



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

Neue Supertechnologien kommen in Reichweite

9. Dezember 2021

Autor

Hermann P. Rapp
+49 69 910-43893
hermann-paul.rapp@db.com

Editor

Stefan Schneider

Deutsche Bank AG
Deutsche Bank Research
Frankfurt am Main
Deutschland
E-Mail: marketing.dbr@db.com
Fax: +49 69 910-31877

www.dbresearch.de

DB Research Management
Stefan Schneider

Quantum 2.0 wird neue Supertechnologien hervorbringen, die unser Leben und unsere Arbeit massiv verändern und ein neues Zeitalter prägen. Fortschritte in der Quantenforschung ermöglichen es Unternehmen, in den kommenden Jahren marktreife Anwendungen in den unterschiedlichsten Bereichen zu entwickeln – von Quantenrechnern und Quantennetzwerken als Bestandteile eines neuen leistungsstarken Quanteninternets, Quantensoftware und Echtzeit-Anwendungen für autonome Systeme bis hin zu Biomedizin, Pharmazie und Raumfahrt, neuartigen nanotechnologiebasierten Materialien und vielen weiteren Anwendungen.

Quantum 2.0-Supertechnologien haben das Potenzial, über Jahrzehnte enorme Produktivitäts- und Wachstumsschübe zu ermöglichen, wie auch bereits durch Quantum 1.0 seit den 1960er Jahren beim Aufbau moderner Industrie- und Informationsgesellschaften. Innovationsfreundliche Rahmenbedingungen werden dafür mitentscheidend sein.

Bereits heute existiert ein Quantenökosystem aus Start-ups und großen Unternehmen unter Beteiligung von mehr als 60 Ländern. Während es noch zu früh ist, um künftige Marktgrößen präzise vorherzusagen, werden die globalen Märkte für verschiedene Quantentechnologien bereits heute auf über 1 Billion USD geschätzt (UK Government Office for Science, 2016: S. 56), angeführt von Photonik, Halbleitern und Cybersicherheit.

Quantentechnologien werden die Wirkung von digitalen Transformationsprozessen nochmals beschleunigen. Für Unternehmen ist es essenziell zu entscheiden, ob sie „Quantum ready“ werden wollen – durch eine eventuelle Anpassung der Geschäftsmodelle und ein neues Denken in Bezug auf Daten, Prozesse sowie eine innovative Unternehmenskultur inkl. Talentmanagement.

Der Wettbewerb zwischen Unternehmen wird sich durch Quantum 2.0 verschärfen. Regionale und globale Liefer- und Wertschöpfungsketten könnten aufgebrochen werden und neue Geschäftsmodelle entstehen. Auf internationaler und diplomatischer Ebene hat Quantum das Potenzial, die Erreichung politischer, wirtschaftlicher und sozialer Ziele und eines nachhaltigen ökologischen Umbaus zu unterstützen.



Inhalt

A. Einführung: Wirtschaft und Gesellschaft werden sich durch Quantum 2.0-Technologien verändern	3
Gesamtgesellschaftliche Wirkungen	4
Wirkungen auf Innovation	4
Folgen für Sicherheit	4
Statistische Methodologie	5
B. Die erste und zweite Quantenrevolution	5
Quantum 1.0: Die Technologiebasis moderner Industrie- und Informationsgesellschaften	5
Quantum 2.0: Zukünftige Quantensuperttechnologien	6
Industrie, Produktion & Logistik	6
Gesundheitswesen, Medizin, Pharmazie und Biotechnologien	6
Banken und Versicherungen	7
Arbeitswelt und Kommunikation	7
Klimaforschung und ökologische Transformation	7
Unterhaltung	7
Einzelhandel und Supermärkte	8
Quantum-KI	8
Übersicht: Von Quantum 1.0 zu Quantum 2.0	8
Von der Quantenforschung bis zur industriellen Nutzung von Quantentechnologien	9
C. Quantentechnologie, Photonik und Plasmonik	10
D. Quantencomputer: Ein ergebnisoffenes globales Wettrennen	11
Quantum-Hardwarestrategien	11
Quantencomputer: Die Überwindung digital-binärer Grenzen	12
Quantenvorteil: Wurde ein spektakulärer Meilenstein erreicht?	13
Wann steht ein leistungsfähiger kommerziell einsetzbarer Quantenrechner zur Verfügung?	14
Patente auf dem Gebiet des Quantenrechnens	15
E. Quantensoftware	16
Gegenüberstellung von Digitalrechnen und Quantenrechnen	17
Unterschied zwischen digitalen und quantenbasierten Rechenmethoden ..	18
Primzahlenberechnung und Verschlüsselungsverfahren	18
Quantenlogistik	20
F. Quantenkommunikation: Hochleistungsnetze und die Vision eines Quanteninternets	20
G. Globale Ansätze zur Unterstützung von Quantentechnologien	22
Nationale Quantenstrategien und Initiativen	22
Quantenökosystem	23
USA	24
VR China	24
Europäische Union (EU-27)	25
H. Quantum readiness: Szenarioanalyse und neues Denken	26
Bibliografie	27



A. Einführung: Wirtschaft und Gesellschaft werden sich durch Quantum 2.0-Technologien verändern

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts entstand die Moderne Quantenmechanik und damit das Wissen über die Naturgesetze im subatomaren Bereich. Lichtenergie wird seither nicht mehr als kontinuierlich im Raum verteilt verstanden, sondern es tritt als Energiepakete auf, die als Photonen bzw. Energiequanten bezeichnet werden. Max Planck¹ hat dafür 1901 den Begriff Quanta² eingeführt, um die Zustände von Energiequanten zu beschreiben. Neben Planck haben an den experimentellen und theoretischen Durchbrüchen viele weitere Wissenschaftler der Physik, Chemie und Mathematik zusammengearbeitet³, von denen einige Nobelpreise erhielten, u.a. Niels Bohr, Marie Sklodowska-Curie, Albert Einstein, Louis de Broglie, Werner Heisenberg, Erwin Schrödinger, Felix Bloch und Max Born. Seitdem werden die Grenzen der Wissenschaft immer weiter verschoben und in immer mehr Bereichen entstehen angewandte Forschungsprojekte.

Quantenforschung

1



Quelle: Deutsche Bank Research, 2021

Etwa seit dem Jahr 2000 befinden wir uns in der Anfangsphase der zweiten Quantenrevolution (Quantum 2.0). Das Jahr 2015 wurde von den Vereinten Nationen als das „Internationale Jahr des Lichts und der lichtbasierten Technologien“⁴ ausgerufen. Inzwischen hat der globale Wettlauf um neue Supertechnologien durch hohe öffentliche Investitionen im Milliardenbereich und die Beteiligung von renommierten Forschungseinrichtungen und Universitäten an Fahrt gewonnen und ist zunehmend getrieben durch private Investitionen und die Aktivitäten internationaler Technologieunternehmen. Derzeit wird in einer Vielzahl von Branchen und akademischen Disziplinen an Anwendungsfällen für Quantum 2.0 gearbeitet. Wie viele Jahre einzelne quantenbasierte Anwendungen bis zur Marktreife brauchen werden, ist Gegenstand ganz unterschiedlicher Einschätzungen. Die entsprechenden Quantentechnologien sind jedoch größtenteils noch im Forschungsstadium bzw. industriell noch nicht effektiv einsetzbar. Allerdings wird sich dies im nächsten Jahrzehnt dramatisch ändern – und für einige Quantentechnologien auch schon früher.

Heute sind die Quantenforschung und Quantentechnologien sich schnell entwickelnde Bereiche mit vielen forschungsintensiven Teilgebieten und einer Mischung von Technologien, die teils voneinander abhängig sind bzw. sich gegenseitig ergänzen und in ihrer Wirkung verstärken. Zusammen mit Schlüsseltechnologien wie Photonik, Nanotechnologie und Künstlicher Intelligenz eröffnen sich durch Quantum 2.0 neuartige und faszinierende Perspektiven, die ein neues Quantenzeitalter prägen werden, das unsere Zukunft so entscheidend beeinflussen könnte wie das Zeitalter der Elektrizität seit den 1920er Jahren und das der Elektronik seit den 1960er Jahren. Während dafür noch eine Reihe entscheidender technisch-wissenschaftlicher Durchbrüche notwendig sind, ist es sowohl aus technischer, unternehmerischer und investiver Sicht als auch für eine Gesellschaft als Ganzes wichtig, vorausschauend die Chancen und Herausforderungen zu verstehen und zu diskutieren.

¹ Für seine Entdeckung der Lichtquanten wurde Max Planck der Nobelpreis für Physik 1918 verliehen.
² Quantum [Lat.] = wie groß, wie viel
³ Einen Überblick über die Gemeinschaft der beteiligten Forschenden gibt ein Projekt des MPI für Wissenschaftsgeschichte und die daraus entstandenen Publikationen:
<https://www.mpiwg-berlin.mpg.de/de/feature-story/die-netzwerke-der-fruehen-quantentheorie>
⁴ <https://www.light2015.org/Home.html>, <http://www.jahr-des-lichts.de/>



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

Studien zur Technikfolgenabschätzung von Quantentechnologien⁵ können dabei helfen, die Wirkungen neuer Technologien auf die gesellschaftliche, wirtschaftliche und ethisch-soziale Dimension eines neuen Quantenzeitalters einzuordnen. Warnend hat allerdings Niklas Luhmann⁶ darauf hingewiesen, dass „mehr als für jede andere Gesellschaft [...] erfolgsversprechende Forschungsmöglichkeiten bereit“ sind und „zugleich [...] aber damit auch das Nichtwissen [steigt], und zwar überproportional.“

Mit Bezug auf die Folgen von Quantentechnologien ergeben sich Themen wie beispielsweise:

Gesamtgesellschaftliche Wirkungen

- Demokratie und Medien: Quantum Internet, Medienkompetenz, Partizipation
- Soziale Effekte der Beschleunigung der Arbeitswelt und Kommunikation
- Soziale Homogenität in einer High-Tech-Informationsgesellschaft
- Eigentumsrechte an persönlichen und sozialen Daten und souveräne Identität

Wirkungen auf Innovation

- Quantentechnologien und Innovationsmanagement
- Zugang zu Quantentechnologien (z.B. durch kleine und mittlere Unternehmen)
- Auswirkungen von Quantentechnologien auf einzelne Industrien und Lieferketten
- Auswirkungen spezifischer Innovationen⁷

Folgen für Sicherheit

- Cyberangriffe mit zukünftigen Quantentechnologien
- Risiken moderner Kryptografie durch quantenbasierte Entschlüsselung und Quantencodes⁸, bis zur Erreichung einer Post-Quantum Kryptographie

⁵ Arge ITA-AIT Parlament (2021). Zukunft der Quantentechnologie: Quantumcyberkrieg oder leistbares Quanteninternet für alle? Foresight und Technikfolgenabschätzung: Monitoring von Zukunftsthemen für das Österreichische Parlament. US Government Accountability Office (GAO) (2020). Science & Tech Spotlight – Quantum Technologies. Schweizer Wissenschaftsrat (2020). Quantentechnologie in der Schweiz. Enzweiler, Kai et al. (2018). Quantencomputer. TAB - Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin.

⁶ Luhmann, Niklas (1997). Die Gesellschaft der Gesellschaft. Suhrkamp Verlag, Frankfurt a.M., S. 1111.

⁷ Beispielsweise sollen in dem EU Quantum Flagship Projekt CiViQ neben den technologischen Aspekten einer zukünftigen Integration von Quantenkommunikation (QKD) in optische Telekommunikationsnetze auch Fragestellungen zu den langfristigen ethisch-sozialen Veränderungen berücksichtigt werden. URL: <http://civiquantum.eu/>

⁸ World Economic Forum (WEF) (2019). The Global Risks Report 2019. 14th Edition. Geneva. BSI (2020). Entwicklungsstand Quantencomputer. Berlin.



Statistische Methodologie

- Statistische Erfassung und Analyse der Wertbeiträge von digitalen Dienstleistungen und einzelnen Technologien bzw. Technologiesektoren

Diese Publikation gibt eine kurze Einführung in die gerade entstehenden Quantentechnologien und Impulse zu den damit verbundenen Chancen und Herausforderungen, um das Potenzial von Quantum 2.0 nicht nur technisch, sondern auch wirtschaftlich, ökologisch und sozial sinnvoll einzusetzen.

B. Die erste und zweite Quantenrevolution

Quantum 1.0: Die Technologiebasis moderner Industrie- und Informationsgesellschaften

Aufbauend auf den Erkenntnissen der modernen Quantenmechanik und Photonik entstanden seit Mitte des 20. Jahrhunderts in vielfachen Innovationszyklen diejenigen Technologien, die heute die technische Basis der modernen Informationsgesellschaft bilden. Anwendungen der ersten Quantenrevolution (Quantum 1.0) wurden seit den 1950er Jahren entwickelt und werden seit Jahrzehnten industriell eingesetzt. Die moderne Elektronik, Quantenelektronik⁹ und Opto-Elektronik basieren weitgehend auf angewandter Quantentheorie¹⁰. Im Bereich der Computer- und Netzwerktechnologien ist die wichtigste Basistechnologie die Mikroelektronik¹¹, die integrierte Schaltungen auf Transistoren und Halbleitern im Mikrobereich ermöglicht. Weitere Basistechnologien sind optoelektronische Bauelemente und Übertragungsmedien (insbesondere die Glasfasertechnologie) für die Datenhöchstgeschwindigkeitskommunikation in modernen Netzwerken. Weitere Beispiele sind Mikrowellen- und Lasertechnologien (z.B. Industrielaser zur Materialbearbeitung), Lichtdioden in CD- und DVD-Abtastern bzw. -brennern, elektrische Haushaltsgeräte mit Mikroelektronik, Satelliten- und Navigationssysteme, das Internet und mobile Kommunikation mit Smartphones.

Über Jahrzehnte haben quantenbasierte Technologien enorme Produktivitäts- und Wachstumsschübe ermöglicht. Eine 2019 veröffentlichte Studie¹² mit Daten von Eurostat für den Zeitraum 2011-2016 besagt, dass industriell angewandte Physik in der EU einen Nettobeitrag zur Wirtschaft von mindestens 1,45 Billionen Euro pro Jahr – oder 12 Prozent – leistet und damit einen höheren Beitrag liefert als Einzelhandel (4,5 Prozent), Finanzdienstleistungen (5,3 Prozent) oder Baugewerbe (5,3 Prozent).

⁹ Auf dem Gebiet der Quantenelektronik wurde der Nobelpreis für Physik 1964 an Charles Hard Townes, Nikolai Bassow und Alexander Prochorow verliehen. Für die Grundlegung der Quantenelektrodynamik erhielt Richard Feynman 1965 zusammen mit Shin'ichiro Tomonaga und Julian Schwinger den Nobelpreis für Physik.

¹⁰ Mitin, Vladimir et al. (1999). Quantum Heterostructures: Microelectronics and Optoelectronics. Cambridge University Press.

¹¹ Aicher, Wolfgang et al. (1998). Technologische Grundlagen. In: Jung, Volker und Hans-Jürgen Warnecke (Hrsg.) Handbuch für die Telekommunikation. Springer Verlag, Berlin/Heidelberg.

¹² European Physical Society (EPS) (2019). The Importance of Physics to the Economies of Europe. A study by Cebr for the period 2011-2016. Mülhausen, Frankreich.



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

Quantum 2.0: Zukünftige Quantensupertechnologien

Die Erforschung und Entwicklung von Quantum 2.0¹³-Technologien geschieht seit mehr als zwei Jahrzehnten durch Forschungsinstitute und Industrielabore weltweit. Ein solches Gebiet ist beispielsweise die Quanteninformatik, die sich u.a. mit Quantennetzwerken, Quantensensorik und quantenbasierter Simulation mit entsprechender Quantensoftware beschäftigt und industriell relevante Lösungen und Ansätze erforscht.

In Schlüsselbereichen von Industrie- und Wirtschaft wird Quantum 2.0 tiefgreifende Veränderungen bewirken, die zu einer Erhöhung bei Produktivität, Wachstum und Wettbewerbsfähigkeit führen. Damit wird eine neue Generation von Produkten und Dienstleistungen ermöglicht, beispielsweise in den folgenden Bereichen:

Industrie, Produktion & Logistik

- Optimierung von Industrieproduktion und Prozessen in unterschiedlichsten Bereichen durch bessere Planungs- und Designinstrumente
- Quantenbasierte Simulationstechniken, z.B. zur Entwicklung und Simulation neuer Materialien und Fertigungsverfahren
- Quantenbasierte Optimierungsberechnungen und verbesserte Messtechnik in Fertigung und Produktion
- Quantenbasierte Echtzeit-Modelle, die in der Quantenlogistik zu optimierter Routenplanung führen und einer höheren Effizienz und Effektivität von Lieferketten, optimierter Verkehrssteuerung und einer verbesserten Koordination verschiedener Verkehrsträger.
- Quantenbasierte Modellierungen werden beispielsweise in der Chemie (Computational Chemistry) oder Biologie (Computational Biology) genutzt, um neue Medikamente und Impfstoffe zu erproben.
- Neue 3D- und 2D-Materialien können durch neuartige nanotechnologische Herstellungs- und Messverfahren erforscht und hergestellt werden. Beispiele hierfür sind Graphen, Quantenpunkte (Quantum Dots) oder Nanokristalle.

Gesundheitswesen, Medizin, Pharmazie und Biotechnologien

- Quantenbildgebung und Quantensensorik können Diagnostik und Monitoring von Patienten erheblich verbessern – sowohl in klinischen als auch privaten Umgebungen.
- Optische Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung (VLC) für Monitoring und Positionsbestimmung von Patienten in Innenräumen
- Quantenbasierte Simulationen können die Entwicklung von neuen Medikamenten und Impfstoffen verbessern und beschleunigen.
- Anwendungen von neuen Verfahren (z.B. „Quantum Dots“) in der Molekularbiologie
- Bioimplantate im Nanobereich mit quantenbasierter Kommunikation

¹³ Die Bezeichnung „Quantum 2.0“ für neu entstehende Quantentechnologien wurde von Pritchard und Till 2014 in einer Veröffentlichung über die britische Quantentechnologie-Landschaft geprägt. Sie prognostizierten, dass die durch Quantum 2.0 ermöglichten Technologien eine „zweite Quantenrevolution“ auslösen würden. Inzwischen wird der Begriff „Quantum 2.0“ in vielen Publikationen und Regierungsprogrammen benutzt.



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

Banken und Versicherungen

- Risikoberechnungen¹⁴ (potenziell in Echtzeit)
- Simulation und Modellierung von Finanzmärkten und Kaufverhalten
- Chatbots und Robo Advisors für „menschlicher“ wirkende Kundendialoge, um in Echtzeit eine bessere Beratung mit passgenauen Produkten (durch quantenbasierte Modellierungen) anzubieten.¹⁵
- Beschleunigung des elektronischen Zahlungsverkehrs
- Ermittlung von Einsparpotenzialen durch Analyse von Ausgabenmustern und Anomalien, um Verbesserungen vorzuschlagen

Arbeitswelt und Kommunikation

- Aufbau und Betrieb eines Quanteninternet, das um Dimensionen schneller sein wird als bisherige Höchstleistungscomputernetzwerke
- Beschleunigung der Kommunikation und Zusammenwirken mit KI (Quantum AI)
- Hochgeschwindigkeits-Kommunikation mit sichtbarem Licht (Visible Light Communication, VLC) im Nahbereich von Innenräumen mit Mikro-LEDs
- Kommunikation und Infotainment per Mikro-LEDs (VLC) in Flugzeugen ohne elektromagnetische Effekte während des Fluges
- Echtzeit-Analyse des Verhaltens komplexer Systeme mit beliebig vielen Teilnehmern
- Entscheidungsvorbereitung mit Quantenrechnern (schnelle Simulation und Kombinatorik)

Klimaforschung und ökologische Transformation

- Neuartige quantenbasierte Modellrechnungen in der Klimaforschung
- Optimierte Logistik (bessere Verkehrssteuerung)
- „Grüne Photonik“, z.B. photonische statt elektronischer Anwendungen und Geräte, die statt Elektrizität Licht verwenden, keine Hitze produzieren und somit Reibungsverluste vermeiden, was eine weitere Miniaturisierung im Nanobereich durch das Wegfallen von Kühlung und Lüftern ermöglicht
- Realisierung einer Low-Carbon-Society mit Smart City-Infrastruktur und Quantum-Internet
- Unterstützung globaler Technologie-Hubs, um den Technologie-Transfer von GreenTech zu beschleunigen

Unterhaltung

- Neue Entertainment- Formen und weitergehende Möglichkeiten, die sich durch quantenbasiertes Echtzeit-Feedback und das Mitspielen einer sehr großen Anzahl von Spielern bzw. ganzer Gemeinschaften ergeben.

¹⁴ <https://arxiv.org/pdf/2103.05475.pdf>

¹⁵ Karasu, Ibrahim (2021). Auswirkungen auf die Banken: Quantencomputer und KI – erfolgreiches Zusammenspiel? KI-Note. Online Magazin.



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

- Eine nächste Generation von Spielen in Echtzeit verbunden mit Augmented Reality/Virtual Reality
- Smart City-Infrastruktur und Quantum-Internet

Einzelhandel und Supermärkte

- Positionsbestimmung von Kunden und Wegesignalisierung zu Angeboten per VLC
- Optimierte Planung und Logistik

Quantum-KI

- Die Kombination mit Quantenrechnen könnte Künstliche Intelligenz in vielen Aspekten voranbringen, z.B. in Bezug auf Rechenkapazität, die Verarbeitung großer Datenmengen (Big Data) in Simulationen und bei Analysen mit hoher Komplexität (z.B. in der Kombinatorik).
- Ein Beispiel für eine Initiative zur Entwicklung einer Plattform und eines Ökosystems für Quantenunterstützte Künstliche Intelligenz ist PlanQK¹⁶, die von einem Konsortium geleitet und vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie gefördert wird.

Übersicht: Von Quantum 1.0 zu Quantum 2.0

Die folgende Tabelle dient eher als ein vereinfachtes didaktisches Hilfsmittel als eine präzise Darstellung der Innovationsgeschichte. Sie hat sich jedoch als nützlich erwiesen, um einige Aspekte der Quantenrevolution zu veranschaulichen:

Vergleich zwischen Quantum 1.0 und Quantum 2.0

2

	Quantum 1.0	Quantum 2.0
Zeitperiode	20. Jahrhundert: das Jahrhundert des Elektrons	21. Jahrhundert: das Jahrhundert des Photons
Moderne Quantenmechanik	Theoretisches Fundament (Interferenz, Superposition und Verschränkung) Schrödingers Gleichung	Quantum Computing, Photonik, Quantengatter, Quantenalgorithmien Quanteninformation
Technologien	- Mikrotechnologie Mikrodimension = 1 mm/1000 - Elektronik - Optik (Laser, Mikrowellen, Glasfaser, Atomuhren)	- Nanotechnologie (atomare und subatomare Niveaus) Nanodimension = 1 nm/1 Mio - Quantum - Photonik, Plasmonik
Industrielle Nutzung	1950s – heute: Computer, Laser und Maser, LEDs, GPS, Magnetresonanzverfahren, Atomuhren, Satellitennavigation u.v.a.	Zukünftig: Quanteninformatik und Photonik, Anwendungen auf unterschiedlichen Gebieten (teils als Nanotechnologie)
Kommunikation	Computer, Smartphones, Elektronische Computernetzwerke, Internet	Quanten-Internet, Quanteninformatiknetzwerke, Komplexe Sensornetzwerke (Internet of Things, IoT)
Sicherheit	Konventionelle Verschlüsselung	Post-Quantum Kryptographie
KI	Maschinenlernen (ML), Deep Learning	Quantum-ML Quantenalgorithmien Echtzeit-Feedback durch quantenbasierte Simulationen

Quelle: Deutsche Bank Research

¹⁶ <https://planqk.de/en/partners/>



Von der Quantenforschung bis zur industriellen Nutzung von Quantentechnologien

Bis Ideen aus der Grundlagenforschung erfolgreich industriell genutzt werden können, ist das Durchlaufen mehrerer Phasen notwendig.

Von der Grundlagenforschung bis zur industriellen Nutzung

3



Deutsche Bank Research

In der Wissenschaftsgeschichte und Innovationsforschung gibt es unzählige Beispiele für erfolgreiche und teils umwälzende Innovationen, aber auch für eine Vielzahl kostspieliger Irrwege und gescheiterter Versuche. Ein Beispiel für die Entwicklungspfade, die sich aus der Grundlagenforschung bis hin zur industriellen Nutzung oft über Jahrzehnte hinziehen, ist die Erfindung blauer LEDs durch drei japanische Forscher, Shuji Nakamura¹⁷, Isamu Akasaki und Hiroshi Amano. Für ihre Entwicklung von LED-Halbleitern in den 1990er Jahren, die blaue Lichtstrahlen emittieren, wurde ihnen der Nobelpreis für Physik im Jahre 2014 verliehen. Seit den 1960er Jahren war nach der Erfindung von roten und grünen LEDs versucht worden, auch blaue LEDs herzustellen. Erst nach einer langen Reihe von Durchbrüchen in der Materialphysik, bei der Kristallzüchtung, in der Gerätephysik und in der optischen Physik gelang dies durch die Herstellung von sog. Quantentöpfen (Quantum Wells), das sind spezifisch gestaltete molekulare Kristallstrukturen (Quantenfilme), die als Halbleiter bestimmte Lichtfrequenzen emittieren. Heute ist durch blaue in Kombination mit den zuvor schon entwickelten roten und grünen Lichtdioden weißes Licht mit LED-Strahlern möglich. Die Nutzung von LEDs als energieeffiziente und umweltfreundliche Leuchtmittel führt zu einer signifikanten Reduzierung des globalen Energieverbrauchs und längeren Wartungsintervallen gegenüber der bisherigen Nutzung von Glühbirnen oder Leuchtstofflampen in Privathaushalten, in Unternehmen und in der Verkehrstechnik, da 20-30% des Stroms in Industriestaaten für Beleuchtung verbraucht werden.

Eine der Hoffnungen, die in die praktische Anwendung von Quantentechnologie gesetzt wird, ist es, durch Simulationen und Modellrechnungen die Entwicklungszeiten zukünftiger Innovationen bis zur Markteinführung verkürzen zu können und die Erfolgswahrscheinlichkeiten zu erhöhen, beispielsweise bei Entwicklung und Test neuer Materialien und Verfahren. Ebenso kann Quantentechnologie in Verbindung mit „Grüner Photonik“ durch eine neue Generation von photonischen Geräten zu einem intelligenteren und effizienteren Energie- und Rohstoffkonsum beitragen.

¹⁷ Nakamura, Shuji (2000). The Blue Laser Diode. The Complete Story. Springer-Verlag, Berlin/Heidelberg. Zweite Auflage. (Erstauflage 1997)



C. Quantentechnologie, Photonik und Plasmonik

Photonik¹⁸ und Quantentechnologie überlagern sich als Forschungsbereiche, da Licht auf Photonen¹⁹ basiert und ein komplexes Phänomen darstellt, das als Energiequanten eine elektromagnetische Strahlung aufweist und sowohl aus Lichtwellen als auch aus Lichtpartikeln besteht. Quantentechnologiesysteme nutzen Licht in atomaren und subatomaren Dimensionen. Aktuell wird an einer neuen Generation von photonischen Geräten in der Nachfolge von elektronischen Geräten geforscht und gearbeitet.

Plasmonik²⁰ ist dabei eines der wichtigsten Gebiete der Photonik, das sich u.a. mit der Züchtung von winzigen Kristall- und Faserstrukturen im atomaren Bereich beschäftigt, die Lasersignale mit hoher Leistung übertragen können und als Komponenten für zukünftige Quanteninformationsnetzwerke dienen sollen. Der Begriff Plasmon bezieht sich dabei auf ein Lichtquant bei einer Anregung durch Energiestrahlung in Festkörpern, beispielsweise die Beugung von Licht in einem Kristall. Dabei wird die Möglichkeit genutzt, Licht unterhalb der Beugungsgrenze²¹ zu bündeln und zu leiten, was eine neue Generation von hochminiaturisierten photonischen Geräten, eine radikal neue Glasfasertechnologie oder auch Computerchips auf Photonikbasis ermöglichen wird.

Beispiele für industrielle Anwendungen aus der Nanophotonik sind neuartige Strukturen in Nanometergröße, wie z.B. Quantendrähte, maßgeschneiderte Quantenpunkte (Quantum dots) als Einzelphotonenquellen, holografische optische Elemente (HOEs) und photonische Kristalle (PhCs), die seit Anfang der 2000er Jahre hergestellt werden können durch Fortschritte in der Herstellungstechnik. Diese Bauelemente ermöglichen sowohl eine weitere Miniaturisierung im Nanobereich als auch eine erhöhte Leistung integrierter optischer Schaltungen²² als Basis für zukünftige Rechner und Quantennetzwerke.

Ein weiteres Beispiel aus der Photonik ist die Kommunikation mit sichtbarem Licht (Visible Light Communication, VLC) im Nahbereich, wofür es seit 2015 einen IEEE-Standard gibt, und deren industrielle Einführung begonnen hat²³. Li-Fi²⁴ (Light Fidelity) hat das Potenzial, das bisherige funkbasierte WiFi (Wireless Fidelity) in Innenräumen abzulösen bzw. zu ergänzen, wobei eine sichere Hochleistungskommunikation mit Datenübertragung über Licht stattfindet (z.B. durch Mikro-LEDs²⁵), die von lichtsensiblen Empfängern (Photosensoren) aufgenommen und dann elektronisch weiterverarbeitet wird. Mit Li-Fi werden neuartige Anwendungen möglich, wie eine Positionsbestimmung in Innenräumen, wo GPS nicht empfangen werden kann, oder eine kabellose Datenübertragung im

¹⁸ Phos [griech.] = Licht. Der Begriff Photonik wurde 1967 von dem französischen Wissenschaftler Pierre Aigrain („La photonique“) geprägt und wie folgt definiert: „Photonik ist die Wissenschaft von der Nutzbarmachung des Lichts. Die Photonik umfasst die Erzeugung von Licht, die Erkennung von Licht, das Management von Licht durch Lenkung, Manipulation und Verstärkung und vor allem seine Nutzung zum Nutzen der Menschheit.“

¹⁹ Wöhrle, Dieter (2015). Was ist Licht? *Chemie in Unserer Zeit*, Vol. 49 (6), S. 386–401.

²⁰ Christensen, Thomas (2017). *From Classical to Quantum Plasmonics in Three and Two Dimensions*. Springer International, Cham.

²¹ Für die experimentelle Entdeckung der Elektronenbeugung durch Kristalle erhielten Clinton Davisson und George Paget Thomson den Nobelpreis für Physik 1937.

²² Hunsperger, Robert G. (2009). *Integrated Optics: Theory and Technology*. Springer Science + Business Media, New York. 6th edition.

²³ Rehman, Saeed Ur et al. (2019). *Visible Light Communication: A System Perspective – Overview and Challenges*. *Systems*, Vol. 19 (1153).

²⁴ Der Begriff Li-Fi wurde 2011 von Harald Haas in einem TED Global Talk erstmals eingeführt.

URL 1: <https://web.archive.org/web/20170608024336/>

URL 2: https://www.ted.com/talks/harald_haas_wireless_data_from_every_light_bulb

²⁵ Singh, James et al. (2020). Micro-LED as a Promising Candidate for High-Speed Visible Light Communication. *Applied Science*, Vol. 10, 7384.



Nahbereich unter Wasser²⁶. Kommunikation per Licht (Li-Fi) bietet in Verbindung mit dem Internet der Dinge (IoT) und neuen Funkbandbreiten (5G und 6G) zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten in Bereichen wie Bildung und Wirtschaft (Kabellose Hochgeschwindigkeitsdatenübertragung in Innenräumen durch Li-Fi), Luftfahrt (Kommunikation per Mikro-LEDs in Flugzeugen ohne elektromagnetische Effekte), Gesundheitswesen (Monitoring und Positionsbestimmung von Patienten in Innenräumen) und im Einzelhandel (Positionsbestimmung von Kunden und Wegesignalisierung zu Angeboten). Das Marktvolumen für VLC und Li-Fi wird bis 2026 auf 1.582,66 Mrd. USD geschätzt²⁷ (2020: 24,01 Mrd. USD) (CAGR 101% über den Prognosezeitraum 2021 - 2026).

D. Quantencomputer: Ein ergebnisoffenes globales Wettrennen

Die derzeitigen Aktivitäten, funktionierende Laborgeräte und kommerzielle Quantenrechner herzustellen, finden in einem hart umkämpften Wettbewerb statt, an dem weltweit Forschungslabore, große Technologieunternehmen und eine wachsende Zahl von Start-ups beteiligt sind. Da die Quantum Computing Forschung sich momentan sehr dynamisch entwickelt und immer wieder neue Durchbrüche und Ankündigungen gemeldet werden, sind ein Hype und eine aufgeregte Berichterstattung entstanden. Eine wissenschaftlich-skeptische Betrachtungsweise wird sowohl die enormen Leistungen und das Erreichen wichtiger Meilensteine anerkennen, als auch die weiterhin große Reihe an technischen Durchbrüchen im Blick behalten. An diesem Wettlauf beteiligen sich verschiedene Wettbewerber mit unterschiedlichen Hardware-Strategien, wobei es noch ungewiss ist, wer sich durchsetzen wird.

Quantum-Hardwarestrategien

Die Ideen zum Bau von Quantencomputern entstanden Anfang der 1980er Jahre. 1980 wurde erstmals von Paul Benioff vorgeschlagen²⁸, einen Quantenrechner als Turing Maschine zu bauen. Die Arbeiten von David Deutsch²⁹ zur Realisierung von Quantenrechnern auf der Basis von Quantengattern (Quantum Gates) waren ein weiterer wichtiger Meilenstein. Richard Feynman postulierte 1982, dass nur Quantenrechner Quantensysteme simulieren könnten.³⁰ David DiVincenzo formulierte 2000 einen Katalog von fünf Kriterien für fehlertolerante und skalierbare Quantenrechner (DiVincenzo-Kriterien³¹) und beschrieb verschiedene Ansätze für deren Bau. Heute sind die relevanten Konzepte, die von Unternehmen bei der Entwicklung von Quanten-Hardware verfolgt werden, sehr vielfältig und höchst unterschiedlich.

Jeder Ansatz ist mit einer Inkaufnahme von Vor- und Nachteilen verbunden. Ein praktischer Vergleich der Quantenrechner-Architekturen ist sehr schwierig, da die Vor- und Nachteile der jeweiligen Ansätze wenig vergleichbar sind.

²⁶ Schirripa Spagnolo, Giuseppe et al. (2020). Underwater Optical Wireless Communications: Overview. *Sensors*, Vol. 20, 2261.

²⁷ <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/visible-light-communication-market>

²⁸ Benioff, Paul (1980). The Computer as a Physical System: A Microscopic Quantum Mechanical Hamiltonian Model of Computers as Represented by Turing Machines. *Journal of Statistical Physics*, Vol. 22, No. 5, S. 563-591.

²⁹ Deutsch, David (1985). Quantum theory, the Church-Turing principle and the universal quantum computer. *Proceedings of The Royal Society London*, A 400, S. 97-117.

³⁰ Feynman, Richard P. (1982). Simulating Physics with Computers. *International Journal of Theoretical Physics*, Vol. 21, Nos. 6/7, S. 467-488.

³¹ DiVincenzo, David P. (2000). The Physical Implementation of Quantum Computation. *Fortschritte der Physik*, Vol. 9-11, S. 771-783.



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

Beispielsweise liegen beim Parameter Kohärenzzeit (d.h. der Dauer der stabilen Lage eines Quantencomputers) Ionenfallen mit ca. einigen Sekunden vorn, während supraleitende Quantencomputer derzeit eine Kohärenzzeit nur von wenigen Mikrosekunden erreichen. In Bezug auf Quantengatterzeiten (d.h. der Geschwindigkeit der Rechenoperationen) hat ein supraleitender Computer Werte im Nanosekundenbereich, während Ionenfallen nur Mikrosekunden erreichen. Architekturen auf der Grundlage von Ionenfallen können deswegen im derzeitigen Entwicklungsstadium längere und komplexere Algorithmen besser verarbeiten, während supraleitende Quantencomputer höhere Geschwindigkeiten erreichen, die aber bisher nur sehr kurz andauern. Ein wichtiger Faktor ist auch das technische Umfeld von Quantenrechnern. Supraleitende Quantencomputer müssen bis nahezu auf den absoluten Nullpunkt heruntergekühlt werden und benötigen Vakuum. Der Bau des ersten supraleitenden Quantencomputers von IBM außerhalb der USA in Ehningen bei Tübingen und damit der erste Quantencomputer in Deutschland, der im Juni 2021 u.a. von Bundeskanzlerin Angela Merkel eingeweiht wurde³², dauerte zwei Jahre, wobei viele Teile wegen der hohen Qualitätsanforderungen von Hand gefertigt werden mussten. IBM und Google nutzen den Ansatz supraleitender Quantenrechner, während beispielsweise Honeywell und IonQ Ionenfallen als Basis für ihre Quantencomputer verwenden.

Daneben gibt es noch weitere Ansätze wie die sog. Quanten-Annealer, die auf Qbits in supraleitenden Schaltkreisen basieren. Mit dem Quanten-Annealer-Ansatz lassen sich nicht die gleichen Quantenalgorithmen wie bei supraleitenden Quantencomputern implementieren, jedoch können damit bestimmte Optimierungen (z.B. Maschinenlernen oder Kombinatorik) effektiver gelöst werden. D-Wave und Fujitsu sind Unternehmen, die Quantenrechner auf der Basis von Quanten-Annealing produzieren. Ein völlig anderes Konzept wird dagegen beispielsweise vom US-Start-up Rigetti Computing angewandt, die Quantenprozessorchips entwerfen und bauen lassen.

Ein abschließendes Urteil, welches Konzept vorne liegen wird, ist noch nicht möglich. Der Quantenphysiker John Preskill hat für den derzeitigen Stand der Forschung an Quantencomputern den Begriff Noisy Intermediate Scale Quantum (NISQ)-Ära geprägt³³, wobei es mindestens ein Jahrzehnt dauern wird, bis neue Quantensysteme entdeckt oder bestehende Qbit-Systeme entscheidend verbessert werden. Die weitere Entwicklung der verschiedenen Ansätze muss deswegen aufmerksam verfolgt werden.

Quantencomputer: Die Überwindung digital-binärer Grenzen

Ein Quantencomputer ist eine Rechenmaschine auf Basis der Quantenmechanik, die in Quantensystemen mit einzelnen Photonen Energiezustände von Quantenbits (Qbits) erzeugt und durch Manipulation nutzt, um die Information zu kodieren und zu verarbeiten. Qbits haben die seltsam erscheinende Eigenschaft, dass sie gleichzeitig eine Reihe von Werten einnehmen („Superposition“). Digitale Computer, die nach den Gesetzen der klassischen Physik operieren, sind dagegen in der Zahl der Zustände beschränkt und arbeiten mit einem strengen Binärcode („0“ bzw. „1“).

³² <https://www.fraunhofer.de/en/events/inauguration-quantum-computing-research-platform.html>

³³ Preskill, John (2018). Quantum Computing in the NISQ era and beyond. Quantum, Vol. 2, 79. S. 1-20.



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

Was ist ein Quantencomputer?

4

Ein Quantencomputer ist ein komplexes technisches Gerät, das auf vielen Ebenen funktionieren muss. Seine Grundbestandteile – die Quantenbits – sind komplizierte physikalische Objekte, die darauf beruhen, dass eine bestimmte experimentelle Modalität auf die Spitze getrieben wird. Andererseits sind die Algorithmen, die auf einem Quantencomputer ablaufen, bereits komplexe Codes, auch wenn sie aufgrund der Leistung des Quantencomputers natürlich nicht so umfangreich sind wie einige moderne klassische Anwendungen. Diese Elemente sind durch einen Stack mit mittlerem Detaillierungsgrad miteinander verbunden.

Die Herausforderung, den Stand der Technik der Konstruktion eines Quantencomputers zu bewerten, besteht im Wesentlichen darin, die Maschine auf all diesen Ebenen zu bewerten und diese Bewertungen in einem Urteil zu verbinden.

Quelle: BSI (2020). Entwicklungsstand Quantencomputer. Berlin. S. 37

Seit Ende der 1990er Jahre wurden verschiedene experimentelle Prototypen vorgestellt. Für supraleitende Quantenrechner lässt sich diese Entwicklung unterteilen in eine Entwicklungsperiode von 1999–2015 und seit Frühjahr 2016 die Ära der Cloud-Quantenprozessoren.³⁴

Entwicklung von Quantenrechnern von 1998 - 2023

5

	Unternehmen	Land	Anzahl Qbits	Quanten-Volumen
1998	IBM, Oxford, Berkeley, Stanford, MIT	USA	2 Qbits	
2001	TU München	Deutschland	5 Qbits	
2000	Los Alamos National Laboratory	USA	7 Qbits	
2006	MIT	USA	12 Qbits	
2008	D-Wave System TWO	Kanada	28 Qbits	
2017	IBM Q Experience	USA	50 Qbits	
2019	Intel	USA	49 Qbits	
	Google Sycamore	USA	54 Qbits	
	IBM Raleigh	USA	28 Qbits	32
	Honeywell H0	USA	6 Qbits	64
2020	D-Wave „Advantage“ (only via cloud)	Kanada	5,000 Qbits	
	Rigetti Aspen-8 on AWS	USA	31 Qbits	
	IBM Falcon	USA	27 Qbits	128
	Jiuzhang Photonic Quantum System	China	76 Qbits (Peak)	
	Honeywell H1 ³⁵	USA	10 Qbits	512
2021	Rigetti Aspen-9	USA	32 Qbits	
	IBM „Eagle“ ³⁶	USA	127 Qbits	
2022	IBM „Osprey“ ³⁷	USA	433 Qbits	
2023	IBM „Condor“ ³⁸	USA	1,121 Qbits	
Quelle:	Deutsche Bank Research			

Quantenvorteil: Wurde ein spektakulärer Meilenstein erreicht?

Derzeit findet ein Wettlauf um den Bau des ersten robusten Quantencomputers statt, der einen echten Quantenvorteil bieten würde und für wissenschaftliche und wirtschaftliche Anwendungen einsetzbar wäre, d.h. ein solches System wäre um Dimensionen schneller als der leistungsfähigste existierende digitale Supercomputer.

2019 wurde von Google CEO Sundar Pichai verkündet, dass der Quantenrechner Google Sycamore erstmals die „Quantum Supremacy“ (sog. Quantenüberlegenheit) erreicht habe, also eine um Dimensionen höhere Rechenleistung als

³⁴ BSI (2020). Entwicklungsstand Quantencomputer. Berlin. S. 20

³⁵ Honeywell Quantum Computer System Model H1.

³⁶ IBM Quantum Roadmap. URL: <https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap>

³⁷ IBM Quantum Roadmap. URL: <https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap>

³⁸ IBM Quantum Roadmap. URL: <https://research.ibm.com/blog/ibm-quantum-roadmap>



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

ein konventioneller digitaler Superrechner. Das zugrundeliegende Experiment wurde danach publiziert³⁹ und löste eine weltweite Berichterstattung aus. Für das Google-Experiment wurde eine speziell für Quantenrechner entworfene Aufgabe verwendet, die sich „Random Circuit Sampling“ nennt⁴⁰ und aus der Berechnung von Zufallszahlen, die einer bestimmten Verteilung aus der Quantenphysik unterliegen müssen, besteht. Der Quantenrechner von Google benötigte für die Lösung eine Zeitdauer von ca. 200 Sekunden.

In der technischen Diskussion, die sich daraufhin entwickelte, wurde sowohl in methodischer Sicht Kritik geübt als auch hinsichtlich der Interpretation des Vorliegens einer Quantenüberlegenheit. Das Google-Experiment und die zugrundeliegende Methode des Benchmarkings sowie eine Verifikation von Fehlerkorrektur sind beispielsweise durch das BSI⁴¹ beschrieben und analysiert worden. Als Antwort auf die Ankündigung von Google wurde von Forschern von IBM⁴² darauf verwiesen, dass digitale Superrechner für die Lösung ca. 2,5 Tage brauchen statt der von Google erwähnten 10.000 Jahre, die ein klassischer Supercomputer benötigen würde.

Im Dezember 2020 verkündete ein Team chinesischer Forscher⁴³ um Jian-Wei Pan, dass sie mit einem photonischen *Jiuzhang* Quantensystem Quantenüberlegenheit erreicht hätten. Parallel errechneten die Forscher, dass die Lösung des Experimentes, für die das Photonensystem etwas mehr als drei Minuten benötigte, mit Chinas leistungsstärkstem Supercomputer Sunway TaihuLight, mehr als 2 Milliarden Jahre gedauert hätte. Das *Jiuzhang* Quantensystem weist allerdings eine völlig andere Bauweise als supraleitende Quantenrechner auf und war nur auf dieses eine Experiment ausgerichtet.

Ob also bereits eine Quantenüberlegenheit erreicht ist, wird unterschiedlich beurteilt.

Wann steht ein leistungsfähiger kommerziell einsetzbarer Quantenrechner zur Verfügung?

Der Physiker Robert Schoelkopf, der 2015 mit Kollegen der Yale University ein Quanten-Start-up gegründet hat, wird in einem Artikel in NATURE⁴⁴ mit der Aussage zitiert, dass Schätzungen darüber, wie lange es dauern wird, einen universellen Quantencomputer zu bauen, zu pessimistisch sind. „Von dem Punkt aus, an dem wir uns vor zehn Jahren befanden, hätte man nie voraussehen können, wie weit wir heute sind“, sagt er. „Innovative Hardware in Kombination mit Software, die sich die am besten lösbaren Probleme herauspickt, bedeutet, dass wir nützliche Quantenberechnungen schneller erreichen werden, als die Leute denken“.

Hartmut Neven, der Direktor des Google Quantum AI Laboratory, argumentierte 2017⁴⁵, dass eine konservative Sichtweise auf das Quantencomputing den Eindruck erwecke, dass Anleger nur langfristig davon profitieren würden, dass aber kurzfristige Renditen mit kleinen Geräten möglich seien, die in den folgenden

³⁹ Arute, Frank et al. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. NATURE, Vol. 574, S. 505-511.

⁴⁰ Bouland, Adam et al. (2019). On the complexity and verification of quantum random circuit sampling. NATURE Physics, Vol. 15, S. 159-163.

⁴¹ BSI (2020). Status of quantum computer development. Entwicklungsstand Quantencomputer. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), Berlin. S. 21, 57, 60-61, 215-217.

⁴² IBM Research Blog, URL: <https://www.ibm.com/blogs/research/2019/10/on-quantum-supremacy/>

⁴³ Zhong, Han-Sen et al. (2020). Quantum computational advantage using photons. Science (Vol. Dec.)

URL: <https://www.science.org/doi/10.1126/science.abe8770>

⁴⁴ Gibney, Elizabeth (2019). The quantum gold rush. NATURE, Vol. 574, S. 22-24.

⁴⁵ <https://www.nature.com/articles/543171a>



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

fünf Jahren bis 2022 auf den Markt kämen, auch wenn diese noch keine vollständige Fehlerkorrektur haben würden. Inzwischen spricht man bezüglich des Wachstums der Leistung von Quantencomputern vom „Nevenschen Gesetz“ („Neven’s Law“⁴⁶), das besagt, dass die Leistung von Quantencomputern doppelt exponentiell wächst⁴⁷ wie die von digitalen Rechnern („Moore’s Law“).

Wenn man die IBM Roadmap⁴⁸ als Maßstab nimmt, nach der sich die Leistung von supraleitenden Quantenrechnern jedes Jahr etwa verdoppelt, und diese hochrechnet, dann könnte etwa im Jahr 2033 die Schwelle von einer Million Qbits erreicht sein, mit der ein robustes Quantenrechnen mit genügender Fehlerkorrektur erreicht wäre. Allerdings nur unter der Voraussetzung, dass die notwendigen Durchbrüche und technischen Meilensteine tatsächlich erreicht werden.

Ein solcher Durchbruch könnten u.a. Qutrits⁴⁹ sein, die auch bei der Quantenteleportation eine wichtige Rolle spielen. Dadurch würde die Kapazität von Quantenrechnern um eine Dimension erhöht bzw. bei weiteren Fortschritten um mehrere Dimensionen.

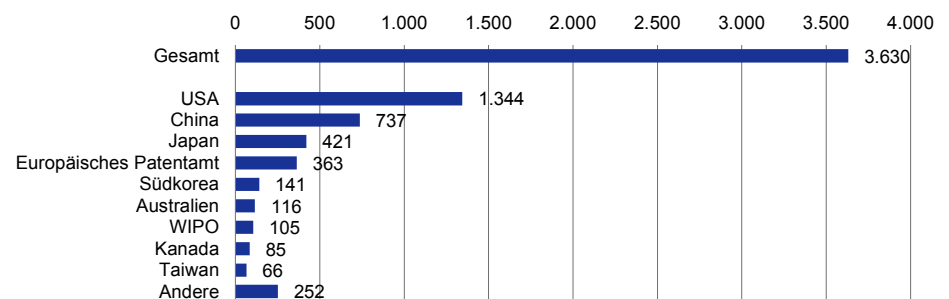
Patente auf dem Gebiet des Quantenrechnens

Die Anzahl der Patentanmeldungen auf dem Gebiet des Quantum Computing ist in den letzten Jahren stark gestiegen (2020: 1,787 gegenüber 2015: 667 und 2012: 557). Neben großen Unternehmen werden Patente zunehmend auch von Start-up-Unternehmen angemeldet.

Anmeldungen von Quantenpatenten (1999 - 2021)

6

weltweit [2021]



Quelle: Statista, Deutsche Bank Research

⁴⁶ Benannt nach Hartmut Neven, dem Direktor des Google Quantum Artificial Intelligence Lab.

⁴⁷ Yoshida, Hubert (2019). Moore’s Law is Replaced by Neven’s Law for Quantum Computing. Hitachi Vantara, June 24, 2019. Available at: <https://community.hitachivantara.com/s/article/moores-law-is-replaced-by-nevens-law-for-quantum-computing>

⁴⁸ <https://www.ibm.com/blogs/research/2020/09/ibm-quantum-roadmap/>

⁴⁹ Erhard, Manuel et al. (2020). Advances in high-dimensional quantum entanglement. Nature Reviews - Physics, Vol.2, S. 365-381.



Die **Patentanalyse** ist eine bewährte Methode zur Bewertung des wirtschaftlichen Potenzials neuer Technologien. Es wurden mehrere Studien über Patentierungstrends bei Quantentechnologien durchgeführt [...]. Alle diese Studien stützen sich auf Suchwerkzeuge, die auf Schlüsselwörtern und Codes der Internationalen Patentklassifikation (IPC) oder der Kooperativen Patentklassifikation (CPC) basieren, und es gibt keinen Hinweis darauf, dass sie von Personen mit einem Hintergrund in Quantenphysik erstellt wurden.

Unter diesen Umständen besteht die Gefahr, dass sie dem untersuchten Bereich eine gleichbleibende Anzahl von Patenten aus anderen technologischen Bereichen zuordnen („falsch-positive“ Patente) und damit beim Leser den Eindruck erwecken, dass der Stand der Technik höher ist als er tatsächlich ist, und dass die Industrie ein größeres Interesse daran hat.

Dieses Risiko wird durch die Tatsache verstärkt, dass das Hauptziel der meisten dieser Berichte darin besteht, das Interesse potenzieller Kunden und Investoren an diesem Bereich zu wecken. Ein solches Ziel wird besonders deutlich in den Marktanalysen, die von mehreren technischen Beratungsunternehmen erstellt und verkauft werden.

In der Regel haben wir festgestellt, dass sie ein viel rosigeres Bild von der technologischen Reife und dem Marktpotenzial dieser Technologien zeichnen, als es vernünftigerweise zu erwarten wäre.

Quelle: Travagnin, Martino (2019). Patent analysis of selected quantum technologies. European Commission, Joint Research Centre (JRC), Ispra/Italy. Publications Office of the European Union, Luxembourg. p. 2

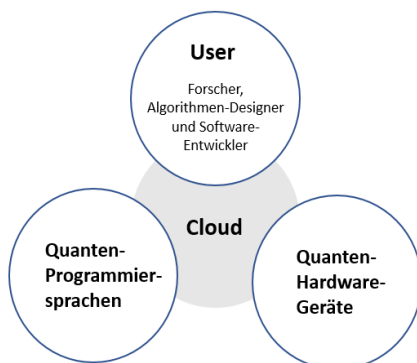
E. Quantensoftware

Quantencomputer bieten inzwischen die Möglichkeit, Quantensoftware zu testen. Quantensoftware ist ein dynamisches Feld, das sich unabhängig von Quantenhardwarearchitekturen entwickelt.

- In der Softwareentwicklung für Quantenrechner dominiert Python⁵⁰ als eine Open Source-Programmiersprache.
- Die Entwicklungsumgebung Qiskit⁵¹ von IBM unterstützt Python.
- Silq⁵² ist eine neue High Level-Programmiersprache für Quantencomputer, die an der ETH Zürich entwickelt und erstmals 2020 publiziert⁵³ wurde.
- Microsoft hat mit Q#⁵⁴ eine eigene Open Source-Programmiersprache für Quantum Computing im Angebot als Teil des Quantum Development Kits (QDK).
- Das Quantensoftwareunternehmen Cambridge Quantum Computing (CQC) bietet ein Quantensoftware-Entwicklungs-Kit (SDK) tket (ausgesprochen „ticket“) an, bei dem alle Lizenzbeschränkungen für die Verwendung des Python-Moduls von tket (bekannt als „pytket“) aufgehoben wurden. Es ist architekturunabhängig.

Die Entwicklung von Quantensoftware wird aktuell weltweit in vielen Projekten vorangetrieben. Analog der klassischen Softwarearchitektur entstehen dabei Quantum Compiler, Quantum Assembler, Spezialsoftware und Bibliotheken (Quantum Full Stack). Quantensoftware hat gegenüber herkömmlicher Software einige Besonderheiten, die ein neues Gebiet der Informatik entstehen lassen. Insbesondere baut Quantensoftware auf einer vollständig anderen Logik auf (siehe unten).

Nutzer aus Wissenschaft und Industrie können bereits heute Zugang zu Hochleistungs-Quantencomputern über die Cloud erhalten, was von Zehntausenden von Forschern und Unternehmen genutzt wird. Die Nachfrage nach Angeboten,



Quelle: Deutsche Bank Research

⁵⁰ <https://www.python.org/>

⁵¹ <https://qiskit.org/>

⁵² <https://silq.ethz.ch/>

⁵³ <https://files.sri.inf.ethz.ch/website/papers/pldi20-silq.pdf>

⁵⁴ <https://docs.microsoft.com/en-us/azure/quantum/overview-what-is-qsharp-and-qdk>



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

eigene Quantensoftware-Projekte durchführen zu können, steigt weltweit sowohl durch einen Anstieg der Anwendungsfälle als auch der Nutzerzahlen.

Die Präferenz der Nutzer wird einer der entscheidenden Faktoren sein bei der Entscheidung, welche Soft- und Hardware sich im Quantenrechnen durchsetzen wird. Viele große Technologieunternehmen haben sich dabei mit cloudbasierten Entwicklungsumgebungen positioniert, wie die beispielhafte Übersicht über heute schon bestehende Angebote zeigt. Durch die Zugangsmöglichkeit über die Cloud werden für Nutzer die technischen Eingangsbarrieren und Kosten drastisch gesenkt.

Die Quantum Open Source Foundation (QOSF) bietet auf GitHub Zugang zu den folgenden Open Source Quantensoftware-Projekten:

Auswahl von Quantensoftwareumgebungen von Technologieunternehmen

9

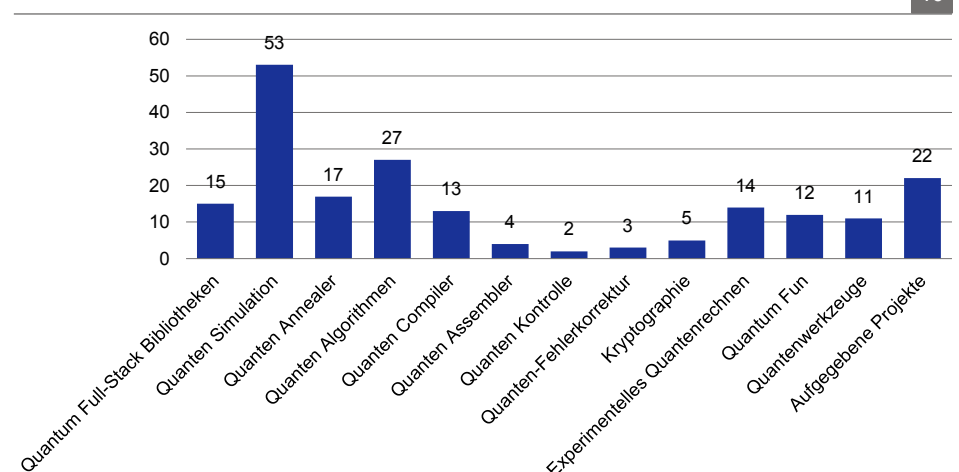
	Quantensoftware-Plattform	URL
IBM	IBM Quantum Experience; IBM Qiskit	https://www.ibm.com/de-de/quantum-computing https://www.ibm.com/quantum-computing/tools/
Microsoft	Microsoft Azure Quantum; Microsoft QDK, Q#	https://azure.microsoft.com/de-de/services/quantum/
Google	Google Quantum AI; Cirq	https://quantumai.google
AWS	Amazon Web Services (AWS); AWS Braket	https://aws.amazon.com/de/braket/
Alibaba	Alibaba Quantum Lab	https://damo.alibabab.com/labs/quantum
CAS	CAS (Chinese Academy of Sciences) Key Laboratory of Quantum Information	http://lqcc.ustc.edu.cn/index/info/826 (in chinesischer Sprache, Übersetzung mit Browser)

Quelle: Deutsche Bank Research

Gegenüberstellung von Digitalrechnen und Quantenrechnen

Open Source – Quanten-Softwareprojekte

10



Quelle: GitHub.com, Deutsche Bank Research

Die Anwendungsfälle für das Quantencomputing überschneiden sich nur teilweise von denen für das herkömmliche digitale Computing. Dabei hat jede Methode ihre spezifischen Stärken und Schwächen, was bedeutet, dass wir in eine neue Ära eintreten könnten, in der digitale Computer und Quantencomputer nebeneinander bestehen oder digitale und quantenbasierte Co-Prozessoren miteinander kombiniert werden. Quantenrechner sollten dabei theoretisch im Falle komplexer Rechenprobleme um Dimensionen leistungsfähiger sein als klassische digitale Superrechner bzw. Probleme lösen können, die bisher als unlösbar galten.



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

Unterschied zwischen digitalen und quantenbasierten Rechenmethoden

Unterschiede zwischen Digitalrechnen und Quantenrechnen

11

	Digitalrechnen	Quantenrechnen
Beschreibung	Digitale Computer nutzen Binärcode im ganzzahligen Bereich und den Zuständen von „0“ und „1“.	Quantenrechner basieren auf der Quantenmechanik. Eine Anordnung von Qbits kann durch Überlagerung (Superposition) alle 264 möglichen Werte gleichzeitig darstellen (komplexer Zahlenbereich), sodass Probleme lösbar werden, die für digitale Computer praktisch unmöglich zu lösen sind.
Stand der Technik	Hochperformante Rechenleistung durch digitale Computerchips und Spezialprozessoren in den unterschiedlichsten Geräten von Smartphones über Notebooks und PCs bis hin zu Servern, Grid Computing und Superrechnern.	Noch nicht kommerziell einsetzbar. Derzeit in Forschung bzw. Erprobung; verschiedene Hardware-Strategien im Wettbewerb; Quantum Software in Entwicklung; Geräte für die Teleportation und künftige Quanteninformationsnetze in der Entwicklung.
Stärken	Etablierte Technologie mit weltweit mehreren Milliarden Nutzern und Millionen von Programmierern.	Rechnen mit annähernd Lichtgeschwindigkeit, massiv paralleles Rechnen.
Schwächen	Bestimmte Rechenprobleme sind nicht lösbar bzw. nicht in annehmbarer oder endlicher Zeit.	Zukünftige Technologie, die ein neues Denken erfordert; erst einige Zehntausende Nutzer und eine sich entwickelnde Programmierer-Community.

Quelle: Deutsche Bank Research

Primzahlenberechnung und Verschlüsselungsverfahren

Die Analyse von Rechenaufgaben als Teilgebiet der Theoretischen Informatik beschäftigt sich mit der algorithmischen Lösbarkeit von Rechenproblemen, die in mehrere Komplexitätsstufen eingeteilt werden und deren Komplexität dramatisch variieren kann. Dabei wird der Unterschied zwischen Problemen, die sich mit konventionellen digitalen Rechenmethoden lösen lassen und denjenigen, die für Quantenrechner prädestiniert sind, wie folgt beschrieben:

Klassen von rechnerischen Entscheidungsproblemen

12

	Digitalrechnen	Quantenrechnen
Klasse der lösbaren Entscheidungsprobleme	BPP (Bounded-Error Probabilistic Polynomial Time)	BQP (Bounded Error Quantum Polynomial Time)
Fehlerwahrscheinlichkeit	Automatisierte Verfahren zur Behandlung von Funktionsstörungen und Maschinenfehlern	Fehlerkorrektur Fehlerunterdrückung (noch zu entwickeln)
Benötigte Zeit	$O(n \log n)$	$O(n^2)$

Quelle: Deutsche Bank Research



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

Ein Beispiel für das unterschiedliche Verhalten von Digitalrechnern und Quantencomputern ist die mathematische Primzahlbestimmung (Faktorisierung)⁵⁵, die u.a. für die Datensicherheit beim Datenaustausch mit Verschlüsselung eine zentrale Bedeutung hat.

Die folgende Tabelle gibt eine Vorstellung der sich exponentiell entwickelnden Vorteile bei der Rechenzeit von Quantenrechnern gegenüber digitalen Computern.

Tabelle: Rechenvorgänge und Rechenzeit im Vergleich

13

	Digitalrechner	Quantenrechner
n	n^n	2^n
15	437.893.890.380.859.000	32.768
13	302.875.106.592.253	8.192
11	285.311.670.611	2.048
10	10.000.000.000	1.024
9	387.420.489	512
7	823.543	128
5	3.125	32
3	27	8
1	1	2
0	1	1

Quelle: Deutsche Bank Research

Bei komplexeren Berechnungen wirkt sich der Zeitvorteil von weniger Rechenoperationen bei Quantenrechnern exponentiell noch weit stärker aus. Beispielsweise werden bei Verschlüsselungen mit dem RSA-Verfahren bis zu 600-stellige Zahlen verwendet. Während eine Verschlüsselung mit privaten und öffentlichen Schlüsseln in eine Richtung leicht zu errechnen ist, ist die umgekehrte Richtung (Umkehrfunktion) mit digitalen Hochleistungsrechnern sehr aufwändig und stellt damit bei geeigneten Schlüssellängen für heute übliche kryptografische Verfahren keine direkte Bedrohung dar. Laut Aussage der Bundesregierung⁵⁶ stellen Quantenalgorithmen nach dem heutigen Stand der Forschung keine Gefahr für symmetrische Verschlüsselungsverfahren dar. Quantenalgorithmen (wie Grover-Suche und das Simon-Problem) haben jedoch Implikationen für die symmetrische Kryptografie, insbesondere für Schlüssellängen und Betriebsarten.

Allerdings würden Quantencomputer die heute verwendete Public-Key-Kryptografie gefährden, da asymmetrische Verfahren wie RSA u.a. auf dem Faktorisierungsproblem beruhen. Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) erläutert dies wie folgt:

„Es ist allgemein bekannt, dass ein genügend skalierbarer Quantencomputer die gegenwärtig verwendeten asymmetrischen Kryptosysteme basierend auf RSA und elliptischen Kurven brechen würde. Seit der Publikation von Shors Algorithmus (1994) existieren nämlich Polynomialzeit-Quantenalgorithmen zur Faktorisierung von RSA-Modulen und Berechnung des diskreten Logarithmus auf elliptischen Kurven.“

⁵⁵ Köbler, Johannes und Olaf Beyersdorff (2006). Von der Turingmaschine zum Quantencomputer – ein Gang durch die Geschichte der Komplexitätstheorie. In: Reisig, Wolfgang und Johann-Christoph Freytag (Hrsg.) Informatik. Aktuelle Themen im historischen Kontext. Springer-Verlag Berlin/ Heidelberg. S. 165-195. Montanaro, Ashley (2016). Quantum algorithms: an overview. npj Quantum Information, Macmillan Publishers.

⁵⁶ Deutscher Bundestag (2021). Die Verschlüsselungspolitik der Bundesregierung. Antwort der Bundesregierung. Drucksache 19/26340.



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

Deswegen wird aktuell an neuen Standards der Verschlüsselung geforscht, z.B. durch Organisationen wie das US National Institute of Standards and Technology (NIST), das European Technical Standards Institute (ETSI) und das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI). Dabei führt das NIST einen Wettbewerb zum Erreichen von Post-Quantum Cryptography (PGC) durch⁵⁷. Sobald sich entsprechende Standards durchgesetzt haben, werden diese die nächste Generation von Verschlüsselungsverfahren bis hin zu einer robusten Post-Quanten-Kryptografie bilden.

Quantenlogistik

Die Quantenlogistik beschäftigt sich mit komplexen Routingproblemen, z.B. zur Planung und Steuerung von Fahrzeugflotten oder der Berechnung von Wegstrecken, was auch für selbstfahrende autonome Systeme relevant ist. Ein klassisches theoretisches Problem ist das „Traveling Salesman Problem“ (TSP), das sich täuschend einfach anhört, jedoch seit Jahrhunderten Wissenschaftler und Praktiker vor Rätsel stellt. Es geht dabei beispielsweise um die Fragestellung, wie sich die kürzeste Wegstrecke für ein Lieferfahrzeug bestimmen lässt, um Pakete an jeweils eine Adresse in verschiedenen Städten auszuliefern. Ziel ist es, die kürzeste Route zu finden, die jede Stadt genau einmal durchläuft und dann zum Ausgangspunkt in der ersten Stadt zurückkehrt. Dabei spielen mehrere Faktoren eine Rolle, die zusammen ein Rechenproblem ergeben, das exponentiell mit einer steigenden Anzahl von Wegpunkten wächst: die Vektorisierung des Netzwerkes (Graphentheorie), die Reihenfolge der Wege (Kombinatorik) und die Auswahl der in Summe kürzesten Route (Optimierung).

Im Jahr 2020 gelang es einem Forscherteam um Takayuki Kawahara in Tokio mit einem speziellen Design für einen KI-Chip⁵⁸, das TSP in einem Netzwerk mit 22 Städten⁵⁹ (d.h. Netzwerkknoten) zu lösen. Davor hatte die maximale Lösbarkeit mit digitalen Schaltkreisen bei 16 Knoten gelegen. Eine Übersichtsstudie⁶⁰ aus dem Jahr 2020 ermöglicht dazu einen Einblick in die Praxis von Optimierungsproblemen mit Quantensoftware. Sobald leistungsstärkere Quantenrechner verfügbar sind, werden quantenbasierte Rechenmethoden eine drastische Steigerung dieser Schwelle ermöglichen und komplexere Routingprobleme werden lösbar.

F. Quantenkommunikation: Hochleistungsnetze und die Vision eines Quanteninternets

Die Forschungen für eine nächste Generation von Quanteninformationsnetzwerken (Quantum 2.0) haben bereits begonnen. Dafür sind sowohl technische Durchbrüche im Bau von Quantencomputern bzw. Quantenchips als auch bei einer Reihe von optischen Netzwerk- und Schaltelementen für eine zukünftige quantenbasierte Netzwerkinfrastruktur notwendig. Die langfristige Vision ist es, dass Netzwerke zur Übertragung von Quanteninformation zu einem neuen Internet werden, das durch die erhöhte Rechenleistung von Quantenrechnern und optischer bzw. quantenbasierter Datenübertragung eine um Dimensionen höhere Leistungsfähigkeit und Geschwindigkeit erreicht.

⁵⁷ <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>

⁵⁸ URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9108766>

⁵⁹ <https://www.eurekalert.org/news-releases/840425>

⁶⁰ Warren, Richard H. (2020). Solving the traveling salesman problem on a quantum annealer. SN Applied Sciences, Vol. 2 (7). URL: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s42452-019-1829-x.pdf>



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

Dazu tragen verschiedene verwandte Gebiete wie die Quantenmechanik, Quanteninformationstheorie, Quantenkanalcodierung, Quantenfehlerkorrektur und Quantenkryptographie bei.⁶¹

Ein grundlegendes Phänomen der Quanteninformationswissenschaft ist die Teleportation. Quantenkommunikation und ein zukünftiges Quantum-Internet basieren auf der Übertragung von Quanteninformationen von einem Sender zu einem Empfänger. Dafür werden verschränkte Photonen so manipuliert, dass sie binäre Informationen übertragen können. Die Reichweite zur quantenbasierten Informationsübertragung per Glasfaser oder über Laser innerhalb der Erdatmosphäre wird durch Störeffekte beschränkt, da nur wenige Photonen in verschränktem Zustand am Ziel ankommen. In den letzten Jahren wurden durch eine Reihe von Experimenten durch Wissenschaftsteams aus Österreich und China, geleitet von dem Pionier Prof. Zeilinger aus Wien, durch Teleportation quantenbasiert Informationen in der Erdatmosphäre übertragen. So wurde im Jahr 2012 zwischen zwei kanarischen Inseln eine Übertragung über 143 km erreicht.⁶²

Quantensatelliten können verschränkte Photonen durch das Vakuum im Weltall weitgehend ungestört übertragen. Im August 2016 wurden vom chinesischen Forschungssatelliten „Micius“ Quanteninformationen zu zwei Bodenstationen in China über bis zu 1.203 km Entfernung übertragen.⁶³ Allerdings ist dies bisher nur nachts möglich, da sonst die Photonen vom Tageslicht abgelenkt werden. Eine quantenbasierte Übertragung zwischen zwei Satelliten im Weltall wurde durch Indien 2021 bekanntgegeben.⁶⁴

Ein weiterer zentraler Meilenstein wurde 2019 von einem Forschungsteam um Anton Zeilinger am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften erreicht⁶⁵ – in Kooperation mit einem chinesischen Team der University of Science and Technology of China (USTC) (Hefei/Anhui Provinz) um Jian-Wei Pan. Es gelang dabei erstmals, dreidimensionale Zustände (Qutrits) von Photonen zu übertragen. In der weiteren Entwicklung könnte dies die Quantenteleportation sehr großer Datenmengen ermöglichen, da nicht nur wie bisher zweistellige Quantenzustände (Qbits) zur Informationsübertragung bereitstehen würden, sondern diese mit fortschreitender Quantentechnologie theoretisch n-stellig erweitert werden könnten. In Deutschland fördert die Fraunhofer-Gesellschaft⁶⁶ ein Forschungsvorhaben, um innovative Hardware für Quantenkommunikation zu schaffen.

Die hohe strategische Bedeutung eines Quanteninternets als Supertechnologie und dessen viele Vorteile mit einer um Dimensionen höheren Übertragungsgeschwindigkeit und Bandbreite und damit einer Überwindung der Kapazitätsengpässe des aktuellen Internets sowie einer bisher nicht erreichbaren Abhörsicherheit ermöglichen intensive Forschungsaktivitäten, was eine Realisierung dieser noch langfristigen Vision wahrscheinlicher werden lässt. So ist auch das Fermilab⁶⁷ als nationale US-Forschungseinrichtung in Zusammenarbeit mit AT&T und

⁶¹ Hayashi, Masahito et al. (2015). Introduction to Quantum Information Science. Graduate Texts in Physics. Springer-Verlag, Berlin/ Heidelberg.

⁶² Erhard, Manuel et al. (2019). Advances in High Dimensional Quantum Entanglement. arXiv:1911.10006v2 [quant-ph].

⁶³ <https://www.science.org/doi/full/10.1126/science.aan3211>

⁶⁴ <https://www.isro.gov.in/update/22-mar-2021/isro-makes-breakthrough-demonstration-of-free-space-quantum-key-distribution-qkd>

⁶⁵ Krenn, Mario und Manuel Erhard (2019). Quantenteleportation in höheren Dimensionen. Physik in Unserer Zeit, Vol. 50 (6), S. 269–270; <https://www.iqoqi-vienna.at/detail/news/qutrit-complex-quantum-teleportation-achieved-for-the-first-time>

⁶⁶ Fraunhofer-Gesellschaft (2020). Forschungsprojekt „InteQuant“. URL: <https://www.iof.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2020/intequant.html>

⁶⁷ <https://quantum.fnal.gov>



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

mehreren Universitäten an Forschung zur Quantenteleportation beteiligt⁶⁸, im Hinblick auf ein zukünftiges Quantum-Internet.

Im Juli 2020 hat das US Department of Energy einen Entwurf (Blueprint) für ein Quantum-Internet vorgestellt⁶⁹, das bereits einen Vorschlag für eine zukünftige Netzwerkarchitektur enthält.

Vergleich des TCP/IP 5 Referenzmodels mit dem Vorschlag für eine Quantum-Internet-Netzwerkarchitektur

14

Schicht (Layer)	Quanteninternet Netzwerkarchitektur	
Anwendung	Verteilte Quantenalgorithmen	
Transportschicht	Koexistenz mit der Steuerungsebene klassischer Netze	Steuerungs-/Kontroll-ebene
Netzwerkschicht	Verschrankungserzeugung (Entanglement) und speicherunterstützte Verteilung	
Datenschicht	Datenübertragung supraleitend/photonisch	
Physikalische Verbindung	Quantenprozessor/ Quantencomputer	
TCP/IP Network Stack	Verschrankungsverteilung (Entanglement) Netzwerkstapel	

Quelle: Deutsche Bank Research

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass ein Quantum-Internet als langfristige Vision zwar noch in der Zukunft liegt, jedoch bereits bedeutende Meilensteine in der Konzeption (Network Stack), der Herstellung von notwendigen Komponenten und der Erprobung der Übertragung von Quanteninformationen (Quantenteleportation) erreicht sind.

G. Globale Ansätze zur Unterstützung von Quantentechnologien

Nationale Quantenstrategien und Initiativen

Weltweit haben mehr als 60 Länder Quantentechnologie-Initiativen ins Leben gerufen und teils auch nationale Quantenstrategien definiert. Diese Initiativen und die Finanzierung durch internationale Organisationen und staatliche Akteure tragen dazu bei, die hohen technischen Barrieren durch die Bereitstellung öffentlicher Mittel im Bereich von Hunderten Millionen bis zu Milliarden von USD und der Finanzierung einer Forschungsinfrastruktur zu überwinden. Abgesehen von den erhofften Verbesserungen für Produktivität und Wettbewerbsfähigkeit haben Quantum 2.0-Technologien auch eine sicherheitspolitische Relevanz, beispielsweise für die Verschlüsselung und Nachrichtenübertragung.

⁶⁸ Valivarthi, Raju (2020). Teleportation Systems Toward a Quantum Internet. American Physical Society, PRX QUANTUM 1, 020317, S. 1-16. Available at: <https://journals.aps.org/prxquantum/pdf/10.1103/PRXQuantum.1.020317>

⁶⁹ <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-unveils-blueprint-quantum-internet-launch-future-quantum-internet>



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

Quantenökosystem

Ein weltweites Quantenökosystem hat sich in den letzten Jahren entwickelt, in dem sich Forschungsinstitutionen und Technologieunternehmen und sowohl staatliche als auch private Investoren vernetzen.

Quantum 2.0 - Ökosystem

16

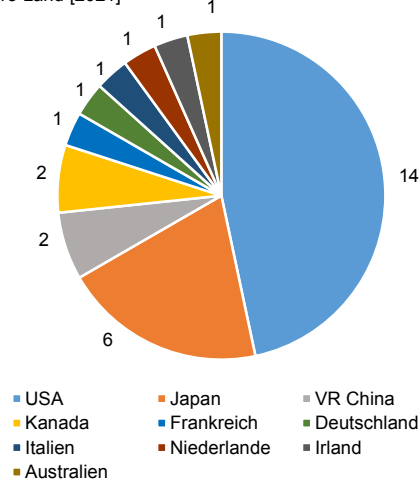
Produzenten	<ul style="list-style-type: none"> — Forschungsinstitutionen (Wissenschaftsakademien, Technologiezentren, Innovationsagenturen) — Technologieunternehmen — Start-ups
Nutzer	<ul style="list-style-type: none"> — Unternehmen — Forscher — Software-Entwickler
Investoren	<ul style="list-style-type: none"> — Staatliche Stellen — Private Investoren

Quelle: Deutsche Bank Research

Börsennotierte Quantentechnologieproduzenten

15

pro Land [2021]

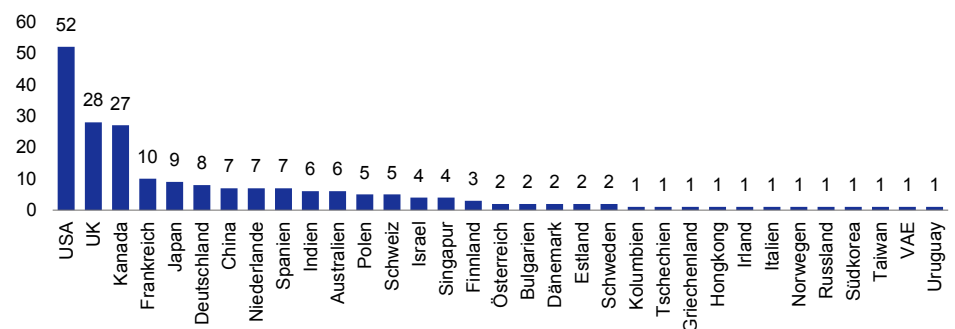


Quelle: Deutsche Bank Research

Quanten-Startups

17

pro Land [2020]



Quelle: Deutsche Bank Research

Von den für diese Auswertung ausgewählten 210 Quantum-Start-ups kommen 64 Quantum-Start-ups (30,4%) aus EU-27 Ländern, etwa ein Viertel (24,8%) aus den USA, und jeweils etwa ein Achtel (12,9%) aus dem Vereinigten Königreich und Kanada. Insgesamt 184 bzw. 88% der Quantum-Start-ups teilen sich auf 15 der insgesamt 33 Länder auf. Die meisten dieser Länder haben nationale Quantum-Strategien, verbunden mit einem Budget von jeweils mehreren Hundert Mio. USD. Für China könnte die Anzahl der Start-ups allerdings wesentlich höher liegen, da keine Informationen über diese Unternehmen vorliegen und staatliche Forschungsinstitutionen teilweise eigene Quantenforschungslabors betreiben, die Start-ups gleichzusetzen sind. Die drei führenden Länder bzw. Regionen auf dem Gebiet der Quantentechnologien⁷⁰ sind die Vereinigten Staaten (Quantencomputer), Europa (Quantenmechanik und Lasertechnologie) und China (Quantenkommunikation und -kryptografie).

⁷⁰ OECD-Ausblick zur digitalen Wirtschaft 2020.



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

USA

Die USA haben mit der National Quantum Initiative (NQI)⁷¹, die im Dezember 2018 vom US-Kongress angenommen wurde, den US-Präsidenten befugt, u.a. die Ziele und Prioritäten eines 10-Jahres-Plans zu bestimmen zur Entwicklung der Quanteninformatikwissenschaft und von Quantentechnologien. Die NQI wurde von der Trump-Administration ins Leben gerufen und wird unter der Biden-Administration fortgeführt.⁷² Sie ist eine Dachorganisation, unter der eine Reihe von Regierungsbehörden Programme für die Quantenwissenschaft und -technologie in den USA entwickeln und durchführen. Im Rahmen der NQI arbeiten staatliche, akademische und privatwirtschaftliche Organisationen zusammen, beispielsweise das NASA Ames – Quantum AI Laboratory (QuAIL)⁷³, das Fermilab⁷⁴, das Los Alamos National Laboratory⁷⁵ und das Lawrence Livermore National Laboratory⁷⁶. Als US-Behörde führt das National Institute of Standards and Technology (NIST) eine weltweite Initiative zum Erreichen von Post-Quantum Cryptography (PGC) an.⁷⁷ Die National Science Foundation (NSF)⁷⁸ und das Department of Energy (DOE) sind ebenfalls mit eigenen Forschungszentren und Programmen⁷⁹ daran beteiligt, Quantentechnologien voranzutreiben. Darüber hinaus sind auch die großen Technologieunternehmen wie IBM, Google, Microsoft, Intel, Honeywell, aber auch Start-ups wie Rigetti Computing und IonQ sowie viele andere aktiv an der Entwicklung von Quantencomputern beteiligt.

VR China

Die Volksrepublik China hat in ihrem aktuellen Fünf-Jahres-Plan (2021-2026) Wachstumsziele in fünf strategischen Bereichen der Wissenschaft und Technik festgelegt, wobei Durchbrüche unter anderem bei Quanteninformationstechnologie, Künstlicher Intelligenz, Halbleitern und in der Raumfahrt erwartet werden. In diesem Zusammenhang hat China das Staatsbudget erhöht und die Investitionen in Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien verstärkt, u.a. mit dem Ziel der Erforschung eines Langstrecken- und Hochgeschwindigkeits-Quantenkommunikationssystems. Die Chinesische Akademie der Wissenschaften (CAS) nimmt dabei eine führende Rolle ein und hat Ressourcen mit der University of Science and Technology of China (USTC) in Hefei (Anhui Provinz) gebündelt. Dort ist u.a. der chinesische Quantenphysiker Jian-Wei Pan als Professor tätig, der bei Anton Zeilinger 1999 in Wien promovierte und mit seinem Team an Durchbrüchen im Bereich der Teleportation beteiligt ist (u.a. mit dem Quantensatelliten „Micius“). In Hefei soll auch der erste Quantum Computing Industrial Park für 60 Quantenunternehmen eröffnet werden.⁸⁰ Im Rahmen von CAS Quantum Net arbeitet ZTE an Quantensicherheitsanwendungen. In den letzten Jahren haben auch die Technologieunternehmen Alibaba (seit 2015) und die Suchmaschine Baidu (seit 2018) eigene Quantenforschungslabore eröffnet. Die Zahl der chinesischen Start-ups im Bereich der Quantentechnologie lässt sich nur schwer abschätzen, da dazu nur wenige Informationen vorliegen,

⁷¹ The US National Quantum Initiative Act. Public Law No: 115-368 (12/21/2018)

⁷² <https://www.whitehouse.gov/ostp/news-updates/2021/10/07/readout-of-white-house-summit-on-quantum-industry-and-society/>

⁷³ <https://ti.arc.nasa.gov/tech/dash/groups/quail/>

⁷⁴ <https://quantum.fnal.gov/>

⁷⁵ https://quantum.lanl.gov/q_computing.shtml

⁷⁶ <https://quantum.llnl.gov/>

⁷⁷ <https://csrc.nist.gov/projects/post-quantum-cryptography>

⁷⁸ https://www.nsf.gov/mps/quantum/quantum_research_at_nsf.jsp

⁷⁹ <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-announces-61-million-advance-breakthroughs-quantum-information>

⁸⁰ <https://thequantumdaily.com/2021/09/05/quantum-china-weekly-volume-21-2021-08-28-2021-09-03/>



Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0

und weil staatsfinanzierte Spin-offs oder Abteilungen von Forschungszentren und Universitäten die Rolle von Start-ups einnehmen.

Die Digitale Seidenstraße (Digital Silk Road, DSR) wurde 2013 im Rahmen der übergeordneten Seidenstraßen-Initiative (Belt and Road Initiative, BRI) zur Erreichung des Unterziels „Konnektivität“ eingeführt. Durch Vereinbarungen im Rahmen der chinesischen Belt and Road Initiative bietet China anderen Ländern Zugang zu Mobilfunk-Technologien, einschließlich 5G, zu fortschrittlichen KI-basierten Überwachungsfunktionen und zukünftig den Zugang zu chinesischen Quantentechnologien und Quanteninformatiionsnetzen.

Europäische Union (EU-27)

Zur Förderung der Forschung und Anwendungsentwicklung von Quantum 2.0 hat die EU 2017 eine Innovationsoffensive⁸¹ eingeleitet. Das im Oktober 2018 gestartete Programm EU-Flaggschiff für Quantentechnologien (EU Quantum Technologies Flagship)⁸² ist eine langfristig angelegte Forschungs- und Innovationsinitiative. Im Rahmen des Quantum Technologies Flagship werden in einer Anfangsphase (Ramp-up) 24 Projekte mit 152 Mio. Euro und insgesamt Forschungsarbeiten über einen Zeitraum von 10 Jahren mit 1 Mrd. Euro unterstützt. Die EU-Quantum-Innovationsoffensive nutzt auch Mittel aus dem EU-Forschungsprogramm Horizon 2020.⁸³

Die europäischen Forschungs- und Technologieorganisationen (Europe's Research and Technology Organisations; RTOs) sind einer der Eckpfeiler der EU-Quantenstrategie, um eine wettbewerbsfähige Quantenindustrie aufzubauen durch eine Unterstützung des privaten Sektors. Angetrieben durch öffentliche Ausgaben sollen RTOs dabei die Kluft zwischen akademischem Wissen und industriellen Kapazitäten überbrücken. Unter Mitarbeit von mehr als 2.000 Quantenexperten aus ganz Europa wurde die Strategische Forschungsagenda der EU für die Quantenforschung (SRA)⁸⁴ entwickelt, die Ziele für einen Zeitraum von drei Jahren und eine Vision für sechs bis zehn Jahre enthält. In Europa, den EU-27 Ländern, dem Vereinigten Königreich, der Schweiz und Russland gibt es eine sehr große Anzahl von international renommierten Forschungseinrichtungen und Universitäten, die an der Quantenforschung beteiligt sind. Auch die hohe Zahl von ca. 64 relevanten Quantum-Start-ups in den EU-27-Ländern ist ein wichtiger Indikator für die Bedeutung des Quantenökosystems in Europa. Es ist eine Herausforderung, ob diese Start-ups ein ausreichendes Wachstum erreichen – und ob sie dann auch ihren Sitz in Europa behalten. Zu den großen europäischen Unternehmen, die bereits an Quantencomputern bzw. Quantenchips arbeiten, gehören Infineon und Bosch.

⁸¹ MIT Technology Review (2017). Europe Unveils Its Vision for a Quantum Future. The race to develop the next generation of quantum technology just got hotter.

URL: <https://www.technologyreview.com/2017/12/20/146704/europe-unveils-its-vision-for-a-quantum-future/>

⁸² <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/quantum-technologies-flagship>

⁸³ <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/en/news/eu-funds-quantum-technology-projects>

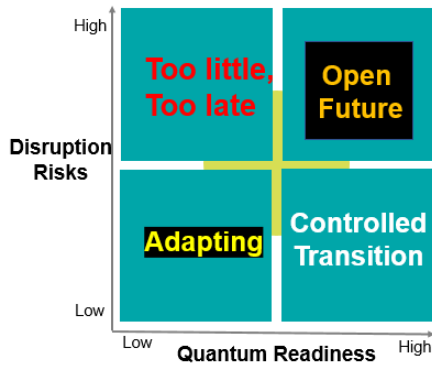
⁸⁴ https://qt.eu/app/uploads/2020/04/Strategic_Research_Agenda_d_FINAL.pdf



H. Quantum Readiness: Szenarioanalyse und neues Denken

Four Scenarios of Quantum Readiness

18



Quelle: Deutsche Bank Research

Quantentechnologien können sich potenziell disruptiv auf jede Industrie auswirken und neue Geschäftsmodelle und Lieferketten werden entstehen. Dies erfordert eine spezifische Analyse, die die Eigenheiten unterschiedlicher Industriesektoren, Unternehmens- und Produktprofile sowie der Flexibilität von Geschäftsmodellen berücksichtigt, um auf ein günstiges Szenario hinarbeiten zu können.

- Unternehmen sollten schon heute damit beginnen, sich mit Quantum 2.0 zu beschäftigen, wobei die Erprobung bzw. die Implementierung von Quantentechnologien immer im Zusammenhang mit einer geschäftlichen Fragestellung (Business Case) erfolgen sollte.
- Innerhalb des Quantenökosystems ist ein Engagement von Industrieunternehmen und eine Zusammenarbeit mit Forschungsinstitutionen zum heutigen Zeitpunkt erforderlich, um die Entwicklung zukünftiger Quantentechnologien angesichts langer Entwicklungszeiten anzustoßen, zu finanzieren und bis zur Marktreife voranzutreiben.
- Der Zugang zu einer quantentechnologischen Wissensbasis in konkreten Projekten bzw. je nach Bedarf ist eine Herausforderung, die im Talentmanagement und in der Aus- bzw. Fortbildung zu berücksichtigen ist. Eine Priorität sollte auf Experten verschiedener Disziplinen und Facharbeiter gesetzt werden, um Quantentechnologien zur Marktreife entwickeln und anwenden zu können.
- Das Verständnis von Quantentechnologien erfordert Wissen und Kenntnisse aus verschiedenen Wissenschaftsdisziplinen wie z.B. Mathematik, Physik, Chemie, Informatik und dem Ingenieurwesen. In Zusammenarbeit mit Forschungsinstitutionen und Universitäten kann ein Wissenstransfer bzw. die Entwicklung von Produkten gelingen.
- Quantum 2.0-Technologien sind heute mit wenigen Ausnahmen noch nicht für den industriellen Einsatz in wissenschaftlich oder wirtschaftlich relevanten Anwendungsfällen bereit. Allerdings wird sich das in den nächsten Jahren ändern und neue Märkte, die im Zusammenhang mit spezifischen Quantentechnologien entstehen, können sich rasant entwickeln und schnell ein hohes Marktvolumen erreichen.

Hermann P. Rapp (+49 69 910-43893, hermann-paul.rapp@db.com)



Bibliografie

- BSI (2020). Status of quantum computer development. Entwicklungsstand Quantencomputer. Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), Berlin.
- Dowling, Jonathan P. und Gerard J. Milburn (2003). Quantum technology: the second quantum revolution. Phil. Trans. The Royal Society, London, Vol. 361, pp. 1655-1674.
- Just, Bettina (2020). Quantencomputing kompakt. Spukhafte Fernwirkung und Teleportation endlich verständlich. Springer Vieweg, Berlin.
- Ernst & Young (2019). Could quantum computing be the technology that drives your quantum leap forward? https://www.ey.com/en_gl/disruption/could-quantum-computing-be-the-technology-that-drives-your-quantum-leap-forward
- Jaeger, Lars (2018). The Second Quantum Revolution. Springer Nature Switzerland, Cham.
- Kagermann, Henning, Florian Süssenguth, Jörg Körner und Annka Liepold (2020). Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. Acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, München. URL: <https://www.acatech.de/publikationen/>
- Kung, Johnny und Muriam Fancy (2021). A Quantum Revolution: Report on Global Policies for Quantum Technology. CIFAR, Toronto.
- McKinsey Quarterly (2020). A game plan for quantum computing. February 2020. <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/a-game-plan-for-quantum-computing>
- McKinsey (2021). Quantum Computing Monitor. URL: <https://www.mckinsey.com/business-functions/mckinsey-digital/our-insights/tech-forward/the-current-state-of-quantum-computing-between-hype-and-revolution>
- Mochinaga, Dai (2020). The Digital Silk Road and China's Technology Influence in Southeast Asia. Council on Foreign Relations, New York. URL: <https://www.cfr.org/blog/digital-silk-road-and-chinas-technology-influence-south-east-asia>
- UK Government Office for Science (2016). The Quantum Age: technological opportunities. London.



Deutschland-Monitor

In der Reihe „Deutschland-Monitor“ greifen wir politische und strukturelle Themen mit großer Bedeutung für Deutschland auf. Darunter fallen die Kommentierung von Wahlen und politischen Weichenstellungen sowie Technologie- und Branchenthemen, aber auch makroökonomische Themen, die über konjunkturelle Fragestellungen – die im Ausblick Deutschland behandelt werden – hinausgehen.

Unsere Publikationen finden Sie unentgeltlich auf unserer Internetseite www.dbresearch.de. Dort können Sie sich auch als regelmäßiger Empfänger unserer Publikationen per E-Mail eintragen.

Für die Print-Version wenden Sie sich bitte an:

Deutsche Bank Research
Marketing
60262 Frankfurt am Main
Fax: +49 69 910-31877
E-Mail: marketing.dbr@db.com

Schneller via E-Mail:
marketing.dbr@db.com

- ▶ **Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0:
Neue Supertechnologien kommen in Reichweite** ... 9. Dezember 2021
- ▶ **Wachstumspotenzial bedroht,
schnelles Handeln notwendig** 14. Oktober 2021
- ▶ **Störungen der Lieferketten:
Auch 2022 noch Konjunktur- und Inflationsrisiko** . 28. September 2021
- ▶ **Wohnungspolitik in Deutschland: Linke und rechte
Parteien mit nur kleiner Schnittmenge** 6. September 2021
- ▶ **Verteilungsfragen rücken in den Vordergrund:
Mehr Anreize und Chancen statt mehr Umverteilung** 30. August 2021
- ▶ **Vorfahrt der E-Mobilität vom Staat teuer erkaufte** 5. August 2021
- ▶ **Die Rückkehr massiver Staatsausgaben:
Wird dieses Mal wirklich alles anders?** 4. August 2021
- ▶ **Nehmen die Inflationsrisiken in Deutschland tatsächlich zu?
Oder machen wir uns wieder einmal umsonst verrückt?** . 29. Juli 2021
- ▶ **Die deutsche EU-Politik post-Merkel:
Grüner, aber finanzpolitisch weiterhin eher konservativ** .. 27. Juli 2021

© Copyright 2021. Deutsche Bank AG, Deutsche Bank Research, 60262 Frankfurt am Main, Deutschland. Alle Rechte vorbehalten. Bei Zitaten wird um Quellenangabe „Deutsche Bank Research“ gebeten.

Die vorstehenden Angaben stellen keine Anlage-, Rechts- oder Steuerberatung dar. Alle Meinungsäußerungen geben die aktuelle Einschätzung des Verfassers wieder, die nicht notwendigerweise der Meinung der Deutsche Bank AG oder ihrer assoziierten Unternehmen entspricht. Alle Meinungen können ohne vorherige Ankündigung geändert werden. Die Meinungen können von Einschätzungen abweichen, die in anderen von der Deutsche Bank veröffentlichten Dokumenten, einschließlich Research-Veröffentlichungen, vertreten werden. Die vorstehenden Angaben werden nur zu Informationszwecken und ohne vertragliche oder sonstige Verpflichtung zur Verfügung gestellt. Für die Richtigkeit, Vollständigkeit oder Angemessenheit der vorstehenden Angaben oder Einschätzungen wird keine Gewähr übernommen.

In Deutschland wird dieser Bericht von Deutsche Bank AG Frankfurt genehmigt und/oder verbreitet, die über eine Erlaubnis zur Erbringung von Bankgeschäften und Finanzdienstleistungen verfügt und unter der Aufsicht der Europäischen Zentralbank (EZB) und der Bundesanstalt für Finanzdienstleistungsaufsicht (BaFin) steht. Im Vereinigten Königreich wird dieser Bericht durch Deutsche Bank AG, Filiale London, Mitglied der London Stock Exchange, genehmigt und/oder verbreitet, die von der UK Prudential Regulation Authority (PRA) zugelassen wurde und der eingeschränkten Aufsicht der Financial Conduct Authority (FCA) (unter der Nummer 150018) sowie der PRA unterliegt. In Hongkong wird dieser Bericht durch Deutsche Bank AG, Hong Kong Branch, in Korea durch Deutsche Securities Korea Co. und in Singapur durch Deutsche Bank AG, Singapore Branch, verbreitet. In Japan wird dieser Bericht durch Deutsche Securities Inc. genehmigt und/oder verbreitet. In Australien sollten Privatkunden eine Kopie der betreffenden Produktinformation (Product Disclosure Statement oder PDS) zu jeglichem in diesem Bericht erwähnten Finanzinstrument beziehen und dieses PDS berücksichtigen, bevor sie eine Anlageentscheidung treffen.

Druck: HST Offsetdruck Schadt & Tetzlaff GbR, Dieburg

ISSN (Print): 2511-1663