiel die genaue Lokalisierung von Grundwasservorkommen.

Opportunitätskosten: weniger genaue Exploration von Rohstoffvorkommen, dadurch werden potenziell wichtige Rohstoffvorkommen nicht gefunden

Referenz: ↗ C. Freier et al »Mobile quantum gravity sensor with unprecedented stability« J. Phys.: Conf. Ser. 723 012050 (2016)



4. Verarbeitendes Gewerbe

Management Summary

Die effiziente Herstellung hochwertiger Komponenten, die dazu erforderlichen Fertigungsprozesse sowie die fortschreitende Individualisierung der Produkte und der Produktion erfordern komplexer werdende Optimierungen, automatisierte Prüfungen, eine effiziente Steuerung der Produktionsprozesse und die gesicherte Übertragung von Informationen entlang der Produktionskette. Quantentechnologien können dabei entscheidende Vorteile bringen und in der gesamten Bandbreite von Forschung und Entwicklung, der Supply Chain, der Produktion und der Endkundenadressierung zum Einsatz kommen. Damit eröffnen sich für das verarbeitende Gewerbe neue Möglichkeiten, die führende Stellung der deutschen Industrie zu erhalten und auszubauen.

UC Batterietechnik

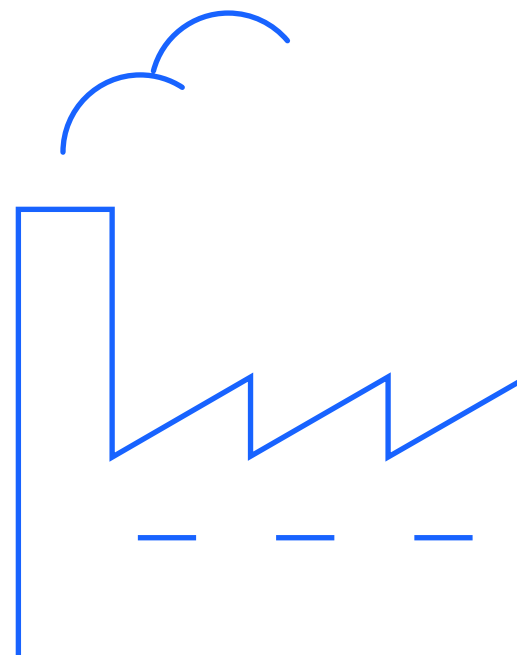
Die Beschaffenheit der Lithiumkathoden kann mit Hilfe von Simulationen auf einem Quantencomputer wie im Daimler-Projekt⁴⁷ mit einer größeren Genauigkeit in kürzerer Zeit bestimmt werden. Hierzu sind komplexe Simulationen erforderlich, für die heutige Supercomputer-Systeme nicht genügend Rechenleistung haben und die in Zukunft nur mit Quantencomputern ausgeführt werden können.

Nutzen: Die Entwicklungszeit verbesserter Komponenten für die Batterietechnik wird deutlich verkürzt. Damit können im Bereich der Energiespeicherung schneller leistungsfähigere Produkte angeboten werden.

Weiterführende Ideen: Mit komplexeren Simulationen können chemische Prozesse in Batterien besser verstanden und mit dieser Kenntnis völlig neue Batterietypen entwickelt werden.

Opportunitätskosten: Wettbewerber bieten leistungsfähigere Batteriesysteme bei kostengünstigerer Entwicklung an und übernehmen die Führung im Markt.

Referenz: ↗ Tanvi P. Gujarati, Tyler Takeshita, Andreas Hintennach, Eunseok Lee
»Heuristic Quantum-Classical Algorithm for Modeling Substitutionally Disordered Binary Crystalline Materials«



UC Optimierung von Bewegungsabläufen von Robotern

Der Bewegungsablauf des Roboters zum Ziehen von Versiegelungsnähten bei Autoka-
rosserien kann mit Optimierungsalgorithmen auf einem Quantencomputer verkürzt
werden. Mit steigender Anzahl der Versiegelungsnähte erhöht sich die Komplexität der
Optimierung so schnell, dass sie die Möglichkeit heutiger HPC Systeme übersteigt und
nur auf zukünftigen Quantencomputern durchgeführt werden kann.

Nutzen: Die Produktionszeit wird verkürzt und Betriebskosten für den Einsatz des Robo-
ters werden gesenkt.

Weiterführende Ideen: In einem Industrie-4.0-Szenarium ist eine dynamische Anpas-
sung idealerweise unter nahezu Echtzeitbedingungen erforderlich. Bei jedem anders zu
versiegelndem Teil bzw. bei einer Änderung des Produktionsablaufs durch Roboter-
ausfall muss der Roboterweg individuell berechnet werden. Die Optimierung kann auf
die gesamte Produktionsstraße ausgedehnt werden – somit erfolgt die Berechnung
nicht nur für einen einzelnen Roboter, sondern für alle Roboter in der Produktionszelle
und auch produktionszellenübergreifend.

Opportunitätskosten: Wettbewerber können mit kürzeren und kostengünstigeren Pro-
duktionsabläufen die Produkte günstiger herstellen.

Referenz: ↗ Industry Quantum Computing Applications QUTAC Application Group
(BMW Robot Production Planning)

UC Produktionssteuerung und Job Shop Scheduling

In komplexen Produktionsabläufen können mit Hilfe von Optimierung auf Quantencom-
putern Jobs auf die vorhandenen Maschinen so verteilt werden, dass die Gesamtpro-
duktionszeit minimal wird und die Maschinen optimal ausgelastet sind. Die Komplexität
der Optimierung steigt mit der Anzahl der zu verteilenden Jobs sowie Randbedingun-
gen bei der Abfolge ihrer Ausführung. Dies übersteigt das Potenzial von HPC Systemen,
kann aber in Zukunft mit Quantencomputern gelöst werden.

Nutzen: Eine effektive und effiziente Produktionsplanung und -steuerung (PPS) ist
damit möglich.

Weiterführende Ideen: Stochastische Störungen und zyklische Anforderungen können
in Realtime ausgeglichen werden, was zu einer ausgewogenen Auslastung der Ferti-
gungskapazitäten führt.

Opportunitätskosten: Wettbewerber können Produkte in kürzeren Zeiten, mit höherer Flexibilität und kostengünstiger herstellen.

Referenz: ↗ Berend Denkena, Fritz Schinkel, Jonathan Pirnay, Sören Wilmsmeier
»Quantum algorithms for process parallel flexible job shop scheduling« CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Volume 33, (2021) Pages 100-114

UC Optimierung der Sensorposition

Fahrzeuge mit Funktionen des automatisierten Fahrens benötigen eine große Anzahl von Sensoren, um die Umgebung des Fahrzeugs zu beobachten. Diese Sensoren sind ein entscheidender Faktor, um das automatisierte Fahren voranzutreiben und die Sicherheit für Menschen innerhalb und außerhalb des Fahrzeugs zu erhöhen. Sensoren wie Lidar und Radar, um nur einige zu nennen, sind jedoch komplexe Systeme und daher sehr teuer. Daher stellen die Sensoren für Fahrassistenzsysteme und automatisierte Fahrzeuge einen großen Kostenfaktor dar.

Nutzen: Es wichtig, die Kosten für die Einrichtung der Sensoren für jedes einzelne Fahrzeug während der Entwicklung zu minimieren.

Referenz: ↗ Quantencomputing: BMW Group startet Crowd-Innovation Initiative
»Quantum Computing Challenge« in Zusammenarbeit mit AWS.

UC Vorserienfahrzeug-Konfiguration

Bevor neue Fahrzeugmodelle für die offizielle Produktion freigegeben werden können, müssen verschiedene Tests an Vorserienfahrzeugen durchgeführt werden. Zu diesen Tests gehören die Bewertung der Möglichkeit, bestimmte Komponenten zu produzieren und die Validierung der Funktionalität des Modells. Die gewünschten Tests sollten so verteilt und durchgeführt werden, dass die Anzahl der vom Hersteller produzierten Testfahrzeuge möglichst gering ist, was wiederum die Produktionskosten senkt. Selbst bei einer optimalen Kombination von Merkmalen müssen also Kosten und Testabdeckung gegeneinander abgewogen werden.

Nutzen: Im Idealfall könnte der Entscheidungsträger die Anzahl der möglichen Tests für eine bestimmte Anzahl von Fahrzeugen schätzen (was sich direkt auf die Kosten auswirkt).

Referenz: ↗ Quantencomputing: BMW Group startet Crowd-Innovation Initiative
»Quantum Computing Challenge« in Zusammenarbeit mit AWS.

UC Materialumformung in der Produktion

Wegen der starken Konkurrenz versuchen Fahrzeughersteller, die Forschung und Entwicklung zu verbessern und die Konstruktions- und Fertigungsprozesse zu beschleunigen, indem sie innovative und effiziente digitale Instrumente und Werkzeuge einsetzen. Ein solches Instrument ist die digitale Modellierung für die Metallumformung in der Automobilindustrie. Jahrzehntlang waren physikalische Tests zur Verformung von Prototypenteilen die einzige zuverlässige Methode zur Überprüfung der Anforderungen an den Metallumformungsprozess. In jüngster Zeit haben sich virtuelle Strukturanalysen und -simulationen zu einer vielversprechenden Alternative entwickelt, die physische Prüfverfahren im Fahrzeugproduktionsprozess quantitativ übertrifft.

Nutzen: Erhöhung der Produktivität von Forschung und Entwicklung, Reduzierte Zeit- und Arbeitsaufwand für die Bewertung alternativer Konstruktionen

Referenz: ↗ Quantencomputing: BMW Group startet Crowd-Innovation Initiative »Quantum Computing Challenge« in Zusammenarbeit mit AWS.

UC Chemische Reaktivität

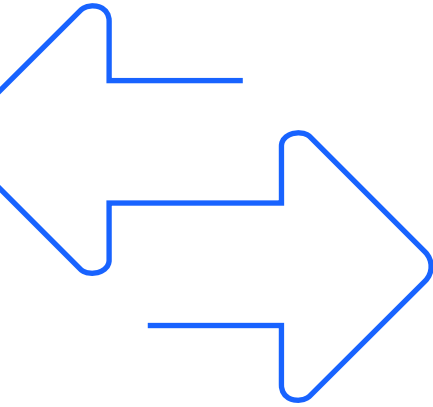
Simulationen stellen ein wichtiges Standbein für die Optimierung von chemischen Reaktionen dar. Das Verständnis der chemischen Reaktivität ist eine Grundvoraussetzung zur Weiterentwicklung von Produkten und Materialien wie Katalysatoren, Polymeren oder Wirkstoffen. Für eine quantitative Untersuchung kommen zumeist quantenchemische Simulationen zum Einsatz, die eine immense Rechenzeit erfordern, sodass in der praktischen Anwendung üblicherweise ein Kompromiss zwischen Genauigkeit und Rechenzeitbedarf gefunden werden muss. Quantencomputer werden in der Zukunft derartige Berechnungen signifikant beschleunigen und somit Simulationen bislang unerreichter Genauigkeit ermöglichen.

Nutzen: Erhöhung der Produktivität von Forschung und Entwicklung; verbesserte Nachhaltigkeit chemischer Prozesse

Opportunitätskosten: Wettbewerber können bessere Produkte oder dieselben Produkte zu wirtschaftlicheren und/oder ökologischeren Bedingungen herstellen

Referenz: ↗ Michael Kühn, Sebastian Zanker, Peter Deglmann, Michael Marthaler*, and Horst Weiß »Accuracy and Resource Estimations for Quantum Chemistry on a Near-Term Quantum Computer« J. Chem. Theory Comput. (2019), 15, 9, 4764–4780

5. Transport, Kommunikation, Energieversorgung



Management Summary:

Quantentechnologien können zur Optimierung von Verkehrswegen, Warenbewegungen und Stromnetzen eingesetzt werden. Abhörsichere Kommunikation kann durch Quantentechnologien erreicht werden.

UC Verkehrsoptimierung:

Volkswagen und D-Wave konnten in einem Forschungsprojekt auf Grundlage der Daten von 10.000 öffentlichen Taxen erfolgreich zeigen, dass sie mit einem Quantencomputer den Verkehrsfluss in Bereichen von Peking optimieren könnten.

Nutzen: Solch ein quantenoptimiertes Verkehrsleitsystem kann den Verkehrsfluss in Metropolen verbessern und den CO₂-Austausch reduzieren.

Referenz: ↗ Florian Neukart, Gabriele Compostella, Christian Seidel, David von Dollen, Sheir Yarkoni and Bob Parney »Traffic Flow Optimization Using a Quantum Annealer« Front. ICT, 20 December 2017

UC Fahrplanoptimierung Bahn:

Die Disposition von Zügen, Schiene und Personal kann durch Quantencomputing erfolgen, so dass Störungen in Nahezu-Echtzeit verarbeitet werden. Zusätzliche Parameter können mit betrachtet werden, die heute noch nicht adäquat berücksichtigt werden können.

Nutzen: optimierte Ausnutzung der bestehenden Schienen-Infrastruktur

Referenz: ↗ Quantum inspired Railway Schedule Planning (Bitkom Quantum Summit 2021)

UC Logistik:

Ladungstransporte werden bezüglich der Variablen Zeitpunkt, Größe und Gewicht mittels Quantencomputer optimal zusammengestellt.

Nutzen: Kostenersparnis, Umweltauswirkungen

Opportunitätskosten: Kosten, Leerfahrten

Referenz: ↗ Mark W. Coffey »Adiabatic quantum computing solution of the knapsack problem« Fujitsu and NYK Streamline Stowage Planning for Car Carriers by Leveraging Quantum-Inspired 'Digital Annealer', September 2021

UC Stromerzeugung und -verteilung:

Quantencomputing kann in dem komplexen System die große Anzahl der Einflussvariablen für die Optimierung der Stromerzeugung und der Stromverteilung verarbeiten. Dies beinhaltet beispielsweise welche Erzeugungseinheiten betrieben werden sollen, basierend auf den Kosten der Einheiten, den Beschränkungen des Netzes und den Kennwerten des jeweiligen Kraftwerks.

Nutzen: optimale Ausnutzung der Infrastruktur, Beitrag zur Energiewende, Kosteneinsparung

Weiterführende Ideen: Energienutzungsvorhersage hilft bei der besseren Planung der Lastverteilung und der dazu benötigten Energieerzeugung

Opportunitätskosten: suboptimaler Umgang mit Energieressourcen, Klimaauswirkungen, Zusatzkosten

Referenz: ↗ E.ON kooperiert mit IBM Quantum, um die Ziele der Energiewende voranzutreiben, September 2021

UC Verteilung von Datenpaketen in Netzwerken

Die Router der Glasfasernetze stoßen je nach Last an ihre Grenzen und werden zukünftig durch Streamingdienste und IoT-Ausbau weitere Belastungen erfahren. Quantencomputing kann das optimale Routing der Datenpakete bestimmen und so zu einer gleichmäßigeren Auslastung der Netze beitragen.

Nutzen: Kosten, höherer Wirkungsgrad der Infrastruktur

Opportunitätskosten: Weiterer Netzausbau, obwohl Kapazitäten verfügbar wären, Kosten

Referenz: ↗ Die Deutsche Telekom erprobt prototypisch Quantencomputing und Quantenkommunikationsanwendungen. Digitale Welt. August 2021

UC Lieferketten- und Logistik-Optimierung

Während die Logistik zu einem immer wichtigeren Teil der gesellschaftlichen Infrastruktur geworden ist, stellen Faktoren wie Fahrendenmangel, Verkehrsstaus und erhöhte CO₂-Emissionen eine Herausforderung für Unternehmen in der Logistik- und Lieferkettenbranche dar. Die Verwaltung von Lieferketten in der Fertigung ist ein Bereich, in dem Effizienzsteigerungen und Kostensenkungen möglich sind. Diese können auch zur Lösung grundlegenderer Logistik- und Umweltprobleme beitragen. In einem Test bei Toyota Systems galt es, ein Optimierungsproblem, das ein großes Logistiknetzwerk mit mehr als drei Millionen Routenkandidaten betraf, zu formulieren und zu lösen. Ziel eines Versuches war es, aus Millionen potenzieller Kandidaten für die Beschaffung von Teilen von Hunderten von Zulieferern und deren Auslieferung über mehrere Transitlager an Dutzende von Fabriken, schnell die Route mit den niedrigsten Distributionskosten zu ermitteln.

Nutzen: Bei Toyota erwartet man sich ein Einsparungspotenzial bei den Kosten in Höhe zwischen 2 Prozent und 5 Prozent.

Referenz: ↗ Fujitsu and Toyota Systems Optimize Large-Scale Supply Chain Logistics using Quantum-Inspired Technology. September 2020

6. Finanz-, Versicherungs- und Immobilienwirtschaft

Management Summary

Die Finanzwirtschaft ist eine der vielversprechendsten Industrien und wird eine der ersten Branchen sein, die Quantenalgorithmen produktiv einsetzen können wird. Optimierungsalgorithmen sind für die Branche vielversprechend. Bei finanzmathematischen Simulationen werden viele Parameter eingesetzt, um möglichst genaue Vorhersagen zu erreichen. Mit der Anzahl der Parameter kann die Berechnungszeit exponentiell steigen. Eine Beschleunigung der Berechnungen für eine größere Zahl an Parametern würde die Genauigkeit der Vorhersagen verbessern.



Es wird erwartet, dass es in fünf bis zehn Jahren kommerziell eingesetzte Quantenalgorithmen im finanzmathematischen Bereich gibt.^{48,49}

UC Portfoliooptimierung und Risikomanagement

Im Rahmen einer Forschungsarbeit wurde gezeigt, dass sich mehrschichtige Portfoliooptimierungsprobleme auf Basis von Quantum-Annealer-Technologien effizient lösen lassen. In anderen Arbeiten wurde mit Hilfe der »Quantum Amplitude Estimation« aufgezeigt, dass Value at Risk, Conditional Value at Risk sowie die Varianz eines Portfolios schneller als mit klassischen Monte-Carlo-Ansätzen berechnet werden können. In einer Veröffentlichung in Nature 2019 wurde dargestellt, dass dieser Ansatz für eine begrenzte Anzahl von Assets (Vermögenswerten) auf einem gatterbasierenden Quantencomputer eine quadratische Beschleunigung gegenüber einer Monte-Carlo-Simulation mit sich bringt. In einer Folgearbeit schätzten die Forschenden in der Projektion auf zukünftige, fehlertolerante Quantencomputer, dass sich damit ein Kreditportfolio mit einer Million Assets in Echtzeit berechnen ließe.

In einem Proof-of-Concept mit der Deutschen Börse konnte aufgezeigt werden, dass die Berechnung von Sensitivitäten von Risiken ein vielversprechendes Anwendungsfeld für Quantencomputing sein kann. Die Anbieter von gatterbasierten Quantencomputern gehen davon aus, dass die für einen relevanten Szenario benötigte Anzahl von fehlerbereinigten Qubits (»Logische Qubits«) in wenigen Jahren erreicht werden kann. Damit könnte das Risiko-Management im Finanzbereich einer der ersten Ansätze sein, in dem Quantencomputing eine kommerziell breite Anwendung findet.

48 ↗ Finextra: Goldman Sachs makes quantum breakthrough

49 ↗ Quantum Computing for Finance: State-of-the-Art and Future Prospects | IEEE Journals & Magazine | IEEE Xplore

Nutzen: Deutlich schnellere und mit weniger Unsicherheiten behaftete Portfoliooptimierung und Risikoabschätzung. Dadurch wird eine genauere und schnellere Justierung der Portfolios möglich.

Opportunitätskosten: Langsamere und ungenaueres Risiko- und Portfoliomanagement kann zu Marktnachteilen gegenüber Konkurrenten, welche diese Methoden schon einsetzen, führen.

Referenzen:

↗ A Quantum Algorithm for the Sensitivity Analysis of Business Risks. M. C. Braun, T. Decker, N. Hegemann, S. F. Kerstan, C. Schäfer

↗ Solving the Optimal Trading Trajectory Problem Using a Quantum Annealer. G. Rosenberg, P. Haghnegahdar, Ph. Goddard, P. Carr, K. Wu, M. López de Prado

↗ Quantum Risk Analysis. S. Woerner, D. J. Egger

↗ Credit Risk Analysis using Quantum Computers. D. J. Egger, R. Gacía Gutiérrez, J. Cahué Mestre, S. Woerner

UC IT-Sicherheit – Blockchaintechnologien

Im Hinblick auf die durch Quantentechnologien (Stichwort Shor-Algorithmus) gefährdete, bei Blockchains gebräuchliche Public-Key/Private-Key-Verschlüsselung werden Quantencomputing-resistente Verschlüsselungsverfahren (Post-Quantenkryptographie) erforscht. Kryptowährungen sind ein Anwendungsfall von Blockchain-Technologien und wären daher ebenfalls potenziell angreifbar.

Für eine Quanten-Blockchain wird ein Quantennetzwerk als Medium benötigt. Das Quanteninternet und Quantensatelliten sind zwei in Entwicklung befindliche Träger für abhörgeschützte Verbindungen. Nach den Prinzipien der Quantenmechanik kann eine solche Verbindung nicht unbemerkt abgehört werden, da ein Abhören (Messen) der übertragenen Nachricht unweigerlich den Superpositionszustand zerstört und der Vorgang damit bemerkt werden würde.

Nutzen: Abhörsichere Blockchain-Lösungen werden möglich.

Opportunitätskosten: Perspektivisch könnten die gebräuchlichen RSA-Verschlüsselungsverfahren und die Transaktionen in der Blockchain unsicher werden.

Referenzen:

↗ Quantum Internet - Applications, Functionalities, Enabling Technologies, Challenges, and Research Directions. Amoldeep Singh, Kapal Dev, Harun Siljak, Hem Dutt Joshi, Maurizio Magarini

↗ Securing Optical Networks using Quantum-secured Blockchain: An Overview. Purva Sharma, Vimal Bhatia, Shashi Prakash

↗ Vulnerability of Blockchain Technologies to Quantum Attacks. Joseph J. Kearney, Carlos A. Perez-Delgado

UC Vorhersage von Finanzkrisen

Der volkswirtschaftliche Schaden der Finanzkrise 2008 wird auf acht Billionen Euro geschätzt. Eine Vorhersage würde durch Reaktionen der Banken und der Politik auf Vorzeichen einer Krise den volkswirtschaftlichen Schaden mindern können. Drei spanische Forscher haben in ihrer Forschungsarbeit »Forecasting financial crashes with quantum computing« zeigen können, dass die Stabilität von Finanzsystemen mithilfe von Quantenalgorithmen berechnet werden kann.

Nutzen: fundiertere Reaktion der Marktkräfte auf Börsen-Crash-Szenarien

Opportunitätskosten: hoher volkswirtschaftlicher Schaden, wenn gefährliche Marktentwicklungen zu spät erkannt werden.

Referenzen: ↗ Forecasting financial crashes with quantum computing. Roman Orus, Samuel Muel, Enrique Lizaso

UC Betrugserkennung

Fortschritte in Bezug auf Künstliche Intelligenz haben die Betrugserkennung in Banken bereits erheblich verbessern können. In der Forschungsarbeit »Quantum machine learning for quantum anomaly detection« haben Liu und Rebentrost erfolgreich zeigen können, dass Quantencomputer für das Erkennen von Anomalien verwendet werden können. Die Genauigkeit und Berechnungsgeschwindigkeit soll mit Methoden des Quantum Machine Learning erhöht werden.

Nutzen: Eine genauere Betrugserkennung bei Finanztransaktionen.

Opportunitätskosten: Mögliche privat- und strafrechtliche Auseinandersetzungen.

Referenzen:

↗ Quantum machine learning for quantum anomaly detection. Nana Liu, Patrick Rebentrost

↗ Quantum computing for finance: overview and prospects. Roman Orus, Samuel Mugel, Enrique Lizaso

↗ Quantum algorithms for supervised and unsupervised machine learning. Seth Lloyd, Masoud Mohseni, Patrick Rebentrost

UC Preisbestimmung von Finanzderivaten

Im Mai 2019 haben die Großbank J. P. Morgan Chase, die ETH Zürich sowie IBM eine Forschungsarbeit veröffentlicht, in der ein Verfahren zur Preisbestimmung von Optionen auf einem Quantencomputer mit 20 Qubits durchgeführt wird. Dafür wird die »Amplitude Estimate« statt einer Monte-Carlo-Simulation verwendet. Illustrative Tests zeigten, dass der Fehler mit dieser Methode quadratisch schneller konvergiert als mit der klassischen Monte-Carlo-Methode.

Nutzen: Eine genauere und schnellere Preisbestimmung für Finanzprodukte kann zu Marktvorteilen und höheren Gewinnspannen in hochgradig spekulativen Derivatengeschäften führen.

Opportunitätskosten: Nachteile am Markt, wenn andere Teilnehmende solche Methoden einsetzen.

Referenzen: ↗ Option Pricing using Quantum Computers. Nikitas Stamatopoulos, Daniel J. Egger, Yue Sun, Christa Zoufal, Raban Iten, Ning Shen, Stefan Woerner

UC Arbitrage

Ziel der sogenannten Arbitrage ist, mit Preisunterschieden verschiedener Märkte bei gleichem Produkt Gewinne zu erzielen. Für Banken kann dies ein lohnendes Geschäft sein, da häufig kein Risiko gegeben ist und die Ausführung vollautomatisiert funktioniert. Komplexe Strategien können den Gewinn erhöhen, sind jedoch aufgrund der Komplexität nur beschränkt mit klassischen Computern auszuführen.

Nutzen: Gewinnverbesserung durch genauere und schnellere Berechnungen – damit höhere Gewinnspannen möglich.

Opportunitätskosten: entgangener Gewinn

Referenzen: ↗ Quantum computing for finance: overview and prospects. Roman Orus, Samuel Mugel, Enrique Lizaso

UC Kreditbewertungsanpassung (CVA)

Ein weiteres Beispiel für Derivatengeschäfte an der Börse ist die Credit Valuation Adjustment (CVA), also die Neubewertung von Krediten unter Berücksichtigung von Marktrisiken. Üblicherweise wird dies mit der Monte-Carlo-Methode berechnet. Einen neuen Ansatz hat die Bank BBVA aus Spanien entwickelt: eine Kreditneubewertung mit einem Quantenalgorithmus zu berechnen. In diesem Fall wurde eine Variante des Quantum-Phase-Estimation-Algorithmus angewandt, die sich auf den heutigen, nicht fehlerkorrigierten und noch nicht hochskalierbaren Quantencomputern abbilden lässt. Das Paper zeigt insbesondere auf, welche Herausforderungen in Richtung Quantenvorteil zu bewältigen und welche Möglichkeiten zur Verbesserung des Quantenalgorithmus nötig sind, um praktisch nutzbare Vorteile in realen Business-Szenarien zu erhalten.

Nutzen: verbessertes Risikomanagement in Bezug auf Kredite

Opportunitätskosten: keine Verbesserung der Kreditausfallrate

Referenzen: ↗ Quantum algorithm for credit valuation adjustments. Javier Alcazar, Andrea Cadarso, Amara Katarwa, Marta Mauri, Borja Peropadre, Guoming Wang, Yudong Cao

7. Medizinprodukte und pharmazeutische Industrie

Management Summary

Für die Entwicklung und Erprobung neuer Wirkstoffe sind Pharmaunternehmen bislang auf umfangreiche und zeitintensive Laborversuche angewiesen. Es dauert im Durchschnitt 13 Jahre, bis ein neues Medikament alle Entwicklungsphasen durchlaufen hat und seine Zulassung erhält. Eine Möglichkeit, den Aufwand für derartige Versuchsreihen zu reduzieren, besteht im Einsatz computergestützter Simulationen der Moleküle, auf denen potenzielle Wirkstoffe beruhen. Während klassische Computer die Dynamik einzelner Atome noch effizient simulieren können, erhöht sich die benötigte Rechenzeit bereits bei der Simulation des Verhaltens einfacher Moleküle.

UC Erforschung neuer Medikamente

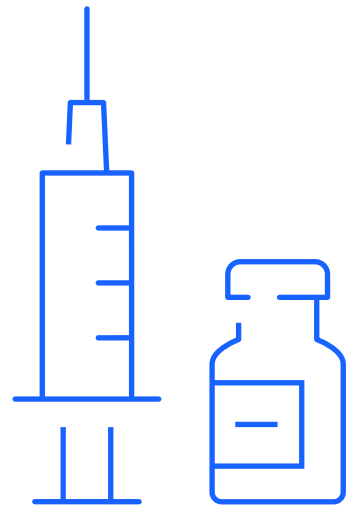
Die pharmazeutische Wirkstoffforschung ist zeitaufwendig und teuer. Die Industrie benötigt schnellere und genauere Wirkstoffziele, die in klinischen Studien getestet werden können. Leitmolekülkandidaten werden aus einer virtuellen Bibliothek von mehreren Milliarden Molekülen identifiziert und deren Qualität bewertet. Die Leitmoleküle werden anhand der strukturellen Informationen des pharmazeutischen Ziels und einer Reihe von physikalisch-chemischen Randbedingungen bewertet. Ein Molekülfilter, welcher sich Quantencomputer-Ansätzen bedient, reduziert die Auswahloptionen auf wenige tausend potenzielle Kandidaten an Molekülen.

Das Ergebnis wird mit Algorithmen für maschinelles Lernen hinsichtlich der physikalisch-chemischen Eigenschaften und mit Quantenmechanik- und Molekülmechanik-Simulationen (QM/MM) für Bindungsaffinitäten verfeinert und gereiht. Das Endergebnis ist eine Auswahlliste hochwertiger Moleküle, die für die Synthese und In-vitro-Tests priorisiert werden.

Nutzen: Beschleunigung der Entwicklung neuer Medikamente

Weiterführende Ideen: Medikamente gegen weitere Krankheiten, personalisierte Medikamente

Opportunitätskosten: keine Beschleunigung des Prozesses vor der Synthesisierung der Wirkstoffe im Labor



Referenz:

Fujitsu designs pioneering drug discovery platform to speed up the process of bringing new drugs to market. March 2020

Mit Quantencomputing die Medikamentenentwicklung beschleunigen. Juni 2021

Pharma's digital Rx: Quantum computing in drug research and development. June 2021

UC Beschleunigung der chemisch-pharmazeutischen Entwicklung

Sind Kandidaten für neuen Medikamente gefunden, müssen diese Moleküle zu anwendbaren Arzneimitteln weiterentwickelt werden. Dieses Scale-Up ist ebenfalls ein langer und aufwendiger Prozess, der viele Jahre dauert.

Im Zuge dieser Entwicklungsarbeit gibt es viele Schritte, an denen Forschung und Entwicklung und damit auch Simulationen beteiligt sind. Zuerst wird ermittelt, wie der Wirkstoff zu seinem Ziel gebracht werden kann – ob als Tablette, als Salbe oder per Injektion. Dann werden die Qualitäten ermittelt und dieses Design wird dann bis hinunter zur Synthese des Moleküls geführt. Ist die Syntheseroute des Wirkstoffes festgelegt, werden alle Schritte – soweit heute möglich – in Digital Twins zuerst durchgerechnet und danach per Experiment validiert. Abschließend wird die Dokumentation der Herstellung an die Behörden zur Prüfung und Genehmigung gegeben. An vielen Entwicklungsschritten sind mechanistische und quantenmechanische Rechnungen beteiligt. Schon heute gibt es Schnittstellen, die laufzeitintensive Algorithmen durch alternative Implementierungen auf der Basis von Quantenalgorithmen ersetzen.

Nutzen: beschleunigte Entwicklung vom Wirkstoff zum Arzneimittel

Weiterführende Ideen: komplette Abbildung des Scale-Up in Silico.

Referenz:

↗ Maximilian Zinner, Florian Dahlhausen, Philip Boehme, Jan Ehlers, Linn Bieske, Leonard Fehring. »Toward the institutionalization of quantum computing in pharmaceutical research« Drug Discovery Today, Volume 27, Issue 2, 2022

↗ Cova T., Vitorino C., Ferreira M., Nunes S., Rondon-Villarreal P., Pais A. (2022) Artificial Intelligence and Quantum Computing as the Next Pharma Disruptors. In: Heifetz A. (eds) Artificial Intelligence in Drug Design. Methods in Molecular Biology, vol 2390. Humana, New York, NY.

UC verbesserte MRT-Diagnostik durch Kombination mit Quantensensorik

Die Diagnostik der Magnetresonanztomographie (MRT) kann durch die Kombination mit Quantensensorik verbessert bzw. erweitert werden. Mit der Quantensensorik kann durch die Auflösung kleinster Energieunterschiede die chemische Zusammensetzung von Gewebe bestimmt werden. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sind zuversichtlich, durch die Gabe z. B. von verändertem Zucker als Kontrastmittel, nicht nur Tumorgewebe zu erkennen, sondern kleinste Veränderungen messen zu können. Das so erworbene Wissen könnte den Zeitraum zwischen dem Beginn einer Therapie und der Messung des Erfolgs verkürzen. Schnelle Anpassungen der Therapie können die Heilungschancen verbessern und die Belastung für Patientinnen und Patienten z. B. durch spät erkannte Unwirksamkeit verringern.

Nutzen: frühzeitige Bestätigung der Wirksamkeit von Krebstherapien

Opportunitätskosten: verzögerte Anpassung von Krebstherapien bei schwacher Wirksamkeit, was eine größere Belastung von Patientinnen und Patienten und eine Verringerung der Heilungschancen bedeuten kann

Referenz: ↗ Potenziale der Quantentechnologie für die Gesundheitsversorgung.
November 2019

8. Öffentliche Verwaltung

Management Summary

Die öffentliche Verwaltung ist darauf angewiesen, dass eigene Daten geschützt sind und vertrauliche Daten vertraulich bleiben. Daneben benötigt der Staat nicht öffentlich zugängliche Informationen, um präventiv Sicherheit herzustellen. Beide Ziele können mit Quantentechnologien unterstützt werden.

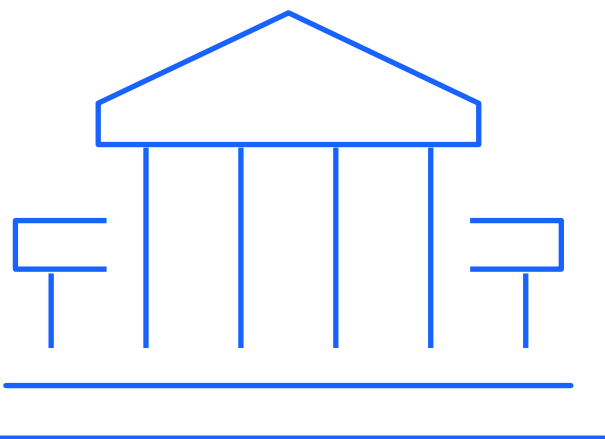
UC Verkehrsfluss-Optimierung (öffentlicher Dienst)

Das Projekt MOZART der Hamburg Port Authority beschäftigt sich mit der Effizienzsteigerung des Verkehrsflusses im Hafenbereich. Das Ziel ist es, durch ein leistungsfähigeres Hafennetz die Verkehrskapazität zu steigern und gleichzeitig die Verkehrsemissionen zu senken. Um dies zu erreichen, werden die kritischen verkehrlichen Engstellen eines jeden Straßennetzes betrachtet: Kreuzungen. Obwohl Kreuzungen nicht nur im Hafen maßgeblich über die Verkehrskapazität und Emissionen entscheiden, läuft die heutige Verkehrslenkung überwiegend über kaum bis gar nicht dynamische Ampelanlagen. Durch die Echtzeitsteuerung der optimalen Ampelschaltung im gesamten Verkehrsnetz sollen Verkehrsteilnehmende vorausschauend durch den Hafenverkehr geführt werden. Um den Verkehr effizient und flächendeckend zu optimieren, sind umfangreiche Berechnungen in Sekundenschnelle notwendig.

Nutzen: Optimierung der Ampelschaltungen in Echtzeit

Weiterführende Ideen: Skalierung auf größere Gebiete

Referenz: ↗ Verkehrsprojekt MOZART – Effizienter Verkehrsfluss im Hafenbereich durch den Einsatz von Quantentechnologie. Dezember 2020



UC Schutz sensibler Daten

Die öffentliche Verwaltung erhebt und verarbeitet zur Erfüllung ihrer Aufgaben massenhaft Daten, häufig mit Personenbezug. Das Spektrum reicht von Meldedaten über Einkommens- und Vermögensdaten bis zu Erkenntnissen von Sicherheitsbehörden und Informationen, deren Bekanntwerden die Interessen oder Sicherheit der Bundesrepublik Deutschland oder eines ihrer Länder gefährden kann. Die Vertraulichkeit und der Schutz dieser Daten ist eine wesentliche Voraussetzung für das Vertrauen der Bürgerinnen und Bürger in den Staat und seine Verwaltung. Zu diesem Zweck werden auf allen Verwaltungsebenen sichere Netzwerk-Infrastrukturen benötigt. Die QKD (Quantum Key Distribution) ist hierfür ein wesentlicher Baustein.

Nutzen: abhörsichere Übertragung sensibler Daten über unsichere Netze.

Opportunitätskosten: Ohne ausreichenden Schutz wird das Vertrauen der Bürgerinnen und Bürger in den Staat gestört, die Sicherheit und die Interessen Deutschlands sind gefährdet. Die Zuverlässigkeit Deutschlands, z. B. bei der Zusammenarbeit von Geheimdiensten oder Militär, könnte von anderen Staaten in Frage gestellt werden.

Referenz:

↗ BSI - Quantenkryptographie

↗ EuroQCI-Initiative

UC Aufklärung durch Nachrichtendienste und Sicherheitsbehörden

Nachrichtendienste und Sicherheitsbehörden sind für die Erfüllung ihrer Aufgaben auf Informationen angewiesen, die gewöhnlich nicht offen zugänglich sind. Nachrichtendienste und Sicherheitsbehörden können Quantencomputer nutzen, um aus der Überwachung verschlüsselter Kommunikationsverbindungen gewonnene, kryptographisch gesicherte Daten zu entschlüsseln. Erst im März 2021 hat der Bundesnachrichtendienst (BND) im Rahmen der Reform des BND-Gesetzes breite Befugnis zum Hacken ausländischer Vermittlungsanlagen, Telekommunikationsinfrastruktur und der IT-Systeme von Internet-Providern erhalten.⁵⁰

Nutzen: frühzeitige Aufklärung krimineller oder terroristischer Handlungen.

Opportunitätskosten: Die Handlungsfähigkeit der Nachrichtendienste und Sicherheitsbehörden wird eingeschränkt. Die präventive Aufklärung und damit Verhinderung schwerer krimineller Handlungen oder terroristischer Anschläge wird erschwert.

Referenz: ↗ BSI - Entwicklungsstand Quantencomputer

UC Militärische Aufklärung mit Quantenradar

Seit dem 2. Weltkrieg sind Radarsysteme zentrale Bausteine militärischer Aufklärung. Seit vielen Jahren gibt es einen Wettbewerb konkurrierender Staaten oder Verteidigungsbündnisse um die Verbesserung des Radars, aber auch um dessen Umgehung. Mit Quantentechnologien kann die nächste Entwicklungsstufe erklommen werden. Quantenradare nutzen die physikalische Eigenschaft der Quantenverschränkung, um die ausgesandten und detektierten elektromagnetischen Wellen mit einer fälschungssicheren Signatur zu versehen. Dadurch würden Abwehrmechanismen wie Jamming oder die Tarnkappentechnologie nutzlos. Störsysteme können den Quantenzustand der Photonen im Radarsignal nicht kennen und nach dem No-Cloning-Theorem auch nicht kopieren. Durch die Berücksichtigung von Quantenzuständen können selbst kleinste Reflexionen detektiert werden.

Opportunitätskosten: verringerte Verteidigungsfähigkeit Deutschlands, der EU und der NATO, strategische Nachteile (Zurückfallen im Wettbewerb mit potenziellen militärischen Gegnern)

Referenz: ↗ Eurasia Review – Geopolitical Monitor, Warfare Evolved: Quantum Radar – Analysis, July 3, 2021

9. Zusammenfassung

Die aufgeführten Beispiele stellen nur einen kleinen Ausschnitt zur Anwendung der Quantentechnologie dar. Das Potenzial der Technik und die Auswirkungen für den Wirtschaftsstandort Deutschland sind signifikant – sowohl im Sinne der genutzten als auch der nicht genutzten Möglichkeiten. Dies gilt sowohl für die Entwicklung von Quantentechnologien (z. B. Quantensensoren), für darauf aufsetzende Entwicklungen (wie Software-Anwendungen) als auch für die Nutzung des Ganzen. Dabei muss neben der Frage nach dem Mehrwert des Ansatzes der Quantentechnologie für einen bestimmten Anwendungsfall immer auch die Frage: »Was muss an Prozessen, Geschäftsmodellen und weiteren heutigen Gegebenheiten geändert werden, um den sich aus der Technologie ergebenden Mehrwert in einen Geschäftsmehrwert umzusetzen?« beantwortet werden. Eine Auseinandersetzung mit diesen Fragen sollte und muss frühzeitig erfolgen.

Glossar

Begriff	Erklärung
Adiabatischer Quantencomputer	Adiabatische Quantencomputer, auch Quantum Annealer genannt, implementieren eine Berechnung durch die adiabatische Entwicklung eines quantenmechanischen Systems. Insbesondere für die Lösung kombinatorischer Optimierungsaufgaben versprechen Quantum Annealer Vorteile gegenüber klassischen Computern nachempfundenen, auf Quantengattern basierenden universellen Quantencomputern.
Binary-Paint-Shop-Problem	Kombinatorisches Optimierungsproblem aus der Automobilindustrie mit dem Ziel, die Belegung von Lackierstraßen bei der Fertigung zu optimieren.
Boden-Satellit-Experimente	Experimente, bei denen ein Teil am Boden und ein anderer Teil im Satelliten ausgeführt wird, um deren Zusammenwirken zu untersuchen.
Doppelspalt	Das Doppelspaltexperiment ist ein Experiment zur Quantenmechanik, das den Wellencharakter von Photonen zeigt. Es liefert daher einen der Hauptbeweise für den Welle-Teilchen-Dualismus. Beim Doppelspaltversuch wird ein Strahl aus Licht (Photonen) oder Materieteilchen durch zwei schmale, parallele Spalte in einer sonst undurchlässigen Blende gesendet und trifft hinter dieser Blende auf einen Detektor. Auf dem Detektor sieht man ein Interferenzmuster, das durch den Wellencharakter der Photonen oder Materieteilchen entsteht.
Elementarteilchen und Quasiteilchen	Elementarteilchen sind nicht mehr aufteilbare Teilchen, aus denen die Materie besteht. Quasiteilchen sind Vielteilchensysteme, die eine Energie-Impuls-Beziehung, wie ein Elementarteilchen aufweisen.
Fehlerrate	Die Fehlerrate spezifiziert die Fehlerwahrscheinlichkeit pro Operation. Die Reduktion der Fehlerrate wird durch Verwendung von ‚logischen Qubits‘ erreicht, die sich aus mehreren ‚physikalischen Qubits‘ zusammensetzen und mit deren Hilfe Fehler durch Vergleichsmessungen detektiert und korrigiert werden.
Gatterbasierender Quantencomputer	Gatterbasierende Quantencomputer nutzen, analog zu klassischen Computern, sogenannte Gatter zur Realisierung von elementaren logischen Operationen. Sie werden daher oft als universelle Quantencomputer bezeichnet (im Gegensatz zu Quantum Annealern, deren Fokus auf der Lösung von kombinatorischen Optimierungsproblemen liegt).
Hilbert-Raum	Hilbert-Raum nennt man in der Quantentheorie denjenigen Vektorraum, der von sämtlichen Quantenzuständen der Theorie aufgespannt wird.
Interferenz	Interferenz beschreibt die Änderung der Überlagerung von zwei oder mehr Wellen nach dem Superpositionsprinzip.
Ionenfalle	In einer Ionenfalle werden Ionen mittels elektrischer und magnetischer Felder festgehalten.

Begriff	Erklärung
Job Shop Scheduling Problem	Optimierungsproblem aus der industriellen Fertigung mit dem Ziel, bei parallel laufenden Fertigungslinien die optimale Maschinenbelegung zu finden.
Kohärenzzeit	Bezeichnet die Zeit, in dem ein Quantenzustand in einem realen System existieren kann. Durch Einwirkungen von außen ist diese Zeit stark limitiert.
Makroskopisches System	Ein System, das aus einer Vielzahl von kleinsten Bestandteilen besteht und zu dessen Beschreibung sinnvolle statistische Größen (z. B. Mittelwerte) genutzt werden.
MICIUS Programm	Die Micius Quantum Foundation hat ihren Sitz an der Chinesischen Universität der Wissenschaften und Technik (USTC) in Hefei und verfolgt das Ziel, die zweite Quantenrevolution voranzubringen.
Monte-Carlo-Algorithmen	Unter Monte-Carlo-Algorithmen versteht man Computeralgorithmen, die mit Zufallszahlen als Parameter arbeiten. Damit kann man geeignete Probleme schneller lösen als mit deterministischen Ansätzen.
NISQ (Noisy Intermediate Scale Quantum Technologies)	Der Begriff »Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ)-Technologie« (NISQ) bezeichnet gatterbasierende Quantencomputer mit einer Rechenkapazität von aktuell bis zu einer dreistelligen Anzahl von Qubits.
Optimierungsverfahren	Mathematische Verfahren, die aus einem bestimmten Anfangszustand den optimalen Zustand berechnen sollen.
Parallelisierbare Lösungsansätze	Algorithmen, bei denen die Berechnung der Lösung so zerlegt werden kann, dass die einzelnen Unterberechnungen gleichzeitig auf vielen Recheneinheiten erfolgen können. Dadurch können zum Beispiel im Bereich des High Performance Computing (HPC) sehr hohe Berechnungsgeschwindigkeiten erreicht werden.
Phononen	Ein Phonon ist die elementare Anregung des elastischen Feldes, z. B. Gitterschwingungen in einem Festkörper.
Präzisionstechnologie	Technologie zur Herstellung von High-Tech-Produkten, die extrem genaue Abmessungen und Abläufe erfordern.
QKD (Quantum Key Distribution)	siehe Quantenkryptographie
Quantenobjekt	Ein Quantenobjekt kann immer nur in diskreten Werten einer physikalischen Größe existieren. Beispiele für Quantenobjekte sind Elementarteilchen und Quasiteilchen.
Quantenalgorithmen	Mathematischer Algorithmus, der auf einem Quantencomputer ausgeführt werden kann. Je nach Art des Algorithmus kann das zu einer signifikant höheren Verarbeitungsgeschwindigkeit führen.

Begriff	Erklärung
Quantum Annealer	Quantum Annealer, auch adiabatische Quantencomputer genannt, implementieren eine Berechnung durch die adiabatische Entwicklung eines quantenmechanischen Systems. Insbesondere für die Lösung kombinatorischer Optimierungsaufgaben versprechen Quantum Annealer Vorteile.
Quanten- Blockchain	Eine Quanten-Blockchain kann als dezentrale, verschlüsselte und verteilte Datenbank auf der Grundlage von Quantencomputer und Quanteninformationstheorie verstanden werden.
Quantencomputer	Eine Rechenmaschine, die so konstruiert ist, dass sie die Zustandsveränderung von Quanten messen kann, weshalb sie mit geeigneten Algorithmen für praktische Berechnungen programmiert werden kann.
Quantencomputing	Quantencomputing bedient sich der Quantenphysik, um in kürzester Zeit aufwendige Berechnungen anstellen zu können. Dabei wird anders als bei klassischen Rechnern mit Qubits gearbeitet, die alle Zustände zwischen 0 und 1 gleichzeitig einnehmen können.
Quantenimaging	Quantenimaging ist ein neues Feld der Quantenoptik, das Quantenkorrelationen wie Quantenverschränkung ausnutzt, um Objekte mit einer Auflösung abzubilden, die über das hinausgeht, was mit klassischer Optik möglich ist.
Quantenkryptographie/ Quantenschlüsselübertragung	Quantenschlüsselübertragung (QKD) ist eine sichere Übertragungsmethode unter Ausnutzung quantenmechanischer Eigenschaften von Objekten, mit der ein sicheres Kryptographieprotokoll realisiert werden kann.
Quantenlithographie	Als Quantenlithographie werden photolithographische Verfahren bezeichnet, die die quantenmechanischen Eigenschaften des Photonenfelds ausnutzen, um eine gegenüber den herkömmlichen (»klassischen«) Verfahren verbesserte Leistungsfähigkeit zu erreichen und insbesondere das Beugungslimit des Auflösungsvermögens zu überwinden.
Quantenmechanik	Die Quantenmechanik ist eine physikalische Theorie, mit der die Eigenschaften und Gesetzmäßigkeiten von Zuständen und Vorgängen der Materie beschrieben werden. Im Gegensatz zu den Theorien der klassischen Physik erlaubt sie die zutreffende Berechnung physikalischer Eigenschaften von Materie im Größenbereich der Atome und darunter.
Quantenmechanische Effekte	Physikalische Effekte, zu deren Erklärung die Quantenmechanik herangezogen werden muss
Quantenmetrologie	Quantenmetrologie ist das Studium der Durchführung hochauflösender und hochempfindlicher Messungen physikalischer Parameter unter Verwendung der Quantentheorie zur Beschreibung der physikalischen Systeme.
Quantenobjekt	Siehe Quant
Quantenprozessor	Einheit innerhalb eines Quantencomputers, in dem die Quanten-Operationen stattfinden

Begriff	Erklärung
Quantenradar	Ein Quantenradar ist eine Fernerkundungstechnologie, die auf quantenmechanischen Effekten wie der Quantenverschränkung basiert.
Quantenrepeater	Quantenrepeater werden in der Quantenkommunikation bei der Übertragung großer Distanzen zwischen Sendenden und Empfangenden eingesetzt, um Übertragungsfehler auszugleichen.
Quantenschlüsselübertragung	siehe Quantenkryptographie
Quantensensoren	Sensoren, die Quanteneffekte ausnutzen, um winzige Änderungen der Messgröße nachzuweisen.
Quantensensorik	Die Anwendung von Quantensensoren zur Messung verschiedener Eigenschaften
Quanten-SVM-Algorithmen	Berechnung eines klassischen unterstützten Machine Learning-Algorithmus 'support vector machine' (SVM) mit Quantenalgorithmen. Im Detail wird hier ein Teil der Berechnung der sehr rechenintensiven hyperplane mittels nichtlinearer Transformationen durchgeführt.
Quantentechnologien	Technologien, die Quanteneffekte ausnutzen, um neuartige Verfahren zu realisieren, die mit herkömmlichen Methoden und Mitteln nicht möglich sind.
Quantenteleportation / Teleportation von Quantenzuständen	Quantenteleportation heißt ein Verfahren der Quantenkommunikation, welches die Quanteneigenschaften – das heißt, den Zustand eines Systems (Quelle) auf ein anderes, möglicherweise entferntes System (Ziel) – überträgt.
Quantenüberlegenheit (Quantum Supremacy)	Mit Quantenüberlegenheit (englisch: Quantum Supremacy) wird die Überlegenheit von Quantencomputern gegenüber klassischen Supercomputern bei der Lösung eines komplexen Problems bezeichnet. Gemeint ist der Zeitpunkt, ab dem ein Quantencomputer eine Aufgabe in akzeptabler Zeit lösen kann, für die ein Computer, dessen Technik auf herkömmlicher Digitaltechnik basiert, eine nicht realisierbare Rechenzeit benötigen würde.
Quantenverschränkung	Bei der Verschränkung gehen die Quantenzustände von Teilsystemen über in einen neuen, verschränkten Zustand des Gesamtsystems. Das Gesamtsystem erstreckt sich dabei über alle Teilsysteme. Operationen auf ein Teilsystem wirken sich damit unmittelbar auf die anderen Teilsysteme aus, unabhängig von deren räumlichen Entfernung.
Quantenzustände	Quantenzustände werden mathematisch meist durch einen Zustandsvektor im Hilbert-Raum beschrieben. Bei der Messung kollabiert der Quantenzustand in einen klassischen Zustand, der weniger Informationen enthält. Deswegen nehmen Quantenzustände – außer sie befinden sich in ihrem Eigenzustand – immer nur mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit einen möglichen Messwert an.
Quantum as a Service (QaaS)	Bereitstellung von quantencomputerbasierenden Services in der Cloud

Begriff	Erklärung
Quantum Machine Learning	Erweiterung von klassischen Machine Learning-Algorithmen mit Quantenalgorithmen
Qubit	Qubits (Quantenbits) sind die elementaren Recheneinheiten eines Quantencomputers. Im Vergleich zu herkömmlichen Bits, die jeweils nur den Wert 0 oder 1 repräsentieren können, können Qubits mehrere Zustände gleichzeitig annehmen.
SI-Einheiten	Das international gültige SI-Einheitensystem ist die moderne Form des metrischen Systems. Die Basiseinheiten sind Sekunde (s) für die Zeit, Meter (m) für die Länge, Kilogramm (kg) für die Masse, Ampere (A) für die Stromstärke, Kelvin (K) für die Temperatur, Mol (mol) für das Stoffgewicht und Candela (cd) für das Licht.
Stochastische Störung	Störungen, die unvorhergesehen eintreten
Superpositionszustand	Ein quantenmechanischer Zustand, der aus einer Überlagerung zweier anderer Zustände hervorgeht. Ein analoges Beispiel sind zwei Wasserwellen, die sich überlagern.
Supraleitende Zustände	Supraleiter befinden sich unterhalb einer materialspezifischen Sprungtemperatur in supraleitenden Zuständen – das heißt, Strom fließt widerstandsfrei durch einen Leiter. Supraleitung ist ein makroskopischer Quantenzustand, der durch die Paarbildung von Elektronen (Cooper-Paare) erklärt werden kann.
Zustandsräume	Menge aller möglichen quantenmechanischer Zustände

Bitkom vertritt mehr als 2.000 Mitgliedsunternehmen aus der digitalen Wirtschaft. Sie erzielen allein mit IT- und Telekommunikationsleistungen jährlich Umsätze von 190 Milliarden Euro, darunter Exporte in Höhe von 50 Milliarden Euro. Die Bitkom-Mitglieder beschäftigen in Deutschland mehr als 2 Millionen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter. Zu den Mitgliedern zählen mehr als 1.000 Mittelständler, über 500 Startups und nahezu alle Global Player. Sie bieten Software, IT-Services, Telekommunikations- oder Internetdienste an, stellen Geräte und Bauteile her, sind im Bereich der digitalen Medien tätig oder in anderer Weise Teil der digitalen Wirtschaft. 80 Prozent der Unternehmen haben ihren Hauptsitz in Deutschland, jeweils 8 Prozent kommen aus Europa und den USA, 4 Prozent aus anderen Regionen. Bitkom fördert und treibt die digitale Transformation der deutschen Wirtschaft und setzt sich für eine breite gesellschaftliche Teilhabe an den digitalen Entwicklungen ein. Ziel ist es, Deutschland zu einem weltweit führenden Digitalstandort zu machen.

Bitkom e.V.

Albrechtstraße 10
10117 Berlin
T 030 27576-0
bitkom@bitkom.org

bitkom.org

bitkom