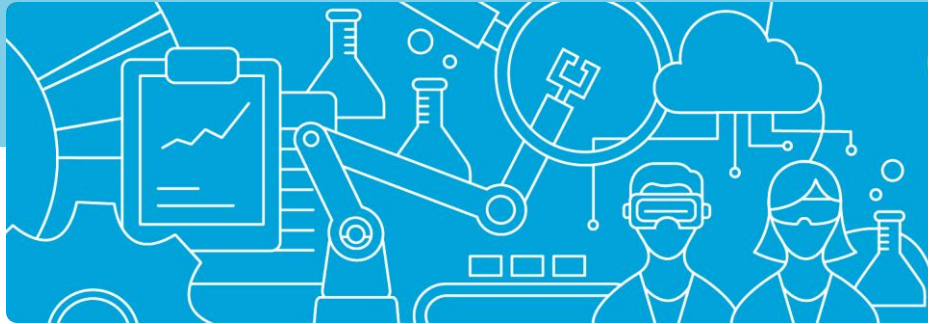


Studie zum deutschen Innovationssystem | Nr. 7-2025



Thomas Schmaltz, Chie Endo, Robin Eßwein, Juliane Groth, Sonia Gruber, Henning Kroll,
Manuel Molina Vogelsang, Peter Neuhäusler, Lukas Weymann

Quantentechnologien und Quanten-Ökosysteme



Diese Studie wurde im Auftrag der Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI) erstellt. Die Ergebnisse und Interpretationen liegen in der alleinigen Verantwortung der durchführenden Institute. Die EFI hat auf die Abfassung des Berichts keinen Einfluss genommen.

Durchführendes Institut

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
www.isi.fraunhofer.de

Studien zum deutschen Innovationssystem

Nr. 7-2025
ISSN 1613-4338

Stand

Februar 2025

Herausgeberin

Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI)

Geschäftsstelle

Pariser Platz 6 | 10117 Berlin
www.e-fi.de

Alle Rechte vorbehalten, insbesondere das Recht auf Vervielfältigung und Verbreitung sowie Übersetzung. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (durch Fotokopie, Mikrofilm oder ein anderes Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung der EFI oder der Institute reproduziert oder unter Verwendung elektronischer Systeme gespeichert, verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

Kontakt und weitere Informationen

Dr. Thomas Schmaltz
Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI
Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
T +49 (0) 721 6809-239
M thomas.schmaltz@isi.fraunhofer.de

Impressum

Schwerpunktstudie „Quantentechnologien und Quanten-Ökosysteme“

Projektleitung

Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI

Breslauer Straße 48, 76139 Karlsruhe
Thomas Schmaltz, thomas.schmaltz@isi.fraunhofer.de

Verantwortlich für den Inhalt des Textes

Chie Endo, chie.endo@isi.fraunhofer.de
Robin Eßwein, robin.esswein@isi.fraunhofer.de
Juliane Groth, juliane.groth@isi.fraunhofer.de
Sonia Gruber, Sonia.Gruber@isi.fraunhofer.de
Henning Kroll, Henning.Kroll@isi.fraunhofer.de
Manuel Molina Vogelsang, manuel.molina.vogelsang@isi.fraunhofer.de
Peter Neuhäusler, Peter.Neuhaeusler@isi.fraunhofer.de
Thomas Schmaltz, thomas.schmaltz@isi.fraunhofer.de
Lukas Weymann, lukas.weymann@isi.fraunhofer.de

Beteiligte Institute

Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie IMW, seit 1.1.2025 Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI, Standort Leipzig

Martin-Luther-Ring 13, 04109 Leipzig
Manuel Molina Vogelsang, manuel.molina.vogelsang@isi.fraunhofer.de

Verfasst im Auftrag von

EFI-Geschäftsstelle Expertenkommission Forschung und Innovation (vertreten durch WiStat gGmbH)
Pariser Platz 6, 10117 Berlin

Veröffentlicht

2025

Hinweise

Dieser Bericht einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Die Informationen wurden nach bestem Wissen und Gewissen unter Beachtung der Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis zusammengestellt. Die Autorinnen und Autoren gehen davon aus, dass die Angaben in diesem Bericht korrekt, vollständig und aktuell sind, übernehmen jedoch für etwaige Fehler, ausdrücklich oder implizit, keine Gewähr. Die Darstellungen in diesem Dokument spiegeln nicht notwendigerweise die Meinung des Auftraggebers wider.

Inhaltsverzeichnis

0	Zusammenfassung	7
1	Einleitung	10
2	Methoden	11
3	Fachlos 1: Quantentechnologien – aktueller Stand, ihre Potenziale und Herausforderungen	14
3.1	Quantensensorik und -metrologie	14
3.1.1	Überblick über Quantensensortechnologien und deren potenzielle Anwendungen	14
3.1.2	Übergreifende Chancen, Risiken Herausforderungen in der Quantensensorik	16
3.1.3	Stand der Technik, Potenziale und Herausforderungen verschiedener Quantensensor-Technologien.....	16
3.1.4	Analyse und Abschätzung des Innovationspotenzials ausgewählter Anwendungsbereiche der Quantensensorik und -metrologie	33
3.2	Quantenkommunikation und -kryptografie	35
3.2.1	Quantenzufallszahlengeneratoren	36
3.2.2	Quantenschlüsselverteilung	38
3.2.3	Quantenrepeater.....	45
3.2.4	Analyse und Abschätzung des Innovationspotenzials ausgewählter Anwendungsbereiche der Quantenkommunikation und -kryptographie	48
3.3	Quantencomputing	49
3.3.1	Begrifflichkeiten und Funktionsweise	49
3.3.2	Stand der Technik.....	51
3.3.3	Chancen, Risiken und Herausforderungen.....	55
3.3.4	Abschätzung des Innovationspotenzials von Quantencomputing	57
4	Fachlos 2: Forschungs-, Innovations- und Diffusionsaktivitäten im internationalen Vergleich	60
4.1	Publikationsaktivitäten	60
4.2	Patentaktivitäten	67
4.3	Gründungs- und andere unternehmerische Aktivitäten	73
5	Fachlos 3: Bestandsaufnahme und Vergleich der deutschen und internationalen F&I-Politik	78
5.1	Allgemeine Einleitung	78
5.2	Analyse der F&I-Politik ausgewählter Länder für Quantentechnologien	81
5.2.1	Deutschland.....	81
5.2.2	Frankreich.....	88
5.2.3	Großbritannien.....	92
5.2.4	Europäische Union	97

5.2.5	Kanada.....	103
5.2.6	USA.....	108
5.2.7	China	112
5.2.8	Japan.....	116
5.2.9	Südkorea.....	121
5.3	Implikationen für die deutsche F&I Politik.....	125
6	Exkurs: Schlüsseltechnologiecharakter von Quantentechnologien	127
7	Problemanalyse und Handlungsempfehlungen	129
7.1	Problemanalyse: Hemmnisse für Quantentechnologie-bezogene F&I- Aktivitäten in Deutschland	129
7.2	Handlungsempfehlungen	132
8	Danksagungen.....	136
9	Literaturverzeichnis	137

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AFM	Rasterkraftmikroskop (engl. Atomic Force Microscope)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung (Deutschland)
BMF	Bundesministerium der Finanzen (Deutschland)
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Deutschland)
CAICT	China Academy of Information and Communications Technology
CAS	Chinesische Akademie der Wissenschaften
CNRS	Centre National de la Recherche Scientifique (Frankreich)
CSAC	Atomuhren in Größe eines Chips (engl. Chip Scale Atomic Clocks)
CSTI	Rat für Wissenschaft, Technologie und Innovation (engl. Council for Science, Technology and Innovation) (Japan)
CV-QKD	Continuous Variable QKD
DI-QKD	Device-Independent QKD
DOD	Department of Defense (USA)
DOE	Department of Energy (USA)
DSQT	Danish Strategy for Quantum Technology
GMR	Riesenmagnetowiderstand (engl. giant magnetoresistance)
GNSS	Globalen Navigationssatellitensystemen
IITP	Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (Südkorea)
INRIA	Institut National de Recherche en Informatique et en Automatique (Frankreich)
JST	Japan Science and Technology Agency
MDI-QKD	Measurement-Device-Independent QKD
MEMS	Mikroelektromechanischen Systemen
METI	Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie (Japan)
MEXT	Ministerium für Bildung, Kultur, Sport, Wissenschaft und Technologie (Japan)
MIC	Ministerium für Informations- und Kommunikationsangelegenheiten (Japan)
MIIT	Ministerium für Industrie und Informationstechnik (China)
MoST	Ministerium für Wissenschaft und Technologie (China)
MSIT	Ministerium für Wissenschaft und IKT (Südkorea)
NISQ	Noisy Intermediate-Scale Quantum
NIST	National Institute of Standards and Technology (USA)
NQCO	National Quantum Coordination Office (USA)

NQI	Nationalen Quanteninitiative (engl. National Quantum Initiative) (USA)
NQIA	National Quantum Initiative Act (USA)
NQIAC	National Quantum Initiative Advisory Committee (USA)
NQS	National Quantum Strategy (Großbritannien)
NQTP	National Quantum Technologies Programme (Großbritannien)
NRF	National Research Foundation of Korea (Südkorea)
NSF	National Science Foundation (USA)
NSFC	Die National Natural Science Foundation of China
NSTC	National Science and Technology Council (USA)
NV-Zentren	Stickstoff-Fehlstellen-Zentren
ODMR	Optisch Detektierte Magnetische Resonanz Technik
OPM	Optically Pumped Magnetometer
OSTP	Office of Science and Technology Policy (USA)
PQC	Post-Quanten-Kryptographie
PRNG	pseudo-Random Number Generator
QED-C	Quantum Economic Development Consortium (USA)
QIS	Quanteninformatikwissenschaft
QKD	Quantenschlüsselverteilung (engl. Quantum Key Distribution)
QPU	Quantum Processing Unit
QRNG	Quantenzufallszahlengenerator (engl. Quantum Random Number Generator)
Q-STAR	Quantum Strategic Industry Alliance for Revolution (Japan)
R&D	Research and Development
Si-SPAD	Silicon Single-Photon Avalanche Diode
SNSPD	Superconducting Nanowire Single-Photon Detector
SPDC	Spontaneous Parametric Down Conversion
SQI	Swiss Quantum Initiative (Schweiz)
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
TES	Transition Edge Sensor
TF-QKD	Twin-Field QKD
TMR	Tunneling Magnetoresistance
TRL	Technology Readiness Level
TRNG	True Random Number Generator

0 Zusammenfassung

Quantentechnologien – aktueller Stand, ihre Potenziale und Herausforderungen

Die Quantentechnologien lassen sich in drei Technologiefelder einteilen: Quantensensorik und -metrologie, Quantenkommunikation und -kryptografie sowie Quantencomputing und -simulation. Dieser Bericht diskutiert relevante Technologien entlang dieser Technologiefelder, beschreibt ihre Funktionsweise und (potenzielle) Anwendungen, und diskutiert Chancen, Risiken und Herausforderungen.

Die **Quantensensorik und -metrologie** nutzt Quantensysteme und -phänomene zur präzisen Messung physikalischer Größen mit einer Genauigkeit, die oft weit über klassische Methoden hinausgeht. Verschiedene Sensortechnologien können den Quantensensoren bzw. der Quantenmetrologie zugerechnet werden, z. B. Atomuhren, Magnetfeldsensoren wie SQUIDs, OPMs, GMR- und TMR-Sensoren sowie NV-Zentren-basierte Magnetsensoren, optische Sensoren, Quantengravimeter, Quantensensoren zur Druckmessung sowie verschiedene optische Quantenverfahren, wie z. B. die Quantenbildgebung, die Quantenmikroskopie und der Quantenradar. Diese Technologien sind teils bereits etabliert, teils noch im Forschungsstadium, bieten aber meist durch ihre höhere Messgenauigkeit (teils deutliche) Mehrwert für zahlreiche Anwendung, wie z. B. in der medizinischen Diagnostik. Herausforderungen bestehen darin, diese Technologien bereit für den Einsatz in Anwendungen zu machen, z. B. durch Miniaturisierung, Verbesserung der Anwenderfreundlichkeit und Robustheit sowie Kostensenkung.

Die **Quantenkommunikation und -kryptografie** beschreibt Technologien, die Quanteneigenschaften gezielt ausnutzen, um sichere Kommunikation zu gewährleisten, oder Quantenzustände über länger Distanzen zu verteilen. Dazu gehören Quantenzufallszahlengeneratoren (Quantum random number generators – QRNGs), die Quantenschlüsselverteilung (Quantum Key Distribution – QKD) und Quantenrepeater. QRNGs erlauben es beweisbar zufällige Zufallszahlen zu erzeugen, was z. B. für die Kryptographie einen Mehrwert bieten kann. QKD stellt eine prinzipiell sichere Kommunikationsmethode dar, die auf Grundlage der Quantenmechanik einen Schlüsselaustausch zwischen Sender zu einem Empfänger erlaubt, wobei das Abhören dieses Schlüssels detektiert werden kann. Diese Verfahren bieten sich für die hochsichere Kommunikation an, aber neben Implementierungsherausforderungen, bestehen auch noch Herausforderungen beim Infrastrukturaufbau sowie der Zertifizierung und der Zulassung für den öffentlichen Sektor. Quantenrepeater stellen eine Zukunftstechnologie dar, die es ermöglicht, über größere Strecken Verschränkungszustände zu verteilen. Dies könnte in Zukunft neben der sicheren Kommunikation auch verteiltes Quantenrechnen oder verteilte Sensorik ermöglichen. Die Technologie ist jedoch noch bei geringer technologischer Reife und es ist noch deutlicher Forschungsaufwand nötig.

Quantencomputing und -simulation nutzt quantenmechanische Prinzipien und bietet das Potenzial, komplexe mathematische Probleme (der Klasse NP) schneller zu lösen als klassische Computer, was neue Anwendungen in Bereichen wie Kryptographie, maschinellem Lernen und chemischer Forschung ermöglichen könnte. Trotz der Vorteile steht die Technologie vor erheblichen technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen, insbesondere im Hinblick auf Fehlerkorrektur, Skalierbarkeit und hoher Kosten. Der aktuelle Stand der Technik zeigt Fortschritte, aber voll funktionsfähige, fehlerkorrigierte Quantencomputer werden erst in 20-30 Jahren erwartet. Die Entwicklung erfordert große Investitionen, enge Zusammenarbeit und kontinuierliche Forschung, wobei hybride Systeme als Übergangslösung dienen könnten.

Forschungs-, Innovations- und Diffusionsaktivitäten im internationalen Vergleich

Der Anteil der *Publikationen* zu Quantentechnologien ist im Vergleich zur Gesamtzahl aller akademischen Veröffentlichungen gering, jedoch steigend. Im Technologiefeld Quantencomputing sind die Publikationen weltweit am höchsten unter den Quantentechnologien. In allen drei Technologiefeldern Quantencomputing, Quantensensorik und Quantenkommunikation dominieren China, die USA und Europa die weltweiten Aktivitäten. China dominiert dabei insbesondere bei der Quantenkommunikation und -sensorik, liegt aber in der Sichtbarkeit der Publikationen in allen Bereichen hinter den führenden westlichen Akteuren. Auch Deutschland nimmt eine starke Rolle in der Quantentechnologieforschung ein, besonders im europäischen Kontext.

Patentanmeldungen sind ein zentraler Innovationsindikator in technologierelevanten Märkten und reflektieren die technologische Wettbewerbsfähigkeit auf verschiedenen Ebenen. Im Bereich der Quantentechnologien hat insbesondere das Quantencomputing seit 2012 einen signifikanten Anstieg bei transnationalen Patentanmeldungen verzeichnet. Die USA sind weltweit führend in Patentanmeldungen, gefolgt von der EU und China. Pro Kopf betrachtet, weist die Schweiz die höchste Patentintensität auf, während die USA trotz großer Einwohnerzahl ebenfalls eine Spitzenposition einnehmen. Deutschland zeigt im Bereich der Quantentechnologien relativ ausgeglichene Anteile bei den Patentanmeldungen nach Technologiefeldern, mit Schwerpunkten in Quantencomputing und Quantenkommunikation, und weist eine vergleichsweise hohe internationale Kooperationsrate auf.

Im Rahmen einer *Analyse von in den Quantentechnologien aktiven Firmen* wurden weltweit 473 Unternehmen im Quantencomputing, 22 in Quantensensorik und -imaging sowie 86 in der Quantenkommunikation identifiziert. Die meisten Unternehmen sind in den USA (insb. im Quantencomputing) und China (insb. in der Quantenkommunikation) ansässig. Auch im Bereich der Startups zeigt sich, dass die meisten im Quantencomputing angesiedelt sind. Aus Deutschland stammen insgesamt 18 Startups, von denen die Mehrheit Spin-Offs aus Forschungseinrichtungen oder Hochschulen sind.

Bestandsaufnahme und Vergleich der deutschen und internationalen F&I-Politik

In den letzten Jahren haben viele Länder nationale Quantenstrategien entwickelt, um Forschung, Entwicklung und Innovation im Bereich der Quantentechnologien zu fördern, darunter Deutschland, Frankreich, Großbritannien, China, die USA, Kanada, Japan, Südkorea und die EU. Die globalen staatlichen Investitionen werden auf über 40 Milliarden US-Dollar geschätzt. Die Strategien zielen darauf ab, wissenschaftliche Exzellenz zu stärken, industrielle Anwendungen voranzutreiben und die internationale Wettbewerbsfähigkeit zu sichern, wobei internationale Zusammenarbeit und die Ausbildung von Fachkräften wesentliche Elemente sind. Quantentechnologien bieten voraussichtlich erhebliches wirtschaftliches Potenzial und sind auch für die nationale Sicherheit von Bedeutung. Länder ohne umfassende Quantenstrategien könnten deshalb im technologischen und wirtschaftlichen Wettbewerb zurückfallen.

Exkurs: Schlüsseltechnologien

Quantentechnologien haben das Potenzial, bestehende Anwendungen grundlegend zu verändern und neue Anwendungsfelder zu erschließen, was sie zu wesentlichen, transformativen

Technologien macht. Jedoch erfüllen sie derzeit nicht alle Kriterien, um als Schlüsseltechnologien im engeren Sinne betrachtet zu werden, da Anwendungen in der Breite aktuell noch nicht absehbar sind und eine disruptive Wirkung noch spekulativ ist. Trotz ihres hohen Innovationswertes und kontinuierlichen Wachstums in Publikationen und Patenten, bleibt ihr breiter, disruptiver Einfluss bis jetzt begrenzt, wobei ihre zukünftige Förderwürdigkeit und das Potenzial für bedeutende Durchbrüche unbestritten bleiben.

Handlungsempfehlungen für die Politik

Aufgrund des großen Potenzials und des gestiegenen internationalen Interesses an Quantentechnologien sind signifikante Weiterentwicklungen wahrscheinlich. Damit auch Deutschland eine entscheidende Rolle in diesem Bereich spielen kann, ist eine kontinuierliche und langfristige öffentliche Förderung notwendig. Dies umfasst die Sicherstellung eines strategischen Rahmens und die Bereitstellung von Finanzierung für Forschung, Entwicklung und die praktische Umsetzung. Der Ausbau von Innovationssystemen und die Schaffung von geeigneten Rahmenbedingungen, einschließlich Normen, Standardisierungen und der Reduzierung bürokratischer Hürden, sind ebenfalls entscheidend. Zudem sollten junge Unternehmen durch den Zugang zu technischer Infrastruktur und Risikokapital unterstützt werden, um den Sektor zu entwickeln und neue High-Tech-Märkte zu erschließen. Eine verstärkte Förderung von Softwareentwicklung und praktischen Anwendungen (Co-Development) sowie die Sicherstellung der Ausbildung und Weiterbildung von Fachkräften sind ebenfalls notwendig, um die Innovationspotenziale der Quantentechnologien voll auszuschöpfen und deren wirtschaftliche Bedeutung zu realisieren.

1 Einleitung

Das Interesse um die Quantentechnologien hat in den letzten Jahren stark zugenommen und das disruptive Innovationspotenzial von Quantentechnologien, einzeln und in ihrem Zusammenwirken mit anderen Technologien, wird aktuell intensiv diskutiert. Der internationale Wettlauf darum, welche Organisationen, Netzwerke und/oder Ökosysteme eine führende Position in Wissenschaft und industrieller Umsetzung einnehmen werden, hat längst begonnen. Unternehmen und die öffentliche Hand investieren weltweit intensiv in die Quantentechnologien, da die technologische Entwicklung und industrielle Umsetzung trotz der erwarteten Innovationspotenziale meist noch in den Anfängen stecken.

Mit dem Rahmenprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ hat die Bundesregierung einen strategisch und ressortübergreifend angelegten Förderansatz zur Erschließung neuer technologischer und ökonomischer Potenziale vorgestellt. Jüngst wurde das Handlungskonzept Quantentechnologien der Bundesregierung veröffentlicht. Deutschland hat in den Quantentechnologien eine gute Ausgangsposition. Diese rührt aus einer diversen Wissenschaftslandschaft mit exzellenten Forschungseinrichtungen, bei gleichzeitig hoher Dichte an potenziellen Herstellern und industriellen Anwendern. Doch technologische Stärken, das haben zahlreiche Beispiele (wie z. B. Digitalisierung, Mikroelektronik, etc.) in der Vergangenheit gezeigt, bedingen nicht automatisch eine hohe wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit, Wertschöpfung und Innovationsführerschaft.

Ziel dieser Studie ist es, das Innovationspotenzial von Quantentechnologien für zentrale Anwendungsbereiche in Wirtschaft und Gesellschaft aufzuzeigen und gleichzeitig die damit einhergehenden Chancen, Risiken und Herausforderungen für die deutsche F&I-Politik zu benennen. Mittels qualitativer Analyseverfahren werden (i) der aktuelle Stand, Potenziale und Herausforderungen in einzelnen Technologiefeldern analysiert und dargestellt. Quantitative Analysen bieten (ii) Einblicke in Forschungs- Entwicklungs- und Innovationsaktivitäten im internationalen Vergleich und bewerten die Position Deutschlands und Europas bei technologischer Leistungsfähigkeit. Auf Basis einer Bestandsaufnahme und internationalem Vergleich der laufenden und geplanten Aktivitäten und Maßnahmen der F&I Politik in relevanten Ländern/Regionen werden (iii) Erfahrungen in anderen Ländern reflektiert und die Übertragbarkeit auf Deutschland bewertet. Im Ergebnis werden Handlungsempfehlungen für die deutsche F&I-Politik abgeleitet.

2 Methoden

Fachlos 1

Um einen Überblick über die Quantentechnologien, ihren aktuellen Stand, ihre Potenziale und Herausforderungen zu geben, wurde eine ausgedehnte Literaturrecherche der relevanten Literatur durchgeführt. Dabei wurden insbesondere die wissenschaftliche Literatur sowie nichtwissenschaftliche (graue) Literatur und weitere Studien analysiert. Um die extrahierten Ergebnisse zu ergänzen und zu validieren, wurden leitfadengestützte Interviews mit Expert:innen aus Industrie und Forschung durchgeführt.

Fachlos 2

Zur Analyse der *Patente* wurde die „EPO Worldwide Patent Statistical Database“ (PATSTAT), verwendet, die Informationen über veröffentlichte Patente von über 80 Patentbehörden weltweit enthält. Die Patente wurden nach dem Jahr der weltweiten Erstanmeldung, dem sogenannten Prioritätsjahr, gezählt. Dies ist das früheste registrierte Datum im Patentprozess und liegt daher dem Datum der Erfindung am nächsten. Zur Zählung der Patente wurde das Konzept der transnationalen Patentanmeldungen verwendet. [1] Hierbei werden alle PCT-Anmeldungen gezählt, unabhängig davon, ob sie an das EPA weitergeleitet wurden oder nicht, sowie alle direkten EPA-Anmeldungen ohne PCT-Vorläuferanmeldung. Eine Doppelzählung von übertragenen Euro-PCT-Anmeldungen ist damit ausgeschlossen.

Für Länderanalysen wurde das so genannte „Erfinderprinzip“ angewendet, das heißt, dass Patente nach dem Land der auf der Anmeldung benannten Erfinder:innen zugeordnet werden. Die Patente werden dabei fraktioniert gezählt.

Tabelle 1: Suchstrategien für Patentrecherche

Quantum computing	Quantum Sensor/Imaging	Quantum Communication
(“quantum comput*” OR “quantum simulat*” OR “quantum process*” OR qpu OR “quantum circuit” OR “quantum system” OR “quantum device” OR “quantum annealer” OR “quantum bit” OR qubit OR “quantum information processing” OR “quantum software” OR “quantum algorithm” OR “quantum annealer” OR “quantum logic gate” OR “quantum lattice” OR “noisy intermediate scale quantum” OR NISQ) AND (G06N 10* OR G16C 10/00 OR G16C 10/00 OR G06N 99/00 OR H01L 39/22 OR H01N 60/10 OR H01N 60/12 OR H01L 29/66) OR G06N 10	(“quantum sens*” OR “quantum-based sens*” OR “quantum imag*” OR “ghost imag*” OR “quantum measur*” OR “quantum metrol*” OR “quantum gravimet*” OR “quantum clock” OR “quantum magnetomet*” OR “atomic clock” OR SQUID OR “superconducting quantum interference device” OR (NV NEAR center NEAR sens*) OR “quantum tomograph*” OR “quantum lithography” OR “quantum illumination” OR “quantum ellipsometry”)	(“quantum communication” OR “quantum key distribution” OR (“quantum cryptography” NOT “post-quantum cryptography”) OR QKD OR “quantum repeater” OR (“quantum memory” AND communication) OR (“entangled photon” AND communication) OR (Entanglement AND communication) OR (“entangled state” AND communication) OR (entanglement AND distribution) OR (“Bell state” AND communication) OR “quantum information transmission” OR “quantum network” OR “quantum random number”) AND (H04B/IPC OR H04L/IPC OR H04B0010-70/IPC OR (H04L0009-0852 OR H04L0009-0855 OR H04L0009-0858)/CPC

Die *Publikationsdaten* wurden durch eine gezielte, SQL-basierte Suche in der Literaturdatenbank Elsevier SCOPUS erhoben. In die Zählung mit einbezogen wurden Forschungsartikel, Reviews, Letters und Notes (entsprechend dem Standard der in den vergangenen Jahren für die EFI durchgeführten Analysen). Die Zuordnung der Region / des Landes, erfolgte, der Struktur

der Datenbank folgend entsprechend der Affiliation der beteiligten Autor:innen. Waren an einem Papier mehr als ein:e Autor:in beteiligt oder hatten Autor:innen Mehrfachaffiliationen, wurden die entsprechenden Papiere in allen so als Affiliation identifizierten Ländern als inhaltlicher Beitrag gezählt (erneut entsprechend dem Standard der in den vergangenen Jahren für die EFI durchgeführten Analysen). Der zugrundeliegende Gedanke ist, dass sich das durch gemeinsame wissenschaftliche Arbeit von allen Autor:innen gemeinsam geschaffene Wissen nicht ex-post wieder anteilig auf diese verteilt.

Die untenstehende Suchstrategie wurde zunächst von Fachexpert:innen des Fraunhofer ISI und das Fraunhofer IMW und darüber hinaus in externen Expert:innen-Gesprächen validiert. Sie ist im Wesentlichen konkordant zur Suchstrategie für Patente, nimmt allerdings die vorlaufende Eingrenzung auf relevante Bereiche nicht anhand von Klassen, sondern anhand von Disziplinen vor. Teilweise wurden Begriffe wie SQUID gefiltert, da sie im Rahmen der Publikationsanalysen systematisch zu vielen falsch positiven Ergebnissen führten, um diese gezielt zu filtern.

Tabelle 2: Suchstrategien für Publikationsrecherche

Quantum computing	Quantum Sensor/Imaging	Quantum Communication
(“quantum comput*” OR “quantum simulat*” OR “quantum process*” OR qpu OR “quantum circuit” OR “quantum system” OR “quantum device” OR “quantum annealer” OR “quantum bit” OR qubit OR “quantum information processing” OR “quantum software” OR “quantum algorithm” OR “quantum annealer” OR “quantum logic gate” OR “quantum lattice” OR “noisy intermediate scale quantum” OR NISQ)	(“quantum sens*” OR “quantum-based sens*” OR “quantum imag*” OR “ghost imag*” OR “quantum measur*” OR “quantum metro*” OR “quantum gravimet*” OR “quantum clock” OR “quantum magnetomet*” OR “atomic clock” OR “quantum interference device” OR (NV NEAR center NEAR sens*) OR “quantum tomograph*” OR “quantum lithography” OR “quantum illumination” OR “quantum ellipsometry”)	(“quantum communication” OR “quantum key distribution” OR (“quantum cryptography” NOT “post-quantum cryptography”) OR QKD OR “quantum repeater” OR (“quantum memory” AND communication) OR (“entangled photon” AND communication) OR (Entanglement AND communication) OR (“entangled state” AND communication) OR (entanglement AND distribution) OR (“Bell state” AND communication) OR “quantum information transmission” OR “quantum network” OR “quantum random number”)
<i>In folgenden Kategorien:</i>	<i>In folgenden Kategorien:</i>	<i>In folgenden Kategorien:</i>
1000 Multidisciplinary 16* Chemistry 17* Computer Science (all) 22* Engineering (all) 25* Materials Science 26* Mathematics (all) 31* Physics and Astronomy (all)	1000 Multidisciplinary 16* Chemistry 17* Computer Science (all) 22* Engineering (all) 25* Materials Science 26* Mathematics (all) 31* Physics and Astronomy (all)	1000 Multidisciplinary 16* Chemistry 17* Computer Science (all) 22* Engineering (all) 25* Materials Science 26* Mathematics (all) 31* Physics and Astronomy (all)

Als Datenbasis für die **Analysen der unternehmerischen Aktivitäten** wurden die Unternehmensdatenbank ORBIS sowie Crunchbase in Kombination verwendet, um möglichst alle Akteure im Bereich Quantentechnologien zu identifizieren. Orbis ist eine Unternehmensdatenbank, die von Moody's bereitgestellt wird. Sie ist eine der größten Datenbanken dieser Art weltweit, die etwa 150 Millionen Unternehmen – hauptsächlich aus dem privaten Sektor – umfasst. Crunchbase beinhaltet Unternehmens- und Wirtschaftsinformationen mit Schwerpunkt auf Technologieunternehmen und -investoren und enthält Informationen zu Unternehmen weltweit. Zur Identifizierung der Unternehmen im Bereich Quantentechnologien wurde eine Stichwortsuche in den Beschreibungen der Unternehmen in beiden Datenbanken verwendet, wobei Doppelzählungen ausgeschlossen wurden.

Tabelle 3: Schlüsselworte für die Stichwortsuche nach Unternehmen in ORBIS und Crunchbase

Quantum computing	Quantum Sensor/Imaging	Quantum Communication
(“quantum comput*” OR “quantum simulat*” OR “quantum process*” OR qpu OR “quantum circuit” OR “quantum system” OR “quantum device” OR “quantum annealer” OR “quantum bit” OR qubit OR “quantum information processing” OR “quantum software” OR “quantum algorithm” OR “quantum annealer” OR “quantum logic gate” OR “quantum lattice” OR “noisy intermediate scale quantum” OR NISQ)	(“quantum sens*” OR “quantum-based sens*” OR “quantum imag*” OR “ghost imag*” OR “quantum measur*” OR “quantum metrol*” OR “quantum gravimet*” OR “quantum clock” OR “quantum magnetomet*” OR “atomic clock” OR SQUID OR “superconducting quantum interference device” OR (NV NEAR center NEAR sens*) OR “quantum tomograph*” OR “quantum lithography” OR “quantum illumination” OR “quantum ellipsometry”)	(“quantum communication” OR “quantum key distribution” OR (“quantum cryptography” NOT “post-quantum cryptography”) OR QKD OR “quantum repeater” OR (“quantum memory” AND communication) OR (“entangled photon” AND communication) OR (Entanglement AND communication) OR (“entangled state” AND communication) OR (entanglement AND distribution) OR (“Bell state” AND communication) OR “quantum information transmission” OR “quantum network” OR “quantum random number”)

Fachlos 3

Um die laufenden und geplanten F&I Aktivitäten im Bereich der Quantentechnologien in Deutschland und international relevanter Länder/Regionen zu analysieren und zu vergleichen, wurde zunächst eine Sekundärdatenanalyse durchgeführt. Hierzu wurde die relevante Literatur, insbesondere Strategiedokumente und Roadmaps von Regierungen und Förderorganisationen, sowie weitere Studien und verfügbare Förderdaten systematisch recherchiert, gesammelt und strukturiert. In Online-Interviews mit Expert:innen der entsprechenden Länder wurden die gesammelten Informationen ergänzt und validiert sowie Einschätzung zu Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken der jeweiligen Länderstrategien und -programme eingeholt.¹

Aus den Ergebnissen der vorangehenden Arbeiten wurden in einem internen Workshop des Autor:innen-Teams Handlungsempfehlungen für die deutsche Politik abgeleitet, um den Herausforderungen und Förderbedarfen in der Ökosystementwicklung in Deutschland zu begegnen. Diese wurden weiterführend in einem Online-Mini-Workshop mit Expert:innen aus Wissenschaft und Wirtschaft diskutiert und ergänzt.

¹ Für Südkorea und China wurde trotz zahlreicher Anfragen kein:e Interviewpartner:in gefunden, die/der bereit war mit uns über diese Thematik zu sprechen. Für China wurde dies durch eine schriftliche Rückmeldung kompensiert, für Südkorea durch eine vertiefte Nachrecherche. Für die USA konnte trotz intensiver Suche nur mit einem Vertreter eines Großunternehmens gesprochen werden.

3 Fachlos 1: Quantentechnologien – aktueller Stand, ihre Potenziale und Herausforderungen

Die Quantentechnologien stellen einen breiten Technologiebereich mit zahlreichen Technologien dar. Um diese Technologien sinnvoll betrachten zu können, wurden sie in diesem Bericht in drei Technologiefelder eingeteilt:

- Quantensensorik und -metrologie
- Quantenkommunikation und -kryptografie
- Quantencomputing und -simulation

Entlang dieser Einteilung wird in diesem Kapitel der Stand der Technik der Quantentechnologien erörtert, kritische Meilensteine identifiziert und auftretende Hürden und Herausforderungen beleuchtet. Dieses Kapitel bietet somit einen strukturierten Überblick über den aktuellen Stand der Quantentechnologien und das Innovationspotenzial in verschiedenen Anwendungsbereichen.

3.1 Quantensensorik und -metrologie

Die Quantensensorik beschreibt die Nutzung eines Quantensystems, von Quanteneigenschaften oder Quantenphänomenen zur Messung einer physikalischen Größe. [2] Entsprechend gibt es zahlreiche Sensortechnologien, die den Quantensensoren zugerechnet werden können – aber nicht stets auch so genannt werden. Mit Quantensensoren können verschiedene physikalische Größen mit sehr hoher Präzision gemessen werden, die teils weit über das hinausgeht, was mit klassischen Messmethoden möglich ist. Im Folgenden werden die aus aktueller Sicht relevantesten Quantensensoren (ohne Gewähr auf Vollständigkeit), ihre Funktionsweise, (potenzielle) Anwendungen, Chancen, Risiken und Herausforderungen diskutiert.

Zunächst wird aber ein Überblick über die wichtigsten Ergebnisse der folgenden tiefergehenden Analyse gegeben.

3.1.1 Überblick über Quantensensortechnologien und deren potenzielle Anwendungen

Tabelle 4 gibt einen Überblick über die in dieser Studie betrachteten Quantensensortechnologien, deren Stand der Technologie sowie (potenziellen) Anwendungen. Informationen zur Funktionsweise und weitere Details finden sich in den folgenden Abschnitten.

Tabelle 4: Überblick über relevante Quantensensortechnologien:

Quantensensortechnologie	Stand der Technologie	(potenzielle) Anwendungen
Atomuhren	<ul style="list-style-type: none"> • Atomuhren auf Basis von Mikrowellen bereits etabliert (TRL 9) • Optische Atomuhren aktuell Gegenstand der F&E 	<ul style="list-style-type: none"> • Positionsbestimmung via GNSS • Präzise Zeitübertragung (Funkuhren) • Definition SI-Basiseinheit Sekunde

Magnetfeldmessung	<ul style="list-style-type: none"> • OPMs: bereits kommerziell erhältlich, aber noch nicht etabliert (TRL 8/9) • SQUIDs: etabliert (TRL 9) • NV-Zentren: bereits kommerziell erhältlich, aber noch nicht etabliert (TRL 8/9) • GMR: etabliert (TRL 9) 	<ul style="list-style-type: none"> • Medizinische Diagnostik (Herz- / Gehirnüberwachung) • Qualitätskontrolle von Materialien • Geologie / Archäologie • Forschung
Optische Sensoren	<ul style="list-style-type: none"> • hohe technologische Reife, bereits kommerziell erhältlich (TRL 9) 	<ul style="list-style-type: none"> • Quantenkommunikation und -computing • Biologie • Medizin • Astronomie • Forschung
Gravimeter	<ul style="list-style-type: none"> • Erste Produkte kommerziell erhältlich; für Spezialanwendungen, da groß und teuer 	<ul style="list-style-type: none"> • Geowissenschaften
Quantensensor zur Druckmessung	<ul style="list-style-type: none"> • Drucksensor auf Basis eines Fabry-Perot-Interferometer: bereits experimentell umgesetzt 	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere Genauigkeit für SI-Standard des Drucks • Metrologie • Halbleiterindustrie • sehr genaue Höhenbestimmung (z. B. in der Luftfahrt)
Optische Quantenverfahren	<ul style="list-style-type: none"> • Quantenmikroskopie (frühes F&E-Stadium) • Quantenlithographie (frühes F&E-Stadium) • Verfahren zur Rauschreduktion (z. B. Quantenradar) • Quantenbildgebung (Ghost imaging, Imaging with undetected photons) 	<ul style="list-style-type: none"> • Mikroskopie: höhere Auflösung, Abbildung von Details die klassisch nicht auflösbar sind, z. B. Medizin (Bioimaging auf zellulärer Ebene) • Lithographie • Hochempfindlicher Radar: z. B. militärische Anwendungen • Neue Bildgebungsverfahren, z. B. für empfindliche Proben in Bio- oder Medizintechnik • Optische Sensorik

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

3.1.2 Übergreifende Chancen, Risiken Herausforderungen in der Quantensensorik

Einige der Potenziale, Chancen, aber auch Risiken und Herausforderungen sind für viele Quantensensortechnologien gleich. Diese werden im Folgenden zusammengefasst:

Chancen: Quantensensoren bieten großes Potenzial zahlreiche verschiedene physikalische Messgrößen mit höherer Genauigkeit zu detektieren, als dies mit klassischen Sensoren möglich ist. Hierfür werden bestimmte Quanteneffekte ausgenutzt, die bspw. ermöglichen physikalische Größen in Messgrößen umzuwandeln, die mit einer höheren Präzision gemessen werden können (z. B. Frequenz, Spannung, etc.). Damit können zahlreiche Anwendungen verbessert werden (z. B. medizinische Diagnostik, genauere Navigation, etc.) und unter Umständen auch ganz neue Anwendungen erst ermöglicht werden (z. B. auch in der medizinischen Diagnostik). Ein weiterer Vorteil einiger Quantensensoren ist, dass diese Quantenzustände als Referenzgröße verwenden (z. B. Atomuhren, die Zustandsübergänge in Atomen als Referenzgröße verwenden). Somit brauchen diese Sensoren nicht extern kalibriert werden, da sie selbstreferenzierend sind, bzw. eine Quantengröße (z. B. spezieller Elektronenübergang in Atomen) im Sensor selbst als Referenz fungiert. Dies erhöht die Kontinuität und Zuverlässigkeit der Messungen der Quantensensoren. Darüber hinaus können solche Quantensensoren verwendet werden, um SI-Einheiten (z. B. Zeit, Druck) zu definieren. Je genauer der Sensor messen kann, desto genauer kann entsprechend auch die SI-Einheiten definiert werden.

Risiken: Quantensensoren befinden sich in der Regel in direkter Konkurrenz zu etablierten Sensortechnologien. Diese basieren häufig auf etablierten Halbleiterbauelementen, oder Mikroelektromechanischen Systemen (MEMS) für welche Miniaturisierung und Skalierung der Produktion durch klassische Halbleiterprozessierungsverfahren möglich und damit kostengünstig darstellbar sind. Entsprechend müssen Quantensensoren einen deutlichen Mehrwert gegenüber den etablierten Sensortechnologien – die auch laufend verbessert werden („moving target“) – liefern, um auf dem Markt eine Chance zum Einsatz zu haben. Der Mehrwert liegt dabei in der Regel in der besseren Performance (insb. Messempfindlichkeit). Dabei sollten die Abstriche in Punkto Kosten, Anwenderfreundlichkeit, Robustheit und Miniaturisierung jedoch idealerweise gering sein.

Herausforderungen: Die größten Herausforderungen für Quantensensoren sind dementsprechend die Anwenderfreundlichkeit, Miniaturisierung und Robustheit zu verbessern. Einige der Quantensensortechnologien benötigen z. B. kryogene Kühlung, was die Sensorsystem recht groß und die Nutzung aufwendig macht. Darüber hinaus muss bei einigen der Quantensensortechnologien die Produzierbarkeit über etablierte Verfahren verbessert werden, damit eine idealerweise kostengünstige Skalierung der Produktion ermöglicht wird. Eine weitere Herausforderung besteht darin, die Quantensensoren auf geeignete Weise in Anwendungen zu implementieren, so dass diese einen Mehrwert für die Anwendungen bringen.

3.1.3 Stand der Technik, Potenziale und Herausforderungen verschiedener Quantensensor-Technologien

In diesem Kapitel werden die Funktionsweise verschiedener Quantensensortechnologien beschrieben, deren Potenzial und Herausforderungen diskutiert und (potenzielle) Anwendungen aufgezeigt.

3.1.3.1 Atomuhren

Atomuhren nutzen die Gesetze der Quantenphysik, um die Zeit möglichst genau abzubilden. Atomuhren sind derzeit die genauesten Uhren; die Abweichung der besten Atomuhren liegt bei weniger als einer Sekunde in einem Zeitraum von 100 Millionen Jahren. Im Vergleich zu Quarzuhren, die auf den Gesetzen der klassischen Physik beruhen, sind sie um Größenordnungen genauer. [3]

Funktionsweise und Stand der Technik

Wie alle Arten von Uhren benötigen auch Atomuhren einen periodischen Taktgeber. Dieser periodische Vorgang wird dann gezählt und daraus die verstrichene Zeit berechnet. Bei Pendeluhren ist das zum Beispiel ein schwingendes Pendel. Bei Atomuhren dagegen sind es die Elektronen in Atomen, die zum Schwingen gebracht werden. Es wird die Frequenz von Elektronenübergängen zwischen definierten Energieniveaus genutzt. Als Taktgeber wird dabei meist Cäsium verwendet. Das Isotop Caesium-133 besitzt zwei Hyperfeinstrukturzustände, die einen konstanten Frequenz-Abstand von etwa 9,2 GHz haben. Richtet man nun Mikrowellenstrahlung mit genau dieser Frequenz, der Resonanzfrequenz, auf das Cäsium, so können die Cäsiumatome die Energie der Mikrowellenstrahlung absorbieren und in den höheren der beiden Hyperfeinstrukturzustände angeregt werden. Nach kurzer Zeit fällt das angeregte Cäsiumatom wieder in dessen Ausgangszustand zurück und emittiert dabei ein Photon. Weicht die Frequenz der Mikrowellen mit der Zeit von der festen Resonanzfrequenz der Cäsiumatome ab, kann dies erkannt und nachjustiert werden. Diese Selbstkalibrierung ist entscheidend für die hohe Genauigkeit der Atomuhren.

Darüber hinaus gibt es derzeit Entwicklungsprojekte "chip scale atomic clocks" (CSAC) zu entwickeln, das heißt vollständig integrierte optische Atomuhren im Chipmaßstab. [4] Dies würde den Einsatz der Technologie deutlich günstiger und einfacher machen. Hochmoderne CSAC hätten eine Auswirkung auf ein breites Anwendungsgebiet. Dazu gehören Gravitationsmessung und Fernerkundung, Zeitmessung und Navigation, die Synchronisierung von Kommunikationsnetzen und die Ermöglichung von in-situ SI-Kalibrierungen von Laborinstrumenten. [5]

Ein aktueller Durchbruch bei der Suche nach verbesserten Atomuhren wurde in einer Kollaboration zwischen der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und der TU Wien erzielt. In theoretischen Überlegungen wurde bereits vorhergesagt, dass mit Hilfe von Übergängen der Quantenzustände des Atomkerns präzisere Uhren gebaut werden können, als es mit den oben beschriebenen Energie-Übergängen von Elektronen in der Schale der Atome möglich ist. Atomkerne sind von der Elektronenhülle umgeben, wodurch sie geschützt und folglich weniger anfällig für externe Störungen durch Felder oder das chemische Umfeld sind. [6] Es wurde das Element Thorium-229 verwendet, da dieses zwei niederenergetische isomere Zustände besitzt, wodurch der Übergang mit einem Vakuum-Ultraviolett-Laser angeregt werden kann. Es konnte dabei erstmals eine Laseranregung des Th-229-Kernübergangs mit niedriger Energie demonstriert werden. Diese Ergebnisse sind ein wichtiger erster Schritt zur Realisierung von Atomkern-Uhren, mit noch höherer Genauigkeit. [7]

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Eine Verbesserung der Genauigkeit von Uhren hat nicht nur den Vorteil, dass Zeit präziser bestimmt werden kann. Außerdem werden dadurch auch andere Forschungsgebiete und Tech-

nologien vorangebracht. Beispiele sind die Erforschung der Gravitationswellen oder die Entwicklung von ultrastabilen Lasern. Optische Atomuhren haben das Potenzial, noch höhere Genauigkeiten als die oben beschriebenen Atomuhren auf Basis von Mikrowellen zu erreichen. Die Genauigkeit einer Uhr ist vor allem davon abhängig, wie exakt die Frequenz realisiert werden kann. Daher sollte die Resonanzfrequenz möglichst scharf sein, also eine geringe Frequenzbreite haben. Außerdem können präzisere Uhren gebaut werden, je höher die Taktfrequenz ist. Es werden daher neue Taktgeber mit einer höheren Frequenz als die der elektromagnetischen Mikrowellenstrahlung gesucht. Dies wäre bei sichtbarem Licht der Fall, welche eine etwa 100.000-fach höhere Frequenz hat. Dies würde zu einer etwa 100-mal höheren Genauigkeit führen. [8] Seit einigen Jahren wird daher an optischen Atomuhren gearbeitet, die mit einer optischen Resonanz arbeiten. Es gibt bereits einige Experimente, in denen die Realisierbarkeit demonstriert wurde, jedoch noch keine tatsächliche Anwendung. Allerdings werden die oben beschriebenen Cäsium Atomuhren aufgrund ihres simpleren Aufbaus auch in Zukunft relevant bleiben.

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Atomuhren stellen eine der derzeit ausgereiftesten Technologien in der Quantensensorik/-metrologie dar. Sie finden bereits sehr breite Anwendung im Alltag, zum Beispiel zur präzisen Einstellung von Funkuhren oder bei der Positionsbestimmung mit GPS-Systemen. Sogar die SI-Basiseinheit der Zeit, eine Sekunde, ist über die Periodendauer von Übergängen zwischen den oben beschriebenen Hyperfeinstrukturzuständen von Cäsium-133 definiert. [9] Zu den potenziell relevanten Anwendungsgebieten in der Zukunft gehören die Netzwerktechnik und der Hochfrequenzhandel.

Wie bereits erwähnt wird bei der Positionsbestimmung mittels globalen Navigationssatellitensystemen (GNSS), wie zum Beispiel der GPS-Technologie, die Zeitdifferenz zwischen Satelliten und Anwender gemessen, um dessen Standort zu berechnen. Eine Verbesserung der Präzision bei der Zeitmessung würde daher dazu führen, dass der Standort exakter festgestellt werden kann. Heutige Navigationssatelliten sind mit miniaturisierten Atomuhren, welche mit Mikrowellen arbeiten, ausgestattet. GPS bietet derzeit eine Genauigkeit von einigen Metern. Bei mit optischen Atomuhren ausgestatteten GNSS, könnte dieser Wert potenziell auf die Größenordnung Zentimeter oder sogar Millimeter verbessert werden. [10] Um optische Atomuhren außerhalb von Forschungslaboren in praktischen Anwendungen einsetzen zu können, müssen noch technische Hürden überwunden werden. Es muss beispielsweise an deren Robustheit und Miniaturisierung gearbeitet werden, um diese zuverlässig kommerziell oder in Satelliten anzuwenden. [11] Darüber hinaus spielen bei optische Atomuhren relativistische Effekte wie die Rotverschiebung durch das Gravitationspotenzial der Erde eine Rolle, [12] die bisher keinen relevanten Einfluss hatten. Dieser Einfluss könnte allerdings auch für Anwendungen in der Erdvermessung genutzt werden. [13]

3.1.3.2 Quantensensoren zur Magnetfeldmessung

Quantensensoren zur Magnetfeldmessung können winzige Änderungen der Magnetfeldstärke detektieren, teils auch mit hoher örtlicher Genauigkeit. Gemessen nach Marktvolumen sind die Magnetfeldsensoren, derzeit und voraussichtlich auch in den nächsten Jahren, die relevanteste Sensortechnologie aus der Quantensensorik. [3] Zu den Anwendungsgebieten zählen neben der Grundlagenforschung in der Physik auch die Navigation, die Mineralienexploration, die Detektion von elektrischen Strömen, Magnetokardiographie, die Bestimmung der Orientierung von

Drohnen und Fahrzeugen in Tunneln, Sonar, zelluläre Bildgebung, die Medizintechnik und Quantencomputer. [3]

Bei der technischen Umsetzung gibt es sehr verschiedene Ansätze bei denen unterschiedliche physikalische Prinzipien ausgenutzt werden. Dazu gehören das Atommagnetometer, Stickstoff-Fehlstellen-Zentren (NV-Zentren) in Diamant und sogenannte „Superconducting Quantum Interference Devices“ (SQUIDs), die im Folgenden genauer betrachtet werden.

3.1.3.2.1 Magnetfeldmessung mit OPMs

Atommagnetometer sind Geräte, die mit Hilfe von einzelnen Atomen ein Magnetfeld mit sehr hoher Präzision messen können. Die quantenmechanischen Zustände dieser Atome werden in einen definierten Ausgangszustand gebracht und anschließend durch externe Magnetfelder beeinflusst. Durch Messung der Zustandsänderung durch die externen Felder kann schließlich die Magnetfeldstärke bestimmt werden. Dabei gibt es mehrere verschiedene Arten von Atommagnetometern, dazu zählen beispielsweise "optisch gepumpte Magnetometer" (Optically Pumped Magnetometers, OPMs) und Protonen-Magnetometer. OPMs basieren auf der Quantenoptik und der Wechselwirkung zwischen Licht und Atomen. Protonen-Magnetometer basieren auf der Kernspinresonanz und nutzen die Präzessionsbewegung der Spins von Wasserstoffprotonen im Magnetfeld. Die höchste Genauigkeit bei der Messung erreicht man mit OPMs, welche deshalb hier genauer betrachtet werden.

Funktionsweise und Stand der Technik

Optische Magnetometrie umfasst verschiedene experimentelle Techniken, bei denen Licht verwendet wird, um die Reaktion des atomaren Drehimpulses auf äußere Magnetfelder zu messen. Als Grundlage dient ein Hochdruckdampf meistens aus den Alkalimetallen Rubidium oder Cäsium im gasförmigen Zustand. Alkalimetalle werden aufgrund ihrer Elektronenkonfiguration eingesetzt, die sich durch ein einzelnes Elektron in der äußersten Schale auszeichnet. Das einzelne ungepaarte Valenzelektron reagiert sehr empfindlich auf externe Magnetfelder. [14] Im ersten Schritt wird die Wechselwirkung zwischen den Atomen und dem Licht verwendet, um den quantenmechanischen Zustand der Gasatome mit Laserlicht zu präparieren. Eine Lichtquelle, meist ein Laser, mit Wellenlänge im sichtbaren oder nahen infraroten Bereich beleuchtet die Atome mit zirkular polarisiertem Licht, um sie in einen bestimmten Zustand anzuregen, in dem das magnetische Moment der Atome um die Strahlrichtung rotiert (Lamorpräzession) – ähnlich wie sich der magnetische Dipol der Erde um die Rotationsachse dreht. Dabei werden die Photonen von den Atomen absorbiert und deren Spin wird auf diese übertragen (optisches Pumpen). Sobald alle Atome des Gases das gleiche quantenmechanische Energieniveau besetzen, gibt es keine weitere Wechselwirkung zwischen Licht und Gas. Dies bedeutet, dass die Photonen das Gas ungehindert passieren und auf der anderen Seite von einem Photodetektor detektiert werden. In Gegenwart eines von außen angelegten statischen Magnetfelds kommt es aufgrund des Zeeman-Effekts zu einer Verschiebung der atomaren Energieniveaus. Diese Verschiebung führt dazu, dass die Absorption weiterer Photonen benötigt wird, um die neuen Energieniveaus zu besetzen. Folglich kann durch Messen der Lichtintensität am Detektor die Stärke des angelegten Magnetfelds berechnet werden. [15–17] OPMs sind bereits vereinzelt kommerziell verfügbar, jedoch ist die Technologie noch nicht so weit ausgereift wie beispielsweise die im nächsten Abschnitt vorgestellten SQUIDs.

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Optische Magnetometer sind derzeit in der absoluten Genauigkeit als auch in der magnetometrischen Empfindlichkeit unerreicht. Es können sehr schwache Magnetfelder mit einer Flussdichte in der Größenordnung von Femtotesla detektiert werden. Da als Medium ein Gas verwendet wird, muss die Magnetfeldmessung im Gegensatz zu den SQUIDs nicht bei kryogenen Temperaturen durchgeführt werden. Dies macht die OPMs zur einer vergleichsweise einfachen und günstigen Messmethode. Gleichzeitig ist die gesamte Messapparatur klein und beweglich. Es muss beachtet werden, dass die Messgenauigkeit mit der Anzahl an Atomen N zunimmt – je mehr Atome verwendet werden desto genauer ist die Messung. Herausforderungen sind aktuell noch höhere Preise, nichtlineare Amplitudenreaktionen bei der Messung, gegenseitige Beeinflussung der Detektoren bei dichten Anordnungen und die heiße Oberfläche des Sensors. [18] Wenn die aktuellen Herausforderungen von OPMs gelöst werden, könnte diese Technologie aufgrund ihrer klaren Stärken in Zukunft eine zunehmende Rolle in der Anwendung spielen.

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Ein vielversprechendes Anwendungsgebiet für OPMs ist die Magnetenzehalographie (ein nicht-invasives, neurologisches Untersuchungsverfahren zur Untersuchung der neuronalen Aktivität des Gehirns) in der Medizin. Ein Vorteil von OPMs ist, im Gegensatz zu den typischerweise eingesetzten SQUIDs, dass sie keine kryogene Kühlung erfordern und somit innerhalb von wenigen Millimetern von der Kopfhaut des Probanden platziert werden können. Allein dadurch wird eine drei- bis fünffache Verbesserung der Empfindlichkeit im Vergleich zu SQUIDs erreicht. Zusätzlich werden mit diesen Sensoren auch Messungen ermöglicht, bei denen der Patient in Bewegung ist, solange Störungen von externen Magnetfeldern ausgeschlossen werden können (das Magnetfeld im Raum muss bis auf Abweichungen von maximal einem Nanotesla homogen sein). [17] Eine weitere potenzielle Anwendung von diesen sehr empfindlichen Magnetometern ist die Qualitätskontrolle von Materialien. Materialfehler können dazu führen, dass kleine Anomalitäten im magnetischen Streufeld auftreten, welche damit detektiert werden können. [19]

3.1.3.2.2 Magnetfeldmessung mit SQUIDs

Sogenannte „Superconducting Quantum Interference Devices“ (SQUIDs, dt. supraleitendes Quanteninterferenzgerät) sind eine bereits etablierte Quantensensortechnologie zur Messung extrem kleiner Änderungen magnetischer Felder.

Funktionsweise und Stand der Technik

Auf sich bewegende Elektronen in einem Magnetfeld wirkt die Lorentz-Kraft, welche die Elektronen orthogonal zur Richtung des Magnetfelds und zur Bewegungsrichtung beschleunigt und so einen elektrischen Stromfluss erzeugt. Umgekehrt erzeugen bewegende Ladungen ein magnetisches Feld, wobei die Stärke von Magnetfeld und Stromfluss proportional zueinander sind. Der magnetische Fluss, den ein angelegtes Magnetfeld in einem supraleitenden Ring erzeugt, darf gemäß der Quantenphysik nur bestimmte diskrete Werte annehmen (quantisiert). Diese entsprechen dem Vielfachen des magnetischen Flusses, welches ein einzelnes, sich kreisförmig bewegendes Elektronenpaar erzeugen würde – also einem Vielfachen des sogenannten supraleitenden magnetischen Flussquantums. Entspräche der durch ein angelegtes Magnetfeld entstehende magnetische Fluss nicht exakt einem der quantisierten Werte, wird in dem supraleitenden Ring ein Ausgleichstrom induziert, der genau so viel magnetischen Fluss erzeugt, wie

benötigt wird, um den gesamten magnetische Fluss auf einen erlaubten Wert zu drücken oder zu heben. Dieser Effekt wird in SQUIDs ausgenutzt. [20]

SQUIDs bestehen aus einem supraleitenden Ring. Entweder an einer oder zwei Stellen wird dieser Ring durch einen Josephson-Kontakt unterbrochen, das heißt es wird ein wenige Nanometer dickes normalleitendes oder isolierendes Material eingesetzt. Im Supraleiter kann elektrischer Strom über sich paarweise bewegende Elektronen, sogenannte Cooper-Paare, ohne Widerstand geleitet werden. Diese Cooper-Paare müssen nun durch den Josephson-Kontakt quantenmechanisch tunneln, um den Suprastrom aufrecht zu erhalten. Wenn dieser Ring nun in ein Magnetfeld gebracht wird, was einer Änderung des auf den SQUID wirkenden Magnetfeldes entspricht, dann entsteht ein elektrischer Kreisstrom in dem supraleitenden Ring. Die Stärke und die Richtung des induzierten Stroms ist abhängig davon, wie stark der resultierende magnetische Fluss von dem Vielfachen des magnetischen Flussquants abweichen würde. Die Josephson Kontakte dienen zur Messung dieses induzierten Kreisstroms. Wird an den supraleitenden Ring ein konstanter Gleichstrom angelegt, dann fällt aufgrund der beiden Josephson-Kontakte eine Spannung am SQUID ab. Durch die Messung der Spannung kann somit die Magnetfeldänderung berechnet werden. Vereinfacht gesagt wandelt ein SQUID eine schwer messbare winzig kleine Magnetfeldänderung in eine leichter messbare elektrische Spannung um, über die schließlich die Stärke der Magnetfeldänderung berechnet werden kann. Die Bauelemente müssen dabei, um den supraleitenden Zustand zu erreichen, auf Temperaturen von einigen Millikelvin, also nahe dem absoluten Nullpunkt bei $-273,15^{\circ}\text{C}$, gekühlt werden, was dieses Verfahren aufwendig und teuer macht. Hochtemperatur-Supraleiter haben den Vorteil, dass deutlich höhere Temperaturen von nur etwa -196°C ausreichend sind, jedoch gibt es bei höheren Temperaturen gleichzeitig auch mehr Rauschen in den Messdaten und damit eine geringere Magnetfeldempfindlichkeit. Außerdem müssen elektromagnetische Störungen von außerhalb sehr gut abgeschirmt werden, da die Messung sonst leicht verfälscht werden kann. [21] SQUIDs sind seit vielen Jahren kommerziell erhältlich und finden bereits einen breiten Einsatz auch außerhalb von Forschungslaboren.

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Die Magnetfeldmessung mit Hilfe eines SQUIDs liefert, gemeinsam mit OPMs, die genauesten Ergebnisse unter den aktuell verfügbaren Magnetometern. Auch in den letzten zehn Jahren gab es noch einige Fortschritte im experimentellen Aufbau und Auswertung der Messergebnisse, die zu einer verbesserten Empfindlichkeit und Vielseitigkeit bei der Anwendung des Magnetometers geführt haben. Es gibt verschiedene Detektionsmodi, wobei zuletzt mit dem SQUID-VSM Modus – einer Messmethode, bei der eine zu untersuchende Probe mit hoher Frequenz in und aus einem Magnetfeld hinein, bzw. heraus bewegt wird – erhebliche Verbesserungen im Messdurchsatz und der Präzision erzielt werden konnte. [22] SQUIDs eignen sich jedoch nur schlecht für mobile Anwendungen, da eine kryogene Kühlung durch flüssigen Stickstoff oder flüssiges Helium benötigt wird, was zu logistischen Schwierigkeiten führt. Des Weiteren sind diese vergleichsweise teuer, weshalb sie hauptsächlich in Bereichen eingesetzt werden, wo extrem hohe Sensitivitäten entscheidend sind. [16]

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

SQUIDs sind bereits seit vielen Jahren etabliert und werden in verschiedensten Anwendungsgebieten eingesetzt. Kommerzielle Anwendung finden SQUIDs zum Beispiel in der Biomagnetik zur Herz- und Gehirnüberwachung, in der Magnetotellurik zur Messung elektrischer

Ströme in der Erde und der Paläomagnetik zur Untersuchung von Gesteinsproben. Ein besonders in der Industrie wichtiges Einsatzgebiet ist die Materialforschung. Außerdem kann durch hochempfindliche Magnetometer Navigation auch ohne GPS ermöglicht werden. Darüber hinaus spielen SQUIDS eine zunehmend wichtige Rolle als Qubits in supraleitenden Quantencomputern (siehe Abschnitt 3.3).

3.1.3.2.3 Magnetfeldmessung mit Stickstoff-Fehlstellen-Zentren

Durch Steuern und Abfragen des Quanten-Spinzustands eines Kristall-Defekts ist es möglich, die Stärke von elektromagnetischen Feldern mit einer guten räumlichen Auflösung und sehr hoher Genauigkeit zu messen. Besonders geeignet sind hierfür, aufgrund der geringen Atomgröße und der langen Spinkohärenzzeiten, Stickstoff-Fehlstellen-Zentren (NV-Zentren). [23] Das Interesse an dieser Technologie hat in den letzten Jahren stark zugenommen, da man die dreidimensionale Orientierung eines Magnetfelds mit Genauigkeit im Nanotesla-Bereich und örtlicher Auflösung von wenigen Nanometern bestimmen kann.

Funktionsweise und Stand der Technik

Als Basis dient ein Diamant-Kristall, in dessen Kristallgitter einzelne Kohlenstoffatome durch Stickstoffatome (N) mit einer benachbarten Leerstelle (V) ersetzt werden. Diese Konfigurationen werden als NV-Zentren bezeichnet. Diese NV-Zentren ändern die elektronischen und optischen Eigenschaften des Diamanten und können durch ein Zwei-Elektronen-System beschrieben werden. Mit Licht wird der quantenmechanische Spinzustand der NV-Zentren zuerst auf einen Zustand eingestellt, mit dem Anlegen eines nur sehr schwachen externen Magnetfeldes werden diese Zustände beeinflusst und damit verändert. [24] Es gibt zwei mögliche optische Detektionstechniken, einerseits die Messung der emittierten Photonen aufgrund von Fluoreszenz und andererseits die Messung der Absorption infraroten Lichts. Als Grundlage für die Messung dient die "Optisch Detektierte Magnetische Resonanz Technik" (ODMR), bei der die NV-Zentren mit monochromatischem Licht angeregt und anschließend die abgegebene Fluoreszenzintensität mit einem Photonendetektor gemessen wird. Diese Art von Magnetometer kann entweder im Skalarmodus betrieben werden, um die absolute Magnetfeldstärke zu messen, oder im Vektormodus, um die räumliche Orientierung des Magnetfelds zu messen. Je nach Anwendung kann die Betriebsart gewählt werden, dabei wird dieselbe Apparatur eingesetzt. Die Vektormessung beruht auf der Tatsache, dass, wenn zusätzlich zum zu messenden Feld ein schwaches Vormagnetisierungsfeld in einer bestimmten Richtung angelegt wird, die Änderung der Gesamtfeldstärke in der Projektion des Vormagnetisierungsfeldes auf das Hauptfeld linear ist. Durch aufeinanderfolgendes Anlegen von drei orthogonalen Vormagnetisierungsfeldern und Messung der jeweiligen Gesamtfeldstärke kann somit der Vektor des Gesamtfeldes in allen drei Raumrichtungen rekonstruiert werden. [16, 25]

Anstelle von Stickstoff können Defektzentren auch mit anderen Atomen erzeugt werden. Jedoch wird meist Stickstoff aufgrund seiner für diese Anwendung vorteilhaften Atomstruktur verwendet. Magnetometer aus NV-Zentren sind heute vereinzelt kommerziell erhältlich, jedoch bei weitem nicht so verbreitet wie die im vorherigen Abschnitt vorgestellten SQUIDS. Auch Bosch forscht an dieser Technologie mit dem Ziel, diese in Zukunft bezahlbar anbieten zu können. [26]

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Diese Technologie bietet eine hohe Magnetfeldsensitivität. Dabei sind die Messungen bei Raumtemperatur wie auch bei hohen Drücken möglich, was ein großer Vorteil dieser Methode

der Magnetfelddetektion ist. [27] Um Magnetfelder mit einer hohen Sensitivität und örtlichen Auflösung abzubilden, müssen die Diamanten mit den NV-Zentren in unmittelbarer Nähe zur Probe sein. Für die Oberflächenanalyse von Bauteilen ist dies beispielsweise mit einem Rasterkraftmikroskop mit einer Diamant-Spitze umsetzbar, wobei jedoch eine sehr glatte Oberfläche der Probe nötig ist. [25] Eine Herausforderung ist die komplexe Analyse und Interpretation der Messdaten, was insbesondere bei der räumlichen Auflösung von Magnetfeldern sehr aufwendig sein kann.

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Es gibt vielfältige potenzielle Einsatzmöglichkeiten in der Medizin und Forschung. Oft werden die NV-Zentren in Kombination mit Rasterkraftmikroskopen (engl. Atomic Force Microscope, AFM) eingesetzt, wobei die NV-Zentren an der AFM-Spitze angebracht sind.

Durch kontinuierliche technologische Fortschritte wird die Magnetometrie mit NV-Zentren in Zukunft mehr und mehr Anwendungen für die Physik der kondensierten Materie finden. [28] Möglicher Einsatz sind die Optimierung elektronischer Schaltkreise, wie auch die Verbesserung der medizinischen Diagnostik durch hochpräzise Messung der Magnetfelder von Herz und Gehirn. [29] Durch die extrem hohe räumliche Auflösung sind Anwendungen bei der Abbildung nanoskaliger magnetischer Strukturen möglich.

3.1.3.2.4 Magnetfeldmessung mit Hilfe des GMR- oder TMR-Effekts

Die Effekte des Riesenmagnetowiderstand (giant magnetoresistance effect, GMR) und des magnetischen Tunnelwiderstands (engl. tunneling magnetoresistance – TMR) können genutzt werden, um sehr empfindliche Magnetfeldsensoren zu bauen.

Funktionsweise und Stand der Technik

Der GMR-Effekt tritt in nur wenige Nanometer dicken Schichten aus abwechselnd aufeinander geschichteten ferromagnetischen und nichtmagnetischen Materialien auf. Die nichtmagnetische Schicht ist dabei beidseitig von ferromagnetischen Schichten umgeben. Wenn ein äußeres Magnetfeld angelegt wird, dann beeinflusst dieses die magnetischen Momente in den ferromagnetischen Schichten. Der elektrische Widerstand der mittleren, nicht-magnetischen Schicht ist von der relativen Orientierung der Magnetisierung der ferromagnetischen Schichten abhängig. Sind diese entgegengesetzt zueinander magnetisiert, so ist der elektrische Widerstand höher als bei paralleler Magnetisierung. Erklärt wird dieses Verhalten durch den quantenmechanischen Effekt, dass die Streuung von Elektronen von der Spin-Orientierung abhängig ist. Wenn also die magnetischen Momente der beiden ferromagnetischen Schichten im Grundzustand antiparallel zueinander ausgerichtet sind, kann ein sehr geringes Magnetfeld die magnetischen Momente parallel zueinander ausrichten, was zu einer messbaren Änderung in dem elektrischen Widerstand führt. [30, 31]

Darüber hinaus gibt es auch Sensoren, die auf dem magnetischen Tunnelwiderstand (engl. tunneling magnetoresistance – TMR) beruhen. Diese haben einen ähnlichen Aufbau wie GMR-Sensoren, nur dass die leitende Schicht des GMR, durch eine isolierende ersetzt ist, durch die die Elektronen tunneln müssen. Die relative Ausrichtung der magnetischen Momente beeinflusst hier die Tunnelwahrscheinlichkeit, welche wieder als Änderung des elektrischen Widerstands gemessen werden kann.

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Während GMR-Sensoren bereits weitgehend ausoptimiert sind, besteht bei TMR-Sensoren durchaus noch Optimierungsbedarf. Insbesondere Verbesserungen in der Empfindlichkeit und der Herstellung könnten zu weiteren Verbesserungen und Kostensenkungen beitragen. TMR-Sensoren erlauben genauere Messungen als GMR-Sensoren, sind allerdings anfälliger für Rauschen. [32]

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Genutzt werden GMR-Sensoren unter anderem in Festplatten. Dabei werden die Daten auf Platten aus ferromagnetischem Material gespeichert. Diese Platten werden in kleine Bereiche unterteilt, in denen jeweils, je nach Orientierung der Magnetisierung, ein Bit mit der Information Eins oder Null gespeichert werden kann. Ein Lesekopf, der aus mehreren abwechselnd angeordneten ferromagnetischen und nichtmagnetischen Schichten besteht, wird nun über diese Platten bewegt werden. Der elektrische Widerstand des Lesekopfs ist davon abhängig, ob er sich gerade über einem Bereich befindet, auf dem eine Eins oder eine Null gespeichert ist. Durch Messung des Widerstands kann somit die auf der Festplatte gespeicherte Information ausgelesen werden. Aufgrund der hohen Genauigkeit der Messung wurde es möglich, die magnetisierten Bereiche (Bits) auf der Festplatte deutlich zu verkleinern und somit sehr hohe Speicherdichten zu erreichen. Die Technologie ist bereits seit vielen Jahren ausgereift.

Aufgrund ihrer geringen Größe, hohen Empfindlichkeit und recht einfachen Messung sind TMR-Sensoren für zahlreiche Anwendungen attraktiv. Dazu gehören industrielle Anwendungen, Mobilitätsanwendungen (z. B. Auto) und Medizinanwendungen. [32, 33]

3.1.3.3 Optische Quantensensoren

Zur Detektion von Licht werden Sensoren benötigt, die durch die Wechselwirkung von Licht mit Materie indirekt Licht nachweisen können. Für manche Anwendungsbereiche, wie zum Beispiel in der Quantenkommunikation, werden sehr empfindliche Lichtsensoren benötigt, die sehr kleine Photonenflüsse oder gar einzelne Photonen messen können. Dies ist mit klassischen analogen Detektoren entweder gar nicht oder nur mit starkem Hintergrundrauschen möglich, sodass das Signal nicht erkennbar ist. Eine wichtige Technologie zur Detektion von einzelnen Photonen im sichtbaren und nahen Infrarot-Bereich mit hoher Effizienz sind supraleitende Nanodraht-Einzelphotonendetektoren (engl. superconducting nanowire single-photon detectors, SNSPDs).

Funktionsweise und Stand der Technik

SNSPDs bestehen aus nur wenige Nanometer dicken supraleitenden Nanodrähten. Die Drähte werden in eine mäanderartige Form gebracht, um eine große Fläche abzudecken, auf der möglichst viele Photonen detektiert werden können. Der Draht muss dabei deutlich mit Hilfe eines Kryostaten unter dessen kritische Temperatur gekühlt werden, um die Supraleitfähigkeit zu ermöglichen. Wenn ein Material im supraleitenden Zustand ist, dann wird elektrischer Strom nicht über einzelne Elektronen transportiert, sondern stattdessen von Cooper-Paaren. Diese bewegen sich ohne elektrischen Widerstand durch den Draht. Für die Messung wird am Draht ein Ruhestrom angelegt, dieser muss kleiner als der kritische Strom des jeweiligen Nanodrahtes sein, um die Supraleitfähigkeit nicht zu zerstören. Sobald nun ein Photon auf den Draht trifft, spaltet dieses ein Cooper-Paar in zwei Elektronen auf. Somit entsteht im Nanodraht ein lokaler, nicht-supraleitender Bereich mit einem elektrischen Widerstand, der entsprechend durch den

Strom lokal erwärmt wird. Dies führt vorübergehend zu einem Spannungsimpuls, welcher gemessen wird. Nach einer kurzen Totzeit kühlt der Draht an dieser Stelle wieder ab und geht somit in den supraleitenden Zustand zurück. Danach ist die nächste Messung eines Photons möglich. [34]

Als Material für den Nanodraht wird meist Niobnitrid verwendet, das eine supraleitende kritische Temperatur von 10 Kelvin besitzt. Ein Vorteil von Niobnitrid ist, dass die Zeit zum Abkühlen nach der Detektion eines Photons sehr kurz ist, was viele Messungen schnell nacheinander ermöglicht. Die Zeitauflösung von Photodetektoren wird durch die Variation der zeitlichen Verzögerung von der Absorption eines Photons bis zur Erzeugung eines elektrischen Ausgangsimpulses bestimmt. Dies wird als „jitter“ bezeichnet. Es gibt zurzeit keine anderen Einzelphotonendetektoren mit einer höheren Zeitauflösung als die der SNSPDs. Um die Anzahl an gleichzeitig absorbierten Photonen zu bestimmen können mehrere Nanodrähte räumlich ineinander verflochten oder parallel angeordnet und jeweils einzeln gemessen werden. [34] SNSPDs haben bereits eine hohe technologische Reife erreicht und sind heutzutage bereits kommerziell erhältlich. [35]

Neben SNSPDs gibt es noch weitere Einzelphotonendetektoren. Einerseits gibt es die „Single-Photon Avalanche Diode“ (SPAD), welche eine Detektionseffizienz von bis zu 80 Prozent im sichtbaren bis infraroten Bereich haben (Si-SPADs), aber gleichzeitig deutlich höhere Totzeiten als SNSPDs zeigen. [35] Andererseits gibt es noch den "Transition Edge Sensor" (TES). Einsatz findet dieser bei kleineren Wellenlängen als dem sichtbaren Bereich, z. B. in der Röntgenstrahlspektroskopie oder der Detektion subatomarer Teilchen, jedoch hauptsächlich in der Grundlagenforschung.

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Vorteile von supraleitenden Nanodraht-Einzelphotonendetektoren im Vergleich zu anderen Einzelphotonendetektoren sind eine hohe Detektionseffizienz von mehr als 85 Prozent, [35] eine niedrige Dunkelzählrate, eine hohe Zählrate und eine geringe Zeitunsicherheit. [36] Typische Wellenlängen, bei denen SNSPDs eingesetzt werden sind im Bereich von sichtbarem Licht und nahem Infrarotlicht. Herausforderungen bestehen insbesondere bei der niedrigen Betriebstemperatur, die eine aufwändige Kühlung nötig macht. Dies schränkt die Anwendung deutlich ein, da die Komplexität des Systems und die Kosten über der von anderen optischen Detekortechnologien liegen. [34]

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Es gibt ein breites, in Zukunft wachsendes Anwendungsgebiet von Einzelphotonendetektoren. Dazu gehören die Medizin, die Biologie wie auch die Forschung, zum Beispiel zur Astroteilchenphysik. [35]

SNSPDs sind aufgrund von deren hohen Zeitauflösung sehr gut geeignet für Anwendungen wie der Quantenschlüsselverteilung (engl. Quantum Key Distribution – QKD), da dort zeitkorrelierte einzelne Photonen gemessen werden müssen. Die SNSPDs haben ein sehr geringes „jitter“, das heißt eine sehr hohe Genauigkeit bei der Bestimmung der Photon-Ankunftszeit auf dem Detektor von nur wenigen Pikosekunden. [37] Auch für optische Quantencomputer bietet sich die Verwendungen von SNSPDs an. [34]

3.1.3.4 Quantengravimeter

Gravimetrie bezeichnet die Messung der Gravitationskraft (auch Schwerkraft oder Erdanziehungskraft genannt). Aus der sehr präzisen Messung von zeit- und ortsabhängigen Änderungen der Gravitationskraft auf der Erdoberfläche lassen sich Informationen über die Massenverteilung und -bewegung unter der Erdoberfläche ableiten. Dies kann in sehr verschiedenen Bereichen der Geowissenschaften genutzt werden. Dafür sind sehr empfindliche Gravimeter nötig, die auch nur minimale Änderungen der Gravitationskraft erkennen können. Quantengravimeter nutzen die Wellennatur von Materie um eine Genauigkeit in der Größenordnung von einigen 10 nm s^{-2} zu erreichen. Die Schwerkraft der Erde auf der Oberfläche variiert je nach Ort der Messung und den Gezeiten zwischen $9,78 \text{ m s}^{-2}$ und $9,83 \text{ m s}^{-2}$. [38]

Funktionsweise und Stand der Technik

Quantengravimeter nutzen frei fallende Atome als Testmassen zur Messung der Beschleunigung durch die Schwerkraft der Erde. In einer Vakuumkammer werden im ersten Schritt gasförmige Atome eingefangen und mit Hilfe von Lasern auf eine Temperatur von einigen Mikrokkelvin abgekühlt. Dies hat den Grund, dass kalte Atome sich weniger stark bewegen und dadurch besser beobachtet werden können. Dafür werden meist Rubidiumatome verwendet. Anschließend wird die Atomwolke in den freien Fall gebracht. Um nun deren Beschleunigung aufgrund der Gravitationskraft zu messen wird der Wellencharakter von Materie genutzt. Während dem freien Fall werden die Atome durch die lokale Schwerkraft beschleunigt. Durch drei Laserimpulse werden die Atome zu Beginn des freien Falls in verschiedene Bahnen aufgeteilt und am Ende wieder kombiniert. Dies versetzt die Atome in zwei verschiedene quantenmechanische Impulszustände, die sich zu Beginn aufteilen und dann schlussendlich wieder rekombinieren. Der erste von drei Impulsen versetzt das atomare Wellenpaket in eine gleich besetzte Überlagerung von Bewegungszuständen, die sich im Vertikalimpuls unterscheiden. Nach einem bestimmten Zeitintervall sind die beiden Zustände in ihrer Höhe getrennt. Es wird der zweite Laserimpuls erzeugt, der deren Impulse vertauscht. Dies bedeutet, dass sich die Zustände nach einem weiteren, gleich langen, Zeitintervall räumlich überschneiden. Die Gravitationskraft wirkt nach dem ersten Laserimpuls stärker auf das erdnähere Atompaket, so dass dies eine stärkere Beschleunigung erfährt, was schließlich zu einer Phasendifferenz zwischen den beiden Trajektorien führt. Diese ist linear proportional zur lokalen Erdbeschleunigung g . Durch den dritten und letzten Laserimpuls werden die Zustände zur Interferenz gebracht. [39] Durch anschließende Messung des Interferenzmusters der Impulszustände kann die Phasendifferenz aus den verschiedenen Bahnen rekonstruiert werden, wodurch die Gravitationsbeschleunigung am Ort der Messung berechnet werden kann, da sie proportional zur Phasendifferenz ist. [38, 40]

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Quantengravimeter, die die Erdbeschleunigung mit Hilfe der beschriebenen Atom-Interferometrie bestimmen, liefern die besten Ergebnisse bezüglich Empfindlichkeit, Langzeitstabilität und Genauigkeit unter allen Gravimetern. Der mobile Einsatz dieser Art von Gravimetern ist aufgrund ihrer komplexen Funktionsweise und aufgrund der starren Limitierungen in der Miniaturisierung – da eine Fallstrecke gemessen wird, kann die Größe nur mit großem Aufwand gewisse Maßstäbe unterschreiten – jedoch schwierig. Außerdem haben kleinste Vibrationen eine Auswirkung auf die Messung, wodurch die Qualität der Ergebnisse stark von seismischen Störungen beispielsweise durch eine nahe gelegene Straße abhängig ist. [38] Eine Herausforderung ist dementsprechend das hohe Rauschen in den Messergebnissen, wodurch eine möglichst gute Abschirmung von Rauschquellen sowie relativ lange Messzeiten nötig sind. [41]

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Es gibt sehr vielfältige Einsatzbereiche für Quantengravimeter in den Geowissenschaften, beispielsweise zur Überwachung und Modellierung von Gletscherschmelze, Grundwasserveränderungen, Überschwemmungen und Vulkanismus. Die Quantengravimeter können dabei zur Kartierung von Grundwasserleitern wie auch zur Beobachtung der Veränderung des Grundwasserspiegels, Archäologie oder zur Bestimmung von Bodeneigenschaften und Wassergehalt genutzt werden. Des Weiteren können die Quantengravimeter dabei helfen, das Risiko unvorhergesehener Bodenbedingungen beim Bau kritischer Energie-, Transport- und Versorgungsinfrastrukturen zu reduzieren. [41]

3.1.3.5 Quantensensoren zur Druckmessung / Photonische Druckmessung

Quantensensoren zur Druckmessung verwenden Licht, um den Druck eines Gases mit hoher Präzision zu messen. Dabei wird der Brechungsindex des Gases gemessen und darüber die Dichte berechnet. Die derzeit gebräuchlichste Methode zur Messung des Brechungsindex ist die Refraktometrie über resonante Fabry-Pérot-Kavitäten, weshalb diese im Folgenden näher beschrieben wird.

Funktionsweise und Stand der Technik

Für die photonische Druckmessung wird ein apparativer Aufbau genutzt, der aus zwei parallelen Röhren besteht. In der einen Röhre ist ein Vakuum, in der anderen befindet sich das Gas, dessen Druck gemessen werden soll. Die Frequenz der Moden elektromagnetischer Wellen in diesen Hohlräumen ist proportional zum Brechungsindex des Gases und damit auch zum Druck. Beide Röhren sind an deren Enden mit halbreflektierenden Spiegeln begrenzt. Zum Messen des Drucks wird in beide Röhren monochromatisches Laserlicht eingestrahlt. Die Wellenlänge bzw. Frequenz des Lichts wird so eingestellt, dass sich in den Röhren stehende Wellen bilden. In der mit Gas gefüllten Röhre ist die Wellenlänge des Lichts jedoch kürzer als im Vakuum, da diese abhängig vom Brechungsindex und Druck des Gases ist. Die Frequenz des Lasers wird so lange variiert, bis schließlich auch im mit Gas gefüllten Zylinder stehende Wellen gebildet werden. Dies kann überprüft werden, da die beiden Enden halbdurchlässig sind und somit ein Teil des Lichts die Apparatur auf der gegenüberliegenden Seite des Lasers wieder verlässt. Durch Kombination der Wellen beider Kanäle, die unterschiedliche Frequenzen besitzen, entsteht durch die Überlagerung ein Wellenmuster, aus dem schließlich die Gasdichte berechnet werden kann. Da die Frequenz mit sehr hoher Genauigkeit bestimmt werden kann, führt dies zu sehr präzisen Ergebnissen bei der Druckmessung. Experimentelle Ergebnisse zeigen, dass die Gasdruckempfindlichkeit bei 4,3 nm/MPa liegt, mit einem guten linearen Ansprechverhalten im Bereich zwischen 400 und 1000 kPa. Diese ganze Messung kann in einem Bruchteil einer Sekunde durchgeführt werden, das heißt damit können auch Änderungen im Druck in beinahe Echtzeit registriert werden. [42–45]

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Aktuell ist die SI-Einheit des Drucks, das Pascal, über die Kraft, die auf eine Fläche von einem Quadratmeter wirkt, definiert. Mit photonischen Quantensensoren kann der Druck direkt über die Gasdichte bestimmt werden. Dies würde die Unsicherheit von Primärmessungen deutlich reduzieren und könnte potenziell zu einem neuen SI-Standard führen.

Der wichtigste Vorteil dieser Messmethode ist, dass die Messwerte absolut sind, es ist also keine Kalibration nötig. [42] Diese Sensoren sind aktuell noch relativ groß, es gibt jedoch bereits Ansätze wie diese miniaturisiert werden könnten. Neben der Miniaturisierung ist eine Herausforderung dieser Drucksensoren, ein lineares Ansprechverhalten für sehr hohe beziehungsweise sehr kleine Drücke zu erreichen. [45]

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Mögliche Anwendungsgebiete, über die Metrologie hinaus, sind in der Halbleiterindustrie, da bei der Produktion der Mikrochips möglichst exakte Druckmessungen nötig sind, um die Prozessbedingungen möglichst präzise einzustellen, oder auch in der Luftfahrt, um die Höhe von Flugzeugen zu bestimmen. Darüber hinaus ist die Temperaturstörung dieser Sensoren relativ gering. Folglich könnte diese Art der Quantensensoren zur Druckmessung zukünftig Einsatz in verschiedensten Anwendungen von Forschung bis hin zu industriellen Anwendungen finden.

3.1.3.6 Photonische Quantenverfahren

Photonische Quantenverfahren stellen ein relativ neues Feld der Quantenoptik dar. Das Ziel dieser Verfahren ist es, quantenmechanische Effekte zu nutzen, um Objekte mit einer besseren Qualität abzubilden oder zu identifizieren, als es mit klassischer Optik möglich ist. Zu diesem Themengebiet gehören sehr vielfältige Konzepte, die im Folgenden kurz vorgestellt werden.

Es gibt in der Bildgebung zwei große physikalische Herausforderungen: Einerseits ist das die minimal abbildbare Strukturgröße. Diese ist klassisch durch das Abbe-Kriterium und das Rayleigh-Kriterium beschrieben und wird durch die Beugung des Lichts bestimmt. Andererseits das Rauschen, welches minimal sein sollte, um ein möglichst klares und kontrastreiches Bild zu erhalten. [46]

Ein zentrales Werkzeug für photonische Quantenverfahren sind verschränkte Photonenpaare. Die Eigenschaften verschränkter Photonen, zum Beispiel deren Polarisation, sind miteinander verknüpft, auch wenn diese örtlich voneinander entfernt sind. So ist die Eigenschaft der einzelnen Photonen bis zur Messung hin eine Superposition der möglichen Zustände und wird erst zum Zeitpunkt der Messung eines der Photonen festgelegt – aber dann instantan für beide Photonen.

Die etablierteste Methode zur Erzeugung verschränkter Photonenpaare ist die parametrische Fluoreszenz (engl. Spontaneous Parametric Down Conversion – SPDC). [47] Es ist der inverse Prozess zur bekannteren Frequenzverdopplung, bei der zwei Photonen gleicher Frequenz in ein Photon der doppelten Frequenz umgewandelt werden. Bei SPDC wird also ein (Pump-)Photon in zwei Photonen umgewandelt, die addiert die gleiche Frequenz haben, wie das Pumpphoton. Dabei können die emittierten Photonen die gleiche oder eine unterschiedliche Frequenz haben. Experimentell wird dies in einem nicht-linearen Medium realisiert, also beispielsweise einem Kristall, in dem bestimmte Symmetrien nicht gegeben sind, sodass die von einem elektrischen Feld im Kristall induzierte Polarisation u. a. quadratisch von eben diesem abhängt ($\chi^2 \neq 0$). Typischerweise wird in so einem Kristall eins von 100.000 eingestrahlenen Photonen in ein verschränktes Photonenpaar umgewandelt. [48] Abhängig von der Kristallorientierung haben die drei involvierten Photonen eine wohldefinierte relative Polarisation zueinander. So können sich beispielsweise die emittierten Photonen jeweils in einer Superposition aus vertikaler und horizontaler Polarisation befinden, aber sind nach der Messung stets exakt senkrecht zueinander polarisiert (siehe Verschränkung). Da die Umwandlung eines Photons zu einem Photonenpaar stets auf stochastischem Zufall beruht, nennt man Einzelphotonenquellen auf Basis von SPDC

„stochastische Photonenquellen“, um sie von deterministischen Photonenquellen abzugrenzen, bei denen die Emission eines einzelnen Photons zu einem definierten Zeitpunkt ausgelöst wird.

3.1.3.6.1 Bildgebung unterhalb der Rayleigh-Grenze

Bildgebungsverfahren, die es ermöglichen, Strukturen zu erfassen, die kleiner als die klassische Auflösungsgrenze von Mikroskopen, das Rayleigh-Kriterium, sind, werden als „Sub-Rayleigh imaging“ bezeichnet. Nach dem Rayleigh-Kriterium müssen zwei Objekte weiter als die halbe Licht-Wellenlänge voneinander entfernt sein, um sie als getrennt wahrnehmen zu können. Um diese Auflösungsgrenze zukünftig zu umgehen, können quantenmechanische Effekte wie die Korrelationseigenschaften von Quantenlicht genutzt werden. [49] Wenn es möglich ist, höhere Auflösungen bei der Bildgebung durch Ausnutzen von quantenmechanischen Effekten zu erreichen, bringt dies sowohl in der Mikroskopie als auch in der Lithographie neue Möglichkeiten.

Quantenmikroskopie:

Funktionsweise und Stand der Technik

Das Ziel bei der Entwicklung von photonischen Messinstrumenten ist es, eine Auflösung nahe an der Heisenberg-Grenze zu erreichen. Dies ist eine theoretische Grenze für die höchstmögliche Messgenauigkeit unter Verwendung quantenmechanischer Ressourcen. Es stellt die untere Grenze der Unsicherheit in Quantenmessungen dar und ist somit allgemein gültig in der Quantenmetrologie. Es wurde bereits experimentell gezeigt, dass mit Quantenmikroskopen eine hochauflösende Bildgebung an der Heisenberg-Grenze erreicht werden kann. Dabei werden Paare von verschränkten Photonen genutzt, die auf symmetrischen Pfaden mit ausgeglichenen optischen Weglängen geschickt werden. Dabei verhalten sie sich wie ein einzelnes Photon mit der halben Wellenlänge. Folglich wird eine zweifache Verbesserung der Auflösung erzielt. [46]

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Die Quantenmikroskopie ermöglicht somit optische Bildgebung unterhalb der klassischen Auflösungsgrenze. Ein möglicher Einsatzbereich ist beispielsweise die Untersuchung von Krebszellen mit einer Auflösung von 1,4 Mikrometern und gleichzeitig vergleichsweise großem Sichtfeld. Es wurde bereits gezeigt, dass ein Quantenmikroskop gut für einen Einsatz im Bioimaging auf zellulärer Ebene geeignet ist, da damit Details sichtbar gemacht werden, die mit dem klassischen Gegenstück nicht aufgelöst werden können. [46]

Quantenlithographie:

Funktionsweise und Stand der Technik

Die Quantenlithographie funktioniert im Prinzip wie die klassische Photolithographie, mit der sehr kleine, in der Regel zweidimensionale, Strukturen einer Photomaske auf ein Substrat übertragen werden. Dies wird hauptsächlich in der Halbleitertechnik zur Herstellung von integrierten Schaltungen verwendet. Die minimal mögliche Strukturgröße ist dabei in der Größenordnung von wenigen zehn Nanometern. [50] Mit steigenden Anforderungen an Computer-Chips müssen auch die minimalen Strukturgrößen, die mit Lithographie hergestellt werden können, kleiner werden. Eine Option, um das zu ermöglichen, ist es mit Licht kleinerer Wellenlänge zu arbeiten. Mit kleiner werdender Wellenlänge des Lichts bei der Belichtung des Photolacks werden die Photonen allerdings schwieriger zu kontrollieren. Eine andere Option ist die Nutzung verschränkter Photonen, wodurch auch potenziell die räumliche Auflösung der Photolitho-

graphie vergrößert werden kann. Es wurde bereits experimentell gezeigt, dass es durch Verschränkung der Photonen möglich ist, die Strukturgröße deutlich zu verkleinern im Gegensatz zu nicht-verschränkten Photonen. Bei dieser Technologie werden zwei verschränkte Photonen an einem 50/50 Strahlteiler zusammengebracht. Aufgrund der Regeln der Quanteninterferenz können diese beiden Photonen den Strahlteiler entweder beide durch die obere oder untere Öffnung verlassen, jedoch niemals ein Photon in jeder Öffnung. Der Zustand des elektromagnetischen Feldes beim Ausgang des Strahlteilers ist $|N0,0N\rangle$, das heißt entweder sind die N Photonen (hier im Beispiel $N=2$) am oberen Ausgang und am unteren Ausgang Null oder umgekehrt. Diese wird als NOON-Zustände bezeichnet. Die N Photonen treffen an einem Medium zusammen, welches nach dem Prinzip der zwei-Photonen-Absorption funktioniert. In dem Medium bilden sich anschließend Interferenzstreifen durch Quanteninterferenz. Die Dichte der Streifen ist dabei doppelt so groß wie bei einem klassischen Interferenzmuster. Wenn N die Anzahl der verschränkten Photonen ist, dann skaliert die Auflösung mit dem Faktor $1/N$. Das Ziel ist es somit, möglichst viele verschränkte Photonen zu erzeugen, um eine möglichst hohe Auflösung zu erzielen.

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Es gibt bereits verschiedene „proof-of-principle“-Studien jedoch noch keine direkte Demonstration der Quantenlithographie. Die zwei größten Herausforderungen sind, erstens wird eine intensive Quelle von Photonen in NOON-Zuständen benötigt und zweitens wird ein empfindliches lithographisches Medium zur Erfassung der N -Photonen benötigt. [51] Eine weitere Schwierigkeit ist die hohe Belichtungszeit. Um die gewünschte Verbesserung der Auflösung zu erzielen, muss die Probe sehr lange belichtet werden. Der Grund dafür ist, dass die verschränkten Photonen den Photolack am gleichen Ort erreichen müssen. Ob die beiden Photonen am gleichen Ort auftreffen, hängt von der Zufallsverteilung der Photonen ab und ist daher nur mit einer geringen stochastischen Wahrscheinlichkeit gegeben. [52]

Auch die Verwendung von gequetschtem Licht (engl. squeezed light) kann zur Überschreitung der Rayleigh-Grenze führen, da hierdurch das dem Licht innewohnende Rauschen verringert werden kann, das herkömmlichen Verfahren Grenzen setzt.

3.1.3.6.2 Verfahren zur Rauschreduktion

Bildgebungsverfahren oder Sensorikverfahren, die quantenkorreliertes Licht nutzen, um Bilder oder Signale mit einer höheren Präzision zu erfassen als klassisch möglich, werden als „Sub-shot noise imaging/sensing“ Verfahren bezeichnet. Bei der Bildgebung und der optischen Sensorik ist das Schrotrauschen eine grundlegende Limitation für das Signal-zu-Rausch-Verhältnis. Rauschen entsteht durch Schwankungen der Photonenzahl, die aus der Quantisierung der Träger, also den Photonen, abgeleitet werden kann. Es ist somit nicht möglich, ein nur schwach absorbierendes Objekt bei einer niedrigen Beleuchtungsstärke abzubilden oder zu detektieren, da dieses Objekt im Rauschen untergeht und folglich nicht erkennbar ist. Mit Hilfe von Photonenzahlkorrelation zwischen zwei Lichtstrahlen ist es möglich, das Rauschen in dem Referenzstrahl zu messen und anschließend von dem zweiten, bildgebenden Strahl, zu subtrahieren. Die Fluktuationen der Photonenzahl sind idealerweise in beiden Strahlen exakt gleich, weshalb das Rauschen vollständig beseitigt werden kann. In einer realen Anwendung ist dies nicht ganz der Fall, da Verluste auftreten, dennoch kann das Signal-zu-Rausch-Verhältnis verbessert werden. [49]

Quantenbeleuchtung (engl. quantum illumination):

Die Quantenbeleuchtung beschreibt ein Konzept, das verschränkte Photonen nutzt, um die Detektion von schwach reflektierenden oder verschleierte Objekten zu verbessern. Einsatz kann diese Technologie in Radaren finden, um die Detektion von Objekten, die mit klassischen Technologien kaum abbildbar sind, klarer erkenntlich zu machen. [49]

Funktionsweise und Stand der Technik

Eine Quelle erzeugt zwei miteinander verschränkte Photonen. Davon wird ein Photon (signal) auf das Objekt gesendet. Das zweite Photon (idler) wird direkt auf einen Detektor gesendet. Trifft das signal-Photon auf ein Objekt, wird es an diesem reflektiert. Anschließend wird es ebenfalls detektiert und das Rauschsignal des idler-Photons subtrahiert. Dadurch kann das Signal-zu-Rausch-Verhältnis verbessert werden.

Die wohl relevanteste Anwendung dieses Verfahren ist der Quantenradar. Radar (radio detection and ranging) ist die Bezeichnung für Erkennungs- und Ortungsverfahren auf Basis elektromagnetischer Wellen im Radiofrequenzbereich. Ein Radargerät sendet elektromagnetische Wellen aus, welche als Primärsignal bezeichnet werden. Anschließend werden die von Objekten reflektierten Echos als Sekundärsignal empfangen. Durch Auswerten können dabei Informationen über die Richtung und Entfernung dieser Objekte gewonnen werden. Die Quantenbeleuchtung kann potenziell genutzt werden, um einen Quantenradar zu bauen, welcher mit verschränkten Photonen im Mikrowellenfrequenzbereich betrieben wird. Damit kann potenziell das Signal-zu-Rausch-Verhältnis und damit die Detektionsergebnisse im Vergleich zu klassischen Radaren deutlich verbessert werden.

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Damit das Quantenradar bessere Ergebnisse liefert als ein herkömmliches Radar müssen Imperfektionen bzw. Ineffizienzen in den folgende drei Bereichen minimiert werden: Erzeugung von verschränkten Photonenpaare mit einer Wellenlänge im Mikrowellenbereich, Speicherung des idler-Photons, hocheffiziente Detektion der Photonen.

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Der vielversprechendste Einsatz von Quantenbeleuchtung ist in einem Quantenradar. Verbesserte Radargeräte wären in den verschiedensten Bereichen von Vorteil, Beispiele dafür sind der Einsatz in militärischen Anwendungen oder auch Weltraumerforschung. Durch den Einsatz von Quantenverschränkung können nur schwach reflektierende Objekte mit gleichzeitig starkem thermischem Hintergrundrauschen besser detektiert werden. Ursprünglich gab es auch Vorschläge, die Quantenbeleuchtung im optischen Wellenlängenbereich einzusetzen, das heißt in LIDAR, jedoch ist der Vorteil im Vergleich zur klassischen Technologie gering. Die Stärken dieser Quanten-Technologie zeigen sich besonders im Bereich der Mikrowellen, da dort das Hintergrundrauschen von Natur aus stärker ist.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Forschung an Quantenbeleuchtung und der Einsatz dieser in Radaren noch im Anfangsstadium ist. Aufgrund der hohen Verlustanfälligkeit ist ein Quanten-Radar mit großer Reichweite in naher Zukunft eher nicht praktikabel. Anwendungen von Quantenbeleuchtung für die Detektion von Objekten mit kleinem Abstand sind dagegen wahrscheinlicher. [53]

3.1.3.6.3 Quantenbildgebung

Ghost Imaging

Ghost Imaging bezeichnet eine Methode zur Erzeugung eines Bildes durch Kombination der Informationen von zwei korrelierten Lichtteilchen in zwei unterschiedlichen Lichtdetektoren. [54]

Funktionsweise und Stand der Technik

Benötigt werden ein konventioneller Multipixel-Detektor, der das Objekt nicht sieht, und ein Singlepixel-Detektor, der das Objekt sieht. Dabei werden in der Regel verschränkte Photonenpaare verwendet, der Prozess funktioniert aber auch mit nicht-verschränkten, ortskorrelierten Photonen. [29] Nun wird eines der ortskorrelierten Photonen auf das abzubildende Objekt geschickt und anschließend mit dem Singlepixel-Detektor detektiert. Das andere Photon wird auf einen Flächendetektor geschickt, der orts aufgelöst detektiert, wo das Photon auftritt. Dabei werden allerdings nur die Photonen berücksichtigt, die in beiden Detektoren – also zeitgleich – detektiert werden, wodurch im Flächendetektor nach und nach ein Bild des Objekts entsteht. Dabei kann man verschränkte Photonen mit unterschiedlichen Wellenlängen verwenden. Dadurch hat man die Möglichkeit, die Aufnahme im sichtbaren Wellenlängenbereich zu machen, in dem hochauflösende und sehr empfindliche Kameras existieren, und gleichzeitig die Probe mit niederenergetischerem Licht zu belichten, um diese möglichst wenig zu schädigen oder das Objekt mit geeigneter Wellenlänge effizient zu detektieren. [55]

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Ghost Imaging bietet die Möglichkeit, hochauflösende Bilder zu erzeugen, selbst wenn das Objekt nur schwach beleuchtet ist. Eine der größten technischen Herausforderungen besteht darin, die präzise Synchronisation der Lichtquellen und Detektoren zu gewährleisten. Weiterhin ist das Verfahren und die Rekonstruktion des Bildes verhältnismäßig langsam. [56]

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Anwendungen von Ghost Imaging finden sich in der medizinischen Bildgebung, wo es zur Minimierung der Strahlenbelastung genutzt werden kann. Bei Untersuchungen von einzelnen Zellen oder von Gewebe in der Medizin interagieren die Lichtstrahlen des Mikroskops mit der zu untersuchenden Probe. Dadurch kann diese verändert oder sogar beschädigt werden. Heutzutage ist die Messdauer durch die Phototoxizität beschränkt, also durch die Sensitivität von Proben bezüglich der schädlichen Einwirkung von Licht. In Zukunft kann diese Technologie die Beobachtung von sehr lichtempfindlichen, lebenden Zellkulturen und Gewebe über mehrere Minuten bis zu Stunden ermöglichen, ohne diese dabei zu beschädigen. [57]

Sensorik und Bildgebung mit nicht-detektierten Photonen:

Sensorik und Bildgebung mit nicht-detektierten Photonen (engl. Sensing and imaging with undetected photons) bezeichnet Methoden, die nichtlinear-optische Interferometer zur Detektion oder Abbildung von Objekten zu nutzen. [54, 58]

Funktionsweise und Stand der Technik

Ein Lichtstrahl einer bestimmten Wellenlänge wird auf zwei nichtlineare Kristalle (K1 und K2) gerichtet, wobei mittels parametrischer Fluoreszenz jeweils ein Paar verschränkter Photonen mit unterschiedlicher Wellenlänge erzeugt wird (Signal-Photonen S1 und S2 sowie Idler-Photonen I1 und I2). Das Idler-Photon I1 passiert das Objekt, welches abgebildet werden soll, und

wird anschließend auf den zweiten Kristall K2 reflektiert. Das Signal-Photon S1 hingegen interagiert nicht mit dem Objekt und wird direkt auf den zweiten nichtlinearen Kristall K2 reflektiert. Im zweiten Kristall K2 werden die Signal-Photonen S1 und S2 sowie die Idler-Photonen I1 und I2 überlagert. Durch Messung der Interferenz entsteht ein Bild des Objektes auch wenn nur die Signal-Photonen gemessen werden, die nicht mit dem Objekt interagiert haben. Diese Methode kann sowohl für die Bildgebung als auch für optische Sensorik verwendet werden. [54, 58, 59]

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Diese Technologie ermöglicht die Sensorik und Bildgebung von Objekten mit Wellenlängen, für die keine geeigneten Detektoren existieren, da das Bild mit Photonen einer anderen Wellenlänge erzeugt wird. Es gibt beispielsweise heutzutage sehr gute Kameras für Licht im sichtbaren Wellenlängenbereich, während diese im Infrarotbereich deutlich schlechter und teurer sind. Somit kann ein Objekt im Infrarotbereich belichtet und im optischen Wellenlängenbereich detektiert werden.

Diese Methoden sind allerdings noch Gegenstand der Forschung und noch von praktischen Anwendungen entfernt. Der Mehrwert in praktischen Anwendungen muss somit noch gezeigt werden. Herausforderungen bestehen weiterhin in der Ineffizienz der parametrischen Fluoreszenz, den Detektoren und somit des gesamten Verfahrens, das entsprechend lange Belichtungszeiten benötigt. Weiterhin ist der optische Aufbau nicht trivial.

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Mögliche Anwendungen sind zum Beispiel in der biologischen Bildgebung und der Inspektion von integrierten Schaltungen. [59]

3.1.4 Analyse und Abschätzung des Innovationspotenzials ausgewählter Anwendungsbereiche der Quantensensorik und -metrologie

3.1.4.1 Anwendungsbereich 1: Hochpräzise Navigation mittels Atomuhren

Ein bereits heute zentraler Anwendungsbereich der Quantensensorik, bzw. -metrologie ist die hochpräzise Navigation mittels globaler Navigationssatellitensysteme (GNSS), wozu auch die GPS-Technologie gehört. Die Navigationssatelliten senden hochpräzise Zeitsignale auf Basis von Atomuhren an Bord der Satelliten aus. Der Empfänger auf der Erde kann über den Zeitversatz des Ankommens der Signale mehrerer Satelliten die eigene Position bestimmen. [60] Dies ist bereits heutzutage einer der am weitesten verbreiteten Einsatzbereiche von Atomuhren mit unmittelbarem Nutzen im Alltag.

Die Genauigkeit der Positionsbestimmung via GNSS hängt maßgeblich davon ab, wie präzise die Zeitdifferenz zwischen den Satelliten und dem Benutzer gemessen werden kann. Durch Weiterentwicklung der Atomuhren können noch höhere Genauigkeiten in den verschiedensten Anwendungsbereichen erreicht werden. Die in Abschnitt 3.1.3.1 vorgestellten optischen Atomuhren haben eine deutlich höhere Genauigkeit. Mit optischen Atomuhren könnten Genauigkeiten von einigen Zentimetern bis hin zu Millimetern erreicht werden. Diese Verbesserung bringt einerseits große Chancen, jedoch andererseits auch Risiken mit sich (z. B. bzgl. militärischer Anwendungen oder Datenschutz). Potenzielle Anwendungen umfassen die hochpräzise Navigation, was besonders für militärische Zwecke eine bedeutende Rolle spielen könnte.

Darüber hinaus könnte die Miniaturisierung von Atomuhren ein weiterer wichtiger Aspekt zur Verbesserung der Positionsbestimmung und Navigation sein. Gelingt es, Atomuhren auf die Größe eines Chips zu miniaturisieren, eröffnen sich vielfältige Anwendungsmöglichkeiten in verschiedensten technischen Geräten. So könnten dann z. B. Atomuhren auch in den Empfängergeräten eingebaut werden, was die Präzision der Positionsbestimmung sowie die Zuverlässigkeit und Robustheit erhöhen würde. [60]

Neben der Nutzung von Atomuhren und Satelliten können auch Magnetfeldsensoren zur Positionsbestimmung verwendet werden. Durch Messung der Stärke des Erdmagnetfelds können diese Sensoren ebenfalls zur präzisen Bestimmung von Positionen beitragen und stellen eine Ergänzung zu den auf Atomuhren basierenden Systemen dar. Durch Kombination verschiedener Technologien kann besonders die Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung garantiert werden, beispielsweise in Situationen, in denen der Empfang zu GPS-Satelliten schlecht ist.

Trotz der bereits breiten und etablierten Anwendung von Atomuhren für die hochpräzise Navigation, zeigt sich weiteres Innovationspotenzial in dieser Technologie. Durch die Entwicklung von noch genaueren optischen Atomuhren sowie durch die Miniaturisierung von Atomuhren lässt sich die Positionsbestimmung und damit die Navigation weiter verbessern. Auch die Weiterentwicklung hochpräziser Magnetfeldsensoren bietet ein großes Potenzial für die Navigation. Die Miniaturisierung dieser Technologien wird dazu beitragen, dass sie in Bereichen des täglichen Lebens, der Industrie, der Forschung wie auch in militärischen Anwendungen einen Einsatz finden werden. Vorteile, die sich daraus ergeben sind unter anderem Optimierungen in der Navigation und Logistik.

3.1.4.2 Anwendungsbereich 2: Hochempfindliche Sensoren für die medizinische Diagnostik

In der medizinischen Diagnostik spielen heutzutage Sensoren eine entscheidende Rolle. Sie ermöglichen die Erkennung von Krankheiten durch die präzise Messung verschiedenster Parameter des Körpers. Eine besonders große Bedeutung in der Medizin haben hochempfindliche Sensoren zur Messung von Magnetfeldern.

Bereits heutzutage werden Magnetfeldsensoren in der Magnetresonanztomographie eingesetzt, um Struktur und Funktion der Gewebe und Organe im Körper darzustellen. Außerdem finden Magnetfeldsensoren Einsatz in der Magnetoenzephalographie, einer Technik zur Messung der sehr kleinen magnetischen Felder, die durch neuronale Aktivitäten im Gehirn erzeugt werden. Auch das Herz erzeugt magnetische Felder. Durch das Messen dieser Felder (Magnetokardiographie) können Herzerkrankungen diagnostiziert werden. Diese Anwendungen zeigen, wie entscheidend Magnetfeldsensoren für die Effektivität der medizinischen Diagnostik sind.

Es gibt eine Reihe verschiedener Magnetfeldsensoren, deren Funktionsweise auf unterschiedlichen quantenmechanischen Effekten basiert. In der medizinischen Diagnostik finden heutzutage vor allem SQUIDs einen Einsatz. Anwendungsbereiche sind dabei sowohl in der Magnetokardiographie wie auch in der Magnetoenzephalographie. SQUIDs benötigen allerdings eine Kühlung auf kryogene Temperaturen, um eine Supraleitung und damit die Funktionsfähigkeit der Sensoren zu ermöglichen. Dies schränkt die Anwendungsmöglichkeiten deutlich ein. Magnetfeldsensoren auf Basis von NV-Zentren und optisch gepumpte Magnetometer (OPMs) sind vielversprechende Kandidaten für einen zukünftigen Einsatz in der medizinischen Diagnostik. NV-Zentren können potenziell in medizinischen Anwendungen zur Untersuchung neuronaler

Aktivitäten eingesetzt werden. Diese haben den Vorteil, dass sie eine sehr hohe räumliche Auflösung bei gleichzeitig hoher Sensitivität haben. Somit kann eine bessere Ortsauflösung z. B. der Gehirnaktivität ermöglicht werden. Außerdem wird keine kryogene Kühlung benötigt, wodurch die Sensoren kleiner sind und näher an der Kopfhaut platziert werden können. [61] Der Abstand zwischen Kopfhaut und Sensor ist aktuell noch eine wichtige Quelle von Rauschen in den Messergebnissen. Auch für die OPMs gibt es bereits erste Demonstrationen für Anwendungen in der medizinischen Diagnostik bei der Magnetoenzephalographie. [62] Auch diese benötigen keine Kühlung und könnten somit die Einsatzgebiete und die Anwendungsfreundlichkeit deutlich erhöhen.

Des Weiteren können auch Muskeln mit Hilfe von sehr empfindlichen Magnetfeldsensoren untersucht werden. In der Magnetomyographie werden magnetische Felder, die durch Muskelaktivitäten erzeugt werden, gemessen. Dafür gibt es bereits ein proof-of-concept, jedoch noch keine tatsächliche Anwendung. [63–65] Dies ist jedoch ein neuer, sehr vielversprechender Anwendungsbereich für hochempfindliche Sensoren zur Magnetfeldmessung, der zukünftig stark an Bedeutung gewinnen könnte.

Quantenmagnetfeldsensoren können somit in Zukunft durch Verbesserung der Empfindlichkeit, Robustheit und Anwendungsfreundlichkeit eine wichtige Rolle bei der Weiterentwicklung der medizinischen Diagnostik spielen. Einerseits kann dies durch Weiterentwicklung der aktuell bereits sehr verbreiteten SQUIDs geschehen. Andererseits könnten durch den Einsatz von Magnetfeldsensoren auf Basis von NV-Zentren und OPMs durch ihre jeweiligen Stärken im Vergleich zu SQUIDs große Sprünge in den Möglichkeiten in der medizinischen Diagnostik erzielt werden. Hierfür ist jedoch noch Forschungsaufwand nötig.

3.2 Quantenkommunikation und -kryptografie

Quantenkommunikation und -kryptografie beschreibt Kommunikations- bzw. Kryptographieverfahren, die sich quantenmechanische Eigenschaften zunutze machen. Dazu gehören Quantenzufallszahlengeneratoren (Quantum random number generators – QRNGs), die Quantenschlüsselverteilung (Quantum Key Distribution – QKD) und Quantenrepeater. Im Folgenden werden diese drei Technologiegruppen etwas genauer betrachtet und ihre Funktionsweise, (potenzielle) Anwendungen, Chancen, Risiken und Herausforderungen diskutiert.

Tabelle 5: Überblick über relevante Quantenkommunikationstechnologien:

Quanten-kommunikations-technologie	Stand der Technologie	(potenzielle) Anwendungen
Quantenzufallszahlengeneratoren (Quantum random number generators – QRNGs)	<ul style="list-style-type: none"> • Viele verschiedene Ansätze existieren • Erste Produkte auf dem Markt, aber noch nicht etabliert • Aktuell große Aktivität in der Forschung 	<ul style="list-style-type: none"> • Hauptanwendung Kryptographie: theoretisch beweisbare Zufallszahlen

- Quantenschlüsselverteilung (Quantum Key Distribution – QKD)**
- Zahlreiche unterschiedliche Ausführungen:
 - BB84 mit abgeschwächten Laserpulsen (TRL 6-9)
 - CV-QKD (TRL 6-9)
 - MDI-QKD/TF-QKD (TRL 6)
 - DI-QKD (TRL 3)
 - Hochsichere Kommunikation
 - Potenzielle Anwendungsbereiche: Behörden, Militär, Finanzwesen, Gesundheitswesen, kritische Infrastrukturen etc.

Es gibt kommerzielle Produkte, jedoch bisher für Nischenanwendungen, u. a. da technologisch noch nicht ausgereift und noch nicht zertifiziert.

Aktuell werden viele Implementierungs-Test mit öffentlichen Fördermitteln unterstützt.

Quantenrepeater	Gegenstand der Forschung (TRL 2-3)	Quantennetzwerke: Vernetzung von Quantencomputern, vernetzte Quantensensorik, sichere Kommunikation über lange Strecken ohne „trusted nodes“
------------------------	------------------------------------	--

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

3.2.1 Quantenzufallszahlengeneratoren

Die Erzeugung von Zufallszahlen ist essenziell für verschlüsselte Kommunikation sowie für numerische Simulationen. Traditionell werden hierfür entweder algorithmische Verfahren verwendet, sogenannte Pseudozufallszahlengeneratoren (engl. pseudo-random number generators – PRNGs), die allerdings deterministische Zufallszahlen erzeugen und bei Wissen des verwendeten Algorithmus und des Startwerts errechnet werden können. Oder physikalische Zufallszahlengeneratoren (engl. true random number generators – TRNGs), die echte Zufallszahlen auf Basis von physikalischen Prozessen erzeugen. Nutzt man nun quantenmechanische Effekte, die aufgrund ihrer probabilistischen Natur besonders gut geeignet sind, spricht man von Quantenzufallszahlengeneratoren (quantum random number generators – QRNGs). Im Folgenden werden verschiedene Arten von QRNGs vorgestellt, Anwendungsmöglichkeiten aufgezeigt und Chancen, Risiken und Herausforderungen diskutiert.

Funktionsweise und Stand der Technik

Es gibt zahlreiche Möglichkeiten quantenmechanische Effekte zu nutzen, um QRNGs zu bauen. Die ersten realisierten QRNGs beruhten auf der Unschärferelation der Quantenmechanik und nutzten den radioaktiven Zerfall oder das Schrotrauschen in elektronischen Schaltkreisen. Diese Systeme haben allerdings einige Nachteile, wie z. B. den Umgang mit radioaktiven Stoffen und Schwierigkeiten bei der Unterscheidung zwischen Schrotrauschen und thermischem Rauschen. Zudem sind sie vergleichsweise langsam. [66] Neuere Generationen von QRNGs nutzen häufig Lichtquellen wie Laser, LEDs oder Einzelphotonenquellen als Entropiequelle, die dann durch optische Elemente manipuliert und abschließend detektiert werden. Dabei werden verschiedene

Effekte der Quantennatur des Lichtes ausgenutzt. Ein QRNG der auf Einzelphotonen-Detektoren beruht, kann beispielsweise wie folgt aufgebaut werden: Eine Einzelphotonenquelle sendet Photonen auf einen Strahlteiler (ein halbdurchlässiger Spiegel), der 50 Prozent der Photonen durchlässt und 50 Prozent der Photonen reflektiert. Welcher der beiden Fälle auftritt, ist für jedes einzelne Photon rein zufällig. Einzelphotonen-Detektoren können anschließend detektieren, welchen Weg die Photonen genommen haben und dies in eine zufällige Zahlenfolge übersetzen (z. B. 0 für reflektiert und 1 für transmittiert). [67]

All diese Arten von sogenannte „trusted“ QRNGs beruhen allerdings darauf, dass man auf die korrekte Funktionsfähigkeit der eingesetzten Komponenten (z. B. Lichtquellen, Detektoren) vertrauen muss, bzw. diese testet und dann bis zum nächsten Testen vertrauen muss. Fehler in der Funktionsweise oder im schlimmsten Fall externe Angriffe auf die Komponenten werden vermutlich nur schwierig bemerkbar sein. Das betrifft z. B. die korrekte Funktionsweise beider Einzelphotonendetektoren im obigen Beispiel. Würden diese nicht beide mit gleicher Genauigkeit funktionieren, ergäbe sich eine nicht-perfekte Zufallszahl. [66]

Um diese Limitation zu überwinden, wurden selbsttestende QRNGs entwickelt. Diese beruhen auf der kontinuierlichen Testung der Zufälligkeit des Outputs, z. B. durch die Beobachtung von Verletzungen gegen die Bell-Ungleichungen, welche als Bestätigung der Verschränkung von Quantenteilchen dient. Die kontinuierliche Selbsttestung dieser QRNGs führt, neben der informationstheoretischen Sicherheit, allerdings dazu, dass sie im Vergleich zu „trusted“ QRNGs eine sehr niedrige Generierungsgeschwindigkeit haben. [67]

Um wiederum diese Limitation zu umgehen, kann man einen Mittelweg gehen, mit sogenannten semi-selbsttestenden QRNG. Diese stellen einen Kompromiss zwischen „trusted“ und selbsttestenden QRNGs dar und ermöglichen eine einigermaßen schnelle als auch sichere Zufallszahlengenerierung. [67] Beispiel hierfür sind lichtquellenunabhängige oder messgeräteunabhängige QRNGs, die auch zuverlässig funktionieren, ohne dass man der Lichtquelle oder dem Detektor vertrauen muss.

Der Bereich der QRNG-Entwicklung ist aktuell sehr aktiv, mit einer Reihe von Unternehmen, die bereits kommerzielle QRNGs entwickelt haben. Dazu gehören z. B. ID Quantique, Toshiba, PicoQuant, und QuantumCTek. [66] In Deutschland gibt es laut Aussagen von Expert:innen bisher keine kommerziellen Anbieter von QRNGs. Die kommerziellen Geräte sind, im Vergleich zu TRNGs, auf dem Markt noch nicht gut etabliert und werden aktuell eher in Nischenanwendungen verwendet. Nichtsdestotrotz werden bereits Bitraten, also Erzeugungsraten von Zufallszahlen, in der Größenordnung von 500 Mbit/s in kommerziellen QRNGs erreicht, was Nahe an die Anforderungen für die Anwendung in QKD-Systemen kommt (hier werden typischerweise Gbit/s benötigt). In der Forschung ist in diesem Gebiet aktuell eine hohe Dynamik zu beobachten, da es insbesondere bei den Komponenten große Überschneidungen zur Quantenkommunikation und zum optischen Quantencomputing gibt.

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Chancen: Im Vergleich zu klassischen TRNGs, kann bei QRNGs die Zufallszahl nicht durch Systemparameter beschrieben werden. Damit erzeugen QRNGs, aufgrund der zugrundeliegenden nicht-deterministischen quantenmechanische Prozesse, theoretisch beweisbare Zufallszahlen. Dies könnte potenziell eine Zertifizierung für z. B. den Hochsicherheitsbereich einfacher gestalten. QRNGs stellen damit einen großen Schritt hin zu größerer Sicherheit dar.

Risiken: In der praktischen Anwendung haben QRNGs mit bereits etablierten TRNGs eine starke Konkurrenz. Auch wenn Zufallszahlen von TRNGs theoretisch durch die Systemparameter beschrieben werden können, so ist dies praktisch nicht ohne weiteres möglich. Außerdem sind TRNGs verhältnismäßig günstig, klein und kompakt und liefern hohe Bitraten. Und auch bei QRNGs ist eine Implementierung, die informationstheoretisch beweisbaren Zufall liefert, recht aufwendig, kostspielig und langsam. Der praktische Mehrwert von QRNGs im Alltagsgebrauch ist deshalb aktuell (noch) nicht offensichtlich.

Herausforderung: Daraus ergeben sich als Herausforderung für QRNGs die Miniaturisierung, Verbesserung der Robustheit, Erhöhung der erreichbaren Bitraten, Beweis der Zufälligkeit der erzeugten Zahlen, eine Zertifizierung und Kosten. Werden diese Punkte weiterhin verbessert, besteht eine gute Chance, dass QRNGs aus den aktuellen Nischenanwendungen, breite Verbreitung finden können.

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Anwendungen für QRNGs finden sich insbesondere im Hochsicherheitsbereich der Kryptographie. Für die Quantenschlüsselverteilung (siehe nächstes Kapitel) werden in der Regel QRNGs für die zufällige Auswahl der Polarisationsbasis verwendet. Darüber hinaus wurden QRNGs auch bereits in Smartphones zur Verschlüsselung von Daten verwendet. [68]

3.2.2 Quantenschlüsselverteilung

Die Quantenschlüsselverteilung (engl. Quantum Key Distribution – QKD) ist eine prinzipiell sichere Kommunikationsmethode, die sich die Grundsätze der Quantenmechanik zunutze macht. Das Verfahren umfasst die Übertragung von Quantenzuständen von einem Sender zu einem Empfänger die z. B. durch Präparation, Messung und Anwendung gewisser Protokolle einen sicheren Schlüssel untereinander austauschen können. Dieser Schlüssel kann dann zur Ver- und Entschlüsselung der Nachrichten verwendet werden.

Es gibt verschiedene Ausführungen der QKD:

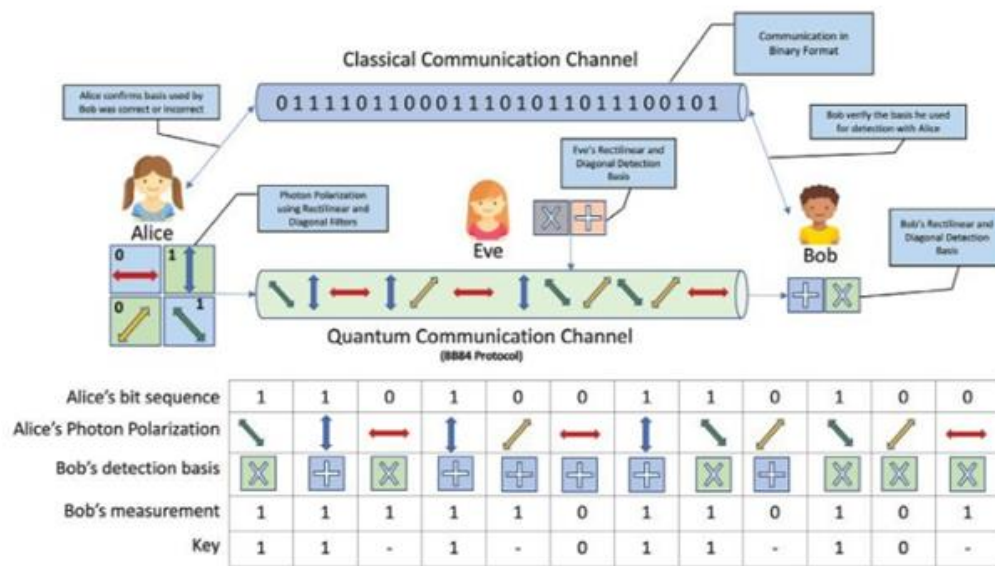
- **Discrete Variable QKD (DV-QKD)** verwendet diskrete Zustände, d. h. im Allgemeinen einzelne Photonen, um Informationen zu übertragen.
- **Continuous Variable QKD (CV-QKD)** verwendet kontinuierliche Zustände, d. h. im Allgemeinen einen kohärenten Laser, um Informationen zu übertragen.

Neben der technologischen Unterscheidung nach verwendeten Komponenten und Protokollen kann man QKD auch nach der Übertragungsart unterscheiden. Konkret kann man QKD über eine Glasfaser realisieren, über Freistrahlauf auf der Erde (von Gebäude zu Gebäude) und Freistrahlauf von Satelliten zur Erde.

Funktionsweise und Stand der Technik

DV-QKD:

DV-QKD verwendet diskrete optische Modi von Photonen, wie z. B. die Photonenpolarisation, um Informationen auszutauschen und dadurch einen Schlüssel zu erzeugen. Diese Technologie kann mit verschiedenen Protokollen umgesetzt werden, die sich grob in zwei Kategorien einteilen lassen: Protokolle nach dem Prepare & Measure-Prinzip und verschränkungsbasierte Protokolle.

Abbildung 1: Illustration des Funktionsmechanismus von QKD nach dem BB84-Protokoll.

Quelle: "Quantum Computing and the Future Internet" [69], Copyright: Dr. Tajdar Jawaid

Bei QKD-Protokollen auf Basis des **Prepare & Measure-Prinzips** präpariert ein Sender (meist Alice genannt) Quantenzustände, z. B. die Polarisation von Photonen, und sendet diese zur Messung an einen Empfänger (meist Bob genannt). Eines der bekanntesten und am weitesten verbreiteten Protokolle in dieser Kategorie ist das *BB84-Protokoll*, das 1984 von Bennett und Brassard vorgeschlagen wurde. Eine vereinfachte Beschreibung der Funktionsweise von BB84 lautet wie folgt (siehe auch Abbildung 1): Alice sendet eine zufällige Folge von binären Bits (0 oder 1) in Form von polarisierten Einzelphotonen, auf einer zufällig gewählten Basis (entweder horizontal/vertikal (+) oder diagonal (×)). Bei der horizontal/vertikal Basis könnte z. B. das 1-Bit durch vertikale Polarisation und das 0-Bit durch horizontale Polarisation dargestellt werden. Das Photon wird über einen Quantenkanal (z. B. eine Glasfaser) an Bob übertragen, der die Polarisation jedes Photons misst, wobei er wiederum eine zufällig ausgewählte Basis verwendet. Nach dem Senden und Empfangen einer gewissen Anzahl von Photonen geben Bob und Alice die Basen preis, die sie für jedes Photon verwendet haben. Sie behalten die Bits nur dann, wenn sie dieselbe Basis verwendet haben, um ein deterministisches Ergebnis der Messung zu gewährleisten (Sifting-Prozess). Die resultierende Bitfolge kann dann als geheimer Schlüssel zum Ver- und Entschlüsseln der eigentlichen Nachricht verwendet werden, die über einen klassischen Kanal gesendet wird. Nehmen wir nun an, ein Mithörer (engl. eavesdropper, meist Eve genannt) versucht, den Quantenschlüssel abzuhören, indem er die Photonen auf dem Quantenkanal misst. Da Eve jedoch die von Alice und Bob zum Zeitpunkt ihrer Messung verwendeten Basen nicht kennen kann, würde ihre Messung den Quantenzustand des Photons stören, wenn sie die falsche Basis wählt. Dies wiederum würde zu Fehlern in einigen von Bobs Messungen führen. Somit dient die Fehlerrate als Indikator dafür, ob Eve einen Angriff versucht hat oder nicht. Aufgrund des quantenphysikalischen Prinzips kann Eve auch keine Photonen abfangen und kopieren, um sie an Bob weiterzusenden; denn im Gegensatz zu einem klassischen Zustand ist es unmöglich, eine perfekte Kopie eines Quantenzustands zu erstellen (No-Cloning-Theorem). [70] In der Realität wird die Fehlerrate auch durch Rauschen auf den Übertragungswegen beeinflusst. Da die durch Abhören und die durch Umgebungsgeräusche verursachten Fehler nicht unterschieden werden können, wird der Angriff möglicherweise nicht entdeckt, wenn Eve

nur kleine Mengen an Informationen abhört. Um dieses Problem zu lösen, werden die „reconciliation“ und „privacy amplification“ als Nachbearbeitungsmethoden vorgeschlagen. [71] Reconciliation (dt. Abgleich) ist ein Verfahren zur Korrektur von Fehlern, die durch Kanalrauschen verursacht werden. Dabei ist zu beachten, dass der Prozess den Austausch zusätzlicher Informationen über einen öffentlichen Kanal erfordert, was die Sicherheit der Schlüssel je nach der Menge der preisgegebenen Informationen verringert. Eines der bekanntesten Protokolle ist Cascade, das Fehler erkennt, indem es den empfangenen Schlüssel iterativ in Blöcke unterteilt und deren Parität² mit der Parität der entsprechenden Blöcke des Originalschlüssels vergleicht, um Bitfehler aufzulösen. [72] Privacy Amplification (dt. Verstärkung des Datenschutzes) zielt darauf ab, die Daten nach dem Abgleich zu komprimieren, indem aus den ursprünglichen Bits neue, kürzere Schlüssel erzeugt werden. Obwohl BB84 theoretisch "bedingungslose Sicherheit" bietet, setzt es die Fehlerfreiheit der Geräte voraus. In der Praxis kann die Unvollkommenheit der Geräte jedoch zu verschiedenen Anfälligkeiten für externe Angriffe (Seitenkanalangriffe) führen. [73] Um dieses Problem zu überwinden, werden derzeit fortschrittlichere Protokolle entwickelt, zum Beispiel:

- **Messgeräteunabhängiges QKD (MDI-QKD):** Im Gegensatz zu BB84 sind sowohl Alice als auch Bob im Versuchsaufbau für MDI-QKD mit einer Photonenquelle ausgestattet, die gleichzeitig jeweils ein präpariertes Photon (z. B. mit bestimmter Polarisation) an einen zentral gelegenen Detektor (meist Charlie genannt) sendet. Charlie führt eine "Bell-State-Messung" an den beiden Photonen durch und teilt Alice und Bob die Ergebnisse mit. Die Bell-State-Messung gibt nur Aufschluss darüber, ob Alice und Bob die gleichen Bits (A=0 und B=0 oder A=1 und B=1) verwendet haben oder nicht (0/1 oder 1/0), ohne zu wissen, welche Bits Alice und Bob versendet haben. Daher ist das Protokoll von Natur aus tolerant gegenüber Schwachstellen, die mit dem Messgerät (Charlie) verbunden sind, und wird als "messgeräteunabhängig" bezeichnet. [74]
- **Twin-Field QKD (TF-QKD)** [75]: Ähnlich wie bei MDI-QKD wird bei TF-QKD Charlie als Messstation verwendet. Allerdings senden Alice und Bob zwei optische Felder anstelle von Photonen, was zu einer Einzelphotonen-Interferenz führt, gefolgt von einem Einzelphotonen-Detektionsereignis bei Charlie. Diese Eigenschaft ermöglicht nicht nur eine messgeräteunabhängige Charakteristik, sondern auch eine verbesserte Raten-Distanz-Grenze für QKD. Bislang wurde TF-QKD mit einer Kommunikationsentfernung von über 1000 km auf Forschungsebene demonstriert. [76]
- **Geräteunabhängiges QKD** (engl. device-independent QKD, **DI-QKD**): DI-QKD ist ein theoretisches Konzept von QKD, das darauf abzielt, die Sicherheit unabhängig von der Implementierung der Geräte zu gewährleisten, indem es sich auf eine hochwertige Verschränkungsverteilung zwischen Alice und Bob stützt. DI-QKD basiert auf dem Protokoll Ekert 91, das in die Kategorie der verschränkungs-basierten Protokolle fällt (siehe unten).

Verschränkungs-basierte QKD nutzt die Verschränkung von Photonen zum sicheren Austausch von Schlüsseln. „Verschränkung“ bezieht sich auf ein Phänomen, bei dem das Ergebnis einer Messung des Quantenzustands eines Photons das des verschränkten Gegenstücks beeinflusst, obwohl die Photonen physisch getrennt sind. Ein Beispiel für ein verschränkungs-basiertes Protokoll ist Ekert 91 (E91). Im Gegensatz zu MDI-QKD fungieren bei E91 sowohl Alice als auch Bob als Empfänger von (in diesem Fall verschränkten) Photonen, die von einem neutralen Akteur (Charlie) an beide ausgesendet werden. Sie messen jeweils die verschränkten

² Die Parität einer Bitfolge ist gerade oder ungerade, entsprechend der Anzahl der 1en in dieser Bitfolge.

Photonen mit einer zufällig ausgewählten Basis. Wenn Alice und Bob die gleiche Basis wählen, sind die Ergebnisse der Messungen aufgrund der Verschränkung perfekt korreliert, so dass Bob und Alice auf das Ergebnis der Messung des anderen schließen können. Versucht Eve Photonen abzu hören, so wird die Verschränkung der Photonenpaare unterbrochen und die bei Alice und Bob ankommenden Photonen sind nicht mehr miteinander verschränkt. Indem sie den Grad der Verschränkung (den Grad der Verletzung einer Bell-Ungleichung) untersuchen, können Alice und Bob den Abhörversuch erkennen. Da die Quantenzustände der einzelnen verschränkten Photonen zum Zeitpunkt der Messung bestimmt werden, kann die Photonenquelle selbst die erzeugten Zustände nicht kennen, was dem Protokoll eine Toleranz gegenüber Angriffen aufgrund von Quellenfehlern verleiht. [77]

CV-QKD:

Im Gegensatz zu DV-QKD verwendet CV-QKD eine kontinuierliche Lichtquelle. Die Information wird in den Quadraturen des quantisierten elektromagnetischen Feldes kodiert und durch Homodyn- oder Heterodyn-Detektion der Quadraturen dekodiert. [78] CV-QKD bereitet Quantenzustände mit kohärentem oder gequetschtem Licht vor und benötigt keine teuren Einzelphotonen-Emitter oder -Detektoren. Wie auch bei DV-QKD gibt es verschiedene Ausführungen des CV-QKD. Die am weitesten verbreitete Variante entspricht auch einem Prepare & Measure-Verfahren. Im Vergleich zu DV-QKD kann CV-QKD daher viele klassische Kommunikationskomponenten und möglicherweise sogar die bestehende Glasfaserinfrastruktur nutzen. Darüber hinaus bietet diese Technologie die Möglichkeit der Integration in kompakte Systeme. Andererseits ist die Kommunikationsdistanz im Allgemeinen geringer als die von DV-QKD. Daher wird teils diskutiert, ob sich CV-QKD besonders für großstädtische Netze eignen könnte. Andererseits erfordert CV-QKD ein recht aufwändiges und rechenintensives Post-Processing.

Faser-basiert vs. Freistrah

Quanteninformationen können entweder über optische Fasern oder über Freistrahkanäle übertragen werden. Glasfaserbasierte QKD ist eine ausgereifere Technologie und kann teils von den bestehenden optischen Kommunikationsnetztechnologien profitieren. Allerdings begrenzen die optischen Verluste innerhalb der Glasfasern die maximale Kommunikationsentfernung. In letzter Zeit haben mehrere Länder mit dem Aufbau von Backbone-Netzen für die Quantenkommunikation begonnen. Ein herausragendes Beispiel ist das Netz in China, das sich über 2000 km von Peking nach Shanghai erstreckt. [79] Andererseits ermöglicht die Freistrah-QKD mit Hilfe eines Satelliten die Kommunikation über große Entfernungen, da der Photonenverlust und die Dekohärenz im Kommunikationsmedium geringer sind, vorausgesetzt, die Quantensignale werden nicht von der Erdatmosphäre absorbiert oder gestreut. Darüber hinaus werden keine physischen Kabel benötigt, was eine größere Flexibilität bei den Kommunikationswegen ermöglicht. So haben chinesische und österreichische Forschungsgruppen im Jahr 2018 QKD über eine Entfernung von 7600 km per Satellit über Kontinente hinweg demonstriert. [80] Dennoch gilt Freistrah-QKD als technologisch weniger ausgereift als glasfaserbasiertes QKD. [81] Darüber hinaus wird die Leistung bei Tageslicht durch das Rauschen des Sonnenlichts beeinträchtigt, weshalb Forscher derzeit neue Tageslichtverfahren erforschen. [82]

Kommerzialisierung von QKD

Im Jahr 2003 kündigte das US-amerikanische Unternehmen MagiQ Technologies Inc. die Veröffentlichung des ersten kommerziellen QKD-Systems an. [83] Seitdem haben verschiedene Unternehmen QKD-Systeme auf den Markt gebracht, die unterschiedliche Protokolle und

Technologien verwenden, darunter BB84, verschränkungsbasiertes QKD und CV-QKD. In Deutschland bietet beispielsweise Quantum Optics Jena, eine Ausgründung des Fraunhofer IOF, ein QKD-System an, das auf dem verschränkungsbasierten BBM92-Protokoll basiert, [84] während KEEQuant, eine Ausgründung des Max-Planck-Instituts für die Physik des Lichts, ein CV-QKD-System entwickelt hat. [85] Die am weitesten verbreitete Technologie ist jedoch aktuell die auf BB84 basierende QKD, die z. B. von IDQuantique und Toshiba verkauft wird.

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Die Entwicklung von Quantencomputern könnte dazu führen, dass klassische kryptographische Schlüssel, mit der Hilfe von Quantencomputern entschlüsselt werden könnten. Einige Expert:innen sagen voraus, dass der „Q-Day“ bis 2030 oder sogar noch früher kommen könnte; „Q-Day“ bezeichnet den Tag, an dem Quantencomputer leistungsfähig genug sein werden, um die derzeitigen Verschlüsselungssysteme zu knacken. [86] Doch bereits bevor Quantencomputer so weit sind, können Daten entsprechend dem Motto „Jetzt sammeln, später entschlüsseln“ abgefangen und für eine spätere Entschlüsselung gespeichert werden. [87] Aufgrund dieser Gefahren ist es wichtig, schon zeitnah „quantensichere“ Verschlüsselungsverfahren zu entwickeln und zu implementieren. Dazu zählen neben QKD auch die Post-Quanten-Kryptographie (engl. post-quantum cryptography, PQC). Als PQC werden neue Arten von kryptografischen Algorithmen bezeichnet, die gegen Angriffe von Quantencomputern (und auch klassischen Computern) resistent sein sollen. PQC stellt keine Quantentechnologie dar, sondern ist ein klassisches Verfahren. Die Entwicklungen des Quantencomputing stellen sowohl für QKD als auch für PQC eine große Chance dar, da in Zukunft alle bisher eingesetzt asymmetrische Verschlüsselungsverfahren potenziell nicht mehr sicher sind. Gleichzeitig bringt PQC viele Wettbewerbsvorteile gegenüber QKD mit, da PQC deutlich einfacher und kostengünstiger in bestehende Systeme integriert werden kann und bereits ausgereifter ist. Es wird dafür keine neue Hardware benötigt. Allerdings bietet PQC nur algorithmische Sicherheit und aktuell ist unklar, ob diese Algorithmen potenziell in Zukunft auch entschlüsselt werden könnten. QKD könnte hingegen, bei richtiger Implementierung, prinzipiell physikalische Sicherheit bieten. PQC und verschiedene Arten von QKD-Technologien haben unterschiedliche Vor- und Nachteile (siehe Tabelle 6), und beide könnten in Zukunft eine Rolle spielen.

In letzter Zeit haben sich viele Sicherheitsbehörden für den Einsatz von PQC ausgesprochen. So haben beispielsweise die U.S. National Security Agency [88] und das U.K. National Cyber Security Center [89] den Einsatz von PQC und nicht von QKD für nationale Sicherheitssysteme empfohlen. Auch das deutsche Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) hat zusammen mit den Sicherheitsbehörden in Frankreich, den Niederlanden und Schweden ein Positionspapier zu QKD veröffentlicht, in dem es die Auffassung vertritt, dass QKD bis 2024 noch nicht ausreichend ausgereift ist und nur für einige Nischenanwendungen in Frage kommt. [90] Im April 2024 veröffentlichte die Europäische Kommission eine Empfehlung zur Post-Quanten-Kryptografie, in der sie die Mitgliedstaaten ermutigt, PQC in bestehenden öffentlichen Verwaltungssystemen und kritischen Infrastrukturen einzusetzen. In dieser Empfehlung wird die Möglichkeit erwähnt, QKD eher als ein hybrides System mit PQC zu verwenden. [91]

Tabelle 6: Vor- und Nachteile verschiedener „quantensicherer“ Verschlüsselungsverfahren:

	Vorteile	Nachteile
PQC	<ul style="list-style-type: none"> • Höhere TRLs als QKD (schätzungsweise etwa TRL 8 bis 9) • Leichtere Implementierung (keine spezielle Hardware erforderlich) • Von staatlichen Behörden in einigen Ländern empfohlen 	<ul style="list-style-type: none"> • Keine "unbedingte Sicherheit" für die Zukunft (nur algorithmische Sicherheit ist gewährleistet) • Hohe rechnerische Anforderungen
DV-QKD (BB84)	Bereits kommerziell verfügbar	<ul style="list-style-type: none"> • Erfordert neue Hardware und Infrastruktur • Begrenzte Reichweite (ca. 100 km) • Dennoch können potenzielle Schlupflöcher bestehen (Seitenkanalangriff)
DV-QKD (MDI-QKD/TF-QKD)	<ul style="list-style-type: none"> • Längere Reichweite (insbesondere bei TF-QKD) • Tolerant gegenüber Schwachstellen an Messgeräten; die Komponenten müssen sich nicht in einer hochsicheren Umgebung befinden • Ermöglicht mehreren Benutzern die Verbindung zu einem einzigen Zentralknoten 	<ul style="list-style-type: none"> • Noch niedrigere technologische Reife, da technisch komplexer als BB84 • Potenzielle Schwachstellen an Lichtquellen
DV-QKD (verschränkungsba-siert)	<ul style="list-style-type: none"> • Bereits kommerziell verfügbar • Tolerant gegenüber der Angreifbarkeit von Geräten (DI-QKD); Komponente muss sich nicht in hochsicherer Umgebung befinden • Kompatibilität mit anderen Quantenanwendungen ("Quantennetze") 	<ul style="list-style-type: none"> • Noch niedrigere technologische Reife, da technisch komplexer als BB84 • Bedarf an technologisch anspruchsvollen Verschränkungsquellen • Erreichbare Schlüsselrate und Reichweite sind noch unklar
CV-QKD [92]	Es können teils klassische Telekom-Komponenten eingesetzt werden; somit potenziell geringere Infrastrukturkosten als DV-QKD	<ul style="list-style-type: none"> • Geringere Anzahl von durchgeführten Tests und theoretischen Sicherheitsnachweisen verfügbar • Komplexere Systeme als BB84

- Kürzere Kommunikationsentfernung (ca. 40 km)
- Bisher keine Konzepte für Quantenrepeater für CV-QKD

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

Eine wesentliche technische Einschränkung der derzeitigen QKD-Systeme ist die begrenzte Reichweite. Kommerziell erhältliche Punkt-zu-Punkt-QKD-Systeme können Kommunikationsentfernungen von bis zu 150 km erreichen. Um diese Beschränkung zu überwinden, kann die Entwicklung von TF-QKD und Quantenrepeatern eine Lösung sein. Doch keines der beiden Systeme hat bisher die industrielle Produktion erreicht und beide erfordern weitere Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen für die Kommerzialisierung. Die Verwendung sogenannter „vertrauenswürdiger Knoten“ (engl. trusted nodes) ist eine derzeit verfügbare Option, um die Entfernung zu vergrößern und komplexere Netzstrukturen aufzubauen. [93] Da diese Knoten jedoch die übertragenen Informationen in klassische Signale umwandeln, ist keine Ende-zu-Ende physikalische Sicherheit gewährleistet (bzw. abhängig vom trusted node), wodurch der eigentliche Vorteil von QKD gegenüber anderen Sicherheitslösungen geschmälert wird.

Auch bezüglich der Komponententechnologie gibt es Herausforderungen. So sind z. B. Einzelphotonendetektor ein kritischer Engpass für die Leistungsfähigkeit von QKD-Systemen. Es besteht ein Bedarf an Detektoren mit höherer Taktrate, höherer Betriebstemperatur und niedrigeren Kosten. [94] Photonenquellen und deren Verbesserung können auch zu leistungsfähigeren QKD-Systemen beitragen. Das ist insbesondere der Fall für verschränkungsbasierte und MDI-QKD Implementierungen. Prepare-and-Measure-Protokolle funktionieren gut mit etablierten abgeschwächte Laserpulsen (unter Verwendung von Decoy-State-Protokollen).

Es wird davon ausgegangen, dass Deutschland im Bereich der Quantenkommunikationsforschung dank der öffentlichen Förderung und der Zusammenarbeit zwischen Industrie und Forschung zu den führenden Ländern aufschließt. Allerdings wird die Abhängigkeit von Nicht-EU-Unternehmen immer noch als Problem angesehen. Zwar bieten mehrere EU-Anbieter QKD-Systeme an, doch die etabliertesten Anbieter kommen nicht aus EU-Mitgliedstaaten, wie ID Quantique in der Schweiz mit koreanischem Kapital und Toshiba mit Sitz im Vereinigten Königreich und Japan. Außerdem gibt es in Europa wohl keine zuverlässige Lieferkette für alle QKD-Komponenten (QRNG, Modulatoren, Detektoren und Laser) gibt. Um die technologische Souveränität zu stärken, wäre es vorteilhafter, in der EU ansässige Zulieferer zu etablieren.

Eine weitere große Herausforderung ist die **Marktnachfrage**. Trotz der kommerziellen Verfügbarkeit von QKD-Systemen hat sich der QKD-Markt bisher nur in Nischenanwendungen entwickelt. Es gibt eine Reihe von Testbeds/Demonstrationsprojekten mit privaten Unternehmen in ganz Europa, die jedoch häufig noch mit öffentlichen Mitteln gefördert werden. Um "echte Kunden" sowohl im öffentlichen als auch im privaten Sektor zu gewinnen, wo QKD potenziell einen Mehrwert bieten könnte, sollten daher die Anstrengungen in Bereichen wie der Erstellung von **Sicherheitsnachweisen, Normung, Zertifizierung und Akkreditierung (zur Verwendung durch offizielle Stellen), Kostensenkung und Verbreitung von Demonstrationsprojekten** unternommen werden, um Kunden zu überzeugen. Weiterhin ist der Infrastrukturaufbau (Glasfasernetze für QKD) voranzutreiben, wie es aktuell z. B. durch EuroQCI umgesetzt wird.

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Anwendung von QKD ist die hochsichere Kommunikation. Es könnten, bei geeigneter Implementierung, prinzipiell physikalisch sicher Schlüssel ausgetauscht werden, die dann für die Verschlüsselung jegliche Kommunikation verwendet werden kann. Aufgrund der zusätzlichen benötigten Hardware und der somit hohen Kosten ist auf absehbare Zeit ein Einsatz in erster Linie für sehr vertrauenswürdige Daten wahrscheinlich. Dies sind insbesondere die Kommunikation zwischen Behörden und Regierungen, im Verteidigungsbereich, im Finanzbereich/Banking, für kritische Infrastruktur, und im medizinischen Bereich.

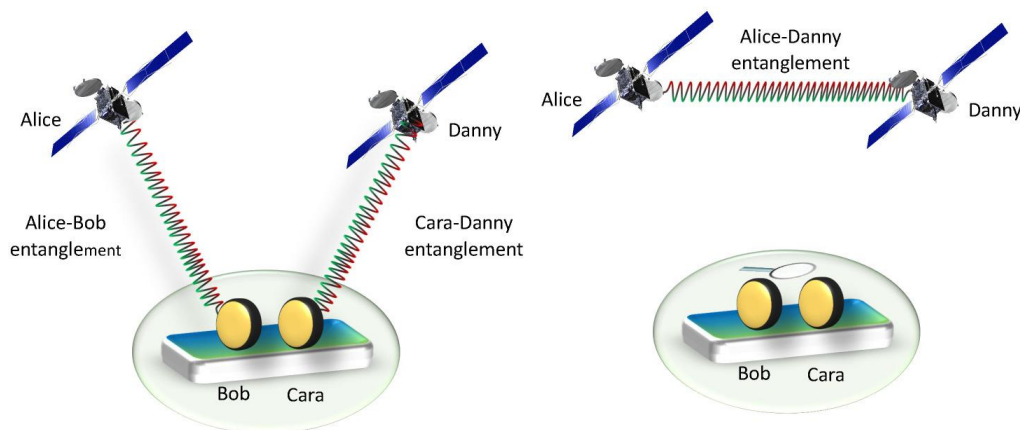
3.2.3 Quantenrepeater

Wie in Abschnitt 3.2.2 erwähnt, stellt die Reichweitenlimitation aufgrund von Photonenstreuung eine grundlegende Beschränkung für die maximale Kommunikationsentfernung von QKD-Systemen dar. In klassischen optischen Kommunikationssystemen erfolgt in gewissen Abständen eine Verstärkung der Signale durch elektronische Geräte, die als „Repeater“ bezeichnet werden. Das No-Cloning-Theorem verbietet jedoch das perfekte Kopieren von Quantenzuständen durch einen klassischen Repeater. Eine Lösung zur Überwindung dieser Einschränkung sind Quantenrepeater, die die Übertragung von Quanteninformationen zwischen entfernten Partnern durch Verschränkungsverteilung ermöglichen.

Funktionsweise und Stand der Technik

Quantenrepeater nutzen die Verschränkung von Quantenteilchen und einen Prozess, der als Verschränkungsverteilung bekannt ist (Abbildung 2). Das Funktionsprinzip der Verschränkungsverteilung ist wie folgt: Man erzeugt zwei unabhängig voneinander verschränkte Photonenpaare A-B und C-D. Durch die Durchführung einer Bell-State-Messung (BSM) an den Photonen B und C und eine Nachbearbeitung auf der Grundlage des BSM-Ergebnisses wird eine Verschränkung der Photonen A und D erreicht.

Abbildung 2: Illustration der Verschränkungsverteilung.

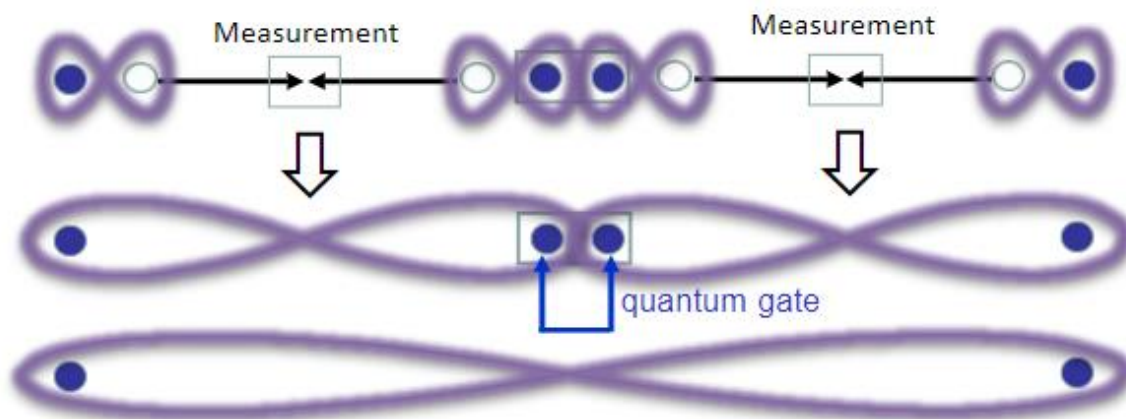


Quelle: "Entanglement Swapping and Swapped Entanglement" [95], lizenziert unter CC BY 4.0

Ein Quantenrepeater nutzt nun die Verschränkungsverteilung, um Verschränkungs Zustände zwischen verschiedenen Partnern zu erzeugen (Abbildung 3). Ein Segment eines Quantenrepeaters besteht aus zwei Quantenspeichern, die lokal Quantenzustände speichern können (blaue Punkte), und einer zentralen Messstation (grauer Kasten), die zur Durchführung des BSM verwendet wird. Zunächst wird eine Verschränkung zwischen einem Photon und dem lokalen

Quantenspeicher (z. B. dem Spin-Zustand) erzeugt und das Photon an die zentrale Messstation übertragen. Dieser Prozess wird zeitgleich in zwei nächstgelegenen Quantenrepeatern ausgeführt. Mit den Photonen wird eine BSM durchgeführt, die bei positivem Ergebnis dazu führt, dass die Quantenzustände der lokalen Quantenspeicher miteinander verschränkt werden. Nachfolgende Iterationen von BSM auf zwei benachbarten Speichern ermöglichen die weitere Ausdehnung der Verschränkung, was schließlich zu einer Verteilung von Verschränkungszuständen über längere Distanzen führt. Es ist wichtig zu beachten, dass das Vorhandensein von Rauschen in Quantenkanälen den Prozess beeinträchtigen kann, was die Erkennung und Korrektur des Rauschens durch einen Prozess namens Verschränkungsdestillation erforderlich macht.

Abbildung 3: Illustration der Funktionsweise von Quantenrepeatern.



Quelle: Abgebildet unter Genehmigung von Christoph Becher, Universität des Saarlandes

1998 präsentierten Briegel, Dür, Cirac und Zoller das erste Konzept eines Quantenrepeaters, [96] das 2008 experimentell im Labor nachgewiesen wurde. [97] In jüngster Zeit wurde über eine Reihe bemerkenswerter Erfolge bei der Demonstration der Verschränkungsverteilung über relativ kurze Entfernungen (Dutzende von Kilometern) berichtet:

- Im Jahr 2021 demonstrierte ein niederländisches Forscherteam ein Drei-Knoten-Netzwerk, das aus NV-Zentren-basierten Qubits bestand, und die Verschränkungsverteilung über die drei Knoten ermöglichte. [98]
- Im Jahr 2022 meldete eine chinesische Forschergruppe, dass sie die Verschränkung von zwei über 10 km voneinander entfernten Speichern in einem Großstadtgebiet nachweisen konnte. [99]
- Im Jahr 2022 demonstrierten zwei deutsche Forschergruppen um Christoph Becher und Harald Weinfurter die Verschränkung zweier Rubidium-Atome über 33 km Glasfaser. [100]
- Im Jahr 2023 demonstrierte Amazon Web Service erfolgreich die Verschränkung von zwei Spinspeichern auf der Basis von Si-V-Zentren durch eine 35 km lange Faserschleife. [101]

Bis April 2024 ist der Quantenrepeater jedoch noch nicht kommerzialisiert worden, und die aktuelle technologische Reife wird auf ein TRL von etwa 2 bis 3 geschätzt. Daher sind weitere kontinuierliche F&E-Anstrengungen erforderlich, um einen Markteintritt zu erreichen. Die Entwicklung eines Quantenrepeaters wird in der EU als mittel- und langfristiges technologisches Ziel betrachtet, wobei die strategische Forschungs- und Industrieagenda 2030 der EU im Rahmen des Quantum Flagships „Langstrecken-Quantenkommunikations-Glasfasernetzwerke unter Verwendung von Quantenrepeatern, die in der Lage sind, Großstadtnetze über Hunderte

von Kilometern zu verbinden“ als eines der mittelfristigen Ziele für den Zeitraum 2027-2030 definiert. [102]

Chancen, Risiken und Herausforderungen

Quantenrepeater sind eine zentrale technologische Komponente zum Aufbau von Quantennetzwerken. Um dem Ziel eines Quantennetzwerks näher zu kommen, wurde die F&E von Quantenrepeatern in Deutschland und der EU bisher mit öffentlichen Mitteln weitgehend unterstützt.

Quantenrepeater sind jedoch technologisch komplex, und Expert:innen gehen davon aus, dass die Kommerzialisierung dieser Technologie noch lange dauern könnte (z. B. 30 Jahre, wenn man die Geschichte der QKD-Entwicklung zugrunde legt). Als alternative Option für die Erhöhung der Reichweite von QKD kann die ausgereifere "Trusted-Node"-Technologie angesehen werden. Inzwischen haben einige Industrieunternehmen damit begonnen, QKD-Netze mit vertrauenswürdigen Knoten zu implementieren. [103] Obwohl eine solche Art von QKD-Netz keine unbedingte Ende-zu-Ende-Sicherheit gewährleisten kann, wäre der vertrauenswürdige Knoten je nach den Sicherheitsanforderungen des Endnutzers kurz- und mittelfristig die wahrscheinlichste Option für den Aufbau von QKD-Netzen. Trusted Nodes können allerdings nur für QKD-Netze und nicht für Quantennetzwerke eingesetzt werden, da über sie keine Verschränkungsverteilung möglich ist – dies geht nur über Quantenrepeater.

Eine entscheidende Technologiekomponente für Quantenrepeater ist der Quantenspeicher, also eine Komponente zur Speicherung von Quantenzuständen. Um die Ankunft von Quanteninformationen zu synchronisieren, muss der Quantenspeicher über eine ausreichende Speicherzeit verfügen. Um ein effektives System zu entwickeln, hat die Forschung verschiedene Materialien erforscht, darunter z. B. gefangene Atome und Ionen, Farbzentren in Diamanten, Atomensembles, Dotierungen aus seltenen Erden und Quantenpunkte. [104] Eine weitere wichtige Komponente ist die verschränkte Photonenquelle, die mit hoher Effizienz reine und ununterscheidbare Photonen erzeugt. [105] In einigen Protokollen wird die Verwendung einer einzigen Materialplattform sowohl für die Speicher- als auch für die Lichtquellenfunktion vorgeschlagen.

Die größte Herausforderung besteht darin, eine optische Schnittstelle zwischen dem Quantenspeicher und den für den Transport benötigten Photonen zu schaffen. Eine der Schwierigkeiten dabei ist, eine Kompatibilität der Energie/Wellenlängen zwischen ihnen zu erreichen. [106] In letzter Zeit haben z. B. Er-dotierte Kristalle aufgrund ihrer mit den Telekommunikationsbändern kompatiblen Übergangswellenlänge Aufmerksamkeit erregt. Doch die Technologie befindet sich in einem noch maßgeblich früheren Entwicklungsstadium als andere Materialsysteme, wie z. B. NV-Zentren.

Anwendungen und potenzielle Anwendungen

Die absehbare Anwendung von Quantenrepeatern sind Quantennetzwerke. Diese ermöglichen die Verschränkungsverteilung über längere Distanzen und können neben hochsicherer Kommunikation auch faszinierende Anwendungen im Bereich des Quantencomputings und der Quantensensorik ermöglichen (Details siehe Abschnitt 3.2.4.2). Diese Anwendungen sind aufgrund der geringen technologischen Reife von Quantenrepeatern allerdings noch Zukunftsmusik und nicht in absehbarer Zeit auf dem Markt realisierbar.

3.2.4 Analyse und Abschätzung des Innovationspotenzials ausgewählter Anwendungsbereiche der Quantenkommunikation und -kryptographie

3.2.4.1 Anwendungsbereich 1: Punkt-zu-Punkt Quantenschlüsselverteilung (QKD) für hochsichere Kommunikation (z. B. zwischen Behörden)

Die Anwendung von QKD kann die Kommunikationssicherheit gegen externe Angriffe durch Quantencomputer in verschiedenen Sektoren verbessern. Insbesondere wird erwartet, dass QKD die Marktnachfrage in Sektoren erhöhen wird, die sich mit kritischer nationaler Sicherheit befassen, wie Regierung und Verteidigung sowie kritische Infrastruktur. Hierfür stellen allerdings eine Zertifizierung und Zulassung der Technologie noch Herausforderungen dar. Stand 2024 ist noch kein QKD-Produkt zertifiziert. Auch Sektoren, die mit sensiblen personenbezogenen Daten umgehen, wie das Gesundheitswesen, könnten von dieser Technologie profitieren. Darüber hinaus werden auch Banken und Rechenzentren, deren Kunden hohe Sicherheitserwartungen haben, zunehmend auf QKD aufmerksam und beteiligen sich an verschiedenen Demonstrationsprojekten. [107]

Der nächste Schritt nach der Punkt-zu-Punkt-Verbindung zwischen Kommunikationspartnern besteht darin, ein QKD-Netz aufzubauen. Da Quantenrepeater noch nicht auf dem Markt sind, ist eine kommerziell verfügbare Lösung ein QKD-Netz, das über vertrauenswürdige Knotenpunkte verbunden ist. Obwohl ein solches Netz keine absolute Ende-zu-Ende Sicherheit bietet, kann es mehrere Nutzer miteinander verbinden. Darüber hinaus könnte ein solches QKD-Netz ein Sprungbrett für ein Quantennetz sein (siehe nächstes Kapitel), da beide Netze eine Infrastruktur auf der Basis von nicht parallel zu Telekommunikationszwecken genutzten Glasfaser-Verbindungen (Dark Fiber) benötigen. Außerdem können mit MDI-QKD oder verschränkungs-basiertem QKD kleine sternförmige Multi-User-Netzwerke aufgebaut werden, indem Charlie im Zentrum platziert wird und mehrere Endknoten (Alice/Bob) mit ihm verbunden werden.

3.2.4.2 Anwendungsbereich 2: Quantennetzwerke / Quanteninternet

Das ultimative Ziel der Quantenkommunikationstechnologie ist der Aufbau von Quantennetzwerken, die Quantenzustände zwischen beliebigen Knoten im Netzwerk durch Verschränkungsverteilung von Ende zu Ende übertragen können. Das Konzept des Quantennetzwerks wurde erstmals in den späten 1990er Jahren im Zusammenhang mit der Implementierung von Quantenkommunikation zwischen verschiedenen Knoten vorgeschlagen. [108] Bis heute haben verschiedene Forscher dieses Konzept auf unterschiedliche Weise definiert, und es gibt keine einheitliche Definition des Begriffs Quantennetzwerk (oder "Quanteninternet"). Im EU-Kontext initiierte die Europäische Kommission 2018 das Quantum Flagship mit der langfristigen Vision, ein Quanteninternet zu schaffen (*"ein Netzwerk, das Quantencomputer, -simulatoren und -sensoren miteinander verbindet und Informationen zur Sicherung unserer digitalen Infrastruktur verteilt"*). [109] Quantennetzwerke werden eine sichere Kommunikation durch verschränkungs-basierte QKD ermöglichen und eine Ende-zu-Ende-Sicherheit im Netz gewährleisten. Seine Anwendungen sind jedoch nicht auf die Kommunikationstechnologie beschränkt. Eine mögliche Anwendung des Quantennetzes ist das verteilte Quantencomputing. Verteiltes Rechnen ist eine Technik, die in klassischen Systemen weit verbreitet ist, um Informationen durch den Einsatz mehrerer Prozessoren, die über ein Netzwerk miteinander kommunizieren, effizient zu verarbeiten. Da erwartet wird, dass die Rechenleistung in der Quanteninformatik

exponentiell mit der Anzahl der genutzten Qubits steigt, birgt die Vernetzung von räumlich entfernten Qubits große Potenziale. [110]

Eine weitere faszinierende potenzielle Anwendung sind vernetzte Quantensensoren, mit denen die Präzision der Quantenmessung verbessert werden soll. Durch die Vernetzung von Atomuhren, die auf Verschränkung beruhen, könnte beispielsweise eine einzige internationale Zeitskala mit hoher Stabilität und Genauigkeit in Echtzeit erreicht werden (Uhrensynchronisation). [111]

3.3 Quantencomputing

Quantencomputing basiert auf den Konzepten der Quantenphysik. Ein Quantencomputer nutzt quantenmechanische Eigenschaften wie Verschränkung (*entanglement*) und Überlagerung (*superposition*). Dadurch bietet er enorme Rechenkapazitäten und kann potenziell bestimmte Berechnungen schneller durchführen als klassische Computer [112]. Diese potenzielle Überlegenheit von Quantencomputing gegenüber klassischem Computing kann sich insbesondere bei komplexen Rechenaufgaben zeigen. Zu den potenziellen Anwendungsgebieten des Quantencomputings zählen daher neben der Grundlagenforschung in den Natur- und Ingenieurwissenschaften (z. B. Physik, Materialforschung, Quanten-Chemie, Umweltforschung), Optimierungsprobleme (z. B. in der Logistik) oder Simulationen (z. B. in der Finanz- und Versicherungswirtschaft).

3.3.1 Begrifflichkeiten und Funktionsweise

Wie bei klassischen Computern wird auch bei Quantencomputern ein Mikroprozessor benötigt, um Rechenoperationen auszuführen. Die Quantum Processing Unit (QPU) besteht aus einer Anordnung von sogenannten **Quantenbits (Qubits)**. Während Bits in klassischen Computern mit 0 und 1 rechnen, können Qubits gewichtete Anteile der beiden Werte 0 und 1 gleichzeitig annehmen [113]. Dieser Überlagerungszustand wird als Superposition bezeichnet. Jedes weitere Qubit erhöht die Anzahl der gleichzeitig darstellbaren Zustände und damit die Fähigkeit Informationen parallel zu verarbeiten. Damit wächst der Vorteil Informationen zu verarbeiten gegenüber klassischen Computern exponentiell [113]. Qubits können auch miteinander verschränkt werden, was bedeutet, dass die Zustände der Qubits voneinander abhängig sind. Qubits können auf unterschiedlichen Plattformen realisiert werden (siehe nächster Abschnitt).

Eine beliebig große Sammlung von Qubits bezeichnet man als **Quantenregister** [114, 115]. Die Qubits können in verschiedenen Superpositionszuständen sein, was es dem Quantenregister ermöglicht, eine große Menge an Informationen gleichzeitig zu repräsentieren [116]. Quantenregister sind grundlegend für die Ausführung von Quantenalgorithm, da sie die Grundlage für die Verarbeitung von Informationen in einem Quantencomputer bilden [117]. Die Größe und Qualität des Quantenregisters haben einen direkten Einfluss auf die Leistungsfähigkeit des Quantencomputers und seine Fähigkeit, komplexe Berechnungen durchzuführen.

Quantengatter sind mathematische Operationen, die auf einer Reihe von verknüpften Qubits – den Quantenregistern – durchgeführt werden [117]. Dazu gehören Gatter wie das Hadamard-Gatter, das CNOT-Gatter und das Toffoli-Gatter [117]. Diese Gatter ermöglichen die Manipulation von Qubits und die Ausführung von Quantenalgorithm [115]. Quantengatter können verschiedene Transformationen wie Drehungen, Verschiebungen und Kontrolloperationen auf den Zustand von Qubits bzw. des Quantenregisters durchführen. **Gatter-Fidelität** bezeichnet

die Genauigkeit, mit der ein Quantengatter eine gewünschte Operation durchführt. Die **Kohärenzzeit** bezeichnet wie langlebig diese Quantenzustände – also die Information auf den Qubits – sind und diese Zeit sollte die Länge der Algorithmen übersteigen [117].

Quantenalgorithmen sind Abfolgen von Quantengattern [118]. Die Beispiele dafür sind der Shor-Algorithmus für die Faktorisierung großer Zahlen und der Grover-Algorithmus für die Suche in unsortierten Datenbanken. Verschiedene problemspezifische Algorithmen für fehlerkorrigiertes und fehlerbehaftetes Quantencomputing existieren, welche jeweils mit unterschiedlichen Stärken und Schwächen behaftet sind [118].

Da Quantencomputer anfällig für Fehler und Störungen sind, z. B. durch Störung der Quantenzustände (Quantenrauschen), Interaktionen der Qubits mit ihrer Umgebung (Dekohärenz) oder Fehler bei der Implementierung von Quantengattern und Operationen (Gatter-Fidelität) ist eine **Fehlerkorrektur** unerlässlich, um die Integrität der durchgeführten Berechnungen sicherzustellen. Dabei gibt es kohärente Fehler, welche zwar den Algorithmus verfälschen aber nicht den Quantenregister, und de-kohärente Fehler, welche einen Verlust an Informationen zur Folge haben [118]. Allerdings ist die Fehlerkorrektur bisher nur für kleine Fehler möglich und sehr ressourcenintensiv, da zusätzliche Qubits und Quantengatter gebraucht werden [118].

3.3.1.1 Hardwareplattformen

Qubits können auf Basis verschiedener physikalischer Systeme realisiert werden [119]. Grundsätzlich werden **atomistische Plattformen** und **Festkörper-Plattformen** unterschieden. Schematische Abbildungen zu den Plattformen befinden sich in **Error! Reference source not found.**

Atomistische Plattformen:

Ionenfallen nutzen die Quanteneigenschaften von geladenen Atomen (Ionen), um Qubits herzustellen. Die Ionenfalle ist eine Vorrichtung, um Ionen einzufangen und zu manipulieren. Die Ionen werden in elektromagnetischen Feldern fixiert, um die Ionen in einer bestimmten Position zu halten [113]. Mithilfe von radiofrequenz- oder laserbasierten Techniken werden die Ionen manipuliert [118]. Die Ionenfalle wird in einer Vakuumkammer betrieben, um die Wechselwirkung der Ionen mit Luftmolekülen und anderen Verunreinigungen zu minimieren [113]. Beim Quantencomputing kommen verschiedene Arten von Ionen zum Einsatz, um Qubits zu realisieren [117]. Einige der am häufigsten verwendeten Arten von Ionen im Bereich des Quantencomputings sind: Calciumionen (Ca⁺), Strontiumionen (Sr⁺), Berylliumionen (Be⁺) und Ytterbiumionen (Yb⁺).

Bei Plattformen basierend auf **Neutralatomen** werden freie Atome mittels eines Lasers und Magnetfeldes in einem Vakuum verlangsamt und deren quantenmechanisches Verhalten ausgenutzt. Die Atome können dann durch gezielte Laserimpulse kontrolliert und manipuliert werden. Die Interaktion zwischen den Atomen, die benötigt wird, um Quantenlogikoperationen durchzuführen, kann durch die kontrollierte Anregung von Wechselwirkungen zwischen den Atomen erreicht werden, z. B. durch zusätzliche Laser [120]. Quantencomputer, die auf **Rydberg-Atomen** basieren, nutzen die einzigartigen Eigenschaften dieser hochangeregten Zustände von Neutralatomen, um Qubits zu manipulieren und Quantenoperationen durchzuführen. Rydberg-Atome unterscheiden sich von anderen Neutralatomen durch ihre großen atomaren Radien und die damit verbundenen starken Wechselwirkungen zwischen den Atomen, welche zur Herstellung von Gattern verwendet werden [118]. Es kommen verschiedene Arten von Atomen zum Einsatz, darunter: Alkalimetalle wie Rubidium (Rb), Natrium (Na), Lithium (Li) und

Kalium (K), Erdalkalimetalle wie Calcium (Ca), Strontium (Sr) und Barium (Ba) und Seltene Erdmetalle wie Ytterbium (Yb), Neodym (Nd) und Lanthan (La).

Einzelne Photonen (Lichtteilchen) können ebenfalls als Qubits verwendet werden. Ausgangspunkt bilden Einzelphotonenquellen, da jedes Photon ein eigenständiges Qubit repräsentiert [121]. Die erzeugten **Photonen-Qubits** werden durch optische Komponenten wie polarisierende Strahlteiler und Phasenschieber manipuliert, um Superpositionszustände zu erzeugen. Die Zustände der Qubits werden schließlich durch hochempfindliche Detektoren gemessen.

Festkörper-Plattformen:

Bei den **supraleitenden Qubits** werden mikroskopisch kleine Schaltkreise verwendet, die aus Metallen oder Metalllegierungen bestehen, die bei sehr niedrigen Temperaturen supraleitend werden (elektrische Leitung ohne Widerstand) und spezielle Quantenzustände erzeugen und aufrechterhalten können. Zur Kühlung wird ein Kryostat aus Helium 3 (Abfallprodukt aus der Kernenergie) benötigt. Die Qubits werden durch sog. Josephson-Kontakte zwischen zwei Supraleitern realisiert, die es ermöglichen, den Quantenzustand des Qubits durch Magnetfelder oder Mikrowellenimpulse zu steuern [122–124]. Man unterscheidet bei den supraleitenden Qubits Flux-Qubits, 2D-Transmonen und 3D-Transmonen [113].

Bei **Stickstoff-Fehlstellen-Zentren** (NV-Zentren) werden einzelne Stickstoffatome in das Kristallgitter von synthetischen Diamanten eingebettet, wodurch Fehlstellen entstehen. Diese Stickstoff-Fehlstellen-Zentren können als Qubits dienen, da sie spezifische optische und elektronische Eigenschaften besitzen, die es erlauben, sie einzeln zu adressieren und zu manipulieren. Sie werden auch für Anwendungen in der Quantensensorik und Quantenkommunikation genutzt, da sie bei Raumtemperatur operieren können (siehe Kapitel 3.1 und 3.2) [125].

Quanten-Punkte sind nanoskalige Halbleiterstrukturen, in denen Elektronen auf sehr kleinen Raum eingeschlossen sind. Diese räumliche Einschränkung führt dazu, dass die Elektronen quantenmechanische Eigenschaften ähnlich denen von Atomen zeigen. In Quanten-Punkten können einzelne Elektronen als Qubits verwendet werden, indem man ihre Spin- oder Ladungszustände manipuliert. Die Kontrolle und das Auslesen dieser Zustände erfolgen über elektrische oder optische Signale [126, 127].

Topologische Qubits basieren auf der Nutzung von Materiezuständen, die topologische Eigenschaften aufweisen [128]. Die Quanteninformation ist in den topologischen Eigenschaften eines physikalischen Systems gespeichert und nicht in Ionen oder Atomen wie bei anderen Ansätzen. Es gibt beispielsweise topologische Qubits, die Quanteninformationen in den beiden Enden eines supraleitenden Nanodrahtes speichern (Microsoft). Werden deren Pfade in Raum-Zeit verknüpft (Braiding), können die Qubits manipuliert werden.

3.3.2 Stand der Technik

Quantencomputing wurden in den 80er Jahren als theoretisches Konstrukt in die Grundlagenforschung eingeführt. In den 90er Jahren erfolgte der Aufbau erster experimenteller Quantencomputer. Technologische Fortschritte und die F&E-Anstrengungen kommerzieller Anbieter wie IBM, Google und Rigetti Computing in den 2000er Jahren erlaubten die Entwicklung erster Quantencomputersysteme [129].

Das heutige Quantencomputing ist ein dynamisches Feld und entwickelt sich ständig weiter. Derzeit gibt es eine Vielzahl von Forschungsaktivitäten in Wissenschaft und Wirtschaft, um die Grundlagen der Quantenmechanik zu erforschen, Quantencomputer weiterzuentwickeln und

Anwendungen mit "Quantenüberlegenheit" – die Fähigkeit Berechnungen exakter und schneller als klassische Computer durchzuführen – zu demonstrieren [130]. 2019 konnte Google erstmalig Quantenüberlegenheit mit einem 53-Qubits Transmonen-Qubit Prozessor (supraleitende Qubits) namens Sycamore demonstrieren [130]. Allerdings handelte es sich um keine reale Anwendung, sondern um eine Demonstration der gesteigerten Rechenleistung eines Quantenprozessors gegenüber eines klassischen High-Performance Computer unter speziellen Bedingungen.

In den letzten Jahren wurden bedeutende Fortschritte bei der Entwicklung von Quantencomputern erzielt, insbesondere in der Hardwareentwicklung [118]. Dennoch sind aktuelle Quantencomputer – sogenannte Noisy Intermediate-Scale Quantum (NISQ)-Maschinen – nur in der Lage eine begrenzte Anzahl von Qubits zu realisieren und zu kontrollieren [131]. NISQ-Maschinen sind zum jetzigen Zeitpunkt in der Lage mit etwa 50-150 Qubits zu arbeiten, weisen eine gewisse Fehleranfälligkeit aufgrund von Rauschen und anderen Störungen auf und können keine komplett fehlerkorrigierte Quantenoperationen durchführen [113, 119]. Diese Maschinen werden hauptsächlich für experimentelle und prototypische Arbeiten vor allem in der Wissenschaft aber auch in Militär, Sicherheitsbehörden und teilweise in der Wirtschaft verwendet, um neue Algorithmen und Anwendungen im Bereich des Quantencomputings zu erforschen. NISQ-Maschinen werden auch als Zwischenstufe betrachtet, da sie eine Brücke zwischen den aktuellen begrenzten Ressourcen von Quantencomputern und der Vision von universell einsetzbaren fehlerkorrigierten Quantencomputern darstellen [119, 131]. Während der Entwicklung von fehlerkorrigierten Quantencomputern werden NISQ-Maschinen weiterhin für Forschungszwecke genutzt und dienen als Testumgebung für neue Ideen und Konzepte im Quantencomputing. Einen Ansatz bieten die Integration von QPU in High-Performance-Computing als Hardwarebeschleuniger.

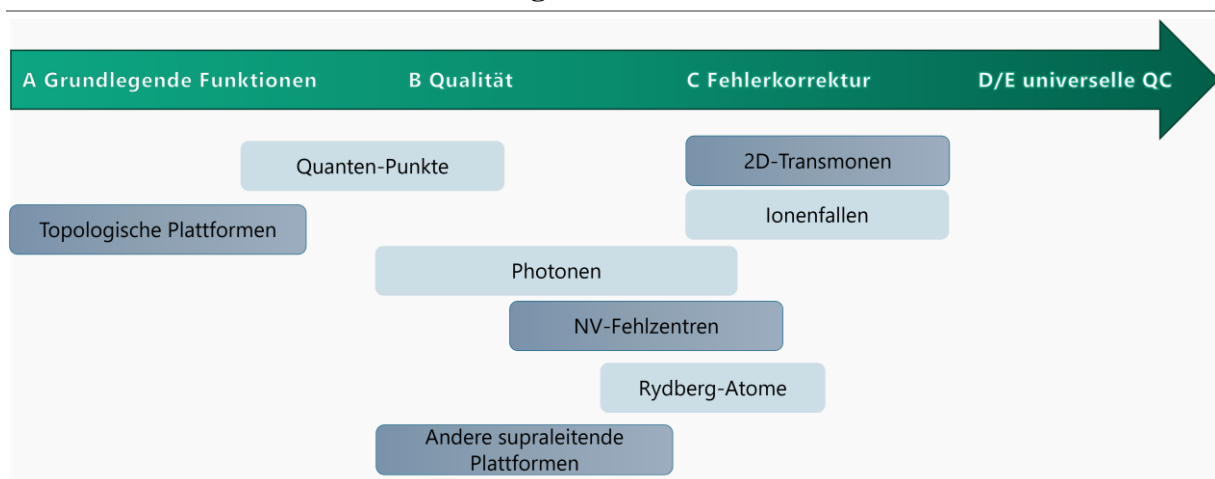
Für voll funktionsfähige und kommerziell nutzbare Quantencomputer geht man davon aus, dass eine 5 bis 6-stellige Anzahl von Qubits benötigt wird, da u.a. für die Fehlerkorrektur – eine zentrale Herausforderung und Maß für den Entwicklungsstand im Quantencomputing – weitere Qubits als Ressourcen benötigt werden. Für die Entschlüsselung des RSA-2048 Codes benötigt man beispielsweise etwa 2 Millionen Qubits [113]. 2024 meldet IBM die Erscheinung des Ersten NISQ 1000-qubit Quantenprozessor namens Condor [132], wobei auch hier weiterhin die Fehlerkorrektur eine Herausforderung darstellt. Die Skalierung bestehender technologischer Plattformen, um eine 5 bis 6-stellige Anzahl von Qubits zu initialisieren, zu kontrollieren, für ausreichend lange Zeit stabil zu halten (Kohärenzzeit), um Rechenoperationen durchführen zu können und die Fehlerkorrektur auszuführen, bleiben daher zentrale Forschungsgebiete [113, 118].

Auf der algorithmischen Seite wurden bedeutende Fortschritte bei der Entwicklung quantenmechanischer Algorithmen erzielt, die Vorteile gegenüber klassischen Algorithmen bieten. So konnten Quantenalgorithmen für Anwendungen wie Faktorisierung, Simulation, Optimierung und maschinelles Lernen entwickelt werden [118]. Allerdings werden diese Anwendungen bisher ebenso größtenteils experimentell auf anwendungsspezifischen Quantencomputern demonstriert und sind häufig noch nicht ausreichend robust gegenüber Fehlern. Die Entwicklung von weiteren und verbesserten Algorithmen für relevante Problemstellungen ist daher notwendig. Standardisierte Verfahren, Plattformen und Schnittstellen gibt es noch nicht [131].

3.3.2.1 Hardwareplattformen

Betrachtet man den derzeitigen Stand der verschiedenen Hardwareplattformen, unterscheiden sich diese in ihren Entwicklungsstadien (vgl. Abbildung 4). Topologische Qubits sind am wenigsten entwickelt, da mit diesen Plattformen nur die grundlegenden Funktionen des Quantencomputings, wie die Initialisierung von zwei Qubits, eine Gatteroperation und das Auslesen des Ergebnisses, demonstriert werden konnten. Ionenfallen und einige Supraleiter (2D-Transmonen) sind am weitesten fortgeschritten in ihrer Entwicklung, da sie Fehlerkorrekturen ermöglichen und die Fehlerquoten im Allgemeinen klein genug sind. Daher können mit diesen Plattformen derzeit am ehesten Anwendungen mit einem Quantenvorteil demonstriert werden.

Abbildung 4: Entwicklungsstufen der Hardwareplattformen. Stufe A umfasst die Demonstration grundlegender Funktionalitäten wie Initialisierung zwei Qubits und einer Gatteroperation. In Stufe B ist das Messen der Fehlerquote gelungen. In Stufe C können erste Fehlerkorrekturen durchgeführt werden. Stufe D beschreibt die Demonstration vollständig fehlerkorrigierten und universellen Quantenoperationen und Stufe E die Entwicklung komplexer Algorithmen für die universellen Quantencomputer. Derzeit gibt es noch keine technologische Plattform in der Stufe D oder E. Festkörper-Plattformen sind in dunkelblau und atomistische Plattformen in hellblau dargestellt.



Quelle: eigene Illustration angelehnt an Wilhelm et al. 2023 [113]

Grundlegend bereiten atomistische Plattformen v. a. Herausforderungen hinsichtlich der Kontrolle der Qubits. Hingegen ist bei Festkörper-Plattformen die Herstellung der Qubits häufig technisch aufwendiger. Es lassen sich für die wesentlichen Plattformen, jedoch im Detail sehr spezifische Vor- und Nachteile erkennen. In Tabelle 7 sind die plattformspezifischen Entwicklungen und die wesentlichen Vor- und Nachteile dargestellt.

Tabelle 7: Vor- und Nachteile der verschiedenen Hardwareplattformen

Hardwareplattform		Stand der Technologie	Vorteile	Nachteile
Atomische Plattformen	Ionenfallen	Fehlerkorrektur möglich	Relative kleine Fehlerquoten, hohe Kohärenzzeit, präzise Kontrolle der Qubits	Steuerung, Kontrolle und Messung großer Qubit-Anzahl ist herausfordernd (Skalierbarkeit!), Gatterzeiten relativ lang
	Neutralatomfallen	einfache Fehlerkorrekturen gelungen	Erhöhung der Qubit-Anzahl einfach, kleine Fehlerquoten, zuletzt große Fortschritte	Kontrolle und Fixierung Qubits schwierig, Qualität der Gatteroperationen ist stark abhängig von Lasertechnik
	Photonen	Messen der Fehlerrate möglich	Hohe Geschwindigkeiten der Informationsübertragung, robust gegen Dekohärenz	Manipulation der Qubits (deterministische Quantengatter) sind schwierig zu implementieren
Festkörper-Plattformen	Supraleitende Schaltkreise	Fehlerkorrektur möglich	Relative kleine Fehlerquoten, gute Kontrolle der Qubits	langsame Fortschritte bei Kohärenzzeit, niedrige Temperaturen erforderlich, viel Overhead für Ansteuerung (Verkabelung), abhängig von Abfallprodukt der Kernenergie (Helium3), Gatterfehler behindern Genauigkeit und damit Upscaling
	NV-Fehlstellen	grundlegende Fehlerkorrekturprotokolle demonstriert	Lange Kohärenzzeit, stabil und robust gegenüber Störungen, einfach optische Manipulation, kompakt und in mobilen Geräten einsetzbar, geringer Leistungs- und Ressourcenverbrauch	große Register (Qubit-Anzahl) schwierig und damit auch Fehlerkorrektur, Methoden der Manipulation Qubits und Auslese noch nicht verifiziert, Miniaturisierung der Elektronik noch herausfordernd
	Quanten-Punkte	grundlegende Funktionen demonstriert	gute Kontrolle der Elektronenzustände, Betrieb bei Raumtemperatur, lange Lebenszeit der Qubits, vgl.s.w lange Kohärenzzeit	Anfällig für Umwelteinflüsse (Dekohärenz), Interkonnektivität herausfordernd, Skalierbarkeit muss noch gezeigt werden, komplexe Fertigungsprozesse, hohe Fehlerraten
	Topologische Qubits	grundlegende Funktionen demonstriert	Robustheit gegenüber Dekohärenz, lange Kohärenzzeiten, inhärenten Fehlertoleranz	Komplexe Implementierung (Erzeugung und Manipulation topologischer Zustände), Skalierbarkeit unbewiesen

3.3.3 Chancen, Risiken und Herausforderungen

Quantencomputing bietet eine Reihe von potenziellen Vorteilen gegenüber klassischem Computing, durch die Fähigkeit komplexe mathematische Probleme zu lösen, die im klassischen Computing lange Laufzeiten benötigen oder sogar scheitern (vgl. Abschnitt 493.3.1) [129, 131]. Beispiele hierfür sind die Faktorisierung großer Zahlen, die Simulation komplexer physikalischer Systeme oder die kombinatorische Optimierung von Prozessen, die teilweise aktuell nur durch Näherungsverfahren lösbar sind [118, 133]. Werden bestimmte Aufgaben exakter oder schneller durchgeführt als im klassischen Computing spricht man von Quantenvorteil oder Quantenüberlegenheit. Dies eröffnet neue Möglichkeiten in Bereichen wie Kryptographie, maschinellem Lernen, chemischer Forschung und Optimierung [134]. Zudem können Quantencomputer komplexe physikalische Systeme simulieren, wie z. B. chemische Reaktionen oder das Verhalten von Materialien. Dies ermöglicht tiefere Einblicke und eine bessere Vorhersage solcher Systeme, was in vielen wissenschaftlichen Disziplinen und praktischen Anwendungen von großem Nutzen sein kann. Gelingt es Unternehmen die Technologie erfolgreich zu nutzen und kommerziell nutzbare Anwendungen zu entwickeln, können durch Quantencomputing Wettbewerbsvorteile erlangt werden und innovative Lösungen in verschiedenen Branchen angeboten werden [118, 131]. Auch im gesellschaftlichen Bereich eröffnen sich durch Quantencomputer vielfältige Chancen, indem diese die Entwicklung neuer Medikamente und Therapien ermöglichen, was zu erheblichen Fortschritten z. B. in der (personalisierten) Krebsforschung führen kann [135–137]. Durch die schnelle Verarbeitung großer Datenmengen, Optimierung von Prozessen können Kosten und Ressourcen beispielweise in der Logistik oder bei der Kraftwerkseinsatzplanung reduziert werden [138]. Quantencomputer ermöglichen zudem eine sichere Kommunikations- und Verschlüsselungstechnologie [113].

Jedoch ist die Entwicklung von fehlerkorrigierten Quantencomputern, die zuverlässige und universelle Rechenleistung bieten, immer noch ein aktives Forschungsgebiet (vgl. Abschnitt 3.3.2) und man steht im Feld des Quantencomputings nicht nur vor erheblichen technischen, aber auch wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen.

Zu den wesentlichen technischen Herausforderungen zählen:

1. Fehlerkorrektur: Die Entwicklung effektiver Fehlerkorrekturmechanismen, die Fehler minimieren und korrigieren können, ist eine große Herausforderung und ressourcenintensiv (erfordert zusätzliche Qubits) [139, 140].
2. Umweltstörungen und Kohärenzzeit: Quantencomputer sind empfindlich gegenüber Umweltstörungen wie Temperaturschwankungen, elektromagnetischer Strahlung und magnetischen Feldern. Die Entwicklung von Technologien zur Isolierung und Abschirmung der Qubits vor diesen Störungen zur Verlängerung der Kohärenzzeit, ist eine Herausforderung. Quantencomputer sind anfällig für Fehler und Störungen, die ihre Kohärenz, also die Stabilität der Qubits, beeinträchtigen können [141, 142].
3. Skalierbarkeit: Die Skalierung von Quantencomputern, also die Erhöhung der Anzahl von Qubits und die Durchführung komplexer Berechnungen, ist eine Herausforderung. Die Integration einer großen Anzahl von Qubits und die Verringerung von Interferenzen und Fehlerquellen sind technische Hürden [140].

4. **Input-Output Problem:** Das Messen der Quanteninformation ohne Zerstörung der Quanteninformation stellt aufgrund der Quantenverschränkung (entanglement) ein Problem dar. Spezielle Algorithmen und Auslesemethoden befinden sich in der Entwicklung [143].
5. **Kontrolle und Manipulation der Qubits:** Die präzise Kontrolle und Manipulation von Qubits ist eine technische Herausforderung. Die Entwicklung von Quantengattern und anderen Quantenoperationen erfordert fortschrittliche Technologien und präzise Steuerungsmethoden [140].
6. **Hardware- und Fertigungskomplexität:** Die Herstellung von Quantencomputern erfordert komplexe Fertigungsprozesse und hochentwickelte Technologien. Die Integration verschiedener Komponenten und die Bewältigung von Herausforderungen in der Halbleiter- und Nanotechnologie sind wichtige Aspekte der Entwicklung.
7. **Algorithmische Entwicklung:** Die Entwicklung von Quantenalgorithmen, die das volle Potenzial von Quantencomputern ausschöpfen können, ist eine Herausforderung. Auch die Entwicklung fehlerkorrigierter Algorithmen und hybriden Algorithmen für Hybridsysteme in Rechenzentren befindet sich noch in der Entwicklung [139, 140].

Gesellschaftliche Herausforderungen:

1. **Sicherheit und Ethik:** Quantencomputer bieten neue Möglichkeiten große Datenmengen zu analysieren und zu verarbeiten. Dies wirft Fragen hinsichtlich des Schutzes der Privatsphäre und des ethischen Umgangs mit sensiblen Informationen auf. Zudem haben Quantencomputer das Potenzial bestehende Verschlüsselungsprotokolle z. B. RSA-Standard zu gefährden [131, 144]. Dies hat weitreichende Auswirkungen auf die Sicherheit der aktuellen Informations- und Kommunikationsinfrastruktur.
2. **Zugänglichkeit und Chancengleichheit:** Quantencomputer sind derzeit noch in einem experimentellen Stadium und erfordern umfangreiche Ressourcen und Fachkenntnisse. Die Schaffung eines breiteren Zugangs zu Quantencomputern und deren Anwendungen ist eine Herausforderung, um sicherzustellen, dass auch Länder des globalen Südens gleichermaßen von den Vorteilen dieser Technologie profitieren können oder sich gleichermaßen gegen Hackerangriffe von Quantencomputern schützen können, damit sich bestehende Ungleichheiten nicht weiter verstärken [144–146].
3. **Umweltauswirkungen:** Quantencomputer erfordern spezielle Infrastrukturen, Kühlung und Materialien, die einen erhöhten Energieverbrauch verursachen können und der effizienten Nutzung und CO₂ Reduktion durch den Einsatz von Quantencomputern entgegensteht [147].

Wirtschaftliche Herausforderungen:

1. **Kosten:** Die Entwicklung und der Betrieb von Quantencomputern ist mit hohen Kosten verbunden (u.a. durch Notwendigkeit spezielle Kühlung und Umgebungsbedingungen) und erfordern erhebliche Investitionen in Forschung, Entwicklung und Infrastruktur [131]. Auch die Implementierung von Fehlerkorrekturmechanismen erfordert zusätzliche Ressourcen und erhöht den Aufwand und die Kosten.
2. **Kommerzielle Anwendungen:** Viele vielversprechende Anwendungen für Quantencomputing befinden sich noch in einem experimentellen Stadium bzw. Zwischenstadium (NISQ-

Maschinen). Die Identifizierung und Entwicklung von kommerziell rentablen Anwendungen im Quantencomputing stellen zentrale Herausforderungen dar, da viele der aktuellen Anwendungen noch spezialisiert und nicht standardisiert sind, und eher mittel- bis langfristig erwartet werden [131, 148]. Für die Industrie wird sich ein Wechsel auf Quantencomputing allerdings erst lohnen, wenn ein Quantenvorteil für reale Probleme erzielt werden kann und entsprechend die technischen Herausforderungen gelöst wurden. Dies wiederum erfordert erhebliche Investitionen.

3. **Marktkonzentration und Abhängigkeiten:** Quantencomputing ist ein aufstrebendes und dynamisches Feld, das von mehreren Unternehmen und Forschungseinrichtungen vorangetrieben wird. Der Wettbewerb um Talente, Ressourcen und geistiges Eigentum ist intensiv. Diese Ressourcen sind nicht für alle wirtschaftlichen Akteure gleichermaßen verfügbar und daher besteht das Risiko von Marktkonzentration und einer Abhängigkeit von einzelnen großen Unternehmen, welche die technologische Souveränität anderer untergraben könnten [144, 145].
4. **Kritische Materialien und Komponenten:** Für die meisten Hardwareplattformen werden spezielle Komponenten und Materialien benötigt wie beispielsweise Helium 3 – ein knapper, fossiler Rohstoff, der zur Kühlung im Kontext supraleitende Plattformen gebraucht wird – oder Spezialanfertigungen (z. B. Diamanten für NV-Fehlzentren, Lasertechnik und Lichtdetektoren für photonische Qubits). Diese Komponenten können (ungewollte) geopolitische Abhängigkeiten schaffen, von Handelsbeschränkungen betroffen sein (Dual-Use) oder nur durch wenige Hersteller angeboten werden [149, 150].
5. **Co-Design von Quanten Hard- und Software:** Ist erforderlich um Technologie zur Marktreife zu bringen, aber muss Hardwarebauer:innen, Algorithmiker:innen und Anwender:innen zusammenbringen [118]. Problematisch ist diesbezüglich, dass das Anwendungspotenzial bisher nur theoretisch gezeigt wurde. Die einsatzbereite Hardware existiert noch nicht und entsprechen können die Algorithmen nicht angepasst werden (und andersherum). Dies erfordert weitere Investitionen in Grundlagen- als auch anwendungsbezogene Forschung, welche allerdings durch das noch nicht gehobene Potenzial keine Investitionen aus der Anwenderindustrie erwarten lässt.

3.3.4 Abschätzung des Innovationspotenzials von Quantencomputing

Quantencomputing wird als disruptive Technologie angesehen, die das Potenzial hat, zahlreiche Branchen zu transformieren, allerdings mit einem sehr langen Entwicklungshorizont [131]. Expert:innen prognostizieren, dass Quantencomputing mittel- bis langfristig Milliardenbeträge generieren könnte, vor allem durch die Überlegenheit bei komplexen Rechenaufgaben wie Simulationen, Optimierung und Kryptographie [131, 148]. Dieses hohe disruptive Innovationspotenzial steht allerdings allerhand technischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Herausforderungen gegenüber (vgl. Abschnitt 3.3.3). Als Zeithorizont für vollfunktionsfähige und fehlerkorrigierte Quantencomputer werden hier daher eher 20-30 Jahre angenommen, d.h. die Technologie- und Marktentwicklung ist nicht nur mit Risiken verbunden, sondern benötigt auch einen langen Atem und umfassende Investitionen [131].

Trotz der Tatsache, dass supraleitende Qubits und Ionenfallen-Qubits derzeit führende Hardwareplattformen darstellen, ist schwierig, zukünftige Entwicklungen für die verschiedenen Plattformen abzuleiten, da Durchbrüche, insbesondere bei topologischen Qubits und Quantenpunkte, enorme Fortschritte in der Anwendbarkeit dieser Technologien ermöglichen würden

[113, 118, 130]. Schwierig bleibt auch zu beantworten, ob sich zukünftig eine Plattform durchsetzen wird und ob Plattformen anwendungsspezifisch eingesetzt werden [131]. So bieten Quantencomputer auf Basis von NV-Fehlzentren beispielsweise derzeit die einzige Hardwareplattform, welche auch mobil zum Einsatz kommen kann, hingegen Quantencomputer mit supraleitenden Qubits technisch fortgeschrittener sind und Einsatz in Rechenzentren finden. Darüber hinaus benötigen die verschiedenen Hardwareplattformen unterschiedliche *enabling technologies* wie Helium-3 Misch Kryostate oder spezielle Lasertechnik (vgl. Abschnitt 3.3.2.1), diese können Probleme mit Verfügbarkeit implizieren (vgl. Abschnitt 3.3.3). Gleichzeitig profitieren die verschiedenen Plattformen von unterschiedlichen Ökosystemen: Entwicklungen bei den photonischen Plattformen können positiv durch das große Photonik-Ökosystem in Deutschland beeinflusst werden, ebenso profitieren Festkörper-Plattformen von der Halbleiterindustrie. Es ist zudem nicht gesichert, dass Quantenüberlegenheit für reale Probleme außerhalb der Quantencommunity erreicht werden kann oder unter welchen Bedingungen [130]. Derzeitige Quantencomputer und NISQ-Algorithmen sind noch weit entfernt von industriellen Anwendungen [130]. Trotz des hohen Innovationspotenzials sollten daher realistische Erwartungen gesetzt werden, um die nachhaltige Entwicklung und Förderung von Quantencomputing sicherzustellen.

Am ehesten sind derzeit industrielle Anwendungen im Bereich der **Simulation** molekulare Zustände, chemischer Wechselwirkungen und anderer komplexer Systeme erwartbar [118, 148]. Hier kann die Technologie für diverse Industriesektoren relevant sein, insbesondere in der Chemie und Materialproduktion und in der Pharmazie. Simulation neuartiger chemischer Verbindungen, z. B. für die Automobilindustrie, Batterieherstellung oder die Verbesserung in der Düngemittelherstellung, umfassen mögliche Anwendungen. Beispielsweise geraten klassische Ansätze der computergestützten Chemie, welche u.a. zur Herstellung sicherer, leichter und kosteneffizienter Batterien verwendet werden, aktuell an ihre Grenzen. In diesem Kontext haben Volkswagen und das kanadische Quantentechnologie Unternehmen Xanadu ein mehrjähriges Forschungsprogramm initiiert, welches das Ziel hat, verbesserte Quantenalgorithmen zur Simulation von Batteriematerialien zu entwickeln [151]. Ebenso erforscht das US-amerikanische Unternehmen PSIQuantum in Kooperation mit Mercedes Benz wie bestehende Ideen für Quantenalgorithmen zur Verbesserung im Batteriedesign in zukünftige fehlertolerante photonische Quantencomputer implementiert und für diese optimiert werden können [152].

Weiterhin kann Quantencomputing Schlüsseltechnologien wie **Künstlicher Intelligenz** und **Maschinellem Lernen** beim Verarbeiten großer und unstrukturierter Daten, z. B. beim autonomen Fahren oder beim Detektieren von Mustern in Genomdaten, weiteren Vorschub verleihen [131]. Quantencomputer haben auch das Potenzial, in Bereichen wie Logistik, Luftfahrt, Verkehr, industrielle Fertigung, sowie Finanz- und Versicherungswirtschaft Verbesserungen z. B. hinsichtlich von Kosten und Emissionen zu erzielen. Sie können beispielsweise zur **Optimierung** von Routenplanungen, Kraftwerkseinsatzplanung zur effizienteren Gestaltung von Lieferketten oder zur Verbesserung von Risikomodellen für Investitionsstrategien in der Finanzwirtschaft eingesetzt werden [118]. Diese Anwendungen haben eine sehr hohe praktische Relevanz, lassen sich gemäß Expert:innen-Einschätzung allerdings eher mittelfristig realisieren. Erste Proof-Of-Concepts hin zu effizienteren Lieferketten zeigte BMW in Kooperation mit Honeywell und Entropica Labs auf einem Quantencomputer basierend auf Ionenfallen [153]. Lieferketten in der Automobilindustrie sind hoch komplex und deren optimale Konfiguration ist daher sehr datenintensiv. Das Projekt zeigte, dass der Quantencomputer von Honeywell und die Algorithmen von Entropica Labs vergleichbare Ergebnisse wie der klassische Computer

lieferten [154]. Damit liegt auch hier ein möglicher Quantenvorteil für echte Lieferkettenprobleme noch in der Zukunft. Als Anwendungen in weiter entfernter Zukunft ist der Einsatz von Quantencomputing in der **Kryptoanalyse** denkbar [113].

Unter den Quantentechnologie wird dem Quantencomputing das theoretisch größte Marktpotenzial zugesprochen (acatech). Dessen Realisierung bedarf allerdings noch einer Vielzahl von entscheidenden Entwicklungen hin zur Marktreife:

Ein zentraler Punkt ist die Weiterentwicklung der Quanten-Hardware. Es ist erforderlich, die Anzahl der (kontrollierbaren) Qubits zu erhöhen und deren Fehlertoleranz zu verbessern (vgl. Abschnitt 3.3.3), um komplexere Berechnungen durchführen zu können. Grundlagenforschung bleibt damit ein unverzichtbarer Bestandteil des Fortschritts. Große Investitionen, besonders im Bereich der Hardware, sind ebenso entscheidend und erfordern viel Risikokapital [131]. Zudem bedarf es einer kontinuierlichen Weiterentwicklung spezifischer Algorithmen für Simulations- und Optimierungsaufgaben, welche im Zusammenspiel mit der Entwicklung und Anpassung der Quanten-Hardware an ebendiese Aufgaben erfolgen muss [131]. Dies erfordert eine enge Zusammenarbeit zwischen Anwender:innen, Algorithmiker:innen und Hardwareentwickler:innen, welche die Entwicklung von Prototypen vorantreibt und die Technologie praxisnah demonstriert [118].

Expert:innen sehen Quantencomputer zunächst vor allem in Hybridsystemen mit klassischen Computern, in denen ihre Rechenleistung nur bei spezifischen Problemstellungen zum Einsatz kommt. Das bedeutet, dass es hybride Algorithmen braucht, die die Stärken klassischer und quantenbasierter Methoden kombinieren und so eine effizientere Datenverarbeitung ermöglichen. Gleichzeitig ist es notwendig, Schnittstellen zu optimieren, um den Datenaustausch zwischen klassischen und Quantencomputern zu beschleunigen und zu verbessern [155]. Expert:innen gehen davon aus, dass die Hardwareproduktion mittelfristig ein Nischenmarkt bleibt, während sich der größere Teil der Wertschöpfung aus Software und Dienstleistungen speisen wird [118, 131]. Derzeit versuchen daher vor allem die große Technologiefirmen, die gesamte Bandbreite (von Hardware über Software bis zum Betrieb von Cloud-Zugängen) abzudecken, während sich Start-ups oft auf spezielle Glieder der Wertschöpfungskette oder auf Spezialanwendungen konzentrieren. Einige Hersteller bieten Quantencomputer in exklusiven Partnerschaften an, bei denen die erzielten Ergebnisse eigens genutzt werden können. Gleichzeitig bieten sie Quantencomputer als Open-Source Dienste an (z. B. IBM). So entstehen Netzwerke von Anwendern, die den Herstellern bei der Weiterentwicklung der Quantencomputer, der Systemumgebung sowie der Software und Anwendungen unterstützen und somit zum Aufbau des Ökosystems beitragen [130, 131].

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Realisierung des Potenzials von Quantencomputing eine umfassende Zusammenarbeit zwischen Forschern, Entwicklern, Herstellern, Anwendern und Investoren erfordert. Große Investitionen, ein langfristiges Engagement von privater und öffentlicher Seite, fortlaufende Forschung und Entwicklung sowie die Schaffung von Standards und Normen, um die Produktion zu skalieren und die Kosten zu senken, sind entscheidende Schritte auf dem Weg zur kommerziellen Anwendung von Quantencomputern.

4 Fachlos 2: Forschungs-, Innovations- und Diffusionsaktivitäten im internationalen Vergleich

4.1 Publikationsaktivitäten

Im Vergleich zur Gesamtzahl aller akademischen Publikationen ist der Anteil derer, die sich mit für Quantentechnologien relevanten Themen beschäftigen, noch immer vergleichsweise gering, auch wenn er in den vergangenen zehn Jahren kontinuierlich anstieg. Auch in Summe aller drei Technologiefelder überstieg er allerdings in keinem der hier untersuchten Länder wesentlich 0,5 Prozent.

Das absolut bedeutsamste Technologiefeld ist dabei das Technologiefeld Quantencomputing, hier wurden in den letzten erfassbaren Jahren (2021, 2022) weltweit zwischen 4000-5000 Publikationen verzeichnet, bei einer jährlichen Wachstumsrate von ca. 15 Prozent. In den Technologiefeldern Quantensensorik / -metrologie bzw. Quantenkommunikation wurden hingegen jeweils nur ca. 1100-1200 Publikationen verzeichnet bei mittleren jährlichen Wachstumsraten von knapp über bzw. knapp unter 10 Prozent (Abbildung 5).

Wie in allen anderen Bereichen des akademischen Publikationsgeschehens, nimmt auch im Bereich der für Quantentechnologien relevanten Arbeiten der Anteil Europas bzw. der USA tendenziell ab, während jener Chinas zunimmt (Abbildung 6, Abbildung 7, Abbildung 8). Allerdings finden sich zwischen den Technologiefeldern erhebliche Unterschiede. Im Technologiefeld Quantencomputing liegen alle drei zentralen Akteure (EU27, USA und China) mit jeweils etwas über 30 Prozent aller weltweiten Publikationen in etwa gleichauf. Im Technologiefeld Quantensensorik / -metrologie hingegen erreicht China über 40 Prozent, gefolgt von Europa mit knapp über 30 Prozent. Die USA haben ihre einstmalige führende Position schon seit mehr als einem Jahrzehnt eingebüßt und erreichen nur etwas mehr als 20 Prozent. Im Technologiefeld Quantenkommunikation schließlich führen chinesische Akteure das Feld am eindeutigsten an und erreichen zusammen einen Weltanteil von mehr als 50 Prozent, die EU27 folgt mit weniger als 30 Prozent, die USA erreichen nur noch in etwa 15 Prozent. Auch hier zeichnet sich eine entsprechende Schwerpunktverschiebung bereits seit Mitte der 2000er Jahre ab, also lange bevor das Feld an Dynamik gewann. Zusammenfassend festhalten lässt sich also, dass zwar im quantitativ bedeutendsten Technologiefeld des Quantencomputings nach wie vor alle global zentralen Akteure gleichauf liegen, in den beiden anderen Technologiefeldern jedoch China bereits in führender Position gestartet ist, und diese auch nicht mehr aufgegeben hat.

Qualifizierend einzuwenden ist in diesem Zusammenhang, dass chinesische Publikationen auch in den beiden letztgenannten Technologiefeldern nur in etwa die Hälfte der für amerikanische bzw. europäische Artikel üblichen Zitationen erhalten (Abbildung 9). Vor dem Hintergrund der Selbstreferenzialität des chinesischen Systems, in dem intensive nationale Zitierungen an der Tagesordnung sind, [156] eröffnet dies Fragen zu Qualitätsunterschieden, da unter Umständen nicht einmal alle hier dokumentierten Zitationen als echte Rezeption gewertet werden können. In jedem Fall ist zu konstatieren, dass chinesische Beiträge noch nicht in gleichem Umfang global rezipiert werden wie andere. Tendenziell stark rezipiert werden hingegen themenübergreifend Arbeiten aus Schweden und Dänemark, im Technologiefeld Quantencomputing auch jene aus der Schweiz.

Deutschland nimmt in allen drei Technologiefeldern eine starke Stellung ein und trägt 11 Prozent, 11 Prozent bzw. 8 Prozent aller weltweiten wissenschaftlichen Arbeiten bei (ca. 550, 150 bzw. 100 Publikationen im Jahre 2022, Abbildung 6, Abbildung 7, Abbildung 8). Hiermit liegt es auf Augenhöhe mit dem im akademischen Bereich sonst oft deutlich stärkeren Großbritannien, sowie vor Japan, Korea und allen anderen europäischen Mitgliedsstaaten, die maximal Beiträge im mittleren einstelligen Prozentbereich leisten.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass Deutschland im sich dynamisch entwickelnden Bereich der Quantentechnologien eine seiner wirtschaftlich-technologischen Größe entsprechende Position einnimmt und hält. Neben dem Vereinigten Königreich ist es im Bereich Quantenforschung der zentrale Akteur im europäischen Rahmen.

Unter den zentralen Akteuren spielen international vor allem chinesische Forschungseinrichtungen eine wichtige Rolle, darunter die University of S&T of China, die Graduate University of CAS (UCAS) und die Tsinghua University. Im Technologiefeld Quantenkommunikation finden sich – erwartungsgemäß – ergänzend Akteure mit einem (zumindest nominellen) Schwerpunkt in den Bereichen Telekommunikation (Beijing University of Post & Telecom, Nanjing University of Post & Telecom), Verkehrswesen (Shanghai Jiaotong) und Verteidigung (Nat. Univ. of Defense Technology). Deutlich erkennbar wird hier der im Technologiefeld Quantenkommunikation am klarsten ausgeprägte Dual Use Charakter der Quantenforschung (vgl. Tabelle 8).

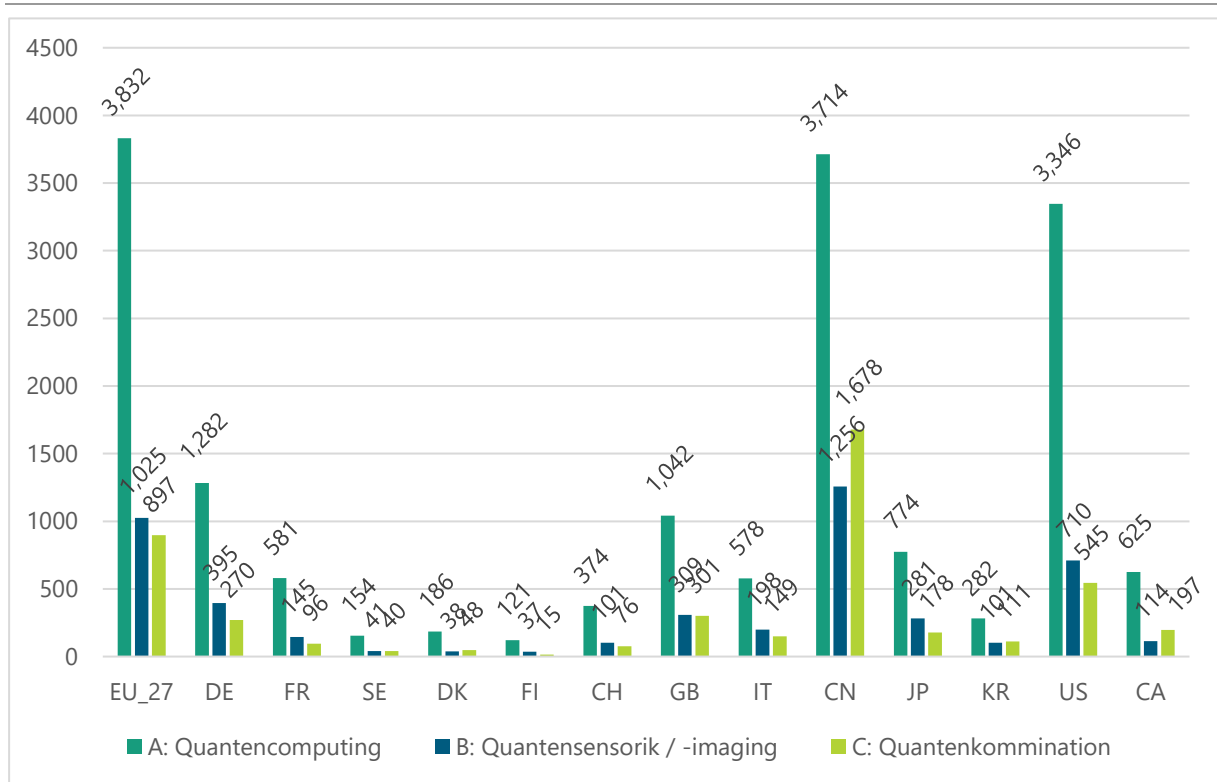
Im Technologiefeld Quantenkommunikation ist die nationale Diversität der Akteure unter den Top-14 am größten, neben amerikanischen und britischen Akteuren finden sich hier auch Organisationen aus der Schweiz und Japan. Im Technologiefeld Quantensensorik und -metrologie findet sich ein ähnliches Bild. Wichtige 'westliche' Akteure sind auch in diesem Fall das MIT, die NIST und die Universität Oxford sowie aus Japan die Tokyo University. Mit der University of Waterloo, der ETH Zürich sowie der Universität Genf nehmen auch kanadische und schweizer Akteure zentrale Rollen ein. Im Technologiefeld Quantenkommunikation ist bemerkenswert, dass mit der japanischen NTT Corporation ein Unternehmen unter die Top-14 fällt.

Mit dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik findet sich im Technologiefeld Quantencomputing der erste deutsche Akteur auf dem 17., im Technologiefeld Quantenkommunikation sogar erst auf dem 18. Platz. Im Technologiefeld Quantensensorik liegt die Universität Ulm dagegen auf dem achten Platz unter den globalen Top-10, die Physikalisch-Technische Bundesanstalt folgt auf dem 16. Platz (vgl. Tabelle 9). Weitere wesentliche Akteure in der deutschen Forschungslandschaft sind die Ludwig-Maximilians-Universität München, die Universität Erlangen-Nürnberg, die Universität Stuttgart, das Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, Forschungszentrum Jülich, die RWTH Aachen sowie die Leibniz Universität Hannover.

Ihre Kooperationspartner fanden diese deutschen Akteure zwischen 2000 und 2022 im Technologiefeld Quantencomputing vor allem in Österreich, gefolgt von den Vereinigten Staaten sowie, mit etwas Abstand, Spanien, den Niederlanden und Russland. Im Technologiefeld Quantensensorik und -imaging konzentrieren sich die Kooperationen auf China, dicht gefolgt von den Vereinigten Staaten und Japan sowie Australien und Russland. Im Technologiefeld Quantenkommunikation finden sich erneut hauptsächlich Kooperationen mit Österreich, gefolgt von Kanada, dagegen – trotz seiner absoluten Dominanz – erst an dritter Stelle China, nur knapp vor Tschechien. Gegebenenfalls spiegelt sich auch hier bereits der stärker verteidigungsrelevante Charakter der Aktivitäten. In keinem Fall allerdings überschreitet die Zahl der Koopera-

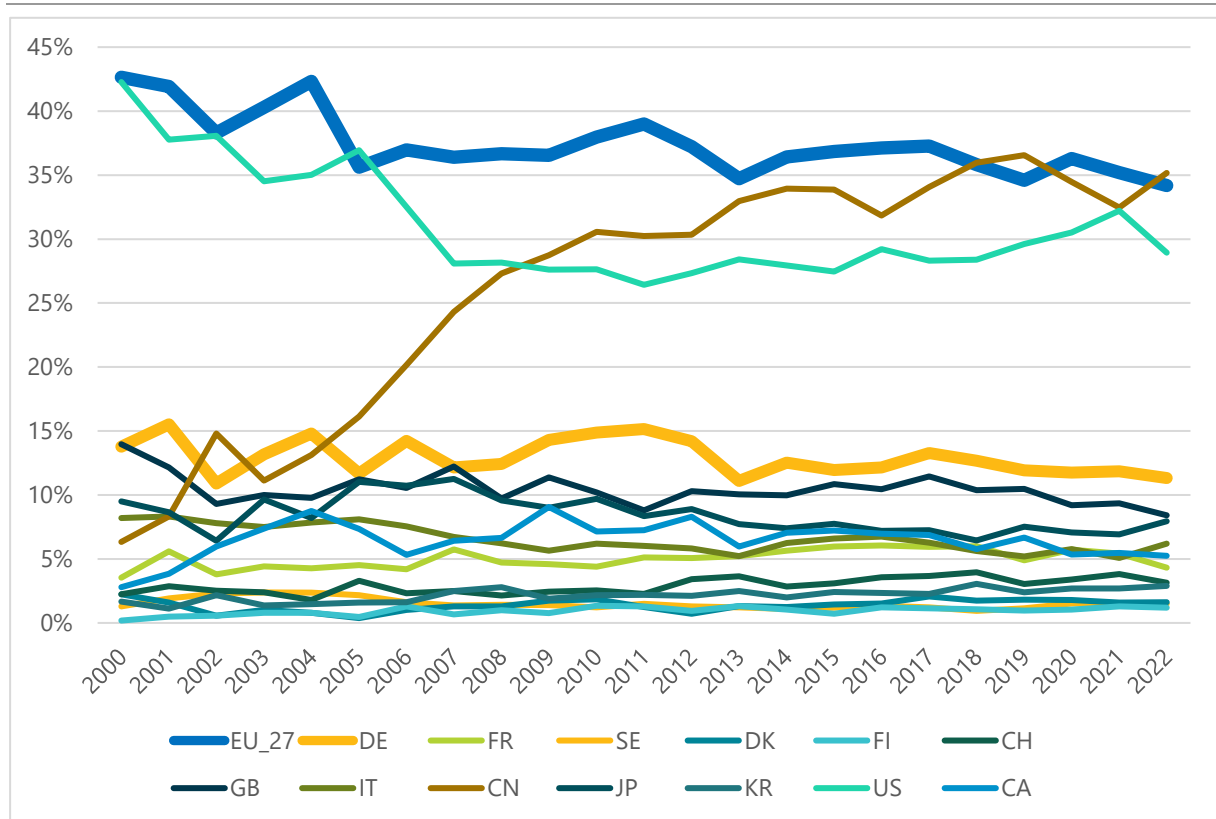
tionen mit einzelnen Ländern – selbst über die lange Periode von 2000-22 – 200 Veröffentlichungen, im Regelfall liegt sie deutlich unter 100. Vor diesem Hintergrund dieser geringen, auf spezifischen Einzelfällen beruhenden und damit statistisch nicht belastbaren Zahlen lassen sich die identifizierten Kooperationsmuster nur in allgemeiner Weise interpretieren. Zudem spiegeln sie teils, wie im Fall Russlands, auch nicht mehr aktuelle Beziehungen wider.

Abbildung 5: Gesamtanzahl Publikationen im Bereich Quantentechnologien nach Herkunftsland und Technologiefeld, Summe 2019-2021



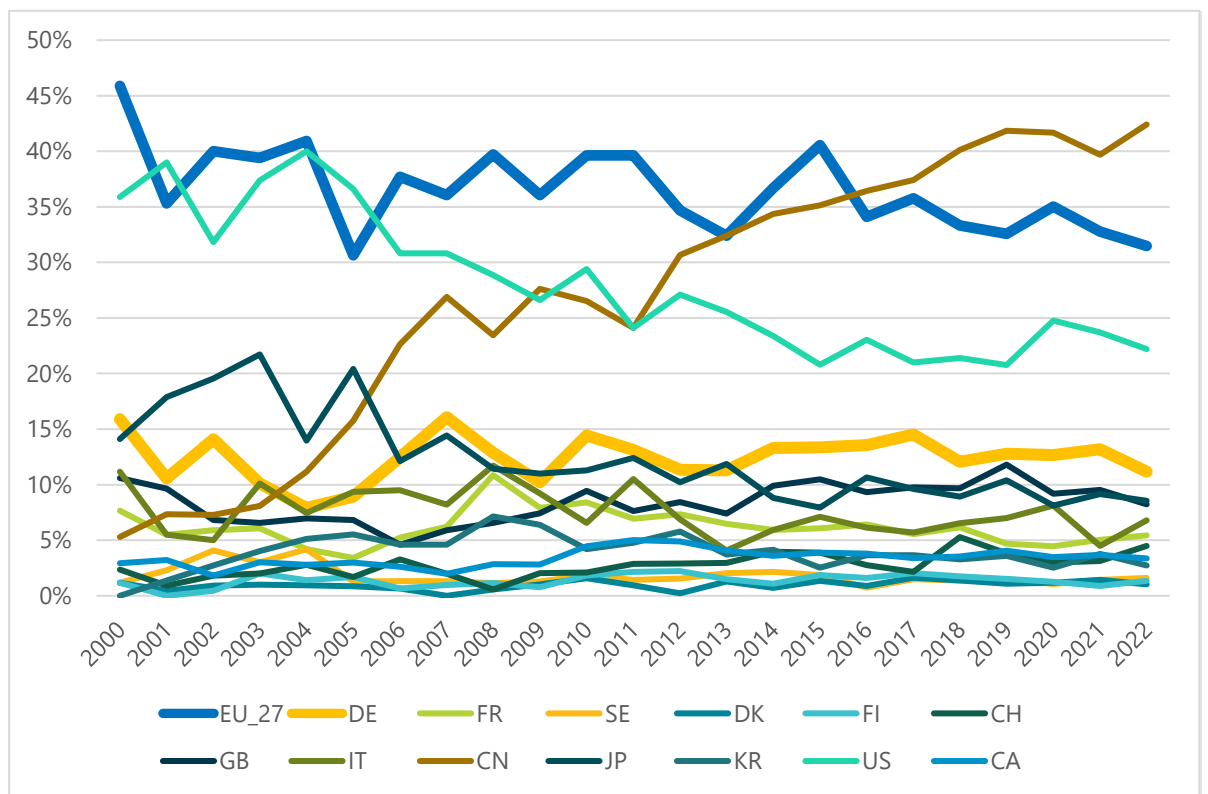
Quelle: eigene Analysen auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung 6: Publikationsaktivitäten im Technologiefeld Quantencomputing nach Herkunftsland



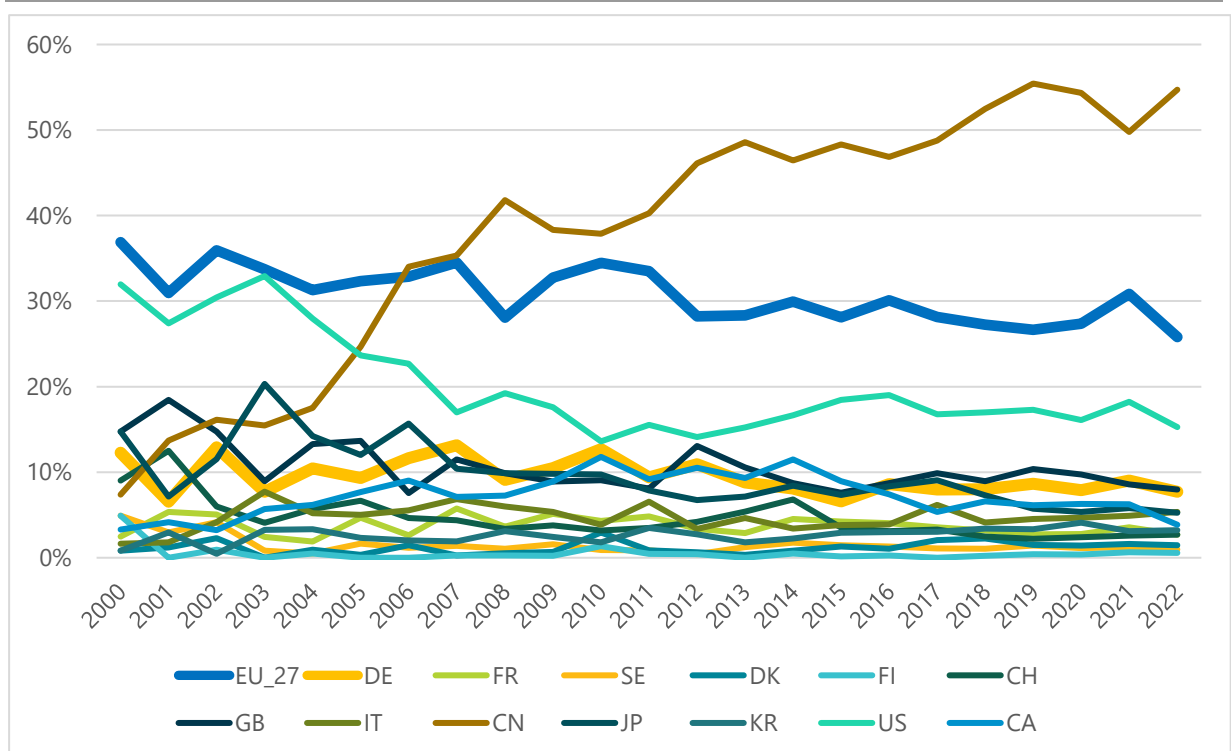
Quelle: eigene Analysen auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung 7: Publikationsaktivitäten im Technologiefeld Quantensensorik / -imaging nach Herkunftsland



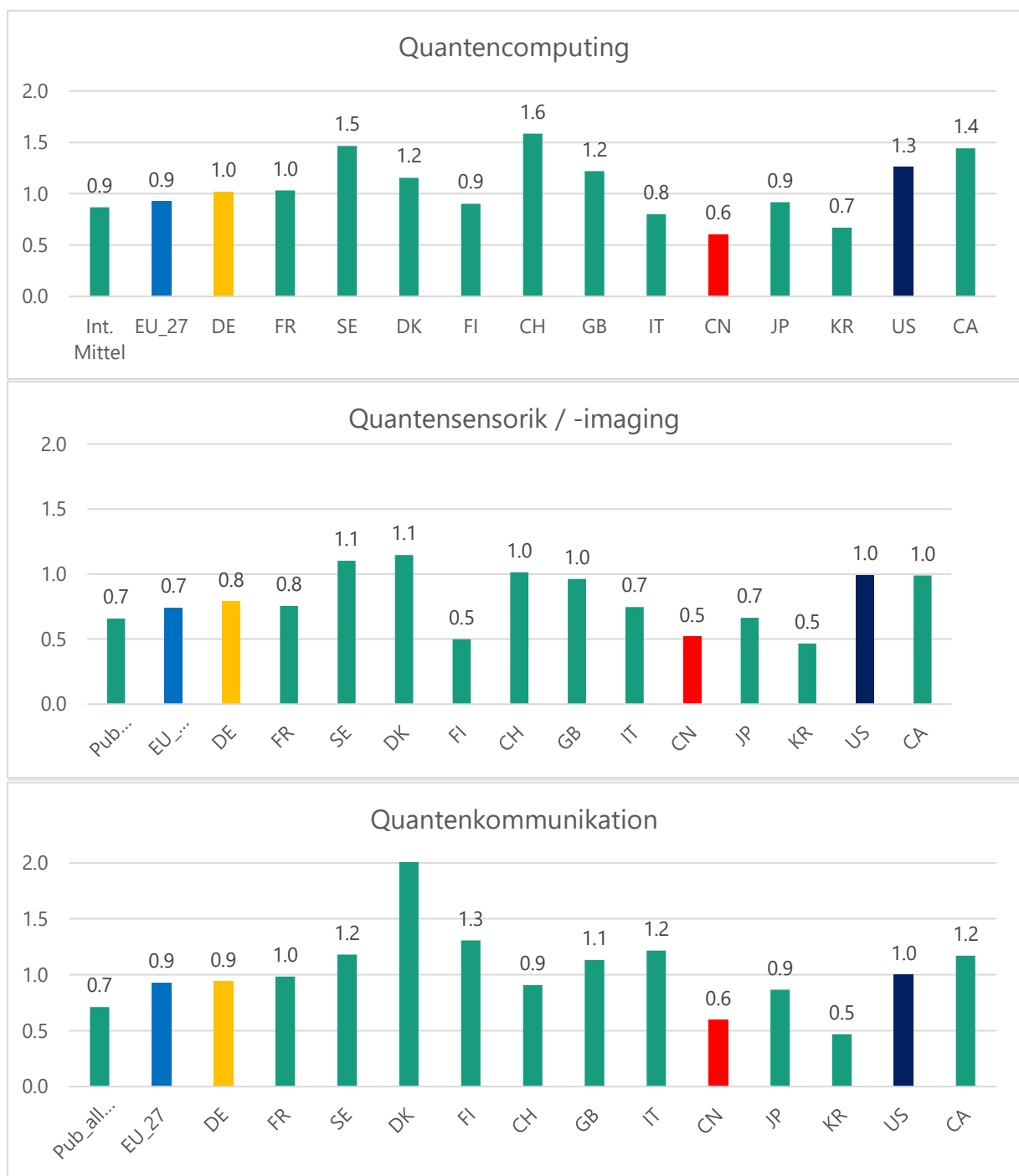
Quelle: eigene Analysen auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung 8: Publikationsaktivitäten im Technologiefeld Quantenkommunikation nach Herkunftsland



Quelle: eigene Analysen auf Basis von Elsevier SCOPUS

Abbildung 9: Visibilität von Publikationen (Crown Indikator, feldkorr. Zittrate, Mittelwert 2019-21)



Quelle: eigene Analysen auf Basis von Elsevier SCOPUS

Tabelle 8: Zentrale publizierende Akteure weltweit im Quantenbereich (Top-10)

Quantencomputing	Quantensensorik	Quantenkommunikation
University of S&T of China	Graduate University of CAS (China)	University of S&T of China
Tsinghua University	University of S&T of China	Beijing University of Post & Telecom
University of Oxford	Chinese Academy of Sciences	Tsinghua University
Mass. Institute of Technology	Mass. Institute of Technology	University of Waterloo
University of Waterloo	NIST (USA)	University of Geneva
University of Maryland	Tsinghua University	Shanxi University
Harvard University	University of Ulm	Shanghai Jiaotong University
Graduate University of CAS (China)	University of Oxford	Central South University
ETH Zurich	Peking University	Nanjing University of Post & Telecom
University of Tokyo	University of Tokyo	Mass. Institute of Technology
Imperial College	University of California	Xidian University
RIKEN	University of Colorado	NTT Corporation
University of Michigan	Nanjing University	University of Oxford
NIST (USA)	University of Maryland	Nat. Univ. of Defense Techn. (China)

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Elsevier SCOPUS

Tabelle 9: Zentrale publizierende Akteure Deutschlands im Quantenbereich (Top-10)

Quantencomputing	Quantensensorik	Quantenkommunikation
Max-Planck-Institut für Quantenoptik	Universität Ulm	Max-Planck-Institut für Quantenoptik
Ludwig-Maximilians-Universität München	Physikalisch-Technische Bundesanstalt	Universität Erlangen-Nürnberg
Universität Ulm	Universität Stuttgart	Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts

RWTH Aachen	Forschungszentrum Jülich	Ludwig-Maximilians-Universität München
Universität Stuttgart	Universität Duisburg-Essen	Leibniz Universität Hannover
Forschungszentrum Jülich	Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts	Universität Stuttgart
Freie Universität Berlin	Ludwig-Maximilians-Universität München	Heinrich-Heine-University
Max-Planck-Institut für Physik Komplexer Systeme	Leibniz Universität Hannover	Universität Heidelberg
Karlsruhe Institute of Technology	Universität Erlangen-Nürnberg	Universität Ulm
Universität Mainz	Universität Mainz	Darmstadt Universität Technology
Universität Freiburg	Max-Planck-Institut für Quantenoptik	Technische Universität Berlin
Universität Erlangen- Nürnberg	Karlsruhe Institute of Technology	Humboldt University
Leibniz Universität Hannover	Freie Universität Berlin	Universität Paderborn
Technische Universität München	Universität Leipzig	Freie Universität Berlin

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Elsevier SCOPUS

4.2 Patentaktivitäten

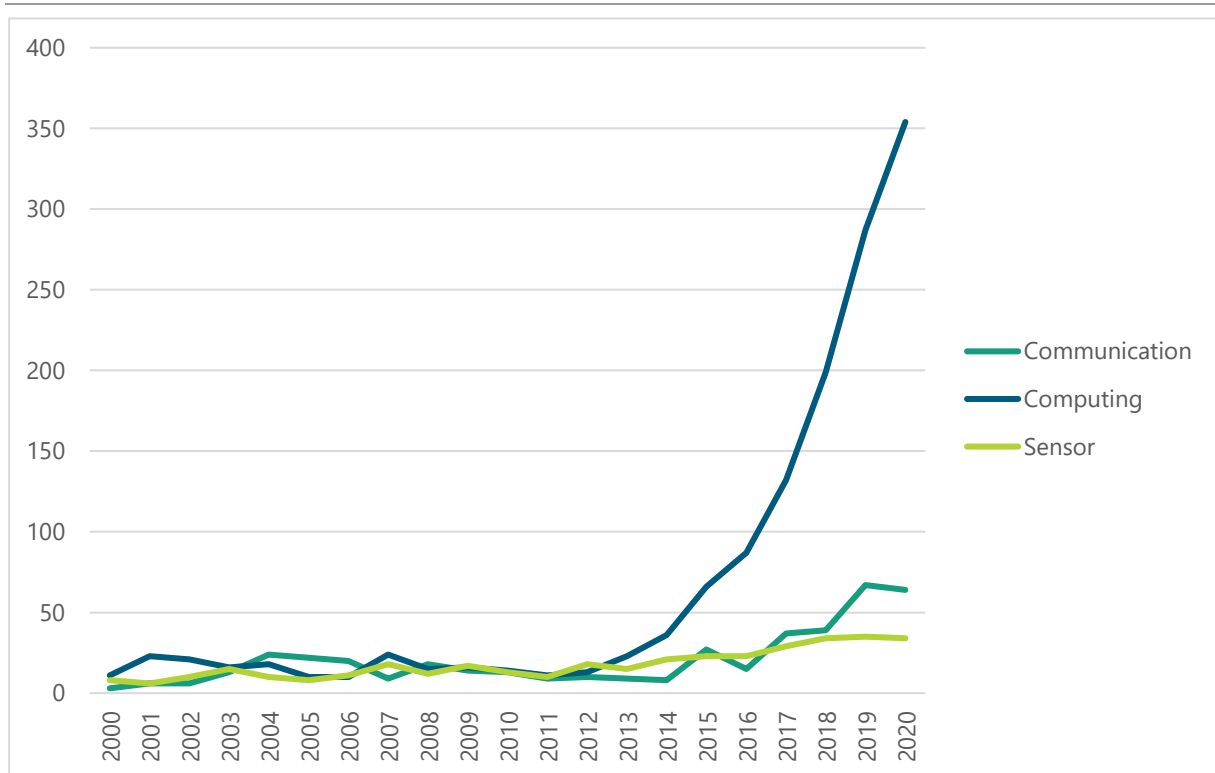
Insbesondere in technologielevanten Märkten sind Patente eines der wichtigsten sichtbaren Artefakte von F&E-Prozessen und können daher als wichtigster Innovationsindikator zur Bewertung der technologischen Wettbewerbsfähigkeit auf Mikro- und Makroebene angesehen werden. Eine makroökonomische Betrachtung bietet somit eine Bewertung des technologischen Outputs nationaler Innovationssysteme, insbesondere in Hochtechnologiebereichen. Die hier dargestellten Patentanalysen für den Bereich Quantentechnologien basieren auf der „EPO Worldwide Patent Statistical Database“ (PATSTAT) des europäischen Patentamts, die Informationen über veröffentlichte Patente von mehr als 80 Patentbehörden weltweit enthält.

Wie auch bei den Publikationsaktivitäten, sticht auch bei den Patentanalysen Quantencomputing als das absolut bedeutsamste Technologiefeld innerhalb der Quantentechnologien hervor (Abbildung 10). Besonders seit dem Jahr 2012 sind die transnationalen Patentanmeldungen³ im

³ Zu den transnationalen Patentanmeldungen (Frietsch und Schmoch 2010) zählen alle PCT-Anmeldungen gezählt, unabhängig davon, ob sie an das EPA übertragen wurden oder nicht, sowie alle direkten EPA-Anmeldungen ohne PCT-Vorläuferanmeldung. Eine Doppelzählung von übertragenen Euro-PCT-Anmeldungen ist damit ausgeschlossen. Vereinfacht gesagt, werden alle Patentfamilien mit mindestens einer PCT-Anmeldung oder einer EPA-Anmeldung berücksichtigt.

Technologiefeld Quantencomputing rasant angestiegen. Waren es im Jahr 2012 noch 13 Anmeldungen in diesem Technologiefeld, können im Jahr 2020 bereits 354 weltweite Anmeldungen verzeichnet werden. Auch in den beiden anderen Technologiefeldern der Quantentechnologien, nämlich Quantensensorik und -metrologie sowie Quantenkommunikation ist spätestens seit 2015 ein Wachstum zu verzeichnen, das jedoch geringer ausfällt als im Quantencomputing.

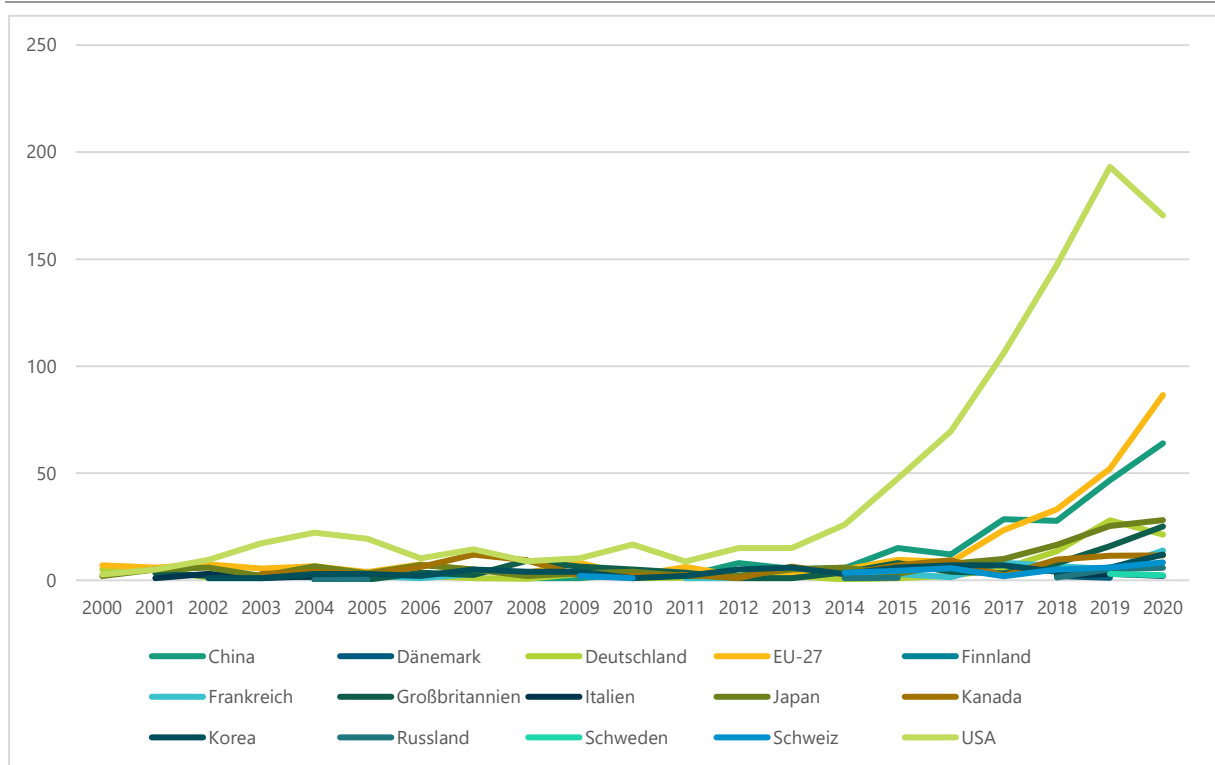
Abbildung 10: Transnationale Patentanmeldungen im Bereich Quantentechnologien nach Technologiefeld, 2000-2020



Quelle: Analysen der EFI auf Basis von EPO PATSTAT

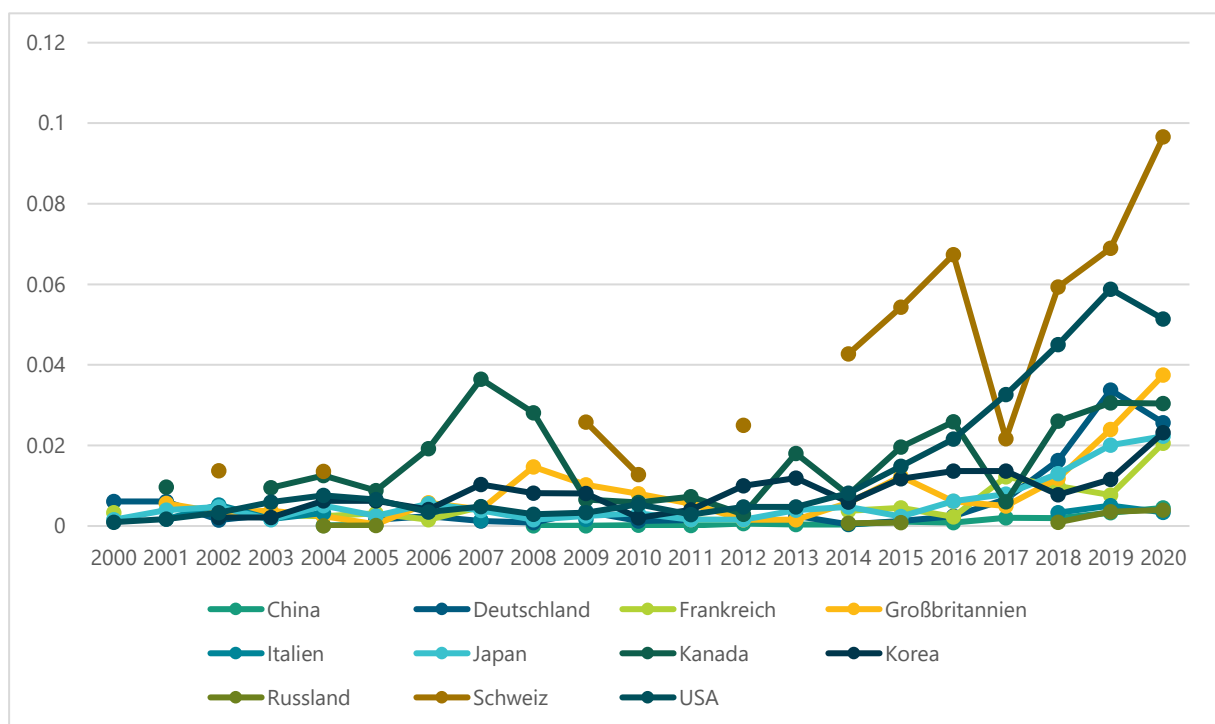
Die Analyse der Patentanmeldungen differenziert nach Erfinderland (Abbildung 11) und weist auf eine starke Dominanz U.S. amerikanischer Patente hin. Knapp 36 Prozent aller Anmeldungen im Bereich Quantentechnologien entfallen im Jahr 2020 auf die USA, gefolgt von der EU-27 mit 18 Prozent aller Anmeldungen und China, mit etwa 14 Prozent. Die Anteile von Japan und Korea fallen mit 6 Prozent, respektive 3 Prozent vergleichsweise gering aus. Innerhalb der EU stechen Finnland und Großbritannien, mit jeweils 5 Prozent aller Anmeldungen, sowie Deutschland mit einem Anteil von 4 Prozent aller Anmeldungen hervor.

Abbildung 11: Transnationale Patentanmeldungen im Bereich Quantentechnologien nach Erfinderland, 2000-2020



Quelle: Analysen der EFI auf Basis von EPO PATSTAT

Abbildung 12: Patentintensitäten ausgewählter Länder, 2000-2020

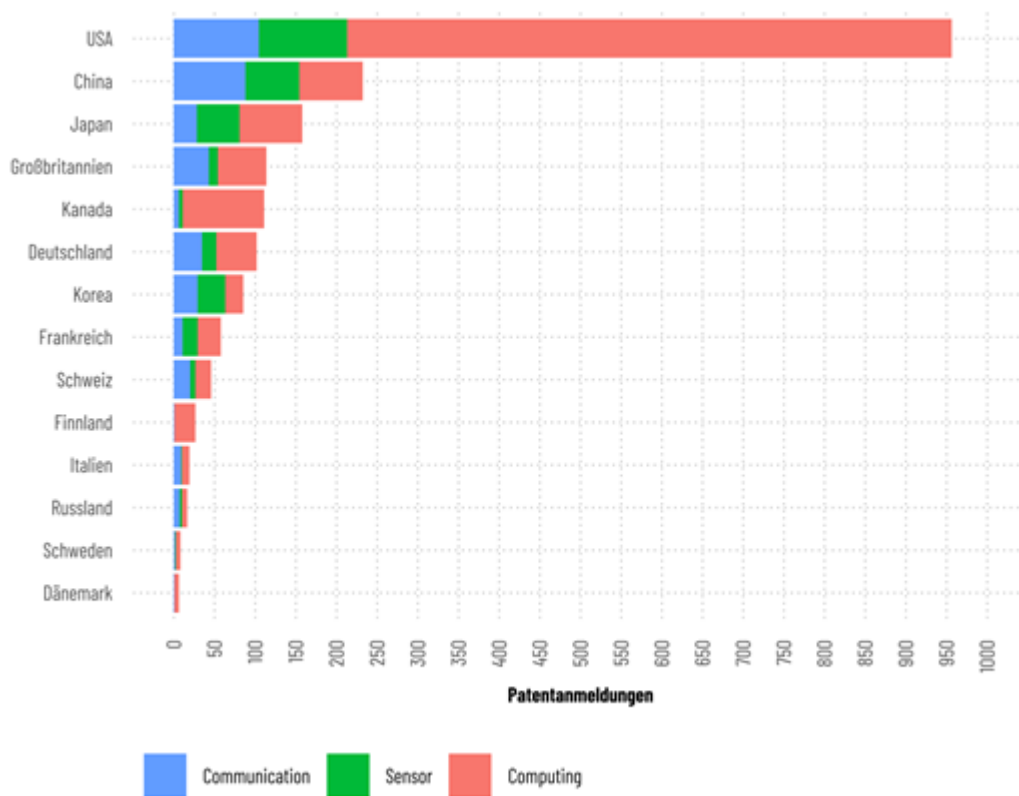


Quelle: Analysen der EFI auf Basis von EPO PATSTAT

Die Anzahl der Patentanmeldungen pro Land ist jedoch ein größenabhängiges Maß. Um die Anzahl der Patentanmeldungen unabhängig von der Größe eines Landes zu bewerten, wurde

die Patentintensität – also die Anzahl der Patentanmeldungen pro 100.000 Einwohner eines Landes – berechnet (Abbildung 12). Hier zeigt sich noch einmal ein anderes Bild als bei den absoluten Zahlen. Pro Kopf gerechnet, sticht im Bereich der Quantentechnologien besonders die Anzahl der Patentanmeldungen der Schweiz hervor. Von einem leichten Einbruch der Patentintensität im Jahr 2017 abgesehen, steigt die Patentintensität der Schweiz über die Jahre hinweg stetig an. Trotz der großen Einwohnerzahl kann die USA auf diesem Indikator den zweiten Rang erreichen. Also auch pro Kopf gerechnet, nimmt die USA bei den Patentanmeldungen in Quantentechnologien eine Spitzenposition ein, gefolgt von Großbritannien, Kanada und Deutschland. Aufgrund der großen Einwohnerzahl fällt China – auf diesem Indikator gemessen – auf einen der hinteren Ränge bei unserem Ländervergleich zurück.

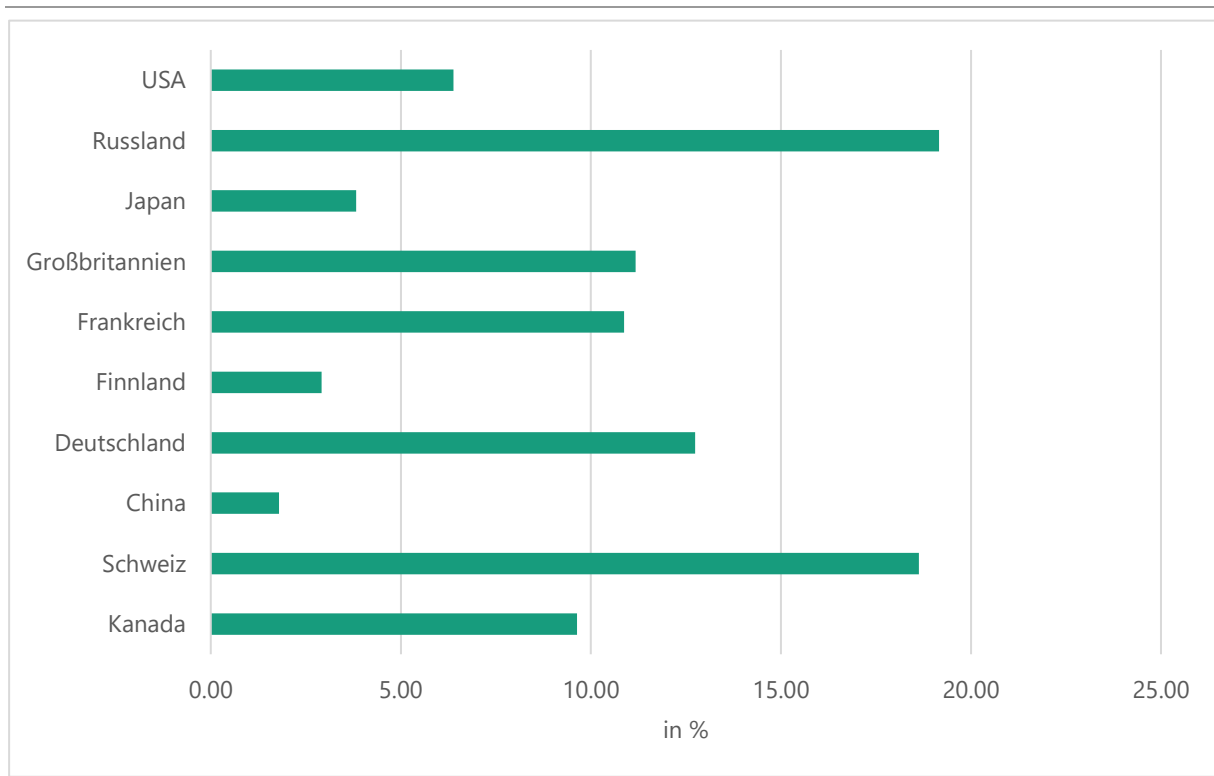
Abbildung 13: Transnationale Patentanmeldungen im Bereich Quantentechnologien nach Erfinderland und Technologiefeld, Summe 2000-2020



Quelle: Analysen der EFI auf Basis von EPO PATSTAT

In Abbildung 13 sind die Patentanmeldungen der Länder der Jahre 2000-2020 noch einmal nach Technologiefeld innerhalb des Bereichs der Quantentechnologien differenziert dargestellt. Hier wird deutlich, dass Quantencomputing nicht in jedem Land das größte Technologiefeld darstellt. Besonders die USA, Kanada und Großbritannien haben jedoch einen klaren Fokus auf Quantencomputing. In China liegt der technologische Fokus – gemessen an den Patentanmeldungen – jedoch stärker auf Quantenkommunikation, wobei auch ein vergleichsweise großer Anteil auf Quantensensorik und -imaging entfällt. Auch in Japan nimmt Quantensensorik und -imaging einen etwas größeren Anteil ein als im internationalen Vergleich, auch wenn auch hier der größte Anteil auf Quantencomputing entfällt. Das deutsche Profil ist relativ ausgeglichen, auch wenn das Technologiefeld Quantensensorik und -imaging etwas kleiner ausfällt als Quantencomputing und Quantenkommunikation.

Abbildung 14: Anteil internationaler Ko-Patente in allen Transnationale Patentanmeldungen im Bereich Quantentechnologien nach Erfinderland, Mittelwert 2000-2020



Quelle: Analysen der EFI auf Basis von EPO PATSTAT

Die Analyse der Ko-Patente (Abbildung 14) gibt Aufschluss über internationale Kooperationen im Bereich der Quantentechnologien. Die größten Ko-Patentierungsanteile entfallen auf Russland und die Schweiz. Vor allem bei der Schweiz lässt sich dies über die Größe des Landes erklären. Dadurch, dass im Land selbst absolut gesehen nur wenig Kooperationspartner zur Verfügung stehen, steht die Kooperation mit internationalen Partnern im Fokus. Die USA und China kooperieren international gesehen deutlich weniger, wobei der Anteil der Ko-Patente Chinas im Bereich Quantentechnologien noch einmal wesentlich kleiner ausfällt als jener der USA. Deutschland weist mit etwas über 12 Prozent auch eine vergleichsweise hohe Kooperationsrate auf, während der Anteil bei Großbritannien und Frankreich bei etwas über 10 Prozent liegt.

Tabelle 10 lenkt zum Abschluss noch einmal den Blick auf die zentralen Akteure bei der Technologieentwicklung in den Quantentechnologien gemessen durch die Anzahl der Patentanmeldungen. Das Bild ist auf der Mikroebene sehr U.S. zentriert, d.h. die größte Zahl der Patentanmeldungen stammt von U.S. Unternehmen. Dies ist besonders stark im Technologiefeld Quantencomputing zu beobachten. Der größte Anmelder im Technologiefeld Quantencomputing ist die IBM Corporation, gefolgt vom IBM Zweig in Großbritannien und Microsoft in den USA. Das Unternehmen D-Wave System aus Kanada nimmt den vierten Platz bei den Patentanmeldungen im Technologiefeld Quantencomputing ein, während Google auf Rang fünf landet. Diese Unternehmen sind für einen wesentlichen Anteil der Patentanmeldungen im Bereich der Quantentechnologien verantwortlich. Im Technologiefeld Quantensensorik und -imaging lan-

den Honeywell International, Microsoft und Northrop Grumman auf den ersten Rängen, während dies im Technologiefeld Quantenkommunikation auf Magic Tech Int. aus den USA, sowie ID Quantique SA auf der Schweiz und den chinesischen Tech-Riesen Huawei entfällt.

Tabelle 10: Patentanmeldungen - Zentrale Akteure

Quantum Computing (n gesamt = 1.563)		Quantum Sensing (n gesamt = 365)		Quantum Communi- cation		(n gesamt = 463)
IBM CORP	US	HONEYWELL INT INC	US	MAGIQ TECH INC	US	
IBM UK LTD	GB	MICROSOFT TECH LICENSING LLC	US	ID QUANTIQUE SA	CH	
MICROSOFT TECH LICENSING LLC	US	NORTHROP GRUMMAN SYSTEMS CORP	US	HUAWEI TECH CO LTD	CN	
D WAVE SYSTEMS INC	CA	KR RES INST OF STANDARDS & SCIENCE	KR	CO LTD TOSHIBA	JP	
GOOGLE LLC	US	CANON CO LTD	JP	HUAWEI TECH DUESSEL-DORF GMBH	DE	
IBM DEUTSCHLAND GMBH	DE	IBM CORP	US	QINETIQ LTD	GB	
INTEL CORP	US	SEKISUI CHEM CO LTD	JP	HEWLETT PACKARD DEV CO LP	US	
NORTHROP GRUMMAN SYSTEMS CORP	US	KON PHILIPS ELECT NV	NL	DEUTSCHE TELEKOM AG	DE	
RIGETTI & CO INC	US	CSEM CENTRE SUISSE D ELECTRONIQUE ET DE MICROTECHNIQUE SA R&D	CH	QUANTUMCTEK CO LTD	CN	
IONQ INC	US	IBM UK LTD	GB	ALIBABA GROUP HOLDING LTD	US	
MASSACHUSETTS INSTITUTE OF TECH	US	THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA	US	CHINA ACADEMY OF ELECT & INFORMATION TECH CETC	CN	
IBM CORP	CN	SHANGHAI INST. OF MICROSYSTEM & INFO TECH CHIN. ACAD. OF SCIEN.	CN	LOS ALAMOS NATIONAL SECURITY LLC	US	
IBM CHINA INVESTMENT CO LTD	US	THALES	FR	BRITISH TELECOMMUNICATIONS PLC	GB	
ZAPATA COMPUTING INC	US	PRINCETON UNIVERSITY	US	SHANDONG INSTITUTE OF QUANTUM SCIENCE & TECH	CN	
PRESIDENT & FELLOWS OF HARVARD COLLEGE	US	HONEYWELL INT INC	US	MAGIQ TECH INC	US	

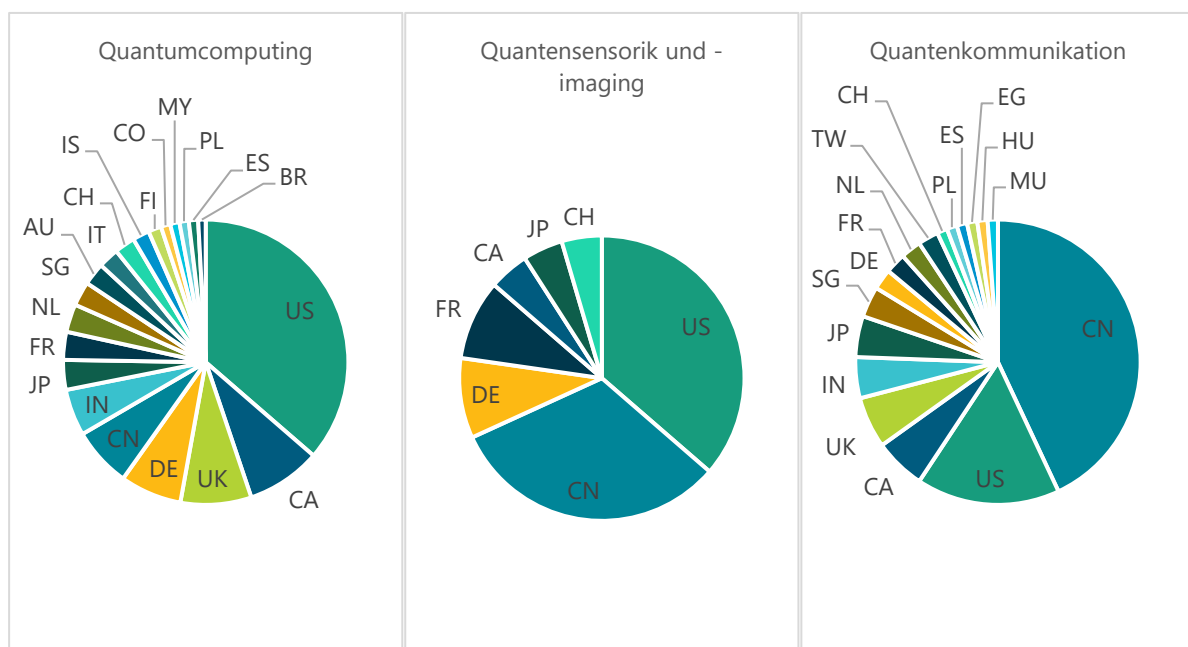
Quelle: Analysen der EFI sowie des Fraunhofer ISI auf Basis von EPO PATSTAT

4.3 Gründungs- und andere unternehmerische Aktivitäten

In diesem Abschnitt widmen wir uns der Analyse der Gründungs- und weiterer unternehmerischer Aktivitäten im Bereich der Quantentechnologien. Als Datenbasis für die Analysen wurden die Unternehmensdatenbank ORBIS sowie Crunchbase in Kombination verwendet, um möglichst alle Akteure im Bereich der Quantentechnologien zu identifizieren. Orbis ist eine Unternehmensdatenbank, die von Moody's bereitgestellt wird. Sie ist eine der größten Datenbanken dieser Art weltweit, die etwa 150 Millionen Unternehmen – hauptsächlich aus dem privaten Sektor – umfasst. Crunchbase beinhaltet Unternehmens- und Wirtschaftsinformationen mit Schwerpunkt auf Technologieunternehmen und -investoren und enthält Informationen zu Unternehmen weltweit. Zur Identifizierung der Unternehmen im Bereich der Quantentechnologien wurde eine Stichwortsuche in beiden Datenbanken verwendet, wobei Doppelzählungen ausgeschlossen wurden. Hierbei wurde in der ORBIS Datenbank die „Trade Description“⁴ durchsucht, während in Crunchbase die Volltextbeschreibung der Unternehmen durchsucht wurde. Die verwendeten Keywords sind in Tabelle 3 im Methodenkapitel dargestellt.

Die Anzahl identifizierbarer Firmen im Bereich Quantentechnologien ist – nach Land differenziert – in Abbildung 15 dargestellt. Im Feld Quantencomputing konnten 473 Unternehmen weltweit identifiziert werden, wobei der bei weitem größte Anteil auf die USA entfällt. Im Feld Quantensensorik und -imaging konnten insgesamt nur 22 Unternehmen identifiziert werden, wobei die USA und China mit acht bzw. sieben Unternehmen hier eine ähnlich hohe Unternehmensanzahl aufweisen. Im Feld Quantenkommunikation konnten weltweit insgesamt 86 Unternehmen identifiziert werden. Der größte Anteil der Unternehmen in diesem Feld hat ihren Hauptsitz in China.

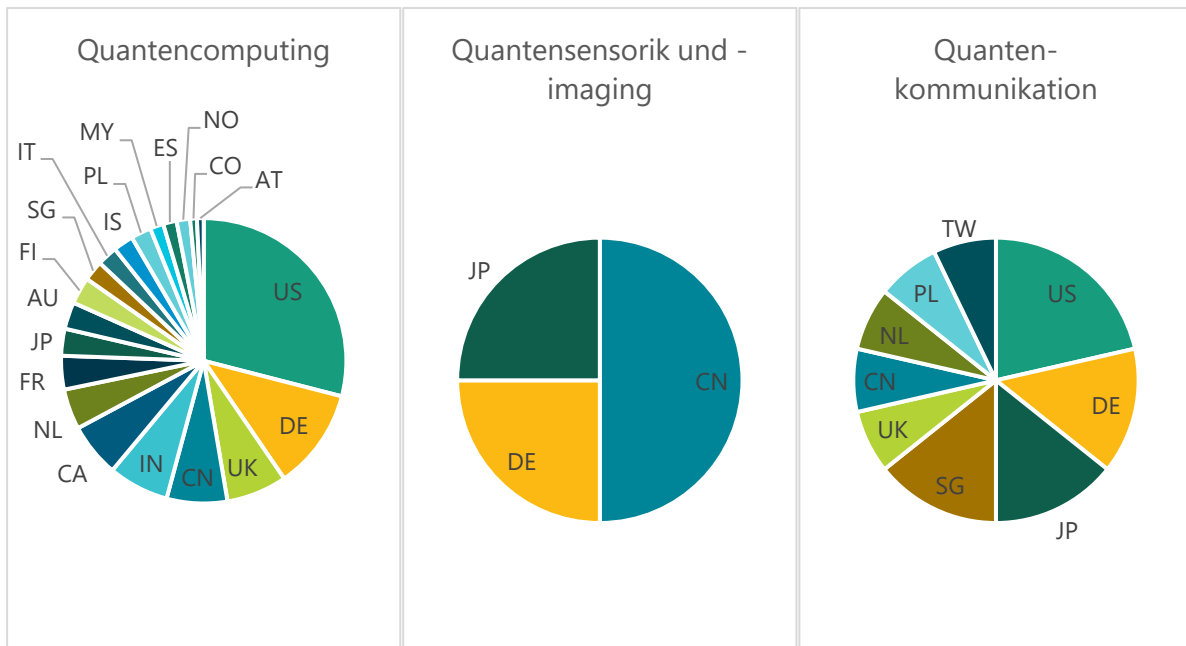
Abbildung 15: Anzahl identifizierbarer Firmen im Bereich der Quantentechnologien



Quelle: eigene Analysen auf Basis von Moody's ORBIS und Crunchbase

⁴ Hierbei ist zu erwähnen, dass die „trade description“ für U.S. Unternehmen nur in etwa 1% der Fälle befüllt ist, d.h. dass U.S. Unternehmen hier unterrepräsentiert sind.

Abbildung 16: Anzahl identifizierbarer Startups im Bereich der Quantentechnologien



Quelle: eigene Analysen auf Basis von Moody's ORBIS und Crunchbase

Zur Analyse der Startups im Bereich der Quantentechnologien wurden die Unternehmenssuche auf Unternehmen mit einem Gründungsjahr ab 2020 ausgewählt (Abbildung 16). Im Technologiefeld Quantencomputing können nach dieser Definition 131 Firmen als Startups identifiziert werden, wobei der größte Anteil den Hauptsitz in den USA haben. Im Technologiefeld Quantenkommunikation finden sich 17 Startups, im Technologiefeld Quantensensorik und -imaging konnten insgesamt nur vier Startups identifiziert werden. Aus Deutschland können über alle Technologiefelder hinweg 18 Startups gefunden werden. Eine weitere Analyse der einzelnen Unternehmen zeigt, dass es sich bei vier dieser Startups um eigenständige Unternehmen handelt, während es sich bei zwölf der 18 Startups Spin-Offs aus Universitäten oder außeruniversitären Forschungseinrichtungen handelt. Auf internationaler Ebene stehen leider keine zur Differenzierung zwischen Spin-Offs und anderen Start-Ups erforderlichen Daten zur Verfügung.

Tabelle 11: Top 20 größte Unternehmen bei Quantentechnologien

Unternehmensname	Land	Technologiefeld	Gründungsjahr	Beschäftigte	Industrien Crunchbase
Google	U.S.	Quantum Computing	1998	10001+	Advertising, Collaboration, Enterprise Software, Information Technology, Search Engine
MITRE Corporation / CVE	U.S.	Quantum Computing	1958	10001+	Cyber Security, Information Technology, Non Profit, Quantum Computing, SaaS
MRX Global Holding Corporation	U.S.	Quantum Computing	1976	10001+	3D Printing, Aerospace, Artificial Intelligence (AI), Cyber Security, Machine Learning, Medical, Nanotechnology, Quantum Computing, Sensor
Sudershan Industries	India	Quantum Computing	2022	10001+	Asset Management, Finance, Information Technology, Quantum Computing
Booz Allen Hamilton Holding Corporation	U.S.	Quantum Computing	2008	10001+	
BULL	France	Quantum Computing	1931	5001-10000	Analytics, Artificial Intelligence (AI), Cloud Computing, Infrastructure, IT Infrastructure, Mobile, Outsourcing, Private Cloud, Quantum Computing, Software
Studio-SouthAQ	U.S.	Quantum Communication	2016	5001-10000	Artificial Intelligence (AI), Cyber Security, Information Technology, Quantum Computing, SaaS
FormFactor, Inc.	U.S.	Quantum Computing	1993	501-5000	n.v.
Tpv display technology (wuhan) co., ltd.	China	Quantum Computing	2004	501-5000	n.v.

Zhangzhou kehua technology co., ltd.	China	Quantum Communication	2004	501-5000	n.v.
TEL Manufacturing & Engineering of America INC	U.S.	Quantum Computing	1973	251-500	n.v.
IonQ	U.S.	Quantum Computing	2015	251-500	Computer, Electronics, Information Services, Information Technology, Quantum Computing
4IRE	Ukraine	Quantum Computing	2010	251-500	Apps, Blockchain, FinTech, Information Technology, Machine Learning, Mobile Apps, Smart Contracts, Software
BLAKFX	U.S.	Quantum Computing	2017	251-500	Blockchain, Cloud Security, Cryptocurrency, Cyber Security, Information Technology
CEICLOUD	China	Quantum Communication	2013	251-500	Analytics, Big Data, Cloud Storage, Infrastructure
Heidelberg Instruments	Germany	Quantum Computing	1984	251-500	Electronics, Manufacturing, Nanotechnology
Infleqtion	U.S.	Quantum Computing	2007	251-500	Electronics, Manufacturing, Mechanical Design, Mechanical Engineering, Quantum Computing, Software
Quantinuum	U.S.	Quantum Computing	2021	251-500	Cyber Security, Quantum Computing, Software Engineering
Qubit	UK	Quantum Computing	2010	251-500	Advertising, Analytics, Artificial Intelligence (AI), Big Data, E-Commerce, Software
Yokogawa Test & Measurement	Japan	Quantum Computing	1954	251-500	Manufacturing, Technical Support, Test and Measurement
D-Wave Systems	Canada	Quantum Computing	1999	101-250	Electronics, Manufacturing, Quantum Computing, Semiconductor

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Moody's ORBIS und Crunchbase

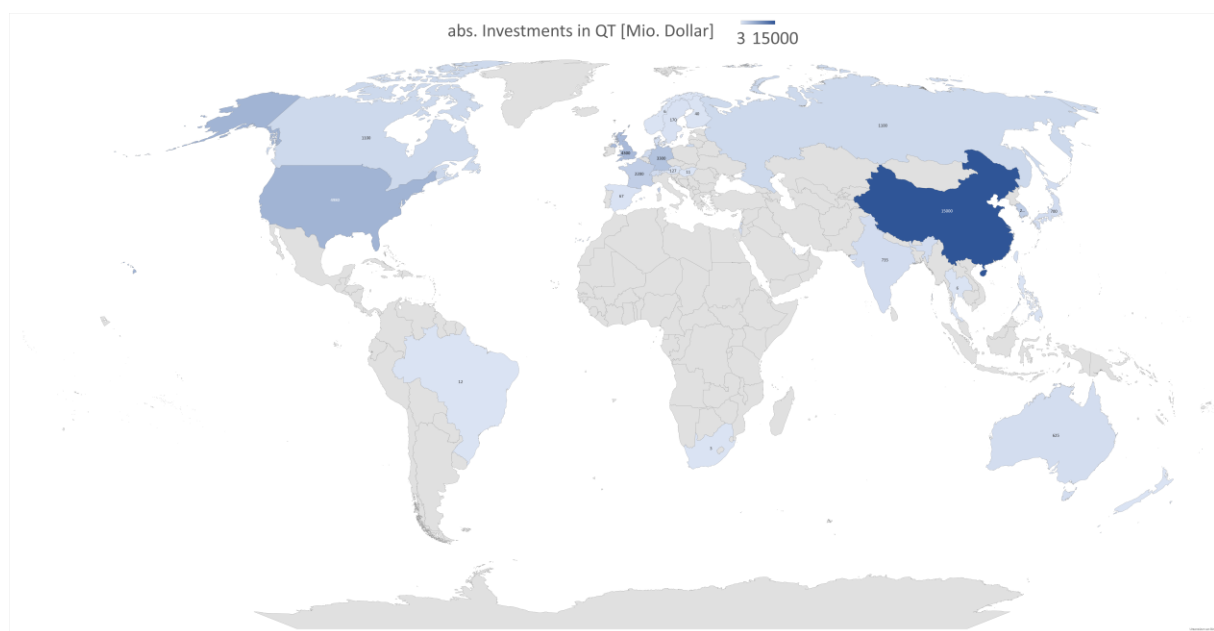
Eine Liste der Top20 größten Unternehmen in den Technologiefeldern innerhalb des Bereichs der Quantentechnologien ist in Tabelle 11 dargestellt. Einige der Unternehmen, die bei der Patentierung herausstechen, wie beispielsweise IBM International, sind in dieser Liste nicht zu finden. Dies liegt daran, dass vor allem große, multinationale Unternehmen stark differenzierte Unternehmensprofile aufweisen und einzelne Teilbereiche, wie beispielsweise Quantentechnologien, nicht in ihre Unternehmensbeschreibungen mit aufnehmen, wenn es sich nicht um das Kerngeschäft der jeweiligen Unternehmen handelt.

5 Fachlos 3: Bestandsaufnahme und Vergleich der deutschen und internationalen F&I-Politik

5.1 Allgemeine Einleitung

In den letzten Jahren haben viele Länder nationale Quantenstrategien entwickelt, um Forschung, Entwicklung und Innovation im Bereich der Quantentechnologien zu fördern. Die globalen Investitionen in die Quantentechnologien haben in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Schätzungen zufolge belaufen sich die weltweiten staatlichen Investitionen auf über 40 Milliarden US-Dollar [146].

Abbildung 17: Geplante Investitionen im Kontext nationaler Quantenstrategien



Quelle: eigene Darstellung mit Daten von [146, 157]

Die umfassenden Investitionen sind durch die Chancen und Potenziale getrieben, die Quantentechnologien und deren Anwendungen für Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft bieten. Die Analyse der nationalen Quantenstrategien in ausgewählten Ländern (vgl. Tabelle 12) zeigt, dass wirtschaftliche, sicherheitspolitische und wissenschaftliche Vorteile die Strategien begründen. Die Entwicklung einer Führungsrolle in den Quantentechnologien soll die technologische Unabhängigkeit sichern und die Innovationskraft stärken. Technologische Souveränität wird insbesondere in Europa diskutiert, um strukturelle Abhängigkeiten zu vermeiden und im internationalen Vergleich nicht weiter zurückfallen. Die Ziele der untersuchten nationalen Quantenstrategien lassen sich wie folgt zusammenfassen: Die wissenschaftliche Exzellenz stärken, industrielle Anwendungen systematisch voranzutreiben und die Position im internationalen Wettbewerb behaupten bzw. weiter ausbauen. Die Internationale Zusammenarbeit und die Ausbildung von Fachkräften werden darüber hinaus als strategische Ziele hervorgehoben.

Nicht alle Staaten investieren in die Erforschung, Entwicklung und Anwendung von Quantentechnologien. Die Daten in Abbildung 17 zeigen, dass ein Großteil der Staaten bisher noch keine Investitionen in die Quantentechnologien im Kontext nationaler Quantenstrategien ange-

kündigt hat. Dies betrifft insbesondere Staaten mit begrenzten finanziellen Ressourcen und geringer technologischer Leistungsfähigkeit. Dies stellt eine Herausforderung sowohl für die betroffenen Staaten als auch für die globale Gemeinschaft dar [146].

Quantentechnologien könnten sozioökonomische Ungleichheiten zwischen Ländern verstärken. Investitionen schaffen die finanziellen und personellen Voraussetzungen für Forschung, Entwicklung und Innovation in den Bereichen der Quantentechnologien. Länder und Unternehmen, die nicht über die notwendigen Ressourcen verfügen, um in Quantentechnologien zu investieren, könnten unter Druck geraten, mit technologisch fortschrittlicheren Wettbewerbern Schritt zu halten. Dies könnte ihre Innovationsfähigkeit und Wettbewerbsfähigkeit beeinträchtigen. Staaten ohne Investitionen bieten weniger attraktive Standortbedingungen für Fachkräfte. Dies birgt die Gefahr des „Brain Drain“, bei dem Wissenschaftler:innen und Ingenieur:innen aus weniger fortschrittlichen Ländern abwandern. Staaten ohne nationale Quantenstrategien können endogene Wachstumskräfte folglich nicht freisetzen und werden im technologischen und wirtschaftlichen Wettbewerb langfristig weiter zurückfallen. Die ungleiche Verteilung von Quantentechnologien könnte die globalen Entwicklungschancen verzerren. Länder, die Zugang zu diesen Technologien haben, könnten schneller Fortschritte machen, während andere zurückbleiben und ihre wirtschaftliche und soziale Entwicklung eingeschränkt wird.

Die Entwicklung und Implementierung von Quantentechnologien erfordern finanzielle und personelle Ressourcen. Regierungen oder Unternehmen, die in Quantentechnologien investieren, könnten eine marktbeherrschende Stellung entwickeln. Ein Ungleichgewicht in der Verteilung von Quantentechnologien könnte entstehen, wobei nur wenige Länder oder Unternehmen Zugang zu diesen fortschrittlichen Technologien haben. Dies könnte zu globalen wirtschaftlichen und technologischen Ungleichheiten führen. Die Entwicklung von Quantentechnologien ist ein langwieriger Prozess, der kontinuierliche Anstrengungen und langfristige Planung erfordert. Dies kann für einige Staaten eine Herausforderung darstellen, insbesondere wenn kurzfristige andere wirtschaftliche oder politische Prioritäten im Vordergrund stehen. Staaten, die in der Entwicklung von Quantentechnologien zurückbleiben, könnten an technologischer Souveränität verlieren und von anderen Nationen abhängig werden. Diese Abhängigkeit könnte ihre Fähigkeit einschränken, eigene technologische Innovationen zu entwickeln und ihre wirtschaftliche Unabhängigkeit zu wahren.

Die Verfügbarkeit von Quantentechnologien ist mit Risiken für die nationale Sicherheit verbunden. Theoretische Arbeiten zeigen, dass Quantencomputer bestehende Verschlüsselungsmethoden knacken können, was zu erhöhten Risiken für die Cybersicherheit führt. Das bedeutet, dass vertrauliche Informationen und Kommunikationskanäle von staatlichen Stellen, Unternehmen und Bürgern gefährdet sein könnten. Mit leistungsfähigen Quantencomputern könnten neue Methoden für Cyberangriffe entwickelt werden, die schwerer abzuwehren sind und größere Schäden verursachen können. Quantensensoren könnten in militärischen Anwendungen eingesetzt werden, um die Genauigkeit von Navigationssystemen, Waffensystemen und Überwachungstechnologien zu erhöhen. Staaten, die diese Technologien kontrollieren, könnten ihren Einfluss und ihre Macht auf der globalen Bühne ausweiten, was zu Instabilitäten und Konflikten führen könnte. Auf globaler Ebene besteht die Gefahr eines globalen Rüstungswettlaufs.

Vor diesem Hintergrund soll im Folgenden analysiert werden, wie die deutsche F&I-Politik die Quantentechnologien fördert und was Deutschland aus den Erfahrungen in anderen Ländern

lernen kann. Dabei sollen die Ziele, Programme und Meilensteine für den Aufbau eines „Quanten-Ökosystems“ in den USA, Kanada, China, Japan, Südkorea, der EU, Großbritannien und Frankreich betrachtet werden.

Tabelle 12: Eckdaten der nationalen Quantenstrategien ausgewählter Länder

Land	Strategie	Zentrale Programme/ Initiativen	Budget	Laufzeit
Deutschland	Handlungskonzept Quantentechnologie	Fachprogramm Quantensysteme Fachprogramm IT-Sicherheit Quantencomputing Initiative	3 Mrd. Euro	2023-2026
EU	Quantum Flaship	EuroHPC EuroQCI	1 Mrd. Euro	2018-2028
Frankreich	Quantum Plan - France National Quantum Strategy		1,8 Mrd. Euro	2021-2025
Großbritannien	National Quantum Strategy (NQS)	National Quantum Technologies Programme (NQTP)	NQS: £2.5 B (ca. 2,97 Mrd. Euro) NQTP: £1 B	NQS: 2023-2033 NQTP: 2014-2024
China	Made in China 2025 14th Five-Year-Plan	National Key R&D Projects National Laboratory of Quantum Information	Geschätzt 15 Mrd. Euro	Bis 2025 2021-2025
Japan	Quantum Technology Innovation Strategy Vision of Quantum Future Society	Moonshot R&D Program Quantum Innovation Hubs	259 Mrd. Yen (~1.5 Mrd. Euro) Haushaltsjahr 2018-2023	2018-2023

Südkorea	Korea's National Quantum Strategy	3 Mrd. Won (ca. 2 Mrd. Euro)	2023-2035
USA	National Quantum Initiative Act	1,2 Mrd. USD (ca. 1,1 Mrd. Euro)	2019-2023
Kanada	Canada's National Quantum Strategy	360 Mio. CAD (ca. 240,9 Mio. Euro)	2021-2028

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von [146, 157]

5.2 Analyse der F&I-Politik ausgewählter Länder für Quantentechnologien

5.2.1 Deutschland

Die Bundesregierung hat im Jahr 2018 das Rahmenprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ aufgelegt, um die Förderung der Quantentechnologien in Deutschland voranzutreiben [158]. Im Jahr 2020 wurde ein umfangreiches Konjunktur- und Zukunftspaket mit einem Volumen von 130 Milliarden Euro aufgelegt, um die Folgen der Corona-Krise zu bekämpfen [159]. Für die Förderung der Quantentechnologien sind 2 Milliarden Euro veranschlagt worden. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF stellt rund 1,1 Milliarden Euro bis 2025 für die Förderung der Quantentechnologien zur Verfügung. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz BMWK investiert rund 740 Millionen Euro in das Quantencomputing im gleichen Zeitraum [160].

Die Bundesregierung hat im Jahr 2023 das Handlungskonzept Quantentechnologien verabschiedet, das bis zum Jahr 2026 den forschungs- und innovationspolitischen Rahmen für die Förderung von Quantentechnologien und deren Anwendung in Deutschland bildet. Die deutsche Quantenstrategie sieht Investitionen in Höhe von 3 Milliarden Euro vor. Die beteiligten Ressorts (Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, Bundesministerium der Finanzen, Bundesministerium des Innern und für Heimat, Bundesministerium der Verteidigung, Bundesministerium für Gesundheit und Bundesministerium für Digitales und Verkehr) investieren rund 2,18 Milliarden Euro, die von der Bundesregierung mitfinanzierten Wissenschaftsorganisationen stellen weitere 850 Millionen Euro bereit [161].

Das Ziel der Bundesregierung besteht darin, dass Deutschland und Europa durch gezielte und langfristige Förderung der Quantentechnologien eine internationale Spitzenposition einnehmen und diese Position festigen. Die Innovationskraft und technologische Souveränität in den Quantentechnologien soll gesichert und weiter ausgebaut werden. Das übergeordnete Ziel wird in drei Handlungsfelder unterteilt. Erstens sollen Quantentechnologien für Wirtschaft, Gesellschaft und staatliche Institutionen nutzbar gemacht werden. Dies beinhaltet die Förderung des Technologie-Transfers und der Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen und Unternehmen, die Entwicklung von Anwendungen, die wirtschaftlichen und gesellschaftlichen

Nutzen bieten, sowie Beiträge zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen. Zweitens wird die Technologieentwicklung mit Blick auf künftige Anwendungen zielgerichtet vorangetrieben. Hierbei wird die Förderung der Grundlagenforschung und angewandter Forschungsvorhaben im Bereich der Quanten- und Basistechnologien betont. Zusätzlich wird der Aufbau und Ausbau von Infrastrukturen, wie beispielsweise für Quantencomputer und Quantenkommunikationsnetzwerke, aber auch für vertrauensvolle Test- und Zertifizierungsverfahren, vorangetrieben. Des Weiteren sollen raumfahrttaugliche und marktfähige Schlüsselkomponenten und Produkte entwickelt und in den Markt gebracht werden. Drittens sollen exzellente Rahmenbedingungen für ein starkes Ökosystem geschaffen werden. Dies umfasst die Sicherstellung einer engen Vernetzung aller Akteure, die Stärkung der Ausbildung und Qualifizierung von Fachkräften sowie die Förderung eines positiven Gründungsklimas. Darüber hinaus wird eine enge Zusammenarbeit mit europäischen Partnern zur Entwicklung gemeinsamer Standards und zur verantwortungsvollen Nutzung von Quantentechnologien angestrebt [162].

Zum Ende der Laufzeit des Handlungskonzepts im Jahr 2026 sollen in Deutschland je nach Technologiefeld folgende Meilensteine erreicht sein:

- **Quantencomputing:** Deutschland soll technologisch zu den führenden Standorten im Quantencomputing außerhalb der EU aufschließen. Dies umfasst die Verfügbarkeit und Leistungsfähigkeit von Quantenhardware hinsichtlich Skalierung, Fehlerraten und Fehlerkorrektur. Ein international wettbewerbsfähiger Quantenrechner mit mindestens 100 individuell ansteuerbaren Qubits, der auf 500 Qubits skalierbar ist, soll bis 2026 entwickelt und in Betrieb genommen werden. Darüber hinaus soll sich das unternehmerische Ökosystem für das Quantencomputing in Deutschland entwickeln und dabei mindestens das Niveau bedeutender außereuropäischer Industriestaaten wie den USA oder Japan erreichen. Entsprechende Programme werden insbesondere vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) unterstützt [162].
- **Quantensensorik:** Hier sollen vielversprechende technologische Entwicklungen in die Anwendung gebracht werden. Fünf neue Produkte in der Quantensensorik sollen auf den Markt kommen, sowie optische Uhren, die die Anforderungen der nächsten Generation der Galileo-Uhren erfüllen. Entsprechende Programme werden insbesondere vom BMBF und vom BMWK gefördert [162].
- **Quantenkommunikation:** Hier soll die Etablierung von ersten abhörsicheren, quantenverschlüsselten Kommunikationsteststrecken zwischen ausgewählten Behördenstandorten erfolgen. Weitere Unternehmensgründungen zur Realisierung eines bundesweiten Glasfaser-Backbones für die Quantenkommunikation sowie die Zeit- und Frequenzverteilung sind geplant. Es sollen erste Teststrecken für Quantenrepeater demonstriert und Testsatelliten zur Quantenschlüsselverteilung gestartet werden. Zudem wird eine Strategie der Bundesregierung für die Migration zu Post-Quanten-Kryptografie in Deutschland erstellt und die Migration in sicherheitskritischen Bereichen eingeleitet. Beteiligt sind das BMBF, BMF, BMI, BMWK und BMVg [162].

Ministerien und Behörden

Das **Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF)** übernimmt in Deutschland die Koordination der Quantenstrategie. Das BMBF arbeitet eng mit den zuständigen Bundes- und Landesministerien sowie der Europäischen Kommission zusammen, um die Umsetzung

der Quantenstrategie zu koordinieren und sicherzustellen, dass die Ziele erreicht werden. Weitere beteiligte Bundesministerien sind: das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), das Bundesministerium der Finanzen (BMF), das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg), das Bundesministerium des Innern und für Heimat (BMI) sowie das Bundesministerium für Digitales und Verkehr (BMDV). Diese Ministerien tragen zur Förderung, Regulierung und Unterstützung der Quantentechnologie bei. Besonders das BMBF und das BMWK sind für die Bundesförderung verantwortlich. Darüber hinaus sind einige Bundesländer aktiv in der Förderung der Quantentechnologien, darunter Bayern, Baden-Württemberg, Berlin, Hamburg, Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Thüringen.

Expert:innen berichten, dass die Koordination zwischen den zuständigen Ministerien und Behörden über Gremien und Austauschformate erfolge. Die Zusammenarbeit zwischen den Bundesministerien erstreckt sich über alle Ebenen, von den Staatssekretären bis hin zu den Referaten. Darüber hinaus wurde eine Bund-Länder-Arbeitsgruppe eingerichtet. Die befragten Expert:innen sind sich nicht einig, ob die Koordination über die unterschiedlichen Ebenen EU, Bund und Länder gut funktioniert. Ein wesentlicher Grund für diese Uneinigkeit liege, laut der befragten Expert:innen, an föderalen Strukturen. Einige Bundesländer und die EU haben eigene Strategien und Programme aufgelegt, was den Wettbewerb verstärke und den Aufbau von Doppelstrukturen begünstige. Dies könne zu Ineffizienzen und einer Fragmentierung im Aufbau eines „Quanten-Ökosystem“ führen. Zudem erschwert es die Abstimmung und Koordination, wenn unterschiedliche Ebenen und Akteure eigene Prioritäten verfolgen und könne zu einer mangelnden Kohärenz in der Umsetzung führen.

Für die Förderung der Quantenkommunikation sind die Cybersicherheitsstrategie und die Leitlinie Hyperkonnektivität ebenfalls relevant. Das BMBF arbeitet hier u.a. mit dem BMI und dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), dem BMVD und der der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) zusammen.

Zentrale Programme, Maßnahmen und Initiativen

Die Bundesregierung verfolgt einen technologieoffenen und ganzheitlichen Förderansatz für die drei Technologiefelder Quantencomputing, Quantenkommunikation und Quantensensorik. Diese sind eng miteinander verknüpft und basieren auf ähnlichen Komponenten und Basistechnologien. Einige befragte Expert:innen weisen darauf hin, dass es wichtig sei, diese Zusammenhänge zwischen den Technologiefeldern und deren Fortschritte in der weiteren strategischen Planung zu berücksichtigen. Zu einem späteren Zeitpunkt könnten sich spezifische Schwerpunkte in den Technologiefeldern herauskristallisieren. Der Entwicklungsstand der Quantentechnologien variiert: Während die Sensorik weiter fortgeschritten ist, befindet sich das Quantencomputing noch in einer früheren Phase. Einige Expert:innen berichten, dass es aktuell unklar ist, welche technologischen Ansätze, insbesondere im Quantencomputing, sich letztendlich durchsetzen werden.

Das Handlungskonzept folgt einem Vier-Jahres-Zyklus, der grob mit der Legislaturperiode übereinstimmt. Die Umsetzung erfolgt in Programmen und Initiativen, welche primär auf eine öffentliche Kofinanzierung mit dem Ziel, private Initiativen und Investitionen in Deutschland zu fördern, setzen. Die Umsetzung erfolgt über unterschiedliche Instrumente, etwa Projektförderung (insbesondere Verbundprojekte mit Unternehmensbeteiligung) oder Aufträge der öffentlichen Hand.

Das breite Förderportfolio bietet ein vielfältiges Angebot. Die Quantenstrategie setzt keine technologischen Schwerpunkte und fördert nicht exklusiv einen bestimmten Technologieansatz. Befragte Expert:innen unterstreichen, dass die Förderdualität des BMBF und des BMWK ein breites Spektrum entlang des Innovationsprozesses abdeckt, von den Grundlagen bis hin zu Produkten, auch wenn es für Quantentechnologien noch keinen richtigen Markt gibt. Im Folgenden werden die zentralen Programme und Initiativen dargestellt.

Besonders hervorzuheben sind die folgenden technologieoffenen BMBF-Programme:

- Das **Forschungsprogramm Quantensysteme** des BMBF ist auf zehn Jahre angelegt, was einen langfristigen Planungshorizont bietet, um den technischen Herausforderungen gerecht zu werden. Das Programm fokussiert sich auf die Quantentechnologien (Quantencomputing, -Kommunikation, -Sensorik, -Messtechnik, -Materialien und -Simulation) und Photonik [163]. Der lange Planungshorizont soll auch ein Signal an die Community senden, dass ein langfristiges Engagement in diesem Bereich angestrebt wird. Im Gegensatz zum Quantencomputing ist in der Quantensensorik eine frühere Marktreife erreichbar, wie erste Unternehmen bereits durch die Einführung von Produkten zeigen.
- Das **Forschungsrahmenprogramm IT-Sicherheit** ist auf fünf Jahre angelegt und fokussiert sich auf den Schutz von Informationssystemen und die Entwicklung sicherer IT-Infrastrukturen, insbesondere im Hinblick auf zukünftige Bedrohungen durch Quantencomputer. Das Programm hat ein Budget von mindestens 350 Millionen Euro [158, 164]. Die Förderung der Quantenkommunikation ist seit 2015 ein Teil des Forschungsrahmenprogramm und umfasst Themen wie Quantenkryptographie (QKD) und Post-Quantum-Kryptographie [165]. Befragte Expert:innen skizzieren, dass mit zunehmender Anwendungsreife die Anforderungen an die Vorhaben (Partnerstruktur, Förderquote, Laufzeiten) steigen und die Einbindung von Unternehmen und Umsetzungspartnern Fördervoraussetzung ist, z. T. müssen Unternehmen in industriegeführten Verbänden die Koordination übernehmen.

Das BMBF verfolgt eine ergebnisoffene Forschungsförderung, um neue und unerwartete Erkenntnisse zu gewinnen, die Funktionsweise experimentell nachzuweisen und Prototypen bzw. Demonstratoren zu entwickeln. Befragte Expert:innen berichten, dass die projektbasierte Verbundförderung einen Schwerpunkt bildet. In anwendungsorientierten F&E Vorhaben sollen Hochschulen und Forschungseinrichtungen gemeinsam mit Umsetzungs- und Verwertungspartnern aus der Wirtschaft an konkreten Lösungen arbeiten. Darüber hinaus fördert das BMBF den Aufbau von Infrastrukturen, z. B. die Erweiterung der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) durch das Modul Quantensysteme und Neuromorphe Computer (QNC), die Quantencomputer-Demonstrationsaufbauten oder Quantenkommunikationsnetze (z. B. QuNET, DemoQuanDT). Einige wissenschaftliche Vorprojekte (grundlagennahe Projekte) und Begleit- und Vernetzungsprojekte wie SQuaD (Schirmprojekt Quantenkommunikation) oder Q.E.D. (Begleitprojekt Quantencomputing) ergänzen das Förderinstrumentarium. Im Gegensatz dazu fördert die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) grundlegende Fragestellungen in den Quantentechnologien. Ziel ist es, ein tieferes Verständnis der Quantenmechanik zu erlangen, das später möglicherweise für die Technologieentwicklung genutzt werden kann.

Die Förderung des Quantencomputings unterscheidet sich von der Förderung der Quantensensorik und Quantenkommunikation. Einige Expert:innen weisen darauf hin, dass die Quantensensorik und Quantenkommunikation technologisch weiter in der Entwicklung sind und Unternehmen erste kommerzielle Produkte anbieten. Für die F&I-Politik ist es gemäß der Befragten

vorteilhaft, dass die Technologiefelder unterschiedliche Reifegrade haben. Dies ermöglicht eine gezielte Allokation von Fördergeldern, die auf die spezifischen Bedürfnisse und Entwicklungsstufen der einzelnen Technologiefelder abgestimmt sind. Beispielsweise fordert das BMBF in der Förderung Quantenkommunikation teilweise, dass Unternehmen die Koordination von Vorhaben übernehmen oder Anwender (Sicherheitsbehörden) in die Projekte eingebunden werden. In der Wissenschaft können sich Forschende auf Forschungslücken in ihrem jeweiligen Feld konzentrieren, während Unternehmen in der Wirtschaft strategisch planen und Ressourcen in Technologien mit kürzeren Markteinführungszeiten investieren können.

Der Dualismus zwischen BMBF und BMWK zeigt sich in unterschiedlichen Instrumenten, die auf verschiedene Phasen im Innovationsprozess abzielen. Das BMWK fördert in den Quantentechnologien u.a. die **DLR-Quantencomputing-Initiative (QCI)** zum Aufbau von zwei Innovationszentren an den Standorten in Hamburg und Ulm. Der Großteil der 740 Millionen Euro Förderung fließt in den Aufbau der Infrastruktur und rund 20 Prozent der Mittel nutzt das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) für eigene F&E-Aktivitäten. Das DLR beschafft verschiedene Quantencomputersysteme über öffentliche Aufträge und baut diese an den beiden Standorten auf. Das BMWK vergibt über die QCI gezielte Aufträge an Start-ups. Diese sollen die Realisierbarkeit von verschiedenen Hardwareplattformen für Quantencomputersysteme unter konkreten Vorgaben demonstrieren, z. B. durch die Erfüllung der Leistungsanforderungen in den Ausschreibungen und den Bau der Systeme. Diese können von interessierten Anwendern aus der Wirtschaft genutzt werden. Hierzu bewerben sich Unternehmen auf Anwendungsprojekte beim DLR, die dann zusammen mit DLR-Forschenden umgesetzt werden. Darüber hinaus können Unternehmen die Reinräume, Büros, Werkstätten und Labore in den Innovationszentren nutzen [166].

Darüber hinaus fördert das BMWK an der PTB den Aufbau des **Quantentechnologie-Kompetenzzentrum (QTZ)**. [167]

Einige Bundesländer haben ebenfalls Förderinitiativen für Netzwerke und Projekte aufgelegt, darunter:

- Bayern fördert und koordiniert die Landesinitiative über das **Munich Quantum Valley** mit 80 Millionen Euro [168]
- Baden-Württemberg fördert und koordiniert die Landesinitiative über das **QuantumBW** mit 115 Millionen Euro [169]
- Berlin fördert und koordiniert die Landesinitiative über **Berlin Quantum Alliance** mit 25 Millionen Euro [170]
- Hamburg fördert und koordiniert die Landesinitiative über **Hamburg Quantum Innovation Capital** mit 34,1 Millionen Euro, ein Schwerpunkt bildet das Quantencomputing [171]
- Niedersachsen fördert und koordiniert die Landesinitiative über **Quantum Valley Lower Saxony** mit 25 Millionen Euro aus dem Programm „Niedersächsischen Vorab“ zusammen mit der VolkswagenStiftung [172]
- Nordrhein-Westfalen fördert und koordiniert die Landesinitiativen über **EIN Quantum NRW** mit 20 Millionen Euro [173]
- Thüringen fördert und koordiniert die Landesinitiative **Quantum Hub Thüringen** mit 6 Millionen Euro [174]

Aktueller Stand der Umsetzung

Das Handlungskonzept Quantentechnologien ist im April 2024 veröffentlicht worden. Befragte Expert:innen berichten, dass zum aktuellen Zeitpunkt keine Entwicklungen absehbar sind, die eine Anpassung der deutschen Quantenstrategie erfordern. Das Konjunkturpaket hat einen Boost für die Förderung der Quantentechnologien bewirkt, wodurch umfangreiche F&E-Investitionen erst möglich wurden. Die Förderung von Querschnittsthemen wie Bildung, Vernetzung, Wissenschaftskommunikation aber auch die Entwicklung von Standards und Normen sind wichtige Handlungsfelder.

- Das BMBF begrüßt ausdrücklich, dass sich über 20 EU-Mitgliedschaften zur engen Zusammenarbeit im Bereich der Quantentechnologien verpflichtet haben, darunter Deutschland [175].
- Im Quantencomputing sind zwei Förderansätze besonders hervorzuheben. Zum einen die DLR-Quantencomputing-Initiative, die mit 740 Millionen Euro aus Mitteln des BMWK gefördert wird. Zum anderen die BMBF-Fördermaßnahme „Quantencomputer-Demonstrationsaufbauten“, die mit ca. 347,8 Millionen Euro durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert wird. Flankierend sind weitere Maßnahmen auf den Weg gebracht worden. Beide Förderansätze sind technologieoffen, d. h. es werden verschiedene Technologieplattformen (NV-Zentren, Ionen-Fallen, Neutral Atome, Photonen, Supraleitende Materialien) gefördert.
- Die DLR-Quantencomputing-Initiative fördert den Aufbau der Infrastruktur und die Validierung von Anwendungsbeispielen. Hierzu bewerben sich Unternehmen auf Anwendungsprojekte beim DLR, die dann zusammen mit Expert:innen der Innovationszentren umgesetzt werden. Im ersten Halbjahr 2024 sind die ersten Quantencomputer in Betrieb genommen worden [176].
- Die Fördermaßnahme „Quantencomputer-Demonstrationsaufbauten“ fördert den Aufbau von Quantencomputern an neuen Standorten in Deutschland bis 2026. Über 100 Organisationen aus Forschung und Industrie arbeiten in Verbundprojekten aus Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen eng zusammen. Ziel dieser Verbundprojekte ist es, jeweils Quantencomputer mit mind. 100 Qubits zu entwickeln und Anwendern den Zugang über Cloud-Dienste zu ermöglichen. Die Förderung umfasst ca. 347,8 Millionen Euro aus dem BMBF und privaten Mitteln, der öffentliche Anteil beträgt rund 90 Prozent [177]. Am Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften (LRZ) wurde im Juni 2024 erstmals ein Quantencomputer in einem Höchstleistungsrechner, dem SuperMUC-NG, integriert [178]. Dieser ist vergleichbar mit der Leistung des IBM Quantum System One in Ehningen. Die Infrastruktur wurde von der EU-Kommission im Rahmen der European High Performance Computing Joint Undertaking (EuroHPC JU) ausgewählt und wird einer von sechs europäischen Standorten für hybride Supercomputer [179].
- Die Förderung der Quantenkommunikation innerhalb des Rahmenprogramms IT-Sicherheit läuft bis 2025. Einige Expert:innen berichten, dass eine Neuauflage des Programms geplant sei. Erste Erfolge in der Quantenkommunikation, z. B. der Start der Hauptphase des zweiten Schlüsselexperiments. Erstmals werden mehrere Nutzer in über 125 km Glasfaser- und Freistrahilverbindungen quantensicher miteinander verbunden.

- Die QuNET-Initiative ist ein Projekt zur Entwicklung eines nationalen Quantenkommunikationsnetzwerks, das sichere Kommunikationsinfrastrukturen unter Nutzung von Quantenverschlüsselungstechnologien aufbauen soll. Die Unternehmensbeteiligung soll bis zum Jahr 2026 schrittweise gesteigert werden, um den Transfer in kommerzielle Anwendungen zu ermöglichen [165]. Die QuNET-Initiative hat ein Fördervolumen von 125 Millionen Euro bis 2026. DemoQuantDT ist die erste Teststrecke für Quantenkommunikation zwischen Bonn und Berlin. Das Projekt wird von der Deutschen Telekom koordiniert und mit 15,2 Millionen Euro durch den Bund gefördert [180]. Ursprünglich lag der Fokus auf der Förderung der Grundlagenforschung, doch nun wird mehr Wert auf Anwendungen gelegt und es gibt mehr Unternehmensbeteiligung. Im Jahr 2021 wurde der erste Quantum-Wettbewerb zur Entwicklung von Quantenspeichern ausgelobt.

SWOT-Analyse

Tabelle 11: SWOT-Analyse der F&I-Politik in den Quantentechnologien in Deutschland

<p>Strength</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es gibt eine Strategie und entsprechende Programme • F&E-Förderung entlang der Wertschöpfungskette, der Transfer in Industrie wird früh adressiert • Umfassende staatliche Förderung durch Bundesregierung • Exzellente Grundlagenforschung, führende F&E-Einrichtungen, gute Grundlagen und kritische Masse an Talenten, um Fortschritte zu erzielen 	<p>Weakness</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fachkräftemangel könnte den Erfolg der Fördermaßnahmen gefährden • Wettbewerb um Fachkräfte wird durch umfangreiche Investitionen intensiviert • Exzellente Forschungsergebnisse werden nicht systematisch in Wertschöpfung überführt • Es fehlt an Risikokapital und umfangreichen Investitionen aus Unternehmen
<p>Opportunities</p> <ul style="list-style-type: none"> • Funktionierende Innovationsnetzwerke zwischen Wissenschaft und Wirtschaft • Starke Industriebasis in bestimmtem Bereich (z. B. Photonik, Sensorik) • Synergien mit EU-Initiativen: EIC, Equity-Beteiligung über EIB, DeepTechFund • Internationale Führungsrolle noch nicht definiert, Deutschland hat Potenzial mit den USA mithalten und globalen Footprint zu setzen • Starke Anwenderbasis in der Sensorik, weite Teile der Wertschöpfungskette sind abgedeckt 	<p>Threat</p> <ul style="list-style-type: none"> • QT ist noch ein Forschungsthema, Risiken sind schwer absehbar, Anwendungen teils noch sehr unklar

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

5.2.2 Frankreich

Frankreich hat eine lange Tradition in der Grundlagenforschung und als Standort zahlreicher renommierter Forschungsinstitute und Universitäten. Frankreichs Quantenstrategie aus dem Jahr 2021 basiert teilweise auf einem umfassenden Bericht der Parlamentsabgeordneten Paula Forteza, dem CNRS-Forscher Iordanis Kerenidis und dem ehemaligen Safran-Chef Jean-Paul Herteman. Der sogenannte Forteza-Bericht „Quantique: le virage technologique que la France ne ratera pas“ betont die Exzellenz der französischen Forschung, aber auch den Rückstand des Landes bei den Investitionen, insbesondere im Hinblick auf den Technologietransfer in die Industrie [181]. Die französische Regierung reagierte mit der Veröffentlichung der **nationalen Quantenstrategie (Stratégie nationale pour les technologies quantiques)** auf ähnliche Entwicklungen in den USA, China, Großbritannien oder Deutschland [182, 183].

Die französische Quantenstrategie zielt darauf ab, weltweit eine Führungsposition in den Quantentechnologien zu entwickeln und ein technologisches, souveränes Ökosystem in einer Zukunftstechnologie aufzubauen. Die französische Quantenstrategie sieht Investitionen in Höhe von 1,8 Milliarden Euro über einen Zeitraum von fünf Jahren vor (2021 bis 2026). Das geplante Budget setzt sich aus 1 Milliarde Euro aus öffentlichen Mitteln und 800 Millionen Euro aus privaten Investitionen zusammen. Die öffentlichen Mittel für die nationale Quantenstrategie stammen aus dem Konjunkturprogramm (France Relance) und dem Programm für Zukunftsinvestitionen (Programme d'investissements d'avenir, PIA4) [184].

Die französische Quantenstrategie ist nicht auf ein bestimmtes Technologiefeld beschränkt. Die Strategie fokussiert sich auf Quantencomputing, Quantenkommunikation und Quantensensorik. Darüber hinaus umfasst sie Basistechnologien wie Kryogenik, rauscharme Elektronik und Laser. Im Bereich der Forschung und Entwicklung wird die Stärkung der Grundlagenforschung in der Quantenmechanik sowie die Unterstützung der angewandten Forschung in Technologien wie Quantencomputing und Quantensensoren angestrebt. Darüber hinaus wird der Aufbau und die Erhaltung modernster Einrichtungen für die Quantenforschung und -entwicklung unterstützt. Gleichzeitig wird die industrielle Entwicklung gefördert, indem die Gründung von Startups und die Unterstützung etablierter Unternehmen im Bereich der Quantentechnologie vorangetrieben werden, um ein robustes Ökosystem zu schaffen, das global wettbewerbsfähig ist. Hierzu zählen die Schaffung eines unterstützenden regulatorischen Rahmens, der das Wachstum von Quantentechnologien erleichtert und gleichzeitig Sicherheits- und ethische Fragen adressiert. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Bildung und Qualifizierung von Fachkräften durch Bildungsprogramme in den Quantentechnologien. Die Kooperationen mit anderen Ländern und internationalen Organisationen sollen die Forschung und Anwendung von Quantentechnologien vorantreiben. Die Nutzung von Quantentechnologien soll zur Verbesserung der nationalen Sicherheit beitragen, insbesondere in den Bereichen Kommunikation und Kryptographie. [183]

Die Strategie gliedert sich in sieben strategische Zielfelder [185]:

- Entwicklung und Verbreitung von NISQ-Simulatoren und -Beschleunigern, hierfür sind 352 Millionen Euro Förderung vorgesehen;
- Entwicklung eines Quantencomputers, der die LSQ-Skala übersteigt, hierfür sind 432 Millionen Euro Förderung vorgesehen;
- Entwicklung von Quantensensortechnologien und -anwendungen, hierfür sind 258 Millionen Euro Förderung vorgesehen;

- Entwicklung und Verbreitung von Post-Quanten-Kryptographie-Verfahren, hierfür sind 156 Millionen Euro Förderung vorgesehen;
- Entwicklung von Quantenkommunikationssystemen, hierfür sind 325 Millionen Euro Förderung vorgesehen;
- Entwicklung eines wettbewerbsfähigen Basistechnologieangebots, hierfür sind 292 Millionen Euro Förderung vorgesehen;
- Entwicklung des Ökosystems.
- In der Strategie werden die folgenden spezifischen Ziele definiert:
- Führungsrolle in der Quantentechnologie: Frankreich soll bis 2030 zu den weltweit führenden Nationen im Bereich der Quantenforschung gehören. Das F&I politische Ziel ist es, 16.000 direkte Arbeitsplätze zu schaffen und zwischen 1-2 Prozent des französischen Exports mit Quantentechnologien zu erwirtschaften [185].
- Entwicklung von Quantencomputern: Bis 2023 sollen erste funktionale Prototypen eines Hybridcomputers mit einem Quantenbeschleuniger von mindestens 100 Qubits entwickelt und getestet werden [185].
- Förderung von Quantenkommunikation: Implementierung sicherer Quantenkommunikationsnetze in strategischen Sektoren wie Verteidigung und kritische Infrastrukturen. Das Hauptziel der Förderung von Quantenkommunikation ist es, Frankreich und Europa technologisch unabhängig zu machen und ihre Souveränität in sicherheitskritischen Bereichen zu stärken. Durch die Beherrschung von Quantenkommunikationslösungen können Abhängigkeiten von ausländischen Technologien reduziert und die strategische Autonomie erhöht werden [185].
- Kommerzialisierung von Quantenanwendungen: Unterstützung der Industrie bei der Entwicklung und Markteinführung von Quantenprodukten und -dienstleistungen. Frankreich soll bis 2030 das erste Land sein, das die gesamte Wertschöpfungskette abbildet, um Qubits auf Basis von Silizium-28 zu produzieren. Die internationale Wettbewerbsposition in den Basistechnologien Kryotechnik oder Laser für Quantentechnologien soll gestärkt werden [185].
- Bildung und Ausbildung: Ausbildung von mindestens 5000 Fachkräften auf verschiedenen Ebenen, vom Techniker bis hin zur Wissenschaftlerin [186]. Dazu werden mindestens 100 Abschlussstipendien, 50 Postdocs und 10 weitere junge Talentstipendien pro Jahr vergeben [185].

Ministerien und Behörden

Die französische Quantenstrategie ist ein umfassendes und ehrgeiziges Programm, das von einer Vielzahl von Stakeholdern getragen wird. Die Koordination der nationalen Quantenstrategie wird von einem zentralen Koordinierungsgremium übernommen, das beim Generalsekretariat für Investitionen (Secrétariat général pour l'investissement, SGPI) angesiedelt ist. Das SGPI arbeitet eng mit den verschiedenen Ministerien, Forschungseinrichtungen, Industriepartnern und anderen Stakeholdern zusammen, um die Umsetzung der Quantenstrategie zu koordinieren und sicherzustellen, dass die Ziele erreicht werden.

Neben dem **Ministerium für Hochschulbildung, Forschung und Innovation** (Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche) sind mehrere andere Ministerien an der Umsetzung der französischen Quantenstrategie beteiligt. Das **Ministerium für Wirtschaft, Finanzen und die industrielle und digitale Souveränität** (Ministère de l'Économie, des Finances et de

la Souveraineté industrielle et numérique) spielt eine zentrale Rolle bei der Bereitstellung der finanziellen Mittel und der Förderung von Investitionen in Quantenunternehmen. Es unterstützt auch die wirtschaftliche Entwicklung und die Kommerzialisierung von Quantentechnologien. Das **Ministerium für Verteidigung** (Ministère des Armées) ist an der Entwicklung von Quantentechnologien mit Anwendungen in der nationalen Sicherheit und Verteidigung interessiert. Es investiert in Forschungsprojekte und arbeitet mit anderen Ministerien und Forschungseinrichtungen zusammen, um sicherheitsrelevante Quantenanwendungen zu entwickeln.

Das CNRS ist eine der führenden Forschungsorganisationen in Frankreich und spielt eine zentrale Rolle bei der Durchführung von Forschungsprojekten im Bereich der Quantentechnologien. Es arbeitet eng mit Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen zusammen, um innovative Lösungen zu entwickeln. Das Nationale Institut für Informatik und Automatikforschung (INRIA) ist ein weiterer wichtiger Akteur. INRIA konzentriert sich auf die Entwicklung von Quantenalgorithmien und Softwarelösungen, die für den Betrieb von Quantencomputern notwendig sind. CEA-Leti ist ein führendes Forschungsinstitut im Bereich der Mikro- und Nanotechnologien und spielt eine Schlüsselrolle bei der Entwicklung von Quantenhardware. Das Institut arbeitet an der Entwicklung von Quantenprozessoren und anderen technologischen Komponenten, die für die Umsetzung der Quantenstrategie erforderlich sind. Mehrere französische Universitäten, darunter die Universität Paris-Saclay, die Universität Grenoble Alpes und die Universität Sorbonne, sind aktiv an der Forschung und Ausbildung im Bereich der Quantentechnologien beteiligt. Diese Universitäten bieten spezialisierte Studiengänge und Forschungsprogramme an, um die nächste Generation von Quantenwissenschaftlern und -ingenieuren auszubilden.

Zentrale Programme, Maßnahmen und Initiativen

Die französische Quantenstrategie ist breit gefächert und umfasst eine Vielzahl von Programmen und Initiativen, die auf die Förderung von Forschung, Infrastruktur, Bildung, Industrie, internationaler Zusammenarbeit und sicherheitsrelevanten Anwendungen abzielen. Hier sind die wichtigsten Programme:

Das **Priority Quantum Research Programme and Equipment (PEPR)** ist Teil der nationalen Quantenstrategie. Ziel ist es, Forschung zu unterstützen, die von der Grundlagenforschung bis zum Machbarkeitsnachweis reicht (etwa TRL 1 bis 4). Frankreich soll auf höchstem internationalem Niveau in Wissenschaft und Industrie in diesem Bereich konkurrieren und die Entwicklung eigener Lösungen ermöglichen, um Unabhängigkeit in diesem wichtigen Bereich zu sichern [187]. Das Programm hat ein Budget von 150 Millionen Euro über fünf Jahre und wird vom CNRS, der CEA und INRIA koordiniert. Das PEPR hat zwei Finanzierungskomponenten: eine für schnelle Umsetzungen und eine für bahnbrechende Konzepte. Zehn Projekte werden von international anerkannten Wissenschaftlern geleitet und durch die Nationale Agentur für Forschungsförderung (Agence Nationale de la Recherche, ANR) verwaltet. Es konzentriert sich auf robuste Festkörper-Qubits und kalte Atom-Qubits für Quantencomputing und Sensoren, Quantenalgorithmien und Quantenkommunikation [188].

Die Regierung hat ein **Industrieentwicklungsprogramm** zu Entwicklung von Qubits auf Basis von Silizium-28, Kryotechnik und Lasern aufgelegt. Das Programm fördert Verbundprojekte mit fortgeschrittener technologischer Reife (TRL3-6), die nahe am Markt sind, aber ein hohes technologische Risiko aufweisen [188].

Die Regierung startete im März 2024 das **PROQCIMA-Programm**. Die Generaldirektion für Rüstungswettmaßnahmen und das Generalsekretariat für Investitionen sind für die Steuerung des Programms zuständig. Die Gesamtinvestition beträgt bis zu 500 Millionen Euro. Das Ziel dieses Programms ist es, bis 2032 mindestens zwei Prototypen universeller Quantencomputer mit 128 Logik-Qubits zu realisieren, bis 2035 skaliert auf 2048 Logik-Qubits. Das PROQCIMA-Programm ist als Wettbewerb strukturiert, der in drei Phasen abläuft (Konzept, Reifung und Industrialisierung). Das Programm beginnt mit fünf Unternehmen und wird bis zum Ende der ersten Stufe auf drei reduziert, d.h. nur die drei vielversprechendsten Vorhaben werden das Programm über vier Jahre hinaus fortsetzen. Nach acht Jahren wird sich der Wettbewerb auf die beiden erfolgreichsten Vorhaben beschränken, die das Programm bis zu seinem Abschluss fortsetzen werden [189].

Die **France Hybrid HPC Quantum Initiative (HQI)** ist ein Forschungsprogramm, das den Erwerb mehrerer Quantentechnologien fördert. Diese Systeme werden mit dem europäischen Supercomputer Joliot Curie des GENCI gekoppelt. Das CEA verwaltet dieses Programm mit einem Budget von 72,3 Millionen Euro. Die Regierung hat GENCI mit der Anschaffung von Simulatoren und Quantencomputern im Wert von 36,3 Millionen Euro beauftragt, die durch europäische und industrielle Kofinanzierung ergänzt werden sollen. Die offene und skalierbare Plattform soll dem Forschungsbedarf gerecht werden und Anwendungsfälle in der Wirtschaft ermöglichen. Der zweite Teil des Forschungsprogramms verfügt über ein Budget von 36 Millionen Euro. Er wird vom CEA und INRIA geleitet, mit Unterstützung des CNRS und der französischen Universitäten, des IT-Herstellers Atos, des Cloud-Anbieters OVHcloud und verschiedenen Start-ups. Im Fokus steht die Entwicklung einer Programmier- und Ausführungssoftware auf hybriden Rechenressourcen, einschließlich Bibliotheken für verschiedene Anwendungsbereiche (Gesundheit, Chemie, Finanzen, maschinelles Lernen, Optimierung usw.). GENCI ist verantwortlich für die Bereitstellung und Förderung der Nutzung der Quantencomputer-Ressourcen des HQI sowie für die Verbreitung im Quanten-Ökosystem [186].

Frankreich arbeitet eng mit der Europäischen Union zusammen, um die Quantenstrategie auf europäischer Ebene zu koordinieren. Programme wie die Quantum Flagship-Initiative der EU bieten zusätzliche finanzielle Mittel und fördern die grenzüberschreitende Zusammenarbeit zwischen den Mitgliedstaaten. Frankreich hat ein bilaterales Forschungsprogramm mit den Niederlanden und im Jahr 2022 eine trilaterale Förderbekanntmachung mit Deutschland auf den Weg gebracht [190]. Neben der Zusammenarbeit innerhalb Europas hat Frankreich auch internationale Partnerschaften mit Ländern wie den USA, Kanada und Japan aufgebaut, um den Austausch von Wissen und Technologien im Bereich der Quantentechnologien zu fördern [191].

Aktueller Stand der Umsetzung

Frankreich hat bedeutende Fortschritte in der Umsetzung der Strategie erzielt. Zu den Meilensteinen gehören:

- Die Regierung hat 150 Millionen Euro in die Grundlagenforschung und 60 Millionen Euro in die Aus- und Weiterbildung investiert [183].
- In die Entwicklung hybrider Quantencomputerprototypen und die Integration in den europäischen Supercomputer Joliot Curie des GENCI wurden 72,3 Millionen Euro investiert. Die Infrastruktur wird internationalen Interessierten aus Forschung und Wirtschaft zur

Verfügung gestellt, um den Zugang zu Quantencomputer zu erleichtern und neue Anwendungsfälle zu identifizieren, zu entwickeln und zu testen [158].

- In die Förderung kritischer Industriebereiche wurden 80 Millionen Euro investiert [158].
- Nationale Programme werden eng mit europäischen Programmen koordiniert, um Redundanzen zu vermeiden und Synergien zu fördern. Zum Beispiel haben Frankreich, Deutschland und die Europäische Kommission gemeinsam zwei Quantensimulatoren im Rahmen der European High Performance Computing Joint Undertaking (EuroHPC JU) gekauft [192].

SWOT-Analyse

Tabelle 12: SWOT-Analyse der F&I-Politik in den Quantentechnologien in Frankreich

<p>Strength</p> <ul style="list-style-type: none"> • Frankreich verfügt über renommierte Forschungseinrichtungen (CNRS und INRIA) und eine lange Tradition in der Grundlagenforschung • Die französische Regierung investiert erheblich in die Quantenforschung und bietet damit eine stabile finanzielle Basis • Enge Kooperationen zwischen Universitäten, Forschungsinstituten und der Industrie 	<p>Weakness</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es gibt einen Mangel an qualifizierten Fachkräften im Bereich der Quantenforschung, was die Umsetzung verzögern kann
<p>Opportunities</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durch frühzeitige Investitionen kann Frankreich eine führende Rolle im globalen Quantenmarkt einnehmen • Potenziale in Medizintechnik und Telekommunikation, Integration in traditionelle Sektoren wie Automobil und Luftfahrt 	<p>Threat</p> <ul style="list-style-type: none"> • Starker Wettbewerb insbesondere durch europäische Nachbarn wie Deutschland und internationale Akteure wie USA und China • Technologische Risiken und Unsicherheit über wirtschaftliche Rentabilität

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

5.2.3 Großbritannien

Die britische Quantenstrategie wurde ins Leben gerufen, um Großbritannien als führende Nation im Bereich der Quantenforschung und -technologie zu etablieren. Die Strategie zielt darauf ab, die wissenschaftliche Exzellenz zu fördern, technologische Durchbrüche zu beschleunigen und die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit zu stärken. Sie soll dazu beitragen, die Herausforderungen der digitalen Transformation zu meistern und neue Anwendungen in Bereichen wie Kommunikation, Medizin und Sicherheit zu entwickeln. Die Strategie umfasst vier Hauptziele [193]:

- Weltweit führender Standort für Quantenwissenschaft und -technik, um Wissen und Fähigkeiten auszubauen;
- Unterstützung von Unternehmen, um das Vereinigte Königreich als attraktiven Standort für Quantenunternehmen, Investoren und Talenten zu positionieren und zu einem integralen Bestandteil globaler Wertschöpfungsnetzwerke zu machen;
- Nutzung von Quantentechnologien zum Vorteil der Wirtschaft und Gesellschaft und zur Verbesserung der nationalen Sicherheit;
- Gestaltung eines nationalen und internationalen Regulierungsrahmens, der Innovationen und die ethische Nutzung von Quantentechnologien unterstützt und die britischen Fähigkeiten und die nationale Sicherheit schützt.

Die Regierung hat ein zehnjähriges Forschungs- und Innovationsprogramm in Höhe von 2,5 Milliarden Pfund für den Zeitraum 2024-2034 aufgelegt, um die wissenschaftliche Exzellenz und technologische Durchbrüche zu fördern. Die Regierung erwartet, dass die Wirtschaft ebenfalls eine Milliarde Pfund bis 2034 in die Quantentechnologien investiert. Die befragten Expert:innen unterstreichen, dass die Strategie an die Förderung der Quantentechnologien in Höhe von 1 Milliarde Pfund im Zeitraum 2014-2024 anknüpft, die im Ergebnis vielversprechende Ansätze in der Photonik hervorgebracht hat.

Die Umsetzung des Forschungs- und Innovationsprogramms wird in zwei 5-Jahres-Phasen realisiert. Zu den strategischen Handlungsfeldern im Bereich Forschung, Entwicklung und Fachkräfte gehören:

- F&E-Förderung für Grundlagenforschung und industriegeführte Vorhaben, um wissenschaftliche Fortschritte zu ermöglichen und eine umfassende Anwendung der Quantenphysik zu gewährleisten;
- Investition in die Infrastruktur, darunter der Aufbau von fünf anwendungsorientierten Quantum Technology Research Hubs and Centres, weitere Finanzierung für das National Quantum Computing Centre (NQCC) und öffentliche Beschaffung von Quantencomputern;
- Fachkräfteausbildung von Hochschulabsolventen, technischen und ingenieurwissenschaftlichen Fachkräften.

Das Vereinigte Königreich verfügt über ein aufstrebendes Quantentechnologieökosystem, mit mindestens 160 Unternehmen, insbesondere KMUs [194]. Die Ökosystementwicklung soll durch die folgenden Maßnahmen unterstützt werden:

- Innovationsförderung: Diese soll darauf abzielen, die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten zu intensivieren und weitere Investitionen der Industrie zu fördern und bestehende Transferherausforderungen zu lösen. Diese Programme können Machbarkeitsprojekte umfassen, um neue Möglichkeiten zur Kommerzialisierung von Quantentechnologien zu erkunden, oder kollaborative Innovationsprojekte, die darauf abzielen, die Herausforderungen bei der Umsetzung und Kommerzialisierung von Quantenlösungen zu bewältigen.
- Unterstützung durch Test- und Zertifizierungsstellen: Das National Physical Laboratory (NPL) soll Unternehmen bis zu 20 Tage Test- und Zertifizierungsdienste kostenlos anbieten. Darüber hinaus hilft das NPL Unternehmen bei der Skalierung, also dabei, die Lücke von einem Technologieprototyp in einer Laborumgebung zu einem marktreifen Produkt zu schließen.

- Zugang zu Infrastrukturen erleichtern: Infrastruktur soll zugänglicher für Tests, Problemlösungen und Leistungsdemonstrationen werden. Geplant ist, dass das National Quantum Computing Centre (NQCC) Unternehmen Zugang zu Quantencomputing-Ressourcen auf verschiedenen Plattformen ermöglicht, um Anwendungen zu testen und zu validieren. Dafür sind 20 Millionen Pfund vorgesehen, um die Arbeit des NQCC zu unterstützen.
- Beratungsangebote schaffen: Die National Protective Security Agency (NPSA) und das National Cyber Security Centre (NCSC) bieten Unternehmen Beratung und Unterstützung an, um digitale und physische Sicherheitsmaßnahmen zu implementieren und so den Schutz sensibler Informationen sicherzustellen. Das Department for Business and Trade (DBT) unterstützt Unternehmen bei der Internationalisierung.
- Standards, Normen und regulatorischen Rahmen entwickeln: Hierfür sollen regulatorische Testumgebungen und Sandboxes eingerichtet werden. Eine aktive Gestaltungsrolle in internationalen Gremien (u.a. WTO, WEF, G7, G20, OECD, Nato) einschließlich des britischen Sitzes in der International Telecommunications Union (ITU) sollen genutzt werden, um sicherzustellen, dass die Quantum-Regulierung britische Unternehmen und Innovationen unterstützt.
- Weitere begleitende Maßnahmen: Die Royal Academy of Engineering soll eine Studie zur Erfassung der verfügbaren Infrastruktur und Bedarfe erstellen. Die Regierung plant weiter, eine zentrale Innovationsplattform aufzubauen und den Standort international zu positionieren.

Ministerien und Behörden

Die Strategie wird federführend vom **Department for Science, Innovation and Technology (DSIT)** getragen, das mit weiteren staatlichen Stellen die Programme und Maßnahmen umsetzt. Die Umsetzung wird von einem Steuerungskreis begleitet (Quantum Technologies Strategic Advisory Board, SAB), der die britische Regierung und ihre nachgeordneten Behörden, insbesondere **UK Research and Innovation (UKRI)**, unabhängig und fachkundig begleiten soll. Der SAB berät zur strategischen Ausrichtung und Umsetzung der Nationalen Quantenstrategie sowie des Forschungs- und Innovationsprogramms des National Quantum Technologies Programme (NQTP). Das Sekretariat des SAB wird vom Office for Quantum, einem Teil des Department for Science, Innovation and Technology, bereitgestellt [195].

Weitere zentrale Stakeholder sind das **Department for Business and Trade**. Es ist verantwortlich für die Entwicklung und Umsetzung von Maßnahmen, die das Wachstum und die Kommerzialisierung von Quantentechnologien fördern. Dazu gehört die Zusammenarbeit mit Organisationen wie den Interessenverbänden UKQuantum und techUK, die Entwicklung von Werbematerialien für kritische Nutzersektoren, die Förderung internationaler Handelsmöglichkeiten sowie die Eröffnung von Investitions- und Kooperationsmöglichkeiten für britische Unternehmen. Zudem unterstützt das Department for Business Initiativen zur Innovationsförderung und arbeitet daran, eine regulierungsfreundliche Umgebung zu schaffen, die die Entwicklung und den Einsatz von Quantentechnologien vorantreibt [194].

Die National Protective Security Agency (NPSA) und das National Cyber Security Centre (NCSC) sollen Unternehmen in sicherheitsrelevanten Aspekten beraten [194].

Die Wirtschaft profitiert von Angeboten der **British Business Bank**, die verschiedene Finanzierungsangebote geschaffen hat, u.a. British Patient Capital, Future Fund, Breakthrough oder den National Security Strategic Investment Fund [194].

Das **Ministry of Defence** beabsichtigt den Kauf von unausgereiften Quantentechnologien, um sie für militärische Zwecke zu erproben. Die Regierung plant ressortübergreifend zusammenzuarbeiten, um andere wichtige Anwendungen im öffentlichen Sektor zu erkunden und deren Transfer in andere Ressorts zu erleichtern [194].

Zentrale Programme, Maßnahmen und Initiativen

Die Förderlandschaft ist breit gefächert, zu den zentralen Programmen und Initiativen der britischen Quantenstrategie gehört das **National Quantum Technologies Programme (NQTP)**, ein großangelegtes Forschungsprogramm zur Förderung von Quantencomputing, -sensorik und -kommunikation. Für dieses Programm sind eine Milliarde Pfund vorgesehen [193].

Das NQTP fördert u.a. den **Infrastrukturaufbau**, hierzu zählen insbesondere die folgenden Maßnahmen:

- Die Entwicklung von fünf anwendungsorientierten **Quantum Technology Research Hubs and Centres**, Förderanträge wurden bis Oktober 2023 angenommen [196].
- Das **National Quantum Computing Centre (NQCC)** soll die Entwicklung und Erprobung von Quantencomputern vorantreiben [197].
- Das Quantum Metrology Institute (QMI) am National Physical Laboratory (NPL) wurde 2015 im Rahmen der ersten Phase des NQTP gegründet. Am NPL-Standort Teddington soll das **Advanced Quantum Metrology Laboratory (AQML)** eingerichtet werden.

Die **Forschungs- und Innovationsförderung** aus Mitteln des NQTP erfolgt im Wesentlichen über:

- Das Programm **Quantum Technologies for Fundamental Physics (QTFP)**, ein mit 40 Millionen Pfund dotiertes Programm aus Mitteln des Strategic Priorities Fund (SPF) [198].
- Der **Industrial Strategy Challenge Fund (ISCF)** fördert Unternehmen mit 153 Millionen Pfund, zusätzlich wurden 425 Millionen privates Kapital aufgebracht, was doppelt so hoch ist, wie erwartet. Die Regierung geht davon aus, dass die Unterstützung des Privatsektors bis 2025 auf 715 Millionen Pfund gesteigert werden kann [198]. Expert:innen berichten, dass das Programm marktnahe F&E-Vorhaben in KMUs und Großunternehmen fördere, um den Quantensektor weiterzuentwickeln.
- **Missionsorientierte Programme** mit einem Budget von 70 Millionen Pfund, darunter: (1) Entwicklung eines Quantencomputers, der klassischen Supercomputern überlegen ist, (2) Aufbau des weltweit fortschrittlichsten Quantenkommunikationsnetzwerks, (3) jeder NHS Trust setzt Quantensensoren ein, um die Diagnose und Behandlung von Menschen mit chronischen Krankheiten zu verbessern, (4) Nutzung von Quantennavigationssystemen in der Luftfahrt, (5) Einsatz von mobilen, vernetzten Quantensensoren zur Überwachung kritischer Infrastrukturen (Verkehr, Telekommunikation, Energie) und zur Verteidigung [199]. Befragte Expert:innen berichten, dass diese Vorhaben die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Wirtschaft und die Skalierung von Quanten-Lösungen fördern sollen.
- **Akzeleratorenprogramme**, die darauf abzielen, spezifische Technologiebereiche und Unternehmen zu fördern und den Weg zur kommerziellen und technologischen Reife zu beschleunigen. In einem ersten Schritt sollen 20 Millionen Pfund in ein Programm in Zusammenarbeit mit der Industrie investiert werden [194].

- Die zentralen **Aus- und Weiterbildungsprogramme** und Initiativen aus Mitteln des NQTP sind [198]:
- Fortführung der **Quantum Technologies Fellowships** und **PhD studentships** [198][197].
- **Fortführung der EPSRC Centres for Doctoral Training (CDTs)**. Die Centres of Doctoral Training wurden 2013 gegründet, darunter das Centre for Doctoral Training in Quantum Dynamics (Imperial College), das Centre for Doctoral Training in Delivering Quantum Technologies (University College London) und das Centre for Doctoral Training in Quantum Engineering (University of Bristol).
- **Errichtung von Training and Skills Hubs**, darunter das Ausbildungsprogramm Quantum Systems Engineering Hub, Innovation in Quantum Business – Applications, Technology and Engineering und Quantum Enterprise am Imperial College London.
- **Errichtung der Quantum City**: Diese richtet sich an die breite Öffentlichkeit und Schulen, um die Öffentlichkeit für Quantentechnologien zu sensibilisieren und Diskussionen über die Rolle dieser Technologien in der Gesellschaft zu fördern.

Aktueller Stand der Umsetzung

Die Förderung der Quantentechnologie wurde erstmals 2013 mit der Ankündigung des "UK National Quantum Technologies Programme" (NQTP) ins Leben gerufen. Die nationale Quantenstrategie ist noch jung (Veröffentlichung im Dezember 2023) und knüpft an das NQTP an. Die Ergebnisse der Strategie können aktuell noch nicht abschließend bewertet werden.

Großbritannien hat durch das NQTP aus dem Jahr 2013 bereits wesentliche Grundlagen gelegt. Zu den Meilensteinen gehören:

- Die Eröffnung von **vier Quantenforschungslaboren mit modernster Ausstattung**. Hierzu gehören die vier Zentren an den führenden Universitäten mit regionalen Schwerpunkten: Quantenkommunikation (University of York), Quantensensorik (University of Birmingham), Quantenverstärkte Bildgebung (University of Glasgow), Quantencomputing (University of Oxford). Insgesamt wurden 214 Millionen Pfund investiert [198].
- Das **National Quantum Computing Centre (NQCC)** soll die Entwicklung und Erprobung von Quantencomputern vorantreiben. Das NQCC wird seit 2001 mit einer Anschubfinanzierung von 93 Millionen Pfund aufgebaut. Im Jahr 2023 wurden weitere 41 Millionen Pfund zur Verfügung gestellt [197].
- Das **Quantum Metrology Institute (QMI)** am National Physical Laboratory (NPL) wurde im Jahr 2015 im Rahmen der ersten Phase des NQTP gegründet.
- Im Jahr 2018 wurden 75 **EPSRC Centres for Doctoral Training** mit über 440 Millionen Pfund gefördert, darunter das Centre for Doctoral Training in Delivering Quantum Technologies (University College London) und das Centre for Doctoral Training in Quantum Engineering (University of Bristol) [198].

Die nationale Quantenstrategie soll durch langfristige und umfangreiche Investitionen das Quantenökosystem in Großbritannien nachhaltig weiterentwickeln. Die Strategie knüpft an die Erfolge des NQTP aus dem Jahr 2013 an. Das NQTP fokussierte sich stärker auf die Grundlagenforschung, wohingegen sich die nationale Quantenstrategie aus dem Jahr 2023 stärker auf die Zusammenarbeit zwischen Forschung und Wirtschaft, den Transfer von F&E-Ergebnissen in praktische Anwendungen und die Ökosystementwicklung fokussiert. Dies spiegelt sich in neuen (z. B. die missionsorientierten Programme) bzw. angepassten Programmen wider. Die nationale Quantenstrategie konzentriert sich insgesamt stärker auf spezifische Bereiche als das

NQTP. Die Programme sind überwiegend öffentlich finanziert, die Regierung geht aber davon aus, dass die privaten Investitionen in Quantentechnologien weiter gesteigert werden können [194].

SWOT-Analyse

Tabelle 13: SWOT-Analyse der F&I-Politik in den Quantentechnologien in Großbritannien

<p>Strength</p> <ul style="list-style-type: none"> • Großbritannien verfügt über renommierte Forschungseinrichtungen und eine lange Tradition in der Grundlagenforschung • Die britische Regierung investiert erheblich in die Quantenforschung und bietet damit eine stabile finanzielle Basis • Die Regierung gibt klare Signale in welchen Bereichen Potenziale bestehen und wo private Investitionsmöglichkeiten bestehen 	<p>Weakness</p> <ul style="list-style-type: none"> • Es gibt einen Mangel an qualifizierten Fachkräften im Bereich der Quantenforschung, was die Umsetzung verzögern kann • Der Markt entwickelt sich relativ langsam • Quantentechnologien sind kein eigenständiger Sektor, es gilt die Quantentechnologien mit den Entwicklungen in anderen High-Tech-Sektor stärker zu verknüpfen
<p>Opportunities</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durch frühzeitige Investitionen kann Großbritannien eine führende Rolle im globalen Quantenmarkt einnehmen. • Rascher Fortschritt bietet Potenziale für Innovationen in Finanzdienstleistungen und Cybersecurity, Chancen in aufstrebenden Sektoren wie Blockchain und AI • Großbritannien sucht nach strategischen Partnern, um die Quantentechnologien weiterzuentwickeln, das Ökosystem zu stärken und Rahmenbedingungen zu gestalten 	<p>Threat</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hauptkonkurrenten USA und China, aber auch wachsender Wettbewerb innerhalb Europas • Durch einen Regierungswechsel können neue politische Prioritäten gesetzt werden • Bisher gibt es noch keinen regulatorischen Rahmen, der mit Unsicherheiten für die Ökosystementwicklung verbunden ist

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

5.2.4 Europäische Union

Die EU Quantum Strategie (Quantum Flagship) ist ein ambitioniertes Vorhaben, das die Europäische Union in die Lage versetzen soll, eine führende Rolle in den Quantentechnologien zu übernehmen. Die Quantum Flagship Initiative wurde 2018 ins Leben gerufen, um die Europäische Union als führenden Standort zu etablieren. Die Strategie greift die Forderungen aus dem Quantum Manifesto [200] aus dem Jahr 2016 auf. Die Strategie zielt darauf ab, wissenschaftli-

che Exzellenz zu fördern, technologische Durchbrüche zu beschleunigen und die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit der Mitgliedstaaten zu stärken. Sie soll dazu beitragen, neue Anwendungen in Bereichen wie Kommunikation, Medizin und Sicherheit zu entwickeln [201]. Die EU-Kommission wird im Rahmen der Quantum Flagship Initiative eine Milliarde Euro über zehn Jahre investieren [202]. Die Strategie ist technologieoffen und fördert die Technologiefelder der Quantenkommunikation, Quantencomputing und Quantensensorik.

In einer Zeit, in der technologische Abhängigkeiten von Drittstaaten zunehmend als Risiko wahrgenommen werden, ist es für die EU essenziell, eigene Kapazitäten in Schlüsseltechnologien wie der Quantentechnologie aufzubauen. Quantentechnologien versprechen enorme wirtschaftliche Potenziale, da sie die Grundlage für neue Industrien schaffen und bestehende Branchen revolutionieren können. Die EU möchte sicherstellen, dass europäische Unternehmen von diesen Wachstumschancen profitieren. Mit der Entwicklung von Quantencomputern und -kommunikationstechnologien können bestehende Sicherheitsprotokolle obsolet werden. Die EU strebt an, die eigene Sicherheitsarchitektur zu modernisieren und zukunftssicher zu gestalten. Die Förderung von Forschung und Entwicklung in den Quantentechnologien trägt zur Stärkung der wissenschaftlichen Exzellenz in Europa bei und fördert die internationale Zusammenarbeit und den Wissensaustausch.

Die EU-Kommission hat die folgenden Handlungsfelder identifiziert, die im Rahmen der Quantenstrategie erreicht werden sollen [102]:

- **Förderung von Forschung und Entwicklung:** Die Grundlagenforschung ist entscheidend für die Nutzung von Quantentechnologien und soll durch bessere Koordination zwischen den nationalen Förderorganisationen und EU-Programmen (ERC, Marie-Curie, Horizon Europe) gestärkt werden. Darüber hinaus soll die Verbindung zwischen Forschung und industriellen Entwicklungszielen mit konkreten Ergebnissen verbessert werden.
- **Förderung der Industrialisierung von Quantentechnologien:** Quantengeräte und die Produktion von Quantenchips sollen gefördert werden, um die Miniaturisierung und Integration in anderen Geräten zu erleichtern. Die Integration des europäischen Quantentechnologie-Ökosystems soll durch enge Verbindungen zwischen Lösungsanbietern und kommerziellen Nutzern gestärkt werden. Spezielle Finanzierungsangebote zur Förderung des Unternehmertums, für Start-ups und KMUs soll die Innovationslücke zwischen Forschung und Markt schließen. Darüber hinaus soll der Zugang zu wesentlichen Komponenten und Technologien sichergestellt werden, die für die Forschung und Anwendung von Quantentechnologien erforderlich sind. Die Übernahme einer globalen Führungsrolle in der Standardisierung von Quantentechnologien soll die Markteinführung beschleunigen.
- **Fachkräfteausbildung:** Die Ausbildung von Talenten und Entwicklung von Fähigkeiten durch spezielle Programme für Forschung, Skalierung und Entscheidungsträger:innen in der Wirtschaft.
- **Kooperation und Vernetzung:** Die Schaffung von Synergien mit den Mitgliedstaaten durch Koordination mit nationalen Quanteninitiativen und Förderorganisationen. Entwicklung von strategischen Partnerschaften durch Initiierung eines politischen Dialogs über internationale Zusammenarbeit in Quantenfragen.

Ministerien und Behörden

Die Hauptverantwortung liegt bei der Europäischen Kommission, die das Quantum Flagship Programm initiiert hat und finanziert. Die EU-Mitgliedstaaten ergänzen die Quantum Flagship Programm, indem sie nationale Quanteninitiativen und -programme umsetzen.

Innerhalb der Europäischen Kommission sind verschiedene Generaldirektionen beteiligt, insbesondere die **Generaldirektion Kommunikationsnetze, Inhalte und Technologien (DG CONNECT)**. Diese ist für die Entwicklung und Umsetzung der digitalen Strategien der EU zuständig, einschließlich des EU Chips Act.

Die Generaldirektion Forschung und Innovation (DG RTD) fördert und unterstützt Forschungs- und Innovationsprojekte innerhalb der EU, einschließlich derjenigen im Bereich der Quantentechnologien, insbesondere über das Rahmenprogramm für Forschung und Innovation der EU (**Horizon Europe**).

Der Europäische Forschungsrat (ERC) unterstützt grundlagenorientierte Forschung im Bereich der Quantentechnologien. Der **Europäischer Innovationsrat (EIC)** unterstützt bahnbrechende Innovationen und Startups im Bereich der Quantentechnologien durch Finanzierungen und Förderprogramme.

Die Generaldirektion Binnenmarkt, Industrie, Unternehmertum und KMU (DG GROW) ist für die Entwicklung der industriellen Basis und der Wettbewerbsfähigkeit der EU verantwortlich, einschließlich der Unterstützung von KMUs und der Förderung von Innovationen im Bereich der Quantentechnologien. Diese spielt ebenfalls eine wichtige Rolle bei der Unterstützung und Förderung der Halbleiterindustrie in der EU.

Europäische Investitionsbank (EIB) unterstützt die Finanzierung von Projekten im Bereich der Quantentechnologien und spielt eine Rolle bei der Bereitstellung von Kapital für Startups und KMUs.

Die Generaldirektion Bildung, Jugend, Sport und Kultur (DG EAC) ist zuständig für die Entwicklung und Umsetzung von Bildungs- und Ausbildungsprogrammen in der EU, einschließlich der Förderung von Forschung und Innovation durch Programme wie die Marie Skłodowska-Curie Actions.

Zentrale Programme, Maßnahmen und Initiativen

Die Europäische Union hat umfangreiche Mittel für die Umsetzung der Quantenstrategie bereitgestellt. Zu den zentralen Initiativen der EU Quantum Strategie gehören:

Das **Quantum Flagship** ist ein umfassendes Förderprogramm der EU im Bereich der Quantentechnologien. Es wurde 2018 ins Leben gerufen und ist mit einem Budget von einer Milliarde Euro über einen Zeitraum von zehn Jahren ausgestattet. Das Hauptziel des Quantum Flagship ist es, Europa an die Spitze der Quantenforschung und -innovation zu bringen. Im Fokus steht die Förderung von Spitzenforschung in den Technologiefeldern Quantencomputing, -kommunikation, -simulation und -metrologie. Die Hauptziele umfassen die Schaffung einer nachhaltigen Innovationskette vom Labor zur Marktreife sowie der Aufbau eines starken europäischen „Quanten-Ökosystems“. Die Mittel werden genutzt, um FuE-Vorhaben, den Aufbau von Infrastrukturen oder die Förderung von Start-ups und KMUs zu finanzieren [202].

Das Vorhaben **European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI)** wurde 2019 initiiert und zielt darauf ab, eine sichere Quantenkommunikationsinfrastruktur in Europa zu

etablieren. Dies umfasst sowohl terrestrische als auch satellitengestützte Kommunikationsnetze. Die Hauptziele sind der Aufbau eines sicheren und widerstandsfähigen Kommunikationsnetzwerks auf Quantenbasis, die Integration von Quantenverschlüsselung in bestehende Kommunikationsinfrastrukturen und die Förderung der Zusammenarbeit zwischen Mitgliedsstaaten und der Industrie [203]. Das EuroQCI Vorhaben baut auf Quantenkommunikationstechnologien auf, die in der Aufbauphase des Quantum Flagship entwickelt wurden, insbesondere im Rahmen des OPENQKD-Projekts.

Die **European High-Performance Computing Joint Undertaking** (EuroHPC JU) hat zwei Vorhaben zur Integration von Quanten-Simulatoren, die jeweils etwa 100 Quantenbits (Qubits) steuern, in zwei bereits bestehende Supercomputer gefördert. Die EuroHPC JU ist eine Einrichtung, die 2018 gegründet wurde, um Europa zum Weltmarktführer im Bereich des Supercomputings zu machen [204].

Horizon Europe ist das zentrale Forschungs- und Innovationsprogramm der EU für den Zeitraum 2021-2027 mit einem Gesamtbudget von 93,5 Milliarden Euro. Innerhalb dieses Programms gibt es spezifische Förderlinien für Quantentechnologien. Die Schwerpunkte liegen auf der Finanzierung von Forschungsprojekten im Bereich Quanteninformatik und -sicherheit, der Unterstützung der Entwicklung von Quanten-Hardware und -Software sowie der Förderung von internationalen Kooperationen und Netzwerken [205]. Unter Horizon Europe wird die Europäische Kommission das Quantum Flagship im Zeitraum 2021-2027 mit mindestens 500 Millionen Euro unterstützen [206].

Der **EU Chips Act** zielt darauf ab, die Halbleiterindustrie in Europa zu stärken, was auch für die Quantentechnologien von Bedeutung ist. Fortschritte in der Halbleitertechnologie können die Entwicklung und Produktion von Quantencomputern und -sensoren unterstützen. Daher fördert die EU den Aufbau von Kapazitäten in der Entwicklung von Quantenchips und den zugehörigen Halbleitertechnologien. Der EU Chips Act wird durch Mittel aus den Programmen „Horizont Europa“ und „Digitales Europa“ unterstützt [207].

Das Digital Europe Programme ergänzt die Quantenstrategie durch die Förderung digitaler Innovationen, einschließlich Quantentechnologien. Die Schwerpunkte liegen auf der Unterstützung von Projekten zur Entwicklung von Quantencomputern, dem Aufbau von Test- und Experimentierumgebungen für Quantentechnologien sowie der Förderung von Bildungs- und Trainingsprogrammen im Bereich Quanteninformatik [202].

Neben den großen Programmen gibt es mehrere kleinere Initiativen und Förderprogramme, die die Quantenstrategie der EU-Kommission unterstützen. Der **EIC Accelerator** zielt darauf ab, Start-ups und innovative KMUs im Quantenbereich zu unterstützen, mit Investitionen von bis zu 50 Millionen Euro pro Projekt [208].

QuantERA ist ein europäisches Netzwerk von Forschungsförderungsorganisationen, das die Entwicklung von Quantentechnologien fördert. Das QuantERA-Konsortium investiert in Forschung und Innovation. Dazu identifiziert und finanziert es herausragende Forschungsideen mit dem Potenzial, neue Linien der Quantentechnologien zu etablieren und voranzutreiben [209].

Aktueller Stand der Umsetzung

- Der Start des Quantum Flagship im Jahr 2018 markierte einen entscheidenden Wendepunkt in der europäischen Quantenstrategie. In seiner Aufbauphase (2018-2022) unterstützte das Quantum Flagship 24 Projekte in den Bereichen Quantenkommunikation, Quantencomputing und Quantensensorik. Aus Mitteln des Quantum Flagships als auch von QuantERA, das Quantenforschung in 31 europäischen Ländern unterstützt, hat die EU seit 2016 über 175 Millionen Euro in die europäische Quantenforschung investiert [206].
- Die nächste Phase des Quantum Flagship (gefördert im Rahmen von „Horizont Europa“) ist nun mit einem Gesamtbudget von über 400 Millionen Euro und mehr als zwanzig neuen Projekten im Gange. Ziel ist es, die europäische Forschungsführerschaft bei Quantentechnologien zu festigen und auszubauen und die Forschungsergebnisse der industriellen Nutzung näher zu bringen. Das Programm „Digitales Europa“ wird zusätzliche Finanzmittel für Quantentechnologien bereitstellen, um die strategischen digitalen Kapazitäten Europas zu entwickeln und zu stärken [210].
- Eine aktualisierte strategische Forschungs- und Industrie-Agenda (SRIA) wurde 2002 veröffentlicht und 2024 aktualisiert. Die Ziele für die vier Hauptsäulen der Initiative wurden erweitert und ein Fahrplan zur Umsetzung dieser Ziele aufgezeigt.
- Eine Reihe neuer Projekte ist bereits in Arbeit. Im Oktober 2022 wurden sechs Standorte (Tschechien, Deutschland, Spanien, Frankreich, Italien und Polen) in der EU ausgewählt, um die ersten EuroHPC-Quantencomputer zu beherbergen und zu betreiben. Die Gesamtinvestition von mehr als 100 Millionen Euro werden zu 50 Prozent aus Mitteln der EuroHPC JU finanziert [204].
- Mit der Etablierung des European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI) im Jahr 2019 ist ein weiterer bedeutender Meilenstein erreicht worden. Das EuroQCI zielt darauf ab, eine sichere Quantenkommunikationsinfrastruktur in Europa aufzubauen. Ein wichtiger Bestandteil ist der Aufbau eines Netzwerks von Quantenkommunikationsknotenpunkten in Zusammenarbeit mit den Mitgliedsstaaten und Industriepartnern. Die erste Implementierungsphase von EuroQCI – finanziert durch das Digital Europe Programm ist im Januar 2023 gestartet, darunter Industrieprojekte zur Entwicklung und Reifung der zentralen technologischen Bausteine für EuroQCI. Zum anderen wurden nationale Projekte ausgewählt und gefördert, die es den Mitgliedstaaten ermöglichen soll, die nationalen Quantenkommunikationsnetzwerke zu planen und aufzubauen, die die Grundlage des terrestrischen Segments bilden werden [211].
- Im Jahr 2021 hat sich das European Quantum Industry Consortium (QuIC) gegründet, eine Industrievereinigung, die sich dem Wachstum des kommerziellen Quantentechnologiesektors in Europa widmet. QuIC fungiert als Unternehmensnetzwerk in ganz Europa und vereint Hunderte von KMUs, großen Unternehmen, Investoren, Forschungs- und Technologieorganisationen sowie akademischen Instituten, um ein starkes und lebendiges Ökosystem aufzubauen [212].
- Im Dezember 2023 wurde mit der Unterzeichnung der European Declaration on Quantum Technologies ein wichtiger Meilenstein in der Zusammenarbeit zwischen den Mitgliedstaaten erreicht. 26 Mitgliedstaaten bekennen sich zur intensiven Zusammenarbeit in den Quantentechnologien, um die angestrebte Führungsrolle der EU Wirklichkeit werden zu lassen [213].

- Die EU-Kommission hat in den letzten Jahren Schritte unternommen, um Europa als führenden Akteur im Bereich der Quantentechnologien zu positionieren. Mit einer klaren Strategie, substanziellen Investitionen und einer Vielzahl von Initiativen und Programmen ist die EU gut aufgestellt, um die Herausforderungen und Chancen der Quantentechnologien zu meistern. Aktuelle und zukünftige Entwicklungen werden weiterhin entscheidend sein, um die gesteckten Ziele zu erreichen und Europas technologische Souveränität zu sichern.

SWOT-Analyse

Tabelle 13: SWOT-Analyse der F&I-Politik in den Quantentechnologien in der EU

<p>Strength</p> <ul style="list-style-type: none"> • Die EU verfügt über renommierte Forschungseinrichtungen und Universitäten in den Mitgliedstaaten. Dies unterscheidet sich von nationalen Strategien, die oft auf spezifische nationale Institutionen fokussiert sind. • Die EU investiert erheblich in die Quantenforschung und bietet damit eine stabile finanzielle Basis. • Die EU kann durch die Bündelung von Ressourcen und Know-how aus verschiedenen Mitgliedstaaten Skaleneffekte erzielen, die über das hinausgehen, was einzelne Länder erreichen können. 	<p>Weakness</p> <ul style="list-style-type: none"> • Obwohl die EU insgesamt eine größere Anzahl von Fachkräften hat, können regionale Unterschiede und der Wettbewerb um Talente zwischen den Mitgliedstaaten zu Engpässen führen. • Die Zusammenarbeit zwischen den verschiedenen Mitgliedstaaten kann aufgrund unterschiedlicher nationaler Interessen und Prioritäten komplex und zeitaufwendig sein. Dies ist eine besondere Herausforderung für die EU im Vergleich zu nationalen Strategien.
<p>Opportunities</p> <ul style="list-style-type: none"> • Durch frühzeitige Investitionen kann die EU eine führende Rolle im globalen Quantenmarkt einnehmen. • Die Quantenstrategie kann von Synergien mit anderen EU-Initiativen wie dem EU Chips Act profitieren, was die Entwicklung und Produktion von Quantencomputern und -sensoren unterstützt. • Die Vielfalt der Mitgliedstaaten ermöglicht eine breite Palette von Anwendungsgebieten für Quantenforschung, von Telekommunikation über Medizintechnik bis hin zu Finanzdienstleistungen. 	<p>Threat</p> <ul style="list-style-type: none"> • Andere Regionen wie die USA und China investieren ebenfalls erheblich in Quantenforschung, was den Wettbewerb verschärft. • Politische Differenzen und mögliche Austritte von Mitgliedstaaten (wie im Fall von Brexit) können die langfristige Stabilität und Finanzierung der Quantenstrategie gefährden. • Der Wettbewerb zwischen den Mitgliedstaaten um Fördermittel und Talente kann die Effizienz der Gesamtstrategie beeinträchtigen.

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

5.2.5 Kanada

Kanada hat sich als ein globaler Vorreiter im Bereich der Quantentechnologie etabliert, angetrieben durch eine starke Forschungsbasis und strategische Investitionen in Wissenschaft und Technologie. Die kanadische Quantenstrategie zielt darauf ab, das Land als führenden Akteur im globalen Quantenökosystem zu positionieren, indem sie Innovationen fördert, Talente entwickelt und internationale Partnerschaften aufbaut.

Kanada verfügt über eine lange Tradition in der Grundlagenforschung zur Quantenphysik. Seit den 1990er Jahren haben kanadische Universitäten und Forschungseinrichtungen bedeutende Beiträge zur Quantenmechanik und ihren Anwendungen geleistet. Diese frühe Investition in die Quantentechnologie hat Kanada eine solide Basis verschafft. Die kanadische Quantenstrategie wurde im Jahr 2022 veröffentlicht. Sie knüpft an die bestehende Förderung der Quantentechnologie an und zielt darauf ab [214]:

- eine globale Führungsposition in Forschung, Entwicklung und Nutzung von Quantencomputing zum Wohle von Wirtschaft, Verwaltung und Gesellschaft entwickeln;
- Sicherung von Privatsphäre und Cybersicherheit in einer quantenfähigen Welt durch ein nationales sicheres Quantenkommunikationsnetzwerk und Post-Quanten-Kryptographie-Verfahren;
- Entwicklung und frühe Nutzung von Quantensensoren zu ermöglichen.

Die zentralen Handlungsfelder der Strategie umfassen [214]:

- Förderung von Forschung und Innovation: Unterstützung der Grundlagen- und angewandten Forschung, um neue Durchbrüche in der Quantentechnologie zu erzielen.
- Entwicklung von Talenten: Ausbildung und Förderung einer neuen Generation von Fachkräften im Bereich Quantentechnologie.
- Kommerzialisierung und Markteinführung: Unterstützung der Markteinführung neuer Quantentechnologien, um wirtschaftliches Wachstum zu stimulieren.

Die kanadische Regierung plant, Investitionen in Höhe von 360 Millionen CAD für die Quantentechnologien bereitzustellen, um den Standort weiter auszubauen. Der Planungshorizont beträgt sieben Jahre (2022-2029). Die Strategie umfasst die Förderung von Forschungsprojekten an Universitäten und spezialisierten Forschungszentren sowie die Förderung von Kooperationen zwischen akademischen Einrichtungen und der Industrie [214].

Die Ausbildung und Förderung einer neuen Generation von Fachkräften im Bereich der Quantentechnologie ist von entscheidender Bedeutung für den langfristigen Erfolg der kanadischen Quantenstrategie. Die Regierung plant, Stipendien und Ausbildungsprogramme für Studierende und Nachwuchsforscher bereitzustellen, um sicherzugehen, dass Kanada über die notwendigen Talente verfügt, um in diesem hochspezialisierten Bereich erfolgreich zu sein. Darüber hinaus werden Partnerschaften mit Bildungseinrichtungen aufgebaut, um spezialisierte Ausbildungsprogramme zu entwickeln. Diese Programme sollen nicht nur die theoretischen Grundlagen der Quantenphysik vermitteln, sondern auch praktische Fähigkeiten und Erfahrungen in der Anwendung von Quantentechnologien bieten. Weiterbildungsangebote für Fachkräfte in der Industrie sind ebenfalls ein wichtiger Bestandteil dieser Strategie [214].

Ein zentrales Ziel der kanadischen Quantenstrategie ist die Kommerzialisierung von Quantentechnologien, um wirtschaftliches Wachstum zu fördern. Die Regierung unterstützt Start-ups

im Bereich der Quantentechnologie durch die Bereitstellung von Risikokapital und die Einrichtung von Innovationszentren und Inkubatoren. Diese Einrichtungen bieten jungen Unternehmen die notwendige Infrastruktur und Unterstützung, um ihre Ideen zur Marktreife zu bringen. Zusätzlich werden Marktanalysen durchgeführt und Strategien entwickelt, um die Kommerzialisierung neuer Technologien zu fördern. Dies umfasst die Identifizierung vielversprechender Anwendungsgebiete und die Schaffung von Anreizen für Unternehmen, in die Entwicklung und Implementierung von Quantentechnologien zu investieren [214].

Kanada betont die Bedeutung internationaler Partnerschaften in seiner Quantenstrategie. Durch den Aufbau und die Pflege von Forschungsk Kooperationen mit anderen führenden Nationen im Bereich Quantentechnologie kann Kanada von gemeinsamen Projekten und dem Austausch von Wissen und Ressourcen profitieren. Diese Zusammenarbeit stärkt Kanadas Position auf der globalen Bühne und ermöglicht den Zugang zu internationalen Märkten und Ressourcen [214].

Ein weiterer wichtiger Aspekt der kanadischen Quantenstrategie ist die Berücksichtigung von Sicherheits- und Ethikfragen. Die Regierung arbeitet daran, Richtlinien und Standards zu entwickeln, die den sicheren und ethischen Einsatz von Quantentechnologien gewährleisten. Dies umfasst den Schutz sensibler Daten in Quantenkommunikationssystemen und die Sicherstellung der ethischen Nutzung von Quantencomputern und anderen Bereichen der Quantentechnologien. Die Entwicklung solcher Richtlinien und Standards erfolgt in enger Zusammenarbeit mit internationalen Partnern und Expert:innen auf dem Gebiet der Ethik und Informationssicherheit. Dies stellt sicher, dass Kanada nicht nur technologisch führend ist, sondern auch eine Vorreiterrolle bei der sicheren und verantwortungsvollen Nutzung von Quantentechnologien einnimmt [214].

Ministerien und Behörden

Die kanadische Quantenstrategie umfasst eine Vielzahl von Stakeholdern, die gemeinsam daran arbeiten, die Ziele der Strategie zu erreichen. Die kanadische Bundesregierung spielt eine zentrale Rolle bei der Entwicklung und Umsetzung der Quantenstrategie. Sie stellt die notwendigen Mittel bereit, formuliert politische Richtlinien und fördert die Koordination zwischen den verschiedenen Akteuren. Die Provinzregierungen unterstützen die Quantenstrategie durch lokale Initiativen und Programme. Sie arbeiten eng mit der Bundesebene zusammen, um regionale Stärken zu nutzen und die Entwicklung von Quantentechnologien voranzutreiben.

Verschiedene Ministerien und Behörden sind direkt an der Umsetzung der Quantenstrategie beteiligt, darunter das Ministerium für Innovation, Wissenschaft und wirtschaftliche Entwicklung Kanada (ISED) und das National Research Council Canada (NRC). Der NRC führt eigenständig Forschung durch und fördert F&E-Aktivitäten in den Quantentechnologien [214].

Zentrale Programme, Maßnahmen und Initiativen

Die Quantum Canada Initiative ist das Flaggschiff der kanadischen Quantenstrategie. Sie umfasst eine Vielzahl von Programmen und Projekten, die darauf abzielen, Forschung und Innovation zu fördern, die Kommerzialisierung von Quantentechnologien voranzutreiben und internationale Kooperationen zu stärken. Die Initiative wird von der kanadischen Regierung koordiniert und erhält Unterstützung von verschiedenen Ministerien, Forschungseinrichtungen und Industriepartnern. Die Förderlandschaft ist breit gefächert, die folgenden Programme sind besonders hervorzuheben:

Die **NSERC Quantum Grants** sind speziell darauf ausgerichtet, die Forschung im Bereich der Quantentechnologie zu unterstützen. Für das Programm stehen 132,5 Millionen CAD zur Verfügung [214]. Diese Fördermittel werden an Universitäten und Forschungseinrichtungen vergeben, um sowohl Grundlagen- als auch angewandte Forschung in Kooperation mit Unternehmen zu finanzieren. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Förderung von Projekten, die Potenzial für kommerzielle Anwendungen haben und zur Stärkung der kanadischen Quantenindustrie beitragen können. Darüber hinaus wird die internationale Zusammenarbeit gefördert [215]. Der NRC fördert im Rahmen seines Challenges-Programms Verbundprojekte zwischen Wissenschaft und Unternehmen: die Quantum Sensors Challenge und die neue Applied Quantum Computing Challenge [216].

Die **Quantum Research and Development Initiative (QRDI)** ist ein 5-jähriges Programm, das vom National Research Council of Canada (NRC) koordiniert und verwaltet wird, um die bundesweite Quantenforschung und -entwicklung voranzutreiben. Für das Programm stehen 9 Millionen CAD zur Verfügung [214]. Die QRDI unterstützt Forschungs- und Entwicklungsprojekte im Bereich der Quantentechnologie. Das Programm bietet finanzielle Mittel, technische Unterstützung und Zugang zu spezialisierten Laboreinrichtungen. Es fördert Projekte, die das Potenzial haben, die Quantenforschung voranzutreiben und kommerzielle Anwendungen zu entwickeln [217].

Um die nächste Generation von Quantenwissenschaftlern und Ingenieuren auszubilden, unterstützt Kanada verschiedene Bildungs- und Outreach-Programme. Diese Programme fördern das Interesse an Quantentechnologien und bieten Ausbildungsmöglichkeiten für Studierende und Fachkräfte in der Industrie. Durch Bildungsinitiativen und Aufklärungskampagnen wird das Bewusstsein für die Potenziale und Herausforderungen von Quantentechnologien geschärft. Besonders hervorzuheben sind das **Collaborative Research and Training Experience (CREATE) Programm** des NSERC, das sich an Fachkräfte richtet, die nach Kanada migrieren möchten, um dort weiterzuarbeiten. Für das Programm stehen 5,4 Millionen CAD zur Verfügung [214].

Mitacs wurde 1999 gegründet und unterstützt College- und Bachelor-Studierende sowie Graduierte und Postdocs mit Stipendien und Vermittlung von Talenten für Quantenarbeitsplätze. Mit fast 400 Mitarbeitenden und Büros in Ottawa, Montréal, Toronto und Vancouver ist Mitacs ein wichtiger Intermediär [218]. Hierfür sind 5,4 Millionen CAD geplant [214].

Kanadas fünf Innovationscluster fördern die Einführung von in Kanada entwickelten Quantentechnologien durch Unternehmen in Schlüsselindustrien sowie durch öffentliche und gemeinnützige Einrichtungen. Im Rahmen des Haushaltsplans 2022 wurden 750 Millionen CAD über fünf Jahre für **Kanadas Globale Innovationscluster** bereitgestellt. Bis heute hat die kanadische Regierung fast 2 Milliarden CAD in die Globalen Innovationscluster investiert, um deren Ökosysteme weiter zu stärken und Kanada für globale Märkte zu positionieren [219]. Aus dem Budget der nationalen Quantenstrategie sollen weitere 14 Millionen CAD in die Cluster investiert werden [214].

Regionale Entwicklungsagenturen (u. a. Canada Economic Development for Quebec Regions, Federal Economic Development Agency for Southern Ontario, Prairies Economic Development Canada und Pacific Economic Development Canada) unterstützen kanadische Quantenunternehmen beim Wachstum [220]. Ein Beispiel für **regionale Förderansätze ist das „Quantum Valley“ in Ontario**, das zahlreiche Spitzenforschungseinrichtungen und Unternehmen im Bereich der Quantenwissenschaften beherbergt. Durch gezielte Investitionen und die Schaffung

eines unterstützenden Ökosystems hat Kanada die Voraussetzungen geschaffen, um weiterhin an der Spitze der Quantenforschung zu bleiben [221].

Innovative Solutions Canada (ISC) bringt Quantenlösungen auf den Markt, indem es Kunden der kanadischen Regierung mit kanadischen KMUs zusammenbringt, die sich in der frühen F&E-Phase befinden oder späte F&E-Phasen testen. ISC wurde 2017 ins Leben gerufen, und 2018 wurde das Build in Canada Innovation Program in ISC integriert. Das jährliche Budget des Programms für Innovationsausgaben beträgt etwa 147,6 Millionen CAD. Seit der Einführung der National Quantum Strategy hat ISC mehrere Unternehmen finanziert, um die Quantenforschung voranzutreiben und die Entwicklung innovativer Produkte zu erleichtern. Von einem Schlüsselmanagementsystem über einen Verdünnungskühler bis hin zu kinetischen Induktanzdetektoren – die Unternehmen hinter diesen Erfindungen ebnet den Weg in der Quantenforschung, -entwicklung und -kommerzialisierung [222].

Kanada entwickelt Richtlinien und Standards, um die sichere und ethische Nutzung von Quantentechnologien zu gewährleisten. Dies umfasst Maßnahmen zum Schutz sensibler Daten und zur Sicherstellung der ethischen Nutzung von Quantencomputern und anderen Quantentechnologien. Durch die Zusammenarbeit mit internationalen Partnern und Expert:innen stellt Kanada sicher, dass die Nutzung von Quantentechnologien verantwortungsvoll und sicher erfolgt [214].

Aktueller Stand der Umsetzung

Kanada hat bedeutende Fortschritte in der Umsetzung der Strategie erzielt. Zu den aktuellen Entwicklungen und Meilensteinen gehören:

- NSERC und NRC arbeiten eng zusammen, um im Rahmen des Programms Alliance Quantum Grants einen neuen Förderaufruf zu pilotieren. Ziel ist es, F&E-Partnerschaften zwischen Universitäten, NRC und kleinen oder mittleren Unternehmen (KMU) zu unterstützen. Andere Organisationen können solchen Partnerschaften beitreten. NSERC und NRC werden bis zu 12 Millionen CAD über drei Jahre bereitstellen [223]. Dieser Förderansatz ist neu, die Umsetzung muss erprobt werden und die Ergebnisse können noch nicht bewertet werden.
- Befragte Expert:innen berichten, dass der Fokus der kanadischen Regierung bisher auf dem Quantencomputing lag, aktuell gewinnt die Quantensensorik an Bedeutung.
- Die Fortsetzung der Strategie wird diskutiert, so berichten befragte Expert:innen. Der Fokus soll noch stärker auf dem Transfer und der Anwendungen liegen. Die Aspekte Standards und Regulierung sollen ebenfalls stärker berücksichtigt werden.
- Der Ausbau der ISC-Komponente im Rahmen der National Quantum Strategy führte zur Vergabe von 15 Verträgen mit kanadischen KMUs und sechs Millionen CAD Förderung [222].
- Die Ausschreibung missionsorientierter Projektförderung in den Quantentechnologien ist ebenfalls ein neuer Förderansatz. Innovative Solutions Canada, eine Initiative zur Förderung von Technologieentwicklung und Kommerzialisierung kanadischer Innovationen, hat im August 2023 eine erste Ausschreibung veröffentlicht. Ziel ist es, Prototypen in den Bereichen Quantensensorik, Kommunikation und Computing zu beschaffen und in realen Umgebungen zu testen. Die Ausschreibung richtet sich an kanadische KMUs. Die Aufträge haben ein Volumen von 2,3 Millionen CAD [224–226].

- Kanada sucht internationale Kooperationen und Partnerschaften im Bereich der Quantentechnologie. Aktuell findet eine intensive Diskussion zu Aspekten der nationalen Sicherheit statt. Die Zusammenarbeit soll mit vertrauensvollen Partnern intensiviert werden [227]. Im Jahr 2021 haben die NSERC und die US-amerikanische National Science Foundation (NSF) ein Memorandum of Understanding über Forschungsk Kooperationen in den Bereichen Quantenwissenschaft und künstliche Intelligenz unterzeichnet. Dieser übergeordnete Rahmen bildet die Grundlage für die Zusammenarbeit zwischen Forschungseinrichtungen aus beiden Ländern [228]. Der Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) und die französische Agence nationale de la recherche (ANR) haben ein Memorandum of Understanding (MOU) über Forschungsk Kooperationen unterzeichnet, um gemeinsame Forschungsprojekte im Bereich der Quantenwissenschaft und -technologien, insbesondere im Bereich der Hardware und Software des Quantencomputings, zu finanzieren [229]. Zwischen November 2023 und März 2024 konnten die Projektanträge eingereicht werden.
- Das Canada Excellence Research Chairs (CERC) Programm bietet Universitäten Zuschüsse in Höhe von 4-8 Millionen CAD über acht Jahre, um weltweit renommierte Forscher und ihre Teams zu unterstützen und ambitionierte Forschungsprogramme an kanadischen Universitäten zu etablieren [230]. Unter den Gewinnern befinden sich Exzellenzzentren, die sich auf Quantentechnologien fokussieren. Ziel ist die Fokussierung der Forschung und Bildung von kritischen Massen. Hierdurch sollen Talente und Unternehmen angezogen werden. Die Ergebnisse können noch nicht bewertet werden.

SWOT-Analyse

Tabelle 14: SWOT-Analyse der F&I-Politik in den Quantentechnologien in Kanada

<p>Strength</p> <ul style="list-style-type: none"> • Lange Tradition in der Quantenforschung, gute Voraussetzungen für die wirtschaftliche Nutzung der Quantentechnologien • Es haben sich drei regionale Cluster mit thematischen Schwerpunkten gebildet • Nähe zu den USA erleichtert Zugang zu Kapital, US-Unternehmen mit Niederlassungen in Kanada präsent 	<p>Weakness</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fragmentiertes Fördersystem mit guten Instrumenten über alle Phasen des Innovationsprozess, diese sind aber nicht aufeinander abgestimmt • F&I politischer Planungshorizont zu kurz, um grundlegende technische Probleme zu lösen • Transfer ist eine Herausforderung, der rechtliche Rahmen behindert den Transfer zwischen Universitäten und Forschungseinrichtungen
<p>Opportunities</p> <ul style="list-style-type: none"> • Umfangreiche Investitionen bereits vor der Bekanntgabe der Strategie erfolgt, Strategie fokussiert auf den Transfer, Anwendung und Diffusion von Innovationen 	<p>Threat</p> <ul style="list-style-type: none"> • Exportrestriktionen und Dual-Use erschwert die Forschungszusammenarbeit • Fehlende Normen und Standards, Gefahr, dass sich große Unternehmen aus dem Ausland ggf. kanadischen Lösungen durchsetzen

- Sicherung der technologischen Souveränität in einem global wachsenden Quantenmarkt
 - Die Strategie hat die ressortübergreifende Koordinierung befruchtet, vorher wenig Abstimmung
 - Forschende aus der Komfortzone holen und neue Kooperationsformen einfördern
- Kürzungen der F&E-Förderung aufgrund neuer politischer Prioritäten

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

5.2.6 USA

Das Interesse der US-Regierung an Quantentechnologien reicht bis in die Mitte der 1990er Jahre zurück, als das National Institute of Standards and Technology (NIST), das Verteidigungsministerium (DOD) und die National Science Foundation (NSF) erste Workshops zu diesem Thema abhielten [231]. Die Unterstützung erfolgt durch verschiedene Förderprogramme, koordiniert von der Nationalen Quanteninitiative (NQI), die 2018 durch den National Quantum Initiative Act ins Leben gerufen wurde und die Quantenforschung und -entwicklung zwischen der NSF, dem Energieministerium (DOE), und dem NIST koordiniert [231].

Die US-Strategie zur Förderung von Quantentechnologien konzentriert sich auf mehrere Ziele [232]:

- Die bestehenden Herausforderungen in der Wissenschaft zu beseitigen und Anwendungen zu verstehen, durch die die Quanteninformationswissenschaft (QIS) der Gesellschaft zugutekommen wird.
- Die Wettbewerbsfähigkeit zu steigern, indem die Technologieentwicklung in Richtung nützlicher wirtschaftlicher Anwendungen von QIS beschleunigt wird und mit internationalen Partnern zusammengearbeitet wird, bei gleichzeitiger Wahrung der nationalen Sicherheit.
- Talentpfade aufbauen und sicherzustellen, dass QIS allen US-Amerikanern zugutekommt.

Die Umsetzung der Strategie soll über die folgenden Handlungsfelder sichergestellt werden [232]:

- Die Forschung und Entwicklung in den Bereichen der Quantentechnologien soll intensiviert werden, um Fortschritte in diesem Bereich zu sichern.
- Entwicklung einer qualifizierten Arbeitskraft durch die Ausbildung von Forschern, Auszubildenden und Studenten.
- Die Förderung der Quantenindustrie und die Schaffung öffentlich-privater Partnerschaften sollen den Technologietransfer unterstützen.
- Aufbau und Erhalt einer robusten Quanteninfrastruktur wird angestrebt, einschließlich Quantencomputern und Netzwerken, um sowohl die Forschung als auch kommerzielle Anwendungen zu unterstützen.
- Entwicklung von Standards in Zusammenarbeit mit der Industrie und internationalen Gremien, um Interoperabilität und Sicherheit zu gewährleisten. Schließlich wird auch die nationale Sicherheit berücksichtigt, indem Technologien wie quantenresistente Kryptographie entwickelt werden. Dieses strategische Rahmenwerk soll sicherstellen, dass die USA

eine führende Rolle in der Quantenwissenschaft und deren Anwendungen einnehmen, indem ein gesundes Ökosystem aus Forschung, Innovation und Kommerzialisierung gefördert wird.

Ministerien und Behörden

Der National Quantum Initiative Act ist ein umfassender Regierungsansatz. Die National Quantum Initiative umfasst Beiträge aus der gesamten Bundesregierung [233].

Der exekutive Hauptakteur in den USA, der die Quantenpolitik über die verschiedenen Einheiten in den USA koordiniert hat, ist der National Science and Technology Council (NSTC). Dieser formulierte zwei entscheidende Berichte für einen nationalen strategischen Ansatz zur Quanteninformationswissenschaft (QIS). Der erste Bericht mit dem Titel "Advancing Quantum Information Science: National Challenges and Opportunities" wurde im Juli 2016 unter Präsident Obama veröffentlicht. Der NSTC veröffentlichte seinen zweiten Bericht, "National Strategic Overview for Quantum Information Science", im September 2018 unter Präsident Trump [231].

Zudem wurde eine neue Bundesbehörde namens **National Quantum Coordination Office (NQCO)** gegründet, die unter dem Office of Science and Technology Policy (OSTP) im Weißen Haus angesiedelt ist und mit der Koordination von Aktivitäten der US-Regierung im Bereich der Quantenforschung und -entwicklung beauftragt ist. Zudem wurde ein neues Bundesberatungsgremium namens National Quantum Initiative Advisory Committee (NQIAC) eingerichtet, das aus Expert:innen aus Wissenschaft, Industrie und Politik besteht und mit der unabhängigen Bewertung und Empfehlung des NQIA-Programms beauftragt ist [231, 234].

Die wichtigsten staatlichen Stellen, die den Großteil der F&E-Förderung im Rahmen des National Quantum Initiative Act verantworten, sind das National Institute of Standards and Technology (NIST), die National Science Foundation (NSF) und das Energieministerium (DOE) [233].

Die **National Science Foundation (NSF)** fördert die Forschung und Ausbildung in der Quanteninformationswissenschaft und trägt jährlich Millionen von Dollar bei. Das **National Institute of Standards and Technology (NIST)** ist für die Entwicklung von Standards für Quantentechnologien verantwortlich und erhält hierfür entsprechende Mittel. Das **Energieministerium (DOE)** spielt eine zentrale Rolle durch die Einrichtung mehrerer Forschungszentren für Quanteninformationstechnologie, die mit bedeutenden finanziellen Mitteln unterstützt werden. Die **Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA)** fördert Initiativen zur Entwicklung von Quantentechnologien für Verteidigungsanwendungen.

Zentrale Programme, Maßnahmen und Initiativen

Die von der National Science Foundation (NSF) finanzierten **NSF Quantum Leap Challenge Institutes** zielen darauf ab, Quantentechnologien durch interdisziplinäre Forschung voranzubringen und Talente auszubilden, indem Forscher:innen aus Universitäten, nationalen Laboratorien und der Industrie zusammengebracht werden [235]. Sie decken Bereiche von Quantencomputing und Algorithmen bis hin zur Bildung und Arbeitskräfteentwicklung ab. Diese Institute sind: Q-SEnSE (Quantum Systems through Entangled Science and Engineering), HQAN (Hybrid Quantum Architectures and Networks) und das Institute for Present and Future Quantum Computing [235]. Im Rahmen ihrer umfassenderen "Quantum Leap"-Initiative hat die NSF auch eine **Quantum Foundry** eingerichtet, die Forscher und Industrie zusammenbringt, um

neue Materialien für Quantentechnologien zu entwickeln, sowie das **Center for Quantum Networks**, mit dem Ziel, ein fehlerkorrigiertes Quantennetzwerk aufzubauen [235].

Das DOE arbeitet mit großen Industrieakteuren und akademischen Institutionen zusammen, um fünf Forschungszentren für Quanteninformationswissenschaft (**QIS-Zentren**) in seinen nationalen Laboratorien zu etablieren, die Forschung betreiben, Prototypen erstellen, Testumgebungen bereitstellen und die Übersetzung und Kommerzialisierung beschleunigen sollen.

Zusätzlich arbeitet das DOE an einem Plan für ein landesweites **Quanteninternet** [235].

Im März 2020 begann die DARPA das Programm **Optimization with Noisy Intermediate-Scale Quantum devices** (ONISQ), um die Kombination von NISQ- und klassischen Systemen zur Lösung kombinatorischer Optimierungsprobleme zu erforschen [235].

Die **National Q-12 Education Partnership**, angeführt vom Weißen Haus (Office for Science and Technology Policy) und NSF, strebt zudem an, eine vielfältige Fachkräufteaufstellung im Quantentechnologiebereich zu schaffen. Die Partnerschaft von Industrie, wissenschaftlichen Gesellschaften, Ausbilder:innen und dem NSF-unterstützten Q2Work-Programm wird Lehrpläne (von der Mittelschule bis zum College) und berufliche Weiterbildung für Lehrer entwickeln [235].

Durch das NIST wird das **Quantum Economic Development Consortium** (QED-C) gefördert, um eine Quantenindustrie und die dazugehörigen Lieferketten zu entwickeln [235]. Das Netzwerk aus Industrie-, Wissenschafts- und Regierungsakteuren [236] stellt ein bedeutendes Instrument der US-Strategie dar, um ihre Fähigkeiten in der Quanteninformationswissenschaft und -technologie zu verbessern und die globale Führungsrolle zu sichern. Befragte Expert:innen berichten, dass die Zusammenarbeit gut funktioniert und das Netzwerk stetig wächst. Das Netzwerk sei für internationale Partner offen.

Aktueller Stand der Umsetzung

- Die US-Regierung hat erhebliche Mittel für Quantentechnologien bereitgestellt, hauptsächlich im Rahmen der National Quantum Initiative (NQI): Das Energieministerium (DOE) kündigte 2020 eine Finanzierung von etwa 625 Millionen Dollar über fünf Jahre für die Einrichtung von Forschungszentren für Quanteninformationswissenschaft an. Die folgenden Zentren wurden ausgewählt [237]:
 - Q-NEXT (Next Generation Quantum Science and Engineering am Argonne National Lab)
 - C2QA (Co-design Center for Quantum Advantage am Brookhaven National Lab), SQMS (Superconducting Quantum Materials and Systems Center am Fermilab),
 - QSA (Quantum Systems Accelerator am Lawrence Berkeley National Lab)
 - QSC (The Quantum Science Center am Oak Ridge National Lab).
- Die QIS-Centers haben bedeutende Fortschritte bei Quantenalgorithmien, Computerarchitekturen, Quantensensoren und stabileren Qubits erzielt [231].
- Die National Science Foundation (NSF) hat 2019 zugesagt, um neue Quantum Leap Challenge Institutes zu etablieren, die jeweils etwa 25 Millionen Dollar über fünf Jahre erhalten [238]. Die Quantum Leap Challenge Institutes sind großangelegte interdisziplinäre Forschungsprojekte, die darauf abzielen, die Grenzen der Quanteninformationswissenschaft und -technik zu erweitern. Die Forschung an diesen Instituten wird sich auf die Felder Quantencomputing, Quantenkommunikation, und Quantensensorik konzentrieren. Die

Institute sollen multidisziplinäre Ansätze zur Erreichung spezifischer wissenschaftlicher, technologischer und bildungsbezogener Ziele in diesen Bereichen fördern. Es werden zwei Arten von Auszeichnungen im Rahmen dieses Programms unterstützt: (i) 12-monatige Konzeptualisierungsstipendien zur Unterstützung von Teams bei der Entwicklung nachfolgender Institutsanträge und (ii) 5-jährige Challenge Institute Auszeichnungen zur Errichtung und zum Betrieb der Quantum Leap Challenge Institutes:

- NSF Quantum Leap Challenge Institute for Present and Future Quantum Computing an der University of California-Berkeley
- NSF Quantum Leap Challenge Institute for Robust Quantum Simulation an der University of Maryland, College Park
- NSF Quantum Leap Challenge Institute for Quantum Sensing in Biophysics and Bioengineering an der University of Chicago
- NSF Quantum Leap Challenge Institute for Hybrid Quantum Architectures and Networks an der University of Illinois at Urbana-Champaign
- NSF Quantum Leap Challenge Institute for Enhanced Sensing and Distribution Using Correlated Quantum States an der University of Colorado at Boulder
- Die NSF Quantum Leap Challenge Institutes haben die Quantencomputing- und Simulationstechnologien vorangetrieben und eine neue Generation von Wissenschaftlern und Ingenieuren ausgebildet [231].
- Das National Institute of Standards and Technology (NIST) hat erhöhte Mittel für Quantenmessungen und Standards erhalten, obwohl die genauen Beträge jährlich variieren. Diese Zahlen stellen nur einen Teil der Gesamtinvestition dar, da zusätzliche Mittel durch weitere Programme und Initiativen hinweg bereitgestellt werden. Die gesamte Investition beläuft sich auf mehrere Milliarden Dollar und zielt darauf ab, die Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien in den USA über mehrere Jahre hinweg zu beschleunigen. Im Jahr 2022 hat das NIST bekannt gegeben, dass die ersten vier quantenresistenten kryptografischen Algorithmen identifiziert werden konnten. Diese Algorithmen sind Teil eines langfristigen Projekts zur Entwicklung kryptografischer Standards, die vor den Bedrohungen durch Quantencomputer schützen sollen. Die ausgewählten Algorithmen sind: CRYSTALS-Kyber (für die allgemeine Verschlüsselung) sowie CRYSTALS-Dilithium, FALCON und SPHINCS+ (für digitale Signaturen). Diese Algorithmen werden in den kommenden Jahren weiter standardisiert, um den Datenschutz und die Cybersicherheit in einer zukünftigen Quantencomputer-Ära zu gewährleisten [239].
- Das Quantum Economic Development Consortium (QED-C) hat mit der Industrie Quantenstandards entwickelt und eine Lieferkette für die Kommerzialisierung von Quantentechnologien geschaffen. Insgesamt haben diese Programme dazu beigetragen, dass die USA ihre Wettbewerbsvorteile in der Quantenwissenschaft und -technologie auf globaler Ebene beibehalten und sowohl theoretische Fortschritte als auch praktische Anwendungen unterstützt werden [231].
- Im Mai 2024 unterzeichneten die Vereinigten Staaten und Deutschland eine gemeinsame Erklärung zur Zusammenarbeit in den Quantentechnologien. Die Erklärung spiegelt die langjährige Geschichte der Zusammenarbeit zwischen den Ländern wider, basierend auf gemeinsamen Werten und dem gegenseitigen Verständnis, dass die Kombination der Expertise beider Länder entscheidend ist, um Quantentechnologien zum Nutzen der Menschheit zu verwirklichen [240].

SWOT-Analyse

Tabelle 15: SWOT-Analyse der F&I-Politik in den Quantentechnologien in den USA

<p>Strength</p> <ul style="list-style-type: none"> • Umfassende staatliche Förderung durch DOE, NSF, and NIST • Führende F&E-Einrichtungen • Kooperation zwischen Wissenschaft, Wirtschaft, Politik, u.a. begleitet durch Quantum Economic Development Consortium (QED-C) • Globale Führungsrolle durch frühzeitige Förderung der Quantentechnologien 	<p>Weakness</p> <ul style="list-style-type: none"> • Fachkräftemangel • KMU sind z.T. von öffentlicher Förderung abhängig, Großunternehmen wie IBM, Google können kaum an öffentlichen Programmen teilnehmen • Abhängigkeit von internationalen Lieferketten, bestimmte Materialien und Komponenten werden aus dem Ausland bezogen
<p>Opportunities</p> <ul style="list-style-type: none"> • Entwicklung der Quanten-Industrie, wachsendes Interesse des privaten Sektors • Einflussnahme der USA auf globale Standards und Normen durch internationale Kooperationen • Zugang zu neuen Märkten 	<p>Threat</p> <ul style="list-style-type: none"> • Wissenschaftliche und technische Herausforderungen schränken die praktische Anwendung aktuell noch ein • Internationaler Wettbewerb, insbesondere durch umfangreiche Investitionen in China und der EU • Sicherheitsrisiken • Öffentliche Wahrnehmung und ethische Bedenken könnten zu öffentlichem Misstrauen oder regulatorischen Herausforderungen führen • Abschottung wichtiger Märkte, die Bestrebungen der EU und ihrer Mitgliedsländer zur Sicherung der technologischen Souveränität wird als Protektionismus wahrgenommen

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

5.2.7 China

Im Jahr 2006 veröffentlichte China den "**Mittel- bis langfristigen Plan für die Entwicklung von Wissenschaft und Technologie (2006-2020)**" mit dem Ziel, bis 2020 eine innovationsorientierte Gesellschaft zu werden. Die Quantenforschung wurde bereits in dieser Strategie als Thema für staatlich geförderte wissenschaftliche Großprojekte erwähnt. [241] Seitdem hat die Regierung die Quantentechnologien kontinuierlich unterstützt. Die Förderung der Entwicklung von Quantencomputern wird auch in der 2015 veröffentlichten Industriestrategie "**Made in China 2025**" erwähnt, die darauf abzielt, die bahnbrechende Entwicklung in der IT-Industrie der neuen Generation zu fördern. Darüber hinaus wiesen einige Expert:innen darauf hin, dass die Veröffentlichung von NSA-Dokumenten durch Edward Snowden im Jahr 2013 die Sichtweise der chinesischen politischen Führung in Bezug auf die nationale Sicherheit beeinflusst

und die strategische Bedeutung der Quantenkommunikationstechnologien erhöht haben könnte. [242]

Seit 2006 ist die Quantentechnologie auch in den Fünfjahresplänen des Landes enthalten, dem wichtigsten politischen Dokument der Kommunistischen Partei Chinas für die wirtschaftliche und soziale Entwicklung. Im 13. Fünfjahresplan (2016-2020) standen Quantenkommunikation und -computing auf der Liste der wichtigsten wissenschaftlichen und technologischen Themen, bei denen bis 2030 ein Durchbruch erzielt werden soll. [243] Der **14. Fünfjahresplan (2021-2025)** und die darin enthaltene "Vision 2035" nennen die **Quanteninformation** ebenfalls als eine vorrangige Pioniertechnologie, die den Ausbau der wissenschaftlichen und technologischen Kapazitäten und die Beschleunigung der Industrialisierung in diesem Bereich erfordert. Darüber hinaus fordert der Plan die weitere Förderung der **militärisch-zivilen Innovationszusammenarbeit** in mehreren Bereichen, einschließlich der Quantenwissenschaft und -technologie. [244]

Insgesamt hat **China seit mehr als 15 Jahren ein starkes politisches Interesse an Quantentechnologien, sowohl aus wirtschaftlichen als auch aus sicherheitspolitischen Gründen.**

Die Quantentechnologie wird auch in der jüngsten Informations- und Kommunikationspolitik Chinas erwähnt. Der im April 2024 veröffentlichte **Aktionsplan zur Entwicklung von Informationsstandards für 2024-2027** [245] verspricht, die Entwicklung von **Quanteninformationsstandards** zu beschleunigen und die Forschung an Standards für Quantencomputer, -kommunikation und -messung durchzuführen.

Im Gegensatz zu Quantencomputing und -kommunikation ist die Quantensensorik in strategischen Dokumenten relativ wenig vertreten. In einer Studie wurde festgestellt, dass Chinas technologische Steuerung zur Förderung der Quantensensorik weniger entwickelt ist als die der USA. [246] Allerdings wurde vor kurzem der **"State Council's metrology development plan for 2021-35"** (**Entwicklungsplan des Staatsrats für das Messwesen für 2021-35**) veröffentlicht, und die Forschung im Bereich der Quantensensorik wird im Rahmen dieses Plans weiter vorangetrieben. [247]

Viele der oben genannten strategischen Dokumente enthalten keine direkten Angaben zu spezifischen F&E-Zielen mit einem klaren Zeitplan. Der (auch politisch) einflussreiche chinesische Quantenforscher Prof. Jian-Wei Pan, ein Akademiker der CAS, der den Start des Micius-Satelliten leitete, erklärte jedoch, **China wolle bis 2030 ein globales Quantenkommunikationsnetz aufbauen**

Ministerien und Behörden

- **Der Staatsrat** ist die oberste Verwaltungsbehörde der Volksrepublik China und das funktionale Zentrum der Staatsmacht.
 - Die Chinesische Akademie der Wissenschaften (**CAS**) ist die größte Forschungsorganisation der Welt und besteht aus mehr als 100 angeschlossenen Forschungsinstituten. Die CAS ist eine Institution, die direkt dem Staatsrat unterstellt ist, und die Rolle des höchsten Beratungsgremiums für Wissenschaft und Technologie für die Regierung innehat.
- Das Ministerium für Industrie und Informationstechnik (**MIIT**) ist für die Industrieentwicklung insbesondere bezüglich der Informationstechnologien zuständig.

- Im Jahr 2024 gab das MIIT zusammen mit sieben anderen Ministerien "Umsetzungsempfehlungen zur Förderung der innovativen Entwicklung von Zukunftsindustrien" heraus, um Aktionspläne zur Beschleunigung der Entwicklung aufstrebender Industrien zu skizzieren. Quantencomputer werden als eines der "ikonischen Produkte" genannt. [248]
- Die "China Academy of Information and Communications Technology" (CAICT) ist ein Forschungsinstitut, das direkt dem MIIT unterstellt ist und als spezialisierter Think-Tank für die Regierung fungiert. [249]
- Das Ministerium für Wissenschaft und Technologie (MoST) übernimmt eine führende Rolle bei der Einrichtung einer nationalen Plattform für das Wissenschaft- und Technologie-Management und bei der Verwaltung von Top-down-F&E-Finanzierungsprojekten zur Quantentechnologie (siehe nächster Abschnitt).
 - Die National Natural Science Foundation of China (NSFC) ist eine Förderagentur, die seit 2018 vom chinesischen Außenministerium verwaltet wird. Der Fokus der Förderagentur liegt auf Forschungsförderung, Talentförderung und Infrastruktur für die Grundlagenforschung. [250]
- In China spielen auch die **Provinzregierungen** eine wichtige Rolle in der F&I-Politik. Auf der Grundlage des Fünfjahresplans der Zentralregierung geben die **Provinzregierungen** auch ihre eigenen Pläne bekannt, und die Quantentechnologien werden auch in einigen solcher Dokumente erwähnt.

Zentrale Programme, Maßnahmen und Initiativen

Seit 2006 haben Chinas Ministerien und Behörden F&E-Programme wie die folgenden aufgelegt:

- Nationale F&E-Schlüsselprojekte des MoST (früher "863/973-Programm" genannt) [251]
 - Projekte zur "Quantenkontrolle" (2006-2010 und 2011-2015)
 - Projekte zur "Quantenkontrolle und Quanteninformation" (2016-2020)
- S&T Innovation 2030 Programm – "Quantenkommunikation und Quantencomputer" Projekte (ab 2023) von MoST
- Von 2006 bis 2019 hat die NSFC mehrere Förderprojekte organisiert, wie z. B. „Single Quantum State Detection and Interaction“, „Quantum Metrology“ und "National major scientific research instruments and equipment development" [251]
 - Im Jahr 2020 startete das NSFC das Großforschungsprogramm zur Konstruktion und Manipulation von Quantensystemen der zweiten Generation mit einer direkten Finanzierung von 200 Millionen RMB für einen 8-Jahres-Zyklus [252]
- Die CAS organisierte auch mehrere Initiativen, darunter Satellitenprojekte und den Aufbau von Quantenkommunikations-Infrastruktur. [251]

Zhang et al. schätzten den Gesamtbetrag der öffentlichen Mittel für die Quanteninformationsforschung von 2006 bis 2019 auf rund 977 Millionen USD, indem sie die Mittel von MoST, NSFC und CAS zusammenrechneten. [251] Im Jahr 2017 wurde jedoch ein weiteres wichtiges Instrument vorgestellt, nämlich die Einrichtung **des National Laboratory of Quantum Information**. Das nationale Labor wurde mit einer Anfangsinvestition von 7 Milliarden RMB (ca. 900 Mio. Euro) ins Leben gerufen, und es ist geplant, weitere 100 Milliarden RMB (ca. 13 Mrd.

Euro) über fünf Jahre zu investieren. [242] Angesichts dieser enormen Investitionen schätzen einige Forscher, dass sich die Gesamtfinanzierung für Quantentechnologien auf mehr als 15 Milliarden USD belaufen könnte, was weit über Zhangs Schätzung hinausgeht.⁵

Darüber hinaus spielen auch die chinesischen Provinzregierungen eine wichtige Rolle bei der F&E-Förderung. So kündigte der 2017 eingerichtete **Anhui Quantum Science Industry Development Fund** an, 10 Milliarden RMB (ca. 1,3 Mrd. Euro) für Quantencomputing, Kommunikation und Metrologie bereitzustellen.

Eine weitere Maßnahme der lokalen Regierungen ist die Einrichtung von Industrieclustern, um Investitionen und Arbeitskräfte anzuziehen. So hat die Provinzregierung von Anhui im Jahr 2021 ihren 14. Fünfjahresplan veröffentlicht, in dem sie vorschlägt, die Innovationskette der Quanteninformationsindustrie auf der Grundlage der "Quantum Avenue" in der nationalen Hightech-Industrieentwicklungszone von Hefei aufzubauen und bis 2025 eine Reihe von Quanten-Einhorn-Unternehmen zu fördern. [253]

Eine systematische Analyse der Initiativen der regionalen und lokalen Gebietskörperschaften ist jedoch schwierig und geht über den Rahmen dieser Studie hinaus.

Aktueller Stand der Umsetzung

Im Folgenden werden Beispiele für Chinas herausragende Leistungen im Bereich der Quantentechnologien genannt.

- Der erste Quantenkommunikationssatellit "Micius (Mozi)" wurde 2016 gestartet, und 2017 wurde die interkontinentale satellitengestützte Quantenschlüsselverteilung (QKD) demonstriert. [254]
- China hat das weltweit größte QKD-Backbone (Quantenkommunikations-Netz) aufgebaut, das aus einer 2000 km langen Glasfaserverbindung zwischen Peking und Shanghai und einer Satellitenverbindung zwischen zwei 2600 km voneinander entfernten Observatorien besteht. [79] Laut Ankündigungen soll die Länge des Backbone-Netzes des National Quantum Secure Communication Network seit Ende 2022 mehr als 10.000 km betragen. [255]
- Der erste photonische Quantencomputer, der die Quantenüberlegenheit erreicht, wurde 2020 unter dem Namen "Jiuzhang" vorgestellt. [256] Im Oktober 2023 wurde der Jiuzhang 3, der Prototyp eines optischen Computers mit 255 Photonen, gebaut. Das Forscherteam behauptete, dass die neue Maschine nur 1,27 μ s für eine Berechnung benötigt, für die der schnellste klassische Computer, Frontier, mehr als 20 Milliarden Jahre brauchen würde. [257]
- Im Januar 2024 nahm der autonome supraleitende Quantencomputer der dritten Generation "Origin Wukong" seinen Betrieb auf. Der Zugang zum Quantencomputer steht Nutzern aus aller Welt offen, und das System hat drei Monate nach dem Start rund 180.000 Aufgaben erledigt. [258]

⁵ Im Allgemeinen ist es aufgrund des Mangels an veröffentlichten Informationen und der Schwierigkeit, lokale Finanzierungsquellen zu ermitteln, schwierig, den Umfang der öffentlichen Finanzierung in China genau zu beurteilen.

Wie aus den obigen Ausführungen deutlich hervorgeht, hat das Land seine Stärke vor allem im Bereich der Quantenkommunikation unter Beweis gestellt, unterstützt durch nationale und provinzielle Fördermittel. Selbst die US-Regierung erkennt an, dass sie bei der satellitengestützten Quantenkommunikationstechnologie gegenüber China aufholen muss. [259]

SWOT Analyse

Tabelle 16: SWOT-Analyse der F&I-Politik in den Quantentechnologien in China:

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Langjährige Unterstützung der Politik durch strategische nationale Projekte • Umfangreiche öffentliche Mittel, insbesondere durch den Aufbau eines nationalen Labors • Auch die Provinzregierungen unterstützen die Technologie finanziell 	<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Geringere Sichtbarkeit der Veröffentlichungen (geringerer Crown-Indikator, siehe Kapitel 4), trotz der großen Anzahl von Veröffentlichungen • Im Vergleich zu den USA sind die industriellen Akteure in China weniger aktiv, was die Anzahl der Unternehmen, die Kapitalverteilung und die Lieferkettenkapazitäten im Bereich des Quantencomputings angeht. [260]
<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hohes politisches Interesse an Technologien für nationale Sicherheit („Snowden-Schock“) • Starke industrielle Akteure fördern aktiv die Kommerzialisierung und Anwendung von Quantencomputern (z. B. Alibaba, QuantumCTek Co., Ltd) 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Begrenzter Zugang zu externen Ressourcen aufgrund des Konflikts zwischen den USA und China

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

5.2.8 Japan

Seit 1996 legt Japan alle fünf Jahre seine übergreifende Wissenschafts- und Technologiepolitik im Basisplan für Wissenschaft und Technologie (engl. "Basic Plan for Science and Technology") dar. Im 4. Basisplan (2011-2015) wurde "Quantum" zum ersten Mal ausdrücklich erwähnt, allerdings im Zusammenhang mit Quantenstrahlanlagen (z. B. Teilchenbeschleuniger, Synchrotrone). [261] **Im 5. Basisplan (2016-2020) wurde „Optik und Quantentechnologie“ als einer der zu entwickelnden zukünftigen Schlüsseltechnologiebereiche genannt.** [262] Seitdem hat die Regierung mehrere F&E-Programme zur Förderung dieser Technologie vorbereitet. Damals verfolgten jedoch verschiedene Ministerien ihre eigenen Aktivitäten, und ihre Bemühungen waren nicht ausreichend koordiniert. Die Regierung erkannte auch, dass Japan in einigen Bereichen der Anwendung und Kommerzialisierung von Quantentechnologien im Rückstand war.

Um eine umfassende (von der Forschung bis zur Innovation), mittel- und langfristige Strategie in diesem Bereich zu entwickeln, die die gemeinsamen Anstrengungen von Industrie,

Wissenschaft und Regierung mobilisiert, wurde die "Quantentechnologie- und Innovationsstrategie (2020)" formuliert. Die Strategie definiert vier große Technologiebereiche (Quantencomputer und -simulation, Quantenmetrologie und -sensorik, Quantenkommunikation und -kryptographie sowie Quantenmaterialien) und nennt Prioritätstechnologiebereiche, die sofort gefördert werden sollen, sowie grundlegende Technologiebereiche, die mittel- und langfristig entwickelt werden sollen. Für jeden Prioritätsbereich wurden Technologiefahrpläne entwickelt. [263]

Kurz nach der Veröffentlichung der oben genannten Strategie, die sich stark auf die Forschung und Entwicklung im Bereich der Quantentechnologie konzentriert, begann die Regierung auch mit der Formulierung einer Zukunftsvision für die Gesellschaft, um die Vorteile der Quantentechnologie zu nutzen. Infolgedessen wurde **die Vision der zukünftigen Quantengesellschaft (2022)** [264] als "**Strategie für den gesellschaftlichen Wandel durch Quantentechnologien**" veröffentlicht, die die Aktualisierung der Technologie-Roadmaps begleitet. Die Vision besteht aus drei Säulen:

- Integration von Quantentechnologien in das sozioökonomische System, Hybridisierung mit dem klassischen System zur wirtschaftlichen Entwicklung und Lösung gesellschaftlicher Probleme.
- Nutzung von Spitzentechnologien (z. B. Quantencomputer, Quantenkommunikations-Testbeds)
- Gründung und Aktivierung von neuen Unternehmen/Start-ups

Und die wichtigsten Ziele für 2030 wurden wie folgt definiert:

- Die Zahl der Nutzer der Quantentechnologie soll auf 10 Millionen steigen.
- Steigerung des Produktionswerts der auf Quantentechnologien basierenden Industrie auf 50 Billionen Yen.
- Förderung von Einhorn-Unternehmen im Bereich der Quantentechnologien.

Im darauffolgenden Jahr wurde **die Strategie zur "Schaffung einer Quantum Future Industry" (2023)** veröffentlicht, um die politischen Maßnahmen zur Verwirklichung der Vision festzulegen. Gemäß der Strategie werden die Entwicklung von Anwendungsfällen, die Verbesserung des Nutzerumfelds, die Bewältigung von Geschäftsrisiken, die Gründung neuer Unternehmen und die Entwicklung von Fachkräften in der Branche weiter unterstützt. [265] Darüber hinaus wurden die **Maßnahmen zur Förderung des Aufbaus und der Entwicklung der Quantenindustrie (2024)** als ergänzendes Dokument veröffentlicht, um die Globalisierungsperspektive zu betonen, die sich auf die Zusammenarbeit mit gleichgesinnten Ländern und die Erhöhung der Sichtbarkeit in den globalen Forschungsgemeinschaften bezieht. [266]

Ministerien und Behörden

Diese Quantenstrategien werden im Rahmen der Diskussion **im Expertengremium für Innovation in der Quantentechnologie** und den zugehörigen Arbeitsgruppen formuliert und vom **Rat für Wissenschaft, Technologie und Innovation (engl. Council for Science, Technology and Innovation – CSTI) im Kabinettsamt** genehmigt. Das Gremium setzt sich aus Expert:innen aus Wissenschaft und Industrie zusammen, und an den Sitzungen nehmen auch Regierungsbeamte aus verschiedenen Ministerien und Behörden teil. Da der CSTI erklärt hat, dass die

Quantenstrategie mit seinen anderen strategischen Themen wie der KI-Strategie und der Halbleiterstrategie im Einklang stehen sollte, sind die Gremien zur Formulierung dieser Strategien ebenfalls relevante Akteure bei der Formulierung der Quantenstrategie.

Eines der wichtigsten Ministerien in diesem Technologiebereich ist das Ministerium für Bildung, Kultur, Sport, Wissenschaft und Technologie (**MEXT**), das zusammen mit seinen zuständigen Agenturen und RTOs mehrere verschiedene Instrumente vorbereitet (siehe nächster Abschnitt). Auch das Ministerium für Wirtschaft, Handel und Industrie (**METI**) und das Ministerium für Informations- und Kommunikationsangelegenheiten (**MIC**) verfügen über eigene F&E-Programme. Trotz der Bemühungen, eine umfassende Strategie zu formulieren, wird darauf hingewiesen, dass die tatsächliche Umsetzung der Programme bis zu einem gewissen Grad durch organisatorische Silos beeinträchtigt wird – MEXT und METI arbeiten an Quantensensorik und -informatik, während unter MIC nur die Quantenkommunikation entwickelt wird.

Ein wichtiger industrieller Akteur bei der Formulierung der Quanteninnovationspolitik ist die "Quantum Strategic Industry Alliance for Revolution" (**Q-STAR**). [267] Q-STAR ist ein unabhängiges Industriekonsortium, dessen Gründung zwar auf eine Regierungsinitiative zurückgeht, das aber eng mit der Politikgestaltung verbunden ist, da einige seiner Vorstandsmitglieder im Ausschuss für Industriepolitik mitarbeiten. Was die wichtigsten wissenschaftlichen Akteure anbelangt, so spielt **das RIKEN-Zentrum für Quanteninformatik** eine Rolle als zentrale Koordinierungsstelle von 11 Quanten-Innovationszentren, die im Rahmen der Strategie eingerichtet wurden (siehe Einzelheiten im nächsten Abschnitt). [268]

Zentrale Programme, Maßnahmen und Initiativen

Die Strategie für Quantentechnologie und Innovation gibt einen Überblick über alle Bemühungen der Regierung im Bereich der Quantentechnologien in den verschiedenen Ministerien und ihren Programmen. Beispiele sind in der Tabelle 17 aufgeführt. [261]

Tabelle 17: Beispiele für F&E-Programme im Rahmen der Strategie für Quantentechnologie und Innovation in Japan:

Programm	Ministerien	Technologischer/Instrumenteller Schwerpunkt	Erwartete Ergebnisse/Auswirkungen	Haushalt/Zeitraum
Strategische Grundlagenforschung	MEXT (JST)	Unterschiedliche technologische Schwerpunkte auf der Grundlage der strategischen Ziele Grundlegende F&E	Wissenschaftliche Exzellenz, Schaffung von technologischem Saatgut	Abhängig von verschiedenen Finanzierungslinien
SIP (2./3. Phase; ein Unterprogramm)	Kabinettsamt/MEXT	Fortgeschrittene Laser, Quantenkommunikation (2. Phase); Quantencomputer/Sicherheit und Netzwerke/Sensorik und	Proof-of-Concept für die Kommerzialisierung	2. Phase: ca. 2,2 Milliarden JPY (Haushaltsjahre 2018-2022)

für das Quantenthema)		Innovationsplattform (3. Phase) Angewandte Forschung. Auftragsorientierte F&E		3. Phase: ca. 4 Milliarden JPY (Haushaltsjahre 2023-2027)
Moons- hot (Ziel 6)	Kabinetts- amt/MEXT	Quantencomputer Grundlegende For- schung. Auftragsorien- tierte F&E	Erforderliche Grundlagen- forschung zur Erreichung der künftigen Ziele (bis 2050)	Keine Haus- haltsinformatio- nen speziell für QT Haushaltsjahr 2019-2029
Q-LEAP	MEXT	Quanteninformati- on, Metrologie und Senso- rik, Laser Grundlagenforschung für bestimmte Bereiche und Entwicklung von Humanressourcen für alle Quantenbereiche		Ca. 18 Milliar- den JPY ab dem Haushaltsjahr 2023 Zeitraum: 2018- 2027
Quantum Inno- vation Hubs	MEXT/METI/MIC	Unterschiedliche Schwerpunkte für jedes Zentrum; nicht nur tech- nologische Bereiche, sondern auch Unterneh- mensgründung, interna- tionale Zusammenarbeit usw. Einrichtung von 11 F&E-Zentren	Technologie- führerschaft, Verbesserung der Zusam- menarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie	Keine Angaben (im Haushalts- jahr 2020 wurde ein Sonder- budget von 7,9 Mrd. JPY bereitgestellt)
Quanten- sicher- heit, Netzpro- jekte	MIC	Quantenkommunikation		Ca. 29,4 Milliar- den JPY ab dem Haushaltsjahr 2023 für sieben Projekte

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

Das Kabinettsbüro organisiert zwei missionsorientierte F&E-Programme – Moonshot und das Ministerien-übergreifende Programm zur Förderung strategischer Innovationen (engl. Strategic Innovation Promotion Program – SIP). Während sich das SIP auf F&E-Aktivitäten kurz vor der Kommerzialisierung konzentriert, arbeitet Moonshot an der Grundlagenforschung mit dem langfristigen Ziel, bis 2050 einen fehlertoleranten universellen Quantencomputer zu realisieren. Das Programm unterstützt derzeit verschiedene Arten von Hardwareplattformen, wie supraleitende Qubits, gefangene Ionen, Photonen, Halbleiter und Atome, und **wird den Fokus durch ein Stage-Gate-Schema irgendwann eingrenzen.** [269]

Diese politischen Instrumente konzentrieren sich hauptsächlich auf F&E-Aktivitäten und decken fast alle Bereiche der Quantentechnologien ab. Es wird jedoch festgestellt, dass die **Instrumente für den Technologietransfer** möglicherweise noch **unzureichend** sind, obwohl die Gründung von Quantenunternehmen in den Strategien des Landes stark betont wird. Es gibt einige politische Instrumente, die die Erforschung der Nutzung neuer Technologien in der Wirtschaft und die Gründung von Start-ups unterstützen (z. B. das JST Mirai-Programm und das START-Programm), aber diese Programme sind nicht speziell auf die Quantentechnologie ausgerichtet.

Ein weiteres Problem, das diskutiert wird, ist **der Mangel an Fachexpert:innen** zur Umsetzung der strategischen Vision in der Quantentechnologie. Auch Japan hat aus verschiedenen Gründen, wie der COVID-19-Pandemie und der Währungsabwertung, Schwierigkeiten, ausländische Fachkräfte anzulocken. In jüngster Zeit wurden im Rahmen des Q-LEAP mehrere Personal- und Entwicklungsprogramme aufgelegt, aber es dürfte einige Zeit dauern, bis diese Programme Früchte tragen.

In jüngster Zeit wird die Quantentechnologie als entscheidend für die nationale wirtschaftliche Sicherheit angesehen, und in den Strategien der Quantenindustrie wird die **Sicherung der Lieferkette für kritische Komponenten** erwähnt. Um dieses Problem anzugehen, befasst sich beispielsweise ein Arbeitspaket im Rahmen des SIP damit, die Herausforderungen für die Lieferkette im Quantencomputing zu ermitteln und mit Komponentenlieferanten, einschließlich KMU, zusammenzuarbeiten. [270]

Aktueller Stand der Umsetzung

Da die umfassende Quantum-Strategie erst vor fünf Jahren formuliert wurde, ist es noch zu früh, um die Ergebnisse der F&I-Aktivitäten zu bewerten. Eine wichtige Errungenschaft ist die Mobilisierung öffentlicher Mittel, die für den Zeitraum vom Haushaltsjahr 2018 bis zum Haushaltsjahr 2023 auf rund 259 Milliarden Yen geschätzt werden. [271] Einem Experten zufolge ist dieser Erfolg auf das **gestiegene Bewusstsein der regierenden politischen Partei für die Bedeutung der Quantentechnologie zurückzuführen, da das** Büro des Premierministers und das Kabinettsbüro bei der Gestaltung der F&I-Politik in Japan einen großen Einfluss haben. Dieses Bewusstsein wurde zum Teil von den Akteuren in der Industrie gefördert, aber auch durch die seit mehr als 20 Jahren andauernden inländischen F&E-Aktivitäten.

SWOT Analyse

Tabelle 18: SWOT-Analyse der F&I-Politik in den Quantentechnologien in Japan:

Stärken	Schwächen
<ul style="list-style-type: none"> • Umfassende F&E- und Industriestrategie sowie technologische Roadmaps, um die Anstrengungen der verschiedenen Akteure aufeinander abzustimmen; Kohärenz zwischen Industrie- und Regierungsstrategie 	<ul style="list-style-type: none"> • Relativ geringe Unterstützung für den Technologietransfer und die Gründung neuer Unternehmen • KMU, die an Komponententechnologien arbeiten, sind nicht vollständig in relevantem Industriekonsortium (Q-STAR) vertreten

<ul style="list-style-type: none"> • Jüngste Mobilisierung öffentlicher Mittel nach der Veröffentlichung der Strategie für Quantentechnologie und Innovation 	
<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Hohes politisches Bewusstsein für Quantentechnologien • Starke industrielle Akteure in einigen klassischen Informations- und Kommunikationstechnologien, wie z. B. in der Prozessorherstellung (z. B. Fujitsu Limited) • Aktive Beteiligung von Endnutzerunternehmen an den Herausforderungen der Quantentechnologien (Beteiligung an Q-STAR aus der Chemie-, Automobil- und Finanzbranche) 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Kleiner Risikokapitalmarkt, Risikovermeidung im Privatsektor bei F&E-Investitionen • Fehlende Fachkräfte • Schwierigkeiten dabei ausländische Fachkräfte anzuziehen

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

5.2.9 Südkorea

Südkoreas frühe Quantenpolitik konzentrierte sich auf die Quanteninformations- und -kommunikationstechnologie. Im Jahr 2014 verkündete die Regierung die "Mid- to Long-term Strategy for Quantum Information and Communication" (Mittel- bis langfristige Strategie für Quanteninformation und -kommunikation) mit dem Ziel, bis 2020 weltweit führend auf diesem Gebiet zu sein. [272] Auch der 2017 veröffentlichte „Mid- to Long-Term Master Plan in Preparation for the Intelligent Information Society“ (Mittel- bis langfristiger Masterplan zur Vorbereitung der intelligenten Informationsgesellschaft) erwähnt die Quantenkryptografie-Technologie für zuverlässige und sichere Netzwerke mit folgenden Meilensteinen: [273]

- Erprobung der Quantenkryptografie-Technologie in exklusiven Netzen als Mittel zur Gewährleistung maximaler Sicherheit für nationale Einrichtungen und Datenzentren bis 2020
- Ausweitung der durch Quantencodes geschützten Netze auf andere Einrichtungen und Geräte, die ein hohes Maß an Sicherheit erfordern, bis 2025
- Entwicklung der Kerntechnologie für das "Quanteninternet" und Aufbau der entsprechenden Infrastruktur bis 2030

Im Jahr 2021 erkannte die koreanische Regierung jedoch, dass das Land in Bezug auf Technologie und Investitionen in die Quantentechnologie immer noch im Rückstand ist. Mit dem Ziel, **in den 2030er Jahren ein „führendes Land“ zu werden**, wurde der „**Nationale Strategieplan für Quantenwissenschaft und -technologie**“ angekündigt. Der Plan skizziert drei Schritte für die zukünftige Entwicklung der Quantentechnologie in Korea: [274]

- Basis (2021-2024) – mit Schwerpunkt auf der Entwicklung von Kerntechnologie und Arbeitskräften
- Anwendungen (2025-2030) – Präsentation erfolgreicher Fälle von akademischen und industriellen Anwendungen

- Industrie (2031-2035) – Industrialisierung der Quantentechnologie

Im März 2022 fand in Südkorea ein Regimewechsel statt und Yoon Suk Yeol wurde neuer Präsident, aber die Quantentechnologie gilt immer noch als Schlüsseltechnologie. Unter der neuen Regierung wählte das Ministerium für Wissenschaft und IKT (MSIT) **12 nationale strategische Technologien** für weitere Investitionen aus, darunter auch die Quantentechnologie. [275]

Im Jahr 2023 kündigte das MIST die „**Südkoreanische Strategie für Quantenwissenschaft und -technologie**“ an, die darauf abzielt, das Land zum „**globalen Zentrum für die Quantenwirtschaft im Jahr 2035**“ zu machen. In der Strategie werden die folgenden spezifischen Ziele definiert: [276]

- Gemeinsame Investitionen der Regierung und des Privatsektors in Höhe von 3 Billionen KRW (ca. 2 Mrd. Euro) zwischen 2023 und 2035, um ein Technologieniveau von 85 Prozent im Vergleich zu führenden Ländern zu erreichen
- Entwicklung eines 1000-Qubit-Quantencomputers mit der Technologie des Landes
- Initiierung eines Intercity-Quantennetzwerks
- Entwicklung von Quantensensoren auf dem neuesten Stand der Technik
- Ausbildung von 2500 Quantenexpert:innen und 10.000 Fachleuten in der Quantentechnologie
- Erhöhung des Quantenmarktanteils auf rund 10 Prozent und Förderung von 1200 Unternehmen der Quantentechnologie

Darüber hinaus wird die Quantentechnologie auch in einer kürzlich veröffentlichten nationalen Wachstumsstrategie, der „**New Growth 4.0 Strategy**“, als eine Zukunftstechnologie genannt, die das Wachstum des Landes vorantreiben soll. [277] Es wird berichtet, dass der Umsetzungsplan des wichtigsten Projekts im Rahmen der Strategie die folgenden Ziele umfasst: [278]

- Öffnung eines 20-Qubit-Quantencomputer-Cloud-Dienstes für den öffentlichen Sektor bis 2024
- Erreichen von 50 Qubits für Quantencomputer bis 2026
- Ausbau der Technologie auf bis zu 1000 Qubits bis 2032

Ministerien und Behörden

Die jüngsten Quantenstrategien wurden vom Ministerium für Wissenschaft und IKT (engl. Ministry of Science and ICT – **MSIT**) angekündigt. Neben dem Ministerium gibt es auch öffentliche Organisationen, die mit dem MSIT verbunden sind und an quantenbezogenen Initiativen arbeiten. Zum Beispiel: [279]

- Die National Research Foundation of Korea (**NRF**) ist eine Fördereinrichtung zur Unterstützung der Grundlagenforschung in Wissenschaft und Technik sowie nationaler strategischer F&E-Programme. [280] Das Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation (**IITP**) ist eine weitere Agentur, die F&E-Projekte in IKT-Bereichen verwaltet. [281]
- Das Korea Institute of S&T Evaluation and Planning (**KISTEP**) ist ein Think-Tank, der für die strategische Planung und Evaluierung von F&E zuständig ist. [282]

Zentrale Programme, Maßnahmen und Initiativen

Seit etwa 2019 hat die südkoreanische Regierung mehrere nationale Projekte zur Forschung und Entwicklung sowie zum Einsatz von Quantentechnologien gestartet. Zum Beispiel:

- Projekt zur Entwicklung der Quantencomputertechnologie (2019) mit 44,5 Milliarden KRW (ca. 30 Millionen Euro) über fünf Jahre. [283]
- Nationales Konvergenznetzprojekt (seit 2020) mit einem Gesamtvolumen von 82 Milliarden KRW (ca. 55 Mio. Euro) zum Aufbau einer Kommunikationsnetzstruktur, die die Regierungsbehörden miteinander verbindet und QKD als Sicherheitslösung verwendet [284]
- "Korean New Deal" (2020): Seit 2020 wurden im Rahmen der Initiative "Digital New Deal" Pilotnetze für Quantenkryptografie in 26 öffentlichen und privaten Einrichtungen eingerichtet. [285]

Um die Vision der neu angekündigten südkoreanischen Strategie für Quantenwissenschaft und -technologie zu verwirklichen, schlug die Regierung die folgenden sieben Aktionsfelder vor: [275]

- **Sicherung von Fachkräften** durch die Einrichtung neuer Abteilungen, die Förderung von Bildungseinrichtungen für die Ausbildung und den internationalen Austausch.
- **Förderung missionsorientierter F&E** zur Entwicklung eines 1000-Qubit-Quantencomputers, eines 100 km großen Quantennetzes in den 2030er Jahren und von Quantensensorik
- **Verbesserung der Forschungs- und Industrieinfrastruktur** durch den Ausbau offener Quantenfabriken, die Einrichtung von Test- und Verifizierungseinrichtungen und die Ermittlung gemeinsamer Geräte, die für die F&E benötigt werden.
- **Schaffung eines industriellen Falles** durch das "Super Start-up 1000+ Projekt" und die "Quantum Concentration Development Zone". Außerdem werden Anreize geschaffen, um die Beteiligung von Unternehmen in diesem Bereich zu fördern.
- **Förderung der Integration von Verteidigung und Sicherheit** durch die Aufstellung von Plänen für den Übergang zur Verschlüsselung der nächsten Generation und die Entwicklung ihrer eigenen Algorithmen.
- **Sicherung der Weltmarktführerschaft:** Ausbau internationaler Technologieallianzen, z. B. mit den USA und der EU, und Erhöhung der Investitionen in die internationale Zusammenarbeit auf 210 Milliarden KRW (ca. 140 Mio. Euro) für 2023-2025 sowie der Zahl der entsandten Mitarbeiter.
- **Einrichtung eines nachhaltigen Unterstützungssystems:** Das "Gesetz zur Förderung der Quantenwissenschaft, -technologie und -industrie" wird verabschiedet.

Die Maßnahmen der neuen Strategie ähneln denen der vorherigen Strategie, verstärken aber bestimmte Aspekte, wie die **Nutzung von Sicherheitslösungen in der Verteidigung und die Unterstützung von Start-ups**. Ab 2023 laufen 12 strategische F&E-Programme in vier verschiedenen Bereichen: 5 für Computing, 3 für die F&E-Grundlagen, 2 für die Sensorik und 2 für die Kommunikationstechnologie. [274]

Obwohl die mittel- bis langfristige Strategie für Quanteninformation und -kommunikation im Jahr 2014 formuliert wurde, dauerte es eine gewisse Zeit, bis die öffentlichen Investitionen für die Strategie anliefen, da die Anträge des MSIT an das Wirtschafts- und Finanzministerium auf Durchführung der Machbarkeitsstudie für Quantenprojekte abgelehnt wurden. Die Investitionen wurden schließlich nach 2018 möglich, als die Befugnis zur Zuweisung von Mitteln für die

Machbarkeitsstudie auf das MIST [261] übertragen wurde. Seitdem ist der Betrag der öffentlichen Investitionen in die Quantentechnologie stark angestiegen, von 10,6 Milliarden KRW (ca. 7 Mio. Euro) im Jahr 2019 auf 60,3 Milliarden KRW (ca. 40 Mio. Euro) im Jahr 2022. [261]

In Südkorea werden Subventionen oder Investitionen manchmal in großem Umfang auf der Grundlage einer Kofinanzierung mit privaten Akteuren getätigt⁶, und die neue Strategie verspricht **bis 2035 öffentlich-private Kooperationsinvestitionen in Höhe von 3 Billionen KRW (ca. 2 Mrd. EUR)**, die sich aus 2,4 Billionen KRW von der Regierung (2023-2035) und 0,6 Billionen KRW vom Privatsektor (2023-2027) zusammensetzen. [288] Es wird also erwartet, dass das Finanzierungsbudget im Rahmen der neuen Strategie weiter steigen wird.

Aktueller Stand der Umsetzung

Da Südkoreas umfassende Quantenstrategien erst vor kurzem formuliert wurden, ist es schwierig, die Ergebnisse ihrer Programme zu bewerten. Allerdings kommen frühere nationale Projekte zum Tragen. Ein Beispiel für die jüngsten Erfolge ist das National Convergence Network Project. Im Jahr 2022 schlossen SK Broadband und IDQuantique, ein in Genf ansässiger Anbieter von Quantenkommunikation, die erste Phase des Projekts ab, das darauf abzielt, ein Kommunikationsnetz aufzubauen, das 48 koreanische Regierungsorganisationen im ganzen Land miteinander verbindet. **In dieser ersten Phase des Projekts entwickelten die Unternehmen eine QKD-Netzwerkinfrastruktur mit einer Gesamtlänge von 800 km.** [289] Diese Leistung ist bemerkenswert, da es sich um einen ersten Versuch handelt, die Quantenkommunikationstechnologie in großem Maßstab in staatlichen Einrichtungen einzusetzen.

SWOT Analyse

Tabelle 19: SWOT-Analyse der F&I-Politik in den Quantentechnologien in Südkorea:

<p>Stärken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eine groß angelegte Infrastruktur für die Quantenkommunikation ist bereits in Betrieb • Die neue Strategie verspricht langfristig umfangreiche öffentlich-private Investitionen (ca. 2 Mrd. EUR von 2023 bis 2035) 	<p>Schwächen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verzögerung bei der Formulierung einer umfassenden Strategie und Aufstockung der öffentlichen Mittel
<p>Chancen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Starke industrielle Basis/Kompetenz in der Bauteiltechnologie (Halbleiter, Mikroelektronik; z. B. Samsung, SK hynix) • Aktive Investitionen großer koreanischer Unternehmen in vielversprechende ausländische Quanten-Start-ups (z. B. Investition von 55 Mio. USD in IonQ) 	<p>Risiken</p> <ul style="list-style-type: none"> • Relativ geringe Anzahl und Sichtbarkeit wissenschaftlicher Veröffentlichungen (vgl. Kapitel 4) • Unzureichende Anzahl von Fachkräften (2022 waren es 384; die neue Strategie

⁶ Die Ankündigung von Ko-Investitionen wird zum Beispiel häufig im Batteriesektor beobachtet [286, 287].

durch Samsung, SK Telecom erwarb ID Quantique)

zielt darauf ab, die Anzahl der Fachkräfte bis 2035 auf 2500 zu erhöhen) [290]

Quelle: eigene Analysen auf Basis von Literaturrecherche und Interviews

5.3 Implikationen für die deutsche F&I Politik

Grundlegend verfolgen die analysierten Quantenstrategien ähnliche übergeordnete Ziele: die Schaffung eines wettbewerbsfähigen Ökosystems durch (weitere) Unterstützung von Forschung und Entwicklung, sowie der Ausbildung und Qualifizierung von Fachkräften, die Kommerzialisierung von Quantentechnologien, die Gestaltung des regulatorischen Rahmens und letztlich das Erreichen oder Erhalten einer globalen Führungsrolle.

In Deutschland gibt es zahlreiche Programme und Initiativen im Bereich Quantentechnologien deren Fokus jedoch stark auf Forschung und Entwicklung ausgerichtet ist. Im Bereich der Grundlagenforschung und angewandten F&E ist Deutschland sehr stark aufgestellt. Hinsichtlich der industriellen Umsetzung, Marktentwicklung und Gestaltung der Rahmenbedingungen besteht noch Entwicklungsbedarf. In der Quantensensorik verfügt Deutschland über wettbewerbsfähige Hersteller und Anbieter von Produkten und Dienstleistungen. Im Quantencomputing und in der Quantenkommunikation hingegen ist die deutsche Wirtschaft stärker in Komponenten (z. B. Lasertechnik) oder Anwendungsbranchen (z. B. Materialien, Mobilität) spezialisiert, die aktuell noch nicht im großen Umfang in die Quantentechnologien investieren. Diese Lücke können Start-ups schließen, die jedoch einen hohen Kapitalbedarf haben, um sich nachhaltig im Markt zu positionieren und sich von etablierten Unternehmen zu differenzieren. Großbritannien und Frankreich haben daher entsprechende Instrumente zur Bereitstellung von Risikokapital geschaffen.

Kanada, Großbritannien und Frankreich legen im Vergleich zu Deutschland einen größeren Wert auf die Förderung und den Ausbau industrieller Anwendungen und Produktionskapazitäten. In Frankreich wird beispielsweise mit dem PROQCIMA-Programm ein Wettbewerbsprinzip verfolgt, in dessen Folge die Anzahl der geförderten Start-ups abnimmt bei steigender Finanzierung. In der letzten Stufe – der Industrialisierungsstufe – werden nur noch die vielversprechendsten Ansätze gefördert. Eine solche langfristige, trichterartige und wettbewerbsgetriebene Förderung für Unternehmen wäre auch für Deutschland denkbar und hätte den Vorteil, dass man zunächst breit und ergebnisoffen fördert (entsprechend der derzeitigen Strategie), sich aber im Laufe der verschiedenen Stufen immer weiter auf die kommerziell vielversprechendsten Ansätze bzw. Vorhaben mit hohem Kapitalbedarf fokussiert. In diesem Kontext stehen z. B. in Frankreich, aber auch in Kanada und Großbritannien die direkte Förderung und die Rolle von Start-Ups mehr im Vordergrund als in der deutschen Förderlandschaft.

Bei der Forschungsförderung formulieren einige Länder spezifischere oder sogar quantitative Ziele (z. B. Frankreich, Großbritannien, Japan). Dies ist in Deutschland bisher wenig der Fall. Auch wenn dies sicherlich nicht immer sinnvoll ist, so könnte es möglicherweise in einigen Förderprogrammen eine konkretere Zielrichtung vorgeben.

In einer global vernetzten Welt, in der alle eine Führungsposition innehaben wollen, ist es von entscheidender Bedeutung, Partnerschaften mit ähnlich denkenden Ländern zu stärken. Deutschland und auch Europa sind in einigen Bereichen derzeit von ausländischen Komponenten und Herstellern abhängig, was die technologische Souveränität gefährden könnte. Es bedarf

umfassender Anstrengungen, um Kompetenzen in den Bereichen Hardware, Software und Implementierung aufzubauen.

Zudem sind Strategien und Handlungskonzepte oder auch Programme in anderen Ländern teilweise längerfristig ausgerichtet. Die untersuchten Länder haben i.d.R. einen längeren Planungshorizont als die Bundesregierung, das Fachprogramm Quantensysteme ist ein guter Ansatz, um langfristige Finanzierung zu sichern. Langfristige Perspektiven schaffen Sicherheiten, insbesondere bei Technologien, die mit teilweise hohen Risiken und einem langen Entwicklungshorizont hin zur Marktreife behaftet sind, helfen eine stabile Community und ein Ökosystem aufzubauen und können dadurch eher Talente halten oder auch weitere anziehen. Kurze Laufzeiten riskieren das Fachkräfte in andere Ökosysteme abwandern.

Großbritannien und Kanada verfolgen explizite Programme, um Fachkräfte anzuwerben und begegnen damit proaktiv dem generellen Problem des zunehmenden Fachkräftemangels. Der Aufbau einer Willkommenskultur für ausländische Arbeitskräfte unterstützt durch gezielte Anreizprogramme für Fachkräfte im Bereich der Quantentechnologie, wären angesichts des zunehmenden Fachkräftemangels und des steigenden Wettbewerbs um globale Führungspositionen auch für die deutsche F&I Politik von Vorteil.

6 Exkurs: Schlüsseltechnologiecharakter von Quantentechnologien

Als Technologien mit dem Potenzial bestehende Anwendungen, z. B. im Bereich der Kommunikation, grundsätzlich zu verändern oder, z. B. im Bereich des Quantencomputings, um Größenordnungen schneller zu machen, sodass sich gänzlich neue Anwendungsfelder erschließen, entfalten Quantentechnologien potenziell eine sehr wesentliche, transformative Wirkung. Vor diesem Hintergrund ist eine Bezeichnung als 'Schlüsseltechnologien' im Sinne einer Technologie, die politische Priorisierung verdient, grundsätzlich angemessen⁷.

Wie Kroll et al. (2022) allerdings weiter ausführen, ist die in der akademischen Diskussion verbreitete, konzeptionelle Definition von Schlüsseltechnologie enger gefasst und nicht alle der in diesem Zusammenhang oft genannten Kriterien können durch Quantentechnologien perspektivisch erfüllt werden. [291] Einerseits verlangt das Verständnis von Schlüsseltechnologien als „key enabling technologies“ eine breite Anwendbarkeit in zahlreichen Branchen und technologischen Anwendungszusammenhängen, wie es z. B. für Softwaretechnologien, miniaturisierten Hardwarelösungen („Internet of Things“) und Technologien aus dem Bereich künstliche Intelligenz bereits heute der Fall ist. Andererseits verlangt eine Bezeichnung als „Schlüsseltechnologie i.e.S.“ darüber hinaus, dass dieses Potenzial nicht nur theoretisch gegeben ist, sondern sich zumindest grundsätzlich auch bereits in aktuellen Dynamiken abzeichnet.

Beides ist für Quantentechnologien nur bedingt gegeben. Sie bleiben, aufgrund des aktuell noch großen technologischen Aufwandes zu ihrer Einbettung, eine Großgerätetechnologie, bei der, ähnlich wie z. B. bei Fusionstechnologien, aktuell kein Einsatz im Alltag oder auch nur in der Breite der industriellen Anwendung denkbar erscheint (insb. im Bereich des Quantencomputings). Auch sachlich-inhaltlich ist ihr Einsatz zzt. noch sehr auf spezifische Einsatzfelder bezogen: die Steigerung der Rechenleistung ortfester Großrechner, die Verbesserung analytischer Messverfahren sowie die sichere Kommunikation. Darüber hinaus sind, insb. im Quantencomputing, – auch aufgrund des frühen Stadiums der Entwicklung – noch wenige weitere Einsatzbereiche bekannt bzw. werden zzt. noch nicht aktiv beforscht. Auch im Bereich der Dynamik zeichnet sich noch keine vergleichbar dynamische Entwicklung ab, wie z. B. im Bereich der Digitaltechnologien, oder selbst bei manchen „grünen“ Technologien. Grundsätzlich steigt die Anzahl der Publikationen und Patentanmeldungen im Bereich Quantentechnologien kontinuierlich an, und dieser wird auch relativ bedeutender. Dieser Anstieg allerdings bleibt von niedrigem Niveau ausgehend bislang eher linear, sodass entsprechende Erfindungen zumindest aufgrund ihrer bloßen Zahl kaum einen breitenwirksamen Transformationseffekt entfalten können. Auch dafür, dass einzelne für sich stehend, die disruptive Wirkung entfalten könnten, spricht zzt. eher wenig (s. o.).

Zusammenfassend kann Quantentechnologien daher nicht in vollumfänglichem Sinne ein schlüsseltechnologischer Charakter zugeschrieben werden, zumindest nicht, wenn man diesen

⁷ Die Debatte zur Identifikation von Schlüsseltechnologien ist mit jener zur politischen Förderungswürdigkeit von Technologien in der Praxis untrennbar verbunden, auch wenn eine theoretische Differenzierung besteht. In jedem Fall bildet erstere eine (von mehreren) Grundlagen für evidenzbasierte Politik und jede Festlegung hat unvermeidbar auch politische Implikationen.

Vor diesem Hintergrund ist es wichtig, den Status Schlüsseltechnologie nicht leichtfertig und pauschal abzuerkennen, nur, weil er in einem eng definierten Sinne technisch (noch) nicht erfüllt ist. Im täglichen Sprachgebrauch wird der Begriff Schlüsseltechnologie daher häufig zu Recht in einer allgemeinen Weise verwendet, da es sich begriffsimmanent zwar um Technologien handelt, die ‚den Schlüssel zu etwas bilden‘, wozu genau und auf welche Weise bleibt allerdings offen, da Technologien ja auch tatsächlich auf verschiedene – aus politischer Perspektive gleichermaßen relevante – Weise wirksam sein können. Alle genaueren Festlegungen stellen insofern nachlaufende Begriffsverengungen dar. Solche sind, wie im Folgenden erläutert, möglich und zur Begründung differenzierter Entscheidungen erforderlich, gehen aber schon einen Schritt über die Beantwortung der allgemeinen Frage hinaus.

im Sinne einer Technologie versteht, die strukturell neue Konjunkturen oder gar neue Kontraktief-Zyklen treibt. Eher finden sich Analogien zur Fusions-, Bio-, oder Nanotechnologie, also Technologien, die zwar einen hohen Neuheitswert aufwiesen bzw. aufweisen, der geeignet erscheint, bestimmte Bereiche des Wirtschaftssystems fundamental zu verändern, dies allerdings bestenfalls indirekt über spezifische Schnittstellen, über die sie in mittelbar diesen hineinwirken.

Im Bereich Quantentechnologien finden sich solche Schnittstellen einerseits im Bereich der Sensorik und der Kommunikation, andererseits im Bereich Großrechenanlagen und Server. Im Bereich der Quantensensorik sind verbesserte und teils neue Anwendungen denkbar. In der Regel kann aber von einer nicht-disruptiven Weiterentwicklung der Technologien ausgegangen werden. Im Quantencomputing und der Quantenkommunikation ist es grundsätzlich sehr wohl denkbar, dass ein weit verbreiteter Einsatz in Zukunft gänzlich neue Formen der Internetinfrastruktur und wirtschaftlich-sozialen Vernetzung ermöglicht. Um diese könnte sich dann mittelfristig auch das Innovations- und Wirtschaftssystem in so grundlegender Weise neu ordnen, wie das als Resultat der Einführung des Internets als Mittel des kommerziellen und sozialen Austausches bereits einmal geschehen ist.

Andererseits wurden vergleichbare Hoffnungen in der Vergangenheit bereits in die Fusions-, Bio- und Nanotechnologie gesetzt, ohne dass es sich die erwarteten Transformationen bislang im erhofften Umfang manifestiert hätten. Jene Schlüsseltechnologien, die in den vergangenen Jahrzehnten wirtschaftlich-gesellschaftliche Transformationen angestoßen haben, waren dagegen häufig eher Innovationen mit architektonischem Charakter (Internet, Smartphones, Soziale Medien, E-Mobility, Vernetzte Wertschöpfungsketten, Plattformökonomie). Der Beweis, dass dies nun erneut auf Grundlage einer noch nicht voll entwickelten Hochtechnologie – z. B. aus dem Bereich der Quanten – gelingen könnte, steht für den Moment aus.

All dies allerdings stellt die grundsätzliche Förderwürdigkeit von Quantentechnologien in keiner Weise in Abrede. Gerade weil ihre Entwicklung sich zzt. noch in einem so frühen Stadium befindet, dass ihre potenziellen Einsatzmöglichkeiten noch gar nicht abzusehen sind (insb. des Quantencomputers), lohnt es, sich im internationalen Wettbewerb, um relevante Durchbrüche aktiv zu positionieren. Gleichzeitig ist, im Rahmen der der täglichen Abwägung gegen andere, gesellschaftlich ebenfalls relevante Investitionsoptionen ein „Quantenpositivismus“ zu vermeiden und – insbesondere mit Blick auf die zeitliche Dimension – Erfahrungswerte aus der Förderung von Fusions-, Bio- und Nanotechnologie zu berücksichtigen.

7 Problemanalyse und Handlungsempfehlungen

Quantentechnologien bergen ein großes Potenzial für die Gesellschaft und die Wirtschaft. Um in den Quantentechnologien eine Vorreiterrolle einzunehmen und auch industriellen Nutzen aus diesen Technologien zu ziehen, müssen Politik, Forschung und Industrie an einem Strang ziehen und gemeinsame Anstrengungen vollbringen, um im internationalen Wettbewerb bestehen zu können. Aufgrund der hohen Komplexität der Quantentechnologien sowie deren teils noch geringen technologischen Reife, ist in den nächsten Jahren aber eine staatliche Förderung unabdingbar, wenn man in den Quantentechnologien führend dabei sein möchte und die vielen potenziellen Anwendungen Realität werden lassen möchte. Welche Herausforderungen aktuell bestehen und welche Handlungsempfehlungen sich daraus ergeben, wird in diesem Kapitel diskutiert.

7.1 Problemanalyse: Hemmnisse für Quantentechnologie-bezogene F&I-Aktivitäten in Deutschland

Im Folgenden werden Herausforderungen und Hemmnisse für Quantentechnologie-bezogene F&I-Aktivitäten in Deutschland diskutiert. Die genannten und diskutierten Aspekte sind eine Zusammenstellung aus Erkenntnissen, die sich im Rahmen der Erstellung dieser Studie ergeben haben, sowie Meinungen externer Expert:innen, die im Rahmen dieser Studie in Interviews bzw. einem Online-Workshop eingeholt wurden. Entsprechend erheben die Autor:innen keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Herausforderungen und Hemmnisse sind entlang folgender Aspekte strukturiert: Strategierahmen der Politik, F&E-Förderung, Rahmenbedingungen, Industrie und Startups, Fachkräfte und Kooperation.

Strategierahmen der Politik

Die Aufgabe der Politik ist es, einen übergreifenden Strategierahmen für Förderpolitik, Unterstützung der Unternehmen sowie weiterer Rahmenbedingungen und Aktivitäten zu setzen. Die Bundesregierung hat mit dem Rahmenprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ 2018 eine grundlegende Strategie formuliert und im Jahr 2023 das Handlungskonzept Quantentechnologien verabschiedet, das bis 2026 den forschungs- und innovationspolitischen Rahmen für die Förderung von Quantentechnologien und deren Anwendung in Deutschland bildet. Diese Strategie wird auch von Expert:innen als insgesamt gut bewertet, allerdings wird bemängelt, dass diese an einigen Stellen unkonkret bzgl. der Zielstellung und Umsetzung sei. Weiterhin hat die Strategie aktuell einen Zeitrahmen bis 2026. Eine langfristige Strategie wäre allerdings wichtig, insbesondere auch für die Forschung, die in diesem komplexen Bereich kontinuierliche Finanzierung benötigt. Dies gilt auch für die Gestaltung der wirtschaftlichen und regulatorischen Rahmenbedingungen, um die Entwicklung einer wettbewerbsfähigen Quantenwirtschaft zu fördern.

In der Strategie sollte möglichst auch die föderale Struktur Deutschlands berücksichtigt werden, was laut Aussage einiger Expert:innen aktuell nicht ausreichend der Fall ist. So könnte z. B. eine Spezialisierung der Länder auf bestimmte Aspekte Sinn ergeben und so regionale Stärken nutzen und Schwerpunkte setzen. Gleichzeitig sollten die Interessen ganz Deutschlands berücksichtigt werden. Es gilt, eine dynamische Balance zwischen der Vielfalt der Ansätze und Aktivitäten sowie der Spezialisierung und Schwerpunktbildung in Forschung und Wertschöpfung

zu finden. Bei der Koordination und Vernetzung zwischen EU, Bund, Ländern und verschiedenen Ministerien und Behörden gibt es laut Expert:innen noch Luft nach oben. Bei der Quantenkommunikation funktioniert das bereits recht gut, aber es bräuhete mehr solcher Beispiele.

F&E-Förderung

Aktuell werden viele F&E-Projekte in den Quantentechnologien gefördert, was für die Entwicklung der Technologien wichtig ist und einen Beitrag zum Aufbau eines Ökosystems leistet. Allerdings ist der Zeithorizont eines Großteils der Förderung auf die Projektlaufzeit begrenzt und eine Anschlussfinanzierung ist häufig ungewiss. Da es sich bei einigen der Quantentechnologien allerdings um sehr aufwändige und komplizierte Technologien handelt, braucht es hier einen langen Atem und langfristige kontinuierliche Anstrengungen in der F&E, um marktfähige Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln. Da viele der Entwicklungen in den Quantentechnologien noch aus der Grundlagenforschung entspringen, sollte gerade diese hier auch entsprechend langfristig gefördert werden, ohne die nachgelagerten Prozessschritte zu vernachlässigen. Innovationen in Quantentechnologien erfordern ganzheitliche Förderansätze und keine zyklische Schwerpunktsetzung auf einzelne Prozessschritte.

Weiterhin besteht aktuell ein gewisser Fokus auf die Förderung von Hardware – die Förderung von Softwareaspekten könnte gestärkt werden. Darüber hinaus ist Deutschland recht aktiv in der Grundlagen- und Technologieforschung, Entwicklungen von Anwendungen auf der anderen Seite sind weniger stark ausgeprägt. F&E-Projekte, die auf eine konkretere Nutzung der Quantentechnologien oder die industrielle Skalierung der Technologie abzielen, sind rar, könnten allerdings dafür sorgen, dass mehr Quantentechnologien in die Anwendung finden und wirtschaftlich genutzt werden können.

Rahmenbedingungen, Industrie und Startups

Die Aktivitäten der Industrie sind in den Quantentechnologien in Deutschland aktuell noch recht begrenzt. Das betrifft sowohl große Unternehmen als auch Startups. Die Risikobereitschaft eine neue Technologie in die kommerzielle Umsetzung zu bringen, ist in Deutschland gering im Vergleich zu einigen anderen Ländern, wie z. B. den USA. Das geringe Mindset für Risikobereitschaft kombiniert mit dem Bedarf an aufwendiger Infrastruktur und finanzieller Mittel für die Kommerzialisierung von hochkomplexen Quantentechnologien hemmt die Gründung von Startups. Die Bürokratie und die öffentlichen Ausschreiberegeln stellen hierbei ein Hindernis für den einfachen Zugang von Startups auf Infrastruktur von Universitäten und weiteren Forschungseinrichtungen dar.

Darüber hinaus sollte nach Expert:innen-Meinung der politische Wille zur Standardisierung gestärkt werden. Eine effektive Unterstützung für die Industrie bzgl. Standardisierung, insbesondere für KMU/Startups, die häufig keine Kapazitäten für aufwändige Standardisierungsprozesse haben, wäre wünschenswert. Darüber hinaus fehlen teils noch unabhängige Mess- und Teststandards für die Quantentechnologien, die für eine vergleichbare Charakterisierung von Komponenten und somit der Entwicklung von Anwendungen notwendig sind.

Fachkräfte

Bereits heute ist es schwierig Fachkräfte für den Bereich der Quantentechnologien zu finden. Mit zunehmendem Wachstum des Ökosystems werden auch zunehmend (hoch-)ausgebildete Fachkräfte benötigt, um die Technologieentwicklung voranzutreiben. Bisher waren vor allem

die Physiker:innen Treiber der Technologien und bisher weniger Ingenieur:innen. Eine verstärkte Einbindung von Ingenieur:innen und Techniker:innen wird allerdings notwendig auf dem Weg zu breiten Anwendungen sein, da diese den Markt und die realen Anforderungen besser kennen. Entsprechend sollte die Weiterbildung verschiedener Fachrichtungen in den Quantentechnologien gestärkt werden und auch neue Studiengänge bzw. Spezialisierungen könnten einen Stimulus darstellen. Im Vergleich zu einigen anderen westlichen Ländern sind außerdem in Deutschland die Anzahl an internationalen Student:innen noch recht gering. Eine größere Attraktivität der Studiengänge für internationale Studierende könnte einem Fachkräftemangel entgegenwirken.

Abschließend ist das Wissen über Quantentechnologien in den etablierten Unternehmen teils noch gering. Die Aus- und Weiterbildung von Unternehmensführungen und allgemein etabliertem Fachpersonal in den Unternehmen könnte zu einer verstärkten Nutzung von Quantentechnologien in etablierten Firmen führen.

Kooperation

Mit zunehmenden Aktivitäten in den Quantentechnologien wird es auch zunehmend herausfordernd, den Überblick zu behalten und die einzelnen Aktivitäten sinnvoll zu vernetzen. Entsprechend können Koordinations- und Kooperationsprojekte, die Akteure, Projekte und Aktivitäten vernetzen, einen Beitrag zum effizienten Aufbau eines Ökosystems beitragen. Teils gibt es bereits solche Begleitprojekte, aber nicht in allen Bereichen der Quantentechnologien.

Um sich technologisch in den Quantentechnologien an der Weltspitze etablieren zu können, werden internationale Partnerschaften mit verlässlichen Partnern unabdingbar sein. Der Ausbau solcher Partnerschaften sollte gut koordiniert stattfinden, wobei aktuell noch Verbesserungsbedarf besteht. Diese Partnerschaften sind auch für das Sicherstellen sicherer Lieferketten für die Quantentechnologien unerlässlich. Ohne stabile Kooperationen können Risiken in der Versorgung von Komponententechnologien entstehen, die die Produktionsprozesse gefährden. Die Zusammenarbeit zwischen den relevanten Disziplinen wie z. B. Physik, Informatik, Ingenieurwissenschaften und Mathematik ist oft nicht ausreichend, was den Innovationsprozess hemmt. Darüber hinaus ist die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie häufig ausbaufähig, wodurch potenzielle Innovationsmöglichkeiten ungenutzt bleiben. Dazu gehört auch, dass Anwender oft nicht frühzeitig in den Entwicklungsprozess einbezogen werden, was zu einer Diskrepanz zwischen Forschung und tatsächlichen Marktbedürfnissen führt. Grund dafür ist unter anderem auch, dass es teils mehr gezielter Maßnahmen zur Förderung und Unterstützung interdisziplinärer Kooperationen bedarf, die für die Innovationsfähigkeit in den Quantentechnologien entscheidend sind.

7.2 Handlungsempfehlungen

Aufgrund des großen Potenzials, des gestiegenen internationalen Interesses und der aktuell großen öffentlichen und privaten Förderungen der Quantentechnologien, kann von signifikanten Weiterentwicklungen der Technologien ausgegangen werden. Da einige der Technologien (z. B. Quantencomputer) jedoch noch deutlich vor einer Marktreife stehen, müssen diese Technologien auch in den nächsten Jahren noch umfangreich gefördert werden, wenn man bei der Technologie eine entscheidende Rolle mitspielen will. Darüber hinaus bildet sich gerade Innovationssysteme (Ökosysteme) zu verschiedenen Bereichen der Quantentechnologien heraus. Diese sind von entscheidender Bedeutung für eine zukünftige wirtschaftliche Bedeutung, können sich in der Regel zu diesem Zeitpunkt jedoch noch nicht ohne öffentliche Förderung tragen. Entsprechend sind auch in Deutschland und Europa eine weitergehende Förderung der Quantentechnologien generell zu empfehlen. Konkretere Handlungsempfehlungen, die sich im Rahmen der Durchführung dieser Studie sowie einem Online-Workshop mit ausgewählten Expert:innen aus Wissenschaft und Industrie ergeben haben, werden im Folgenden diskutiert. Darüber hinaus haben auch der Bitkom und das Quantum Business Network QBN als Reaktion auf das Handlungskonzept Quantentechnologien der Bundesregierung Handlungsempfehlungen erarbeitet. [292, 293]

Langfristigen Strategierahmen setzen und konkrete Umsetzungsvorschläge erarbeiten

- **Strategischen Rahmen und langfristige Finanzierung über 2026 hinaus sichern:** Sicherstellen, dass der strategische Rahmen bis 2026 effektiv umgesetzt wird und entsprechende Fachprogramme und Initiativen auch über 2026 hinaus fortgeführt werden können. Die Quantentechnologien sollten langfristig eine hohe Priorisierung auf der politischen Agenda haben, um die Herausforderungen zu lösen und die Potenziale nachhaltig zu erschließen.
- **Konkrete Umsetzungsvorschläge für die Erreichung der strategischen Ziele erarbeiten:** In der Quanten-Roadmap wurden Vorschläge für die Erreichung der strategischen Ziele gemacht. Diese sind im aktuellen Handlungskonzept nicht weiter berücksichtigt worden. Dies kann zu Lücken in der Strategie (z. B. konkrete Meilensteine) und Herausforderungen in der Umsetzung führen.
- **Fokussierung der Strategie und Formulierung von Prioritäten:** Die Strategie ist technologisch sehr breit gefasst, um die unterschiedlichen Interessen aller Akteure in Deutschland zu berücksichtigen. Dies kann zu einer Verwässerung der Prioritäten und einer ineffizienten Ressourcennutzung führen. Dabei ist zwischen Breite und Fokus abzuwägen und die Entwicklungen in anderen Ländern zu berücksichtigen. Es gilt Alleinstellungsmerkmale (Know-How, Industriebasis), ggf. Nischen, bzw. Abgrenzungen zu anderen Ländern und Akteuren zu identifizieren und abzusichern, um strategische Kooperationsoptionen zu entwickeln.

Langfristige F&E-Förderperspektive sichern

- **Finanzierung für Forschung, Entwicklung und Umsetzung zur Verfügung stellen:** Die Grundlagenforschung in den Quantentechnologien sollte weiterhin gefördert werden (idealerweise in ähnlichem Umfang wie heute). Eine gesicherte Kontinuität dieser Förderung (z. B. über Grundfinanzierung) wäre wünschenswert, um eine langfristige Planbarkeit zu gewährleisten und die Verfolgung von langfristigen Zielen zu ermöglichen. Einige

Bereiche der Quantentechnologien (z. B. das Quantencomputing, der Quantenrepeater) werden, aller Voraussicht nach, noch längerfristig öffentliche Förderung benötigen. Darüber hinaus ist eine wettbewerbsorientierte Projektförderung sinnvoll, die insbesondere auch in Form von Verbundprojekten zwischen Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen bestehen sollte und mehrere Akteure entlang der Wertschöpfungskette abdecken sollte. Hierbei sollte an gewissen Punkten der technologischen Reife eine Priorisierung stattfinden, die auch eigene Stärken (Know-How, Industriebasis), ggf. Nischen, bzw. Abgrenzungen zu anderen Ländern und Akteuren berücksichtigt.

- **Software und Anwendung (Co-Development) stärker in der Förderung berücksichtigen:** Ausbau der Förderung von Softwareentwicklung und Entwicklung von praktischen Anwendungen, um die Innovationspotenziale der Quantentechnologien frühzeitig zu demonstrieren. Erste vielversprechende Ansätze gibt es in der Anwendung von Quantensensoren in der Medizintechnik. Weitere Erfolgsbeispiele sind entscheidend, um private Investitionen zu mobilisieren und die Nachfrage nach Quantenlösungen über den Forschungssektor hinaus zu erhöhen.
- **Maßnahmen und Instrumente kohärent aufeinander abstimmen:** Bestehende und zukünftige Förderinstrumente sollten über die fördernden Stellen (z. B. BMBF, BMWK, Länderförderung etc.) und entlang des Innovationsprozesses kohärent aufeinander abgestimmt sein. Ein guter Austausch der Fördergeber und geförderten Stellen sollte dabei weiter ausgebaut werden, um eine gute Abstimmung der Programme und Inhalte zu gewährleisten. Auch die Deutsche Agentur für Transfer und Innovation (DATI), die Agentur für Sprunginnovationen (SprintD) und andere marktnahe Instrumente könnten stärker in der Förderung der Umsetzung eingebunden werden. Dies gilt ebenfalls für die Verschränkung mit europäischen Instrumenten, insbesondere marktnahe Initiativen (z. B. EU Chips Act).
- **Förderung von Infrastruktur und Anwendungen:** Die Entwicklung von Quantentechnologien sowie deren Implementierung im Markt benötigt an einigen Stellen spezielle Infrastruktur. Dies beinhalten z. B. teils sehr spezielle Labor- und Messinfrastruktur, die insb. für junge Unternehmen nicht ohne weiteres finanzierbar sind. Einfacher Zugang zu solcher Infrastruktur für junge Unternehmen wäre sehr hilfreich (siehe nächster Abschnitt). Darüber hinaus ist z. B. in der Quantenkommunikation ein breiter Einsatz von der Verfügbarkeit einer Glasfaser-Infrastruktur abhängig. Eine Weiterführung der Förderung des Infrastrukturaufbaus ist hier sehr wichtig. Für einige Quantentechnologien mit höherer technologischer Reife wäre eine marktnahe Förderung auf Implementierung der Anwendung hilfreich (z. B. für einige Quantensensoren), um deren Nutzen auch real anwendbar zu machen.

Gestaltung attraktiver und verlässlicher Rahmenbedingungen

- **Verbesserung der Rahmenbedingungen und Finanzierungsmöglichkeiten für junge Unternehmen (Start-ups und Spin-offs):** Schaffung eines förderlichen Umfelds für junge Unternehmen, insbesondere durch den Abbau bürokratischer Hürden und die Bereitstellung von Risikokapital. Start-ups und Spin-offs in den Quantentechnologien brauchen Zugang zu technisch aufwändiger Infrastruktur. Das Beihilferecht erschwert den Zugang zu dieser und ist für Hochschulen und Forschungseinrichtungen mit hohen administrativen Aufwänden verbunden. Entwicklung von speziellen Programmen und Maßnahmen, die diese Herausforderungen adressieren, sind aktuell nicht ausreichend vorhanden.

- **Reduzierung von Bürokratie und Experimentierräume für Innovationen schaffen:** Abbau bürokratischer Hürden, um Innovationen und Entwicklungen im Bereich der Quantentechnologien zu beschleunigen. Schaffung von Experimentierräumen, um Kreativität und Innovationskraft zu fördern.
- **Marktentwicklung durch Schaffung von Normen, Standardisierung und Regulierrahmen:** Entwicklung und Implementierung unabhängiger Mess- und Prüfstandards für Quantentechnologien, um Qualität, Sicherheit und internationale Anerkennung zu gewährleisten. Entwicklung von Normen und Standardisierung, um globale Wettbewerbsfähigkeit und Marktentwicklung zu fördern. Dies ist eine gemeinsame Aufgabe von Unternehmen und staatlichen Akteure wie z. B. der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB). Insbesondere die Einbindung der Industrie sollte hier gestärkt werden.
- **Eigeninitiative der Wirtschaft einfordern:** Förderung einer Kultur der Eigeninitiative in der Wirtschaft, sodass Unternehmen proaktiv Innovationen vorantreiben und nicht ausschließlich auf staatliche Unterstützung hoffen. Schaffung von Anreizen, um mehr Interesse und Engagement aus der Wirtschaft zu erhalten, z. B. bei der Gestaltung von internationalen Normen und Standards.

Weiterentwicklung der Aus- und Weiterbildungsangebote und der Öffentlichkeitsarbeit

- **Universitäre Ausbildung sichern und Studiengänge weiterentwickeln:** Sicherstellung, dass Hochschulen weiterhin mit hoher Qualität ausbilden, um dem Fachkräftemangel zu begegnen. Bestehende Studiengänge und Spezialisierungen im Bereich der Quantentechnologien weiterentwickeln, um attraktiv für Studierende zu sein und gleichzeitig die Bedürfnisse des Marktes zu berücksichtigen. Sicherstellen, dass Absolvent:innen nicht nur wissenschaftliche Kenntnisse, sondern auch Marktkenntnisse und unternehmerische Fähigkeiten besitzen.
- **Weiterbildung von Führungs- und Fachkräften sicherstellen:** Weiterbildungsprogramme für Geschäftsführungen und Führungskräfte, um das Wissen über und die Nachfrage nach Quantentechnologien zu verbessern. Förderung von Ausbildungsprogrammen für Techniker und andere Fachkräfte, um Herstellung und Betrieb von Quantenlösungen sicherzustellen.
- **Internationalisierung der Aus- und Weiterbildung ausbauen:** Schaffung von Anreizen und Unterstützungssystemen, um die Internationalisierung der Ausbildung weiter voranzutreiben und ausländische Studierende anzuziehen.
- **Öffentlichkeitsarbeit stärken:** Wissenschaftskommunikation zu Quantentechnologien fördern, um die breite Öffentlichkeit mitzunehmen und die Quantentechnologien und deren Nutzen für die Gesellschaft und potenzielle Nutzer zu erklären.

Förderung von Vernetzung und Kooperationen ausbauen

- **Unterstützung von Koordinations- und Kooperationsprojekten:** Fortsetzung und Erweiterung von Begleit- und Vernetzungsprojekten (wie z. B. SQuaD in der Quantenkommunikation und Q.E.D. im Quantencomputing), um die Zusammenarbeit, die Koordination und den Austausch zwischen verschiedenen Akteuren zu stärken. Dies ist insbesondere wichtig, da es viele verschiedene Aktivitäten und Förderprogramme gibt und ein Austausch zwischen diesen zu mehr Effizienz führt.

- **Internationale Partnerschaften mit verlässlichen Partnern ausbauen:** Kooperationen mit verlässlichen Partnern, die unsere Wertvorstellungen teilen, sollten systematisch ausgebaut werden. Dies sollte auch zur Sicherung der Lieferkette für Komponententechnologien beitragen. Insbesondere bi- und multilaterale Kooperationen (auch innerhalb der EU) sollten ausgebaut werden, um gemeinsame Forschungs- und Entwicklungs- und Innovationsprojekte zu fördern. Dabei sollten strategische Aspekte bei der Entwicklung und Implementierung internationaler Programme im Bereich der Quantentechnologien Berücksichtigung finden, z. B. Umgang und Verhältnis zu China (siehe Chinastrategie). Die bestehenden Erklärungen zur internationalen Kooperation mit Leben zu füllen und Förderaufträge umsetzen.
- **Interdisziplinäre Zusammenarbeit stärken:** Förderung von interdisziplinären Kooperationen zwischen Physik, Informatik, Ingenieurwissenschaften, Mathematik und anderen relevanten Disziplinen, die den Markt kennen und Ideen für Anwendungen entwickeln können. Darüber hinaus sollte auch die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft und Industrie (Hersteller und Anwender) gestärkt werden. Beides könnte die Innovationsfähigkeit in den Quantentechnologien hin zu Anwendungen stärken, insbesondere, wenn Anwender stärker eingebunden werden.

8 Danksagungen

Das Autorenteam bedankt sich recht herzlich bei allen Expert:innen, die die Erstellung dieser Studie in Form von Interviews und/oder Workshop-Teilnahme unterstützt haben.

9 Literaturverzeichnis

- [1] Frietsch R and Schmoch U 2010 Transnational patents and international markets *Scientometrics* **82** 185–200
- [2] Pirandola S, Bardhan B R, Gehring T, Weedbrook C and Lloyd S 2018 Advances in Photonic Quantum Sensing
- [3] Future Markets I 2023 *The Global Market for Quantum Computing 2024-2034*
- [4] Martinez G D, Li C, Staron A, Kitching J, Raman C and McGehee W R 2023 A chip-scale atomic beam clock *Nature communications* **14** 3501
- [5] Newman Z L *et al* 2019 Architecture for the photonic integration of an optical atomic clock *Optica* **6** 680
- [6] PTB *Atomkern mit Laserlicht angeregt: Lange erhoffter Durchbruch ermöglicht neuartige Atomuhr und öffnet die Tür zur Beantwortung fundamentaler Fragen der Physik* https://www.ptb.de/cms/presseaktuelles/journalisten/nachrichten-presseinformationen/presseinfo.html?tx_news_pi1%5Bnews%5D=13734&tx_news_pi1%5Bcontroller%5D=News&tx_news_pi1%5Baction%5D=detail&tx_news_pi1%5Bday%5D=29&tx_news_pi1%5Bmonth%5D=4&tx_news_pi1%5Byear%5D=2024&cHash=7aff6a8aca02714c484701a7c4e25b05 (accessed 2 May 2024)
- [7] Tiedau J *et al* 2024 Laser Excitation of the Th-229 Nucleus *Phys. Rev. Lett.* **132**
- [8] PTB *The second: Optical atomic clocks* <https://www.ptb.de/cms/en/research-development/research-on-the-new-si/ptb-experiment/the-second-optical-atomic-clocks.html> (accessed 20 Feb 2024)
- [9] welt-der-physik.de *Atomuhren* <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/atomuhren/atomuhren/> (accessed 20 Feb 2024)
- [10] Boldbaatar E, Grant D, Choy S, Zaminpardaz S and Holden L 2023 Evaluating Optical Clock Performance for GNSS Positioning *Sensors (Basel, Switzerland)* **23**
- [11] Loh W, Stuart J, Reens D, Bruzewicz C D, Braje D, Chiaverini J, Juodawlakis P W, Sage J M and McConnell R 2020 *A Brillouin Laser Optical Atomic Clock* (arXiv)
- [12] Mehlstäubler T E, Grosche G, Lisdat C, Schmidt P O and Denker H 2018 Atomic clocks for geodesy *Reports on progress in physics. Physical Society (Great Britain)* **81** 64401
- [13] Christian Speicher 2015 *Erdvermessung mit ultragenauen Atomuhren* <https://www.nzz.ch/wissenschaft/physik/erdvermessung-mit-ultragenauen-atomuhren-id.740111> (accessed 31 Jul 2024)
- [14] Oelsner G, IJsselsteijn R, Scholtes T, Krüger A, Schultze V, Seyffert G, Werner G, Jäger M, Chwala A and Stolz R 2022 Integrated Optically Pumped Magnetometer for Measurements within Earth’s Magnetic Field *Phys. Rev. Applied* **17**
- [15] PTB *Optical Magnetometry: Optically pumped magnetometers (OPMs)* <https://www.ptb.de/cms/en/ptb/fachabteilungen/abt8/fb-82/ag-821/bmsr-821.html> (accessed 31 Jul 2024)

- [16] Budker D and Kimball D F (eds) 2013 *Optical magnetometry* (Cambridge: Cambridge University Press)
- [17] Tierney T M *et al* 2019 Optically pumped magnetometers: From quantum origins to multi-channel magnetoencephalography *NeuroImage* **199** 598–608
- [18] macQsimal *Optically pumped magnetometers* <https://www.macqsimal.eu/macqsimal/optically-pumped-magnetometers/> (accessed 9 May 2024)
- [19] Fraunhofer Institute for Physical Measurement Techniques IPM *Quantum magnetometers for highly sensitive materials testing: Optically pumped magnetometers (OPM)* <https://www.ipm.fraunhofer.de/en/bu/production-control-inline-measurement-techniques/systems/opm.html> (accessed 9 May 2024)
- [20] Weinstock H (ed) 1996 *SQUID Sensors: Fundamentals, Fabrication and Applications (NATO ASI Series, Series E vol 329)* (Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers)
- [21] Robbes D 2006 Highly sensitive magnetometers—a review *Sensors and Actuators A: Physical* **129** 86–93
- [22] Dodrill B and Franco V 2021 *Magnetic Measurement Techniques for Materials Characterization* (Springer)
- [23] Rondin L, Tetienne J-P, Hingant T, Roch J-F, Maletinsky P and Jacques V 2014 Magnetometry with nitrogen-vacancy defects in diamond *Reports on progress in physics. Physical Society (Great Britain)* **77** 56503
- [24] NIST *Diamond NV Center Magnetometry* <https://www.nist.gov/programs-projects/diamond-nv-center-magnetometry> (accessed 13 Feb 2024)
- [25] Sengottuvel S, Mrózek M, Sawczak M, Głowacki M J, Ficek M, Gawlik W and Wojciechowski A M 2022 Wide-field magnetometry using nitrogen-vacancy color centers with randomly oriented micro-diamonds *Scientific reports* **12** 17997
- [26] Volkmar Denner 2021 *Aus Quantenphysik wird „Technik fürs Leben“* <https://www.bosch.com/de/stories/denners-view-quantentechnologie/> (accessed 31 Jul 2024)
- [27] Hong S, Grinolds M S, Pham L M, Le Sage D, Luan L, Walsworth R L and Yacoby A 2013 Nanoscale magnetometry with NV centers in diamond *MRS Bull.* **38** 155–61
- [28] Xu Y, Zhang W and Tian C 2023 Recent advances on applications of NV – magnetometry in condensed matter physics *Photon. Res.* **11** 393
- [29] Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF *Quantensensorik am Fraunhofer IAF* <https://www.iaf.fraunhofer.de/de/forscher/quantensysteme/quantensensorik.html> (accessed 13 Feb 2024)
- [30] Rifai D, Abdalla A N, Ali K and Razali R 2016 Giant Magnetoresistance Sensors: A Review on Structures and Non-Destructive Eddy Current Testing Applications *Sensors (Basel, Switzerland)* **16** 298
- [31] NVE Corporation *How GMR Works* <https://www2.nve.com/gmrsensors/gmr-operation.htm> (accessed 31 Jul 2024)

- [32] Khan M A, Sun J, Li B, Przybysz A and Kosel J 2021 Magnetic sensors-A review and recent technologies *Eng. Res. Express* **3** 22005
- [33] TDK *Detect a weak magnetic field measuring only 1 / 10000000 of the surrounding strong geomagnetic field* <https://product.tdk.com/de/techlibrary/developing/bio-sensor/nivio-xmr-sensor.html> (accessed 31 Jul 2024)
- [34] Natarajan C M, Tanner M G and Hadfield R H 2012 Superconducting nanowire single-photon detectors: physics and applications *Supercond. Sci. Technol.* **25** 63001
- [35] Stefan Kück 2020 *Einzelphotonenmetrologie* <https://oar.ptb.de/files/download/310.20200305.pdf> (accessed 31 Jul 2024)
- [36] You L 2020 Superconducting nanowire single-photon detectors for quantum information *Nanophotonics* **9** 2673–92
- [37] Single Quantum *The top-notch of light detection: SNSPDs: Superconducting Nanowire Single Photon Detectors* <https://www.singlequantum.com/technology/snspd/> (accessed 4 Mar 2024)
- [38] Ménolet V, Vermeulen P, Le Moigne N, Bonvalot S, Bouyer P, Landragin A and Desruelle B 2018 Gravity measurements below 10⁻⁹ g with a transportable absolute quantum gravimeter *Scientific reports* **8** 12300
- [39] Heine N, Matthias J, Sahelgozin M, Herr W, Abend S, Timmen L, Müller J and Rasel E M 2020 A transportable quantum gravimeter employing delta-kick collimated Bose-Einstein condensates *Eur. Phys. J. D* **74**
- [40] Global Geodetic Observing System *Quantum Gravimetry* <https://ggos.org/item/quantum-gravimetry/#learn-this> (accessed 10 Mar 2024)
- [41] Stray B *et al* 2022 Quantum sensing for gravity cartography *Nature* **602** 590–4
- [42] NIST *FLOC Takes Flight: First Portable Prototype of Photonic Pressure Sensor* <https://www.nist.gov/news-events/news/2019/02/floc-takes-flight-first-portable-prototype-photonic-pressure-sensor> (accessed 2 Jun 2024)
- [43] Tom Rubin *Photonische Druckmessung* <https://www.ptb.de/cms/ptb/fachabteilungen/abt7/fb-75/ag-755.html#:~:text=Die%20junge%20Arbeitsgruppe%207.55%20%E2%80%9EPhotonische,vom%20Hochvakuum%20bis%20zum%20Normaldruck> (accessed 2 Jun 2024)
- [44] PTB *QuantumPascal* <https://www.ptb.de/empir2019/quantumpascal/home/> (accessed 2 Jun 2024)
- [45] Chen M, Wei H, Zhao Y, Lei X and Krishnaswamy S 2019 Temperature insensitive air-cavity Fabry-Perot gas pressure sensor based on core-offset fusion of hollow-core fibers *Sensors and Actuators A: Physical* **298** 111589
- [46] He Z, Zhang Y, Tong X, Li L and Wang L V 2023 Quantum microscopy of cells at the Heisenberg limit *Nature communications* **14** 2441
- [47] Hong C K and Mandel L 1985 Theory of parametric frequency down conversion of light *Physical review. A, General physics* **31** 2409–18
- [48] Zhang C, Huang Y-F, Liu B-H, Li C-F and Guo G-C 2021 Spontaneous Parametric Down-Conversion Sources for Multiphoton Experiments *Adv Quantum Tech* **4**

- [49] Genovese M 2016 Real applications of quantum imaging *J. Opt.* **18** 73002
- [50] Mack C A 2004 The new, new limits of optical lithography *Emerging Lithographic Technologies VIII Microlithography 2004 (Santa Clara, CA, Sunday 22 February 2004) (SPIE Proceedings)* ed R S Mackay (SPIE) p 1
- [51] Boyd R W, Chang H J, Shin H and O'Sullivan-Hale C 2005 Progress in quantum lithography *Quantum Communications and Quantum Imaging III Optics & Photonics 2005 (San Diego, California, USA, Sunday 31 July 2005) (SPIE Proceedings)* ed R E Meyers and Y Shih (SPIE) 58930G
- [52] MIT Technology Review 2010 *The Problem With Quantum Lithography* <https://www.technologyreview.com/2010/06/15/202870/the-problem-with-quantum-lithography/>
- [53] Karsa A, Fletcher A, Spedalieri G and Pirandola S 2023 *Quantum Illumination and Quantum Radar: A Brief Overview*
- [54] Padgett M J 2023 - 2023 Quantum imaging overview *Quantum Sensing, Imaging, and Precision Metrology Quantum Sensing, Imaging, and Precision Metrology (San Francisco, United States, 28 Jan 2023 - 3 Feb 2023)* ed S M Shahriar and J Scheuer (SPIE) p 501
- [55] Fraunhofer-Gesellschaft *Quantenimaging: Mit verschränkten Quanten Unsichtbares sichtbar machen* <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/quantentechnologien/quantenimaging.html> (accessed 28 Apr 2024)
- [56] Moodley C and Forbes A 2022 Super-resolved quantum ghost imaging *Scientific reports* **12** 10346
- [57] Aspden R S *et al* 2015 Photon-sparse microscopy: visible light imaging using infrared illumination *Optica* **2** 1049
- [58] Gemmell N R, Flórez J, Pearce E, Czerwinski O, Phillips C C, Oulton R F and Clark A S 2023 Loss-Compensated and Enhanced Midinfrared Interaction-Free Sensing with Undetected Photons *Phys. Rev. Applied* **19**
- [59] Lemos G B, Borish V, Cole G D, Ramelow S, Lapkiewicz R and Zeilinger A 2014 Quantum imaging with undetected photons *Nature* **512** 409–12
- [60] Krawinkel T 2018 *Improved GNSS navigation with chip-scale atomic clocks (Veröffentlichungen der DGK Reihe C, Dissertationen)* (Hannover: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität)
- [61] Barry J F, Turner M J, Schloss J M, Glenn D R, Song Y, Lukin M D, Park H and Walworth R L 2016 Optical magnetic detection of single-neuron action potentials using quantum defects in diamond *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* **113** 14133–8
- [62] Boto E, Bowtell R, Krüger P, Fromhold T M, Morris P G, Meyer S S, Barnes G R and Brookes M J 2016 On the Potential of a New Generation of Magnetometers for MEG: A Beamformer Simulation Study *PloS one* **11** e0157655
- [63] Barchiesi G, Demarchi G, Wilhelm F H, Hauswald A, Sanchez G and Weisz N 2020 Head magnetomyography (hMMG): A novel approach to monitor face and whole head muscular activity *Psychophysiology* **57** e13507

- [64] Fraunberg J von *et al* 2024 Faziale Magnetomyographie zur Messung der Gesichtsmuskelaktivität mittels optisch gepumpter Magnetometer *95. Jahresversammlung Deutsche Gesellschaft für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf- und Hals-Chirurgie e. V., Bonn 95. Jahresversammlung Deutsche Gesellschaft für Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde, Kopf- und Hals-Chirurgie e. V., Bonn (Messe Essen, 8 May 2024 - 11 May 2024) (Laryngo-Rhino-Otologie)* (Georg Thieme Verlag KG)
- [65] Zoffl A M 2021 *Quantitative Magnetresonanztomographie zur Evaluierung der physiologischen Muskelkomposition und deren Veränderung bei neuromuskulären Erkrankungen* (München: Universitätsbibliothek der TU München)
- [66] Mannalatha V, Mishra S and Pathak A 2023 A comprehensive review of quantum random number generators: concepts, classification and the origin of randomness *Quantum Inf Process* **22**
- [67] Ma X, Yuan X, Cao Z, Qi B and Zhang Z 2016 Quantum random number generation *npj Quantum Inf* **2**
- [68] ID Quantique 2021 *ID Quantique and SK Telecom unveil the Samsung Galaxy Quantum2, the newest QRNG-Powered 5G smartphone with even more embedded secured applications* <https://www.idquantique.com/id-quantique-and-sk-telecom-unveil-the-samsung-galaxy-quantum2-the-newest-qrng-powered-5g-smartphone-with-even-more-embedded-secured-applications> (accessed 31 Jul 2024)
- [69] Jawaid T 2022 *Quantum Computing and the Future Internet* (arXiv)
- [70] Bennett C H and Brassard G 2014 Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing *Theoretical Computer Science* **560** 7–11
- [71] Li H, Wonfor A, Weerasinghe A, Alhussein M, Gong Y and Penty R Quantum Key Distribution Post-processing: A Heterogeneous Computing Perspective pp 1–6
- [72] Yan H, Ren T, Peng X, Lin X, Jiang W, Liu T and Guo H Information Reconciliation Protocol in Quantum Key Distribution System pp 637–41
- [73] Federal Office for Information Security *Implementation Attacks against QKD Systems* (Federal Office for Information Security)
- [74] Lo Hoi-Kwong, Curty M and Qi B 2012 Measurement-device-independent quantum key distribution *Phys. Rev. Lett.* **108** 73
- [75] Lucamarini M, Yuan Z L, Dynes J F and Shields A J 2018 Overcoming the rate-distance limit of quantum key distribution without quantum repeaters *Nature* **557** 400–3
- [76] Liu Y *et al* 2023 Experimental Twin-Field Quantum Key Distribution over 1000 km Fiber Distance *Phys. Rev. Lett.* **130** 210801
- [77] Ekert A K 1991 Quantum cryptography based on Bell's theorem *Phys. Rev. Lett.*
- [78] Diamanti E and Leverrier A 2015 Distributing Secret Keys with Quantum Continuous Variables: Principle, Security and Implementations *Entropy* **17** 6072–92
- [79] Chen Y-A *et al* 2021 An integrated space-to-ground quantum communication network over 4,600 kilometres *Nature* **589** 214–9
- [80] Liao S-K *et al* 2018 Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network *Phys. Rev. Lett.* **120** 30501

- [81] Cao Y, Zhao Y, Wang Q, Zhang J, Ng S X and Hanzo L 2022 The Evolution of Quantum Key Distribution Networks: On the Road to the Qinternet *IEEE Commun. Surv. Tutorials* **24** 839–94
- [82] Avesani M *et al* 2021 Full daylight quantum-key-distribution at 1550 nm enabled by integrated silicon photonics *npj Quantum Inf* **7**
- [83] 2003 *MagiQ Technologies unveils first commercial quantum cryptography system* <https://www.bizjournals.com/boston/blog/mass-high-tech/2003/02/magiq-technologies-unveils-first-commercial.html> (accessed 30 Jul 2024)
- [84] Quantum Optics Jena *Cyber security solutions* <https://qo-jena.com/products-overview/> (accessed 30 Jul 2024)
- [85] KEEQuant *KEEQuant Homepage* <https://www.keequant.com/> (accessed 30 Jul 2024)
- [86] Chris Johnson 2023 *Here’s why enterprises and governments should prepare for Q-Day* <https://www.nokia.com/about-us/newsroom/articles/why-should-enterprises-and-governments-prepare-for-q-day/> (accessed 30 Jul 2024)
- [87] IBM *Make the world quantum safe* <https://www.ibm.com/quantum/quantum-safe> (accessed 30 Jul 2024)
- [88] National Security Agency/Central Security Service *Quantum Key Distribution (QKD) and Quantum Cryptography (QC)* <https://www.nsa.gov/Cybersecurity/Quantum-Key-Distribution-QKD-and-Quantum-Cryptography-QC/> (accessed 30 Jul 2024)
- [89] National Cyber Security Center *Quantum security technologies* <https://www.ncsc.gov.uk/whitepaper/quantum-security-technologies> (accessed 30 Jul 2024)
- [90] French Cybersecurity Agency, Federal Office for Information Security, Netherlands National Communications Security Agency and Swedish National Communications Security Authority, Swedish Armed Forces *Position Paper on Quantum Key Distribution* (French Cybersecurity Agency, Federal Office for Information Security, Netherlands National Communications Security Agency and Swedish National Communications Security Authority, Swedish Armed Forces)
- [91] European Commission 2024 *Recommendation on a Coordinated Implementation Roadmap for the transition to Post-Quantum Cryptography* <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/recommendation-coordinated-implementation-roadmap-transition-post-quantum-cryptography> (accessed 30 Jul 2024)
- [92] Fabio Cavaliere, Enrico Prati, Luca Poti and Imran Muhammad and Tommaso Catuogno 2020 Secure Quantum Communication Technologies and Systems: From Labs to Markets *Quantum Reports* **2**
- [93] Huttner B *et al* 2022 Long-range QKD without trusted nodes is not possible with current technology *npj Quantum Inf* **8**
- [94] Liu R, Rozenman G G, Kundu N K, Chandra D and De D 2022 Towards the industrialisation of quantum key distribution in communication networks: A short survey *IET Quantum Communication* **3** 151–63
- [95] Zangi S M, Shukla C, Ur Rahman A and Zheng B 2023 Entanglement Swapping and Swapped Entanglement *Entropy (Basel, Switzerland)* **25**

- [96] Briegel H-J, Dür W, Cirac J I and Zoller P 1998 Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication *Phys. Rev. Lett.* **81** 5932–5
- [97] Zhen-Sheng Yuan, Yu-Ao Chen, Bo Zhao, Shuai Chen, Jörg Schmiedmayer & Jian-Wei Pan 2008 Experimental demonstration of a BDCZ quantum repeater node *Nature* **454**
- [98] M. Pompili, S. L. N. Hermans, S. Baier, H. K. C. Beukers, P. C. Humphreys, R. N. Schouten, R. F. L. Vermeulen, M. J. Tiggelman, L. dos Santos Martins, and R. Hanson Realization of a multinode quantum network of remote solid-state qubits *Science*
- [99] Luo X-Y *et al* 2022 *Entangling metropolitan-distance separated quantum memories* (arXiv)
- [100] van Leent T *et al* 2022 Entangling single atoms over 33 km telecom fibre *Nature* **607** 69–73
- [101] Knaut C M *et al* 2024 Entanglement of Nanophotonic Quantum Memory Nodes in a Telecom Network *Nature* **629** 573–8
- [102] The European Quantum Flagship *Strategic-Research-and-Industry-Agenda-2030* (The European Quantum Flagship)
- [103] Toshiba *Fibre QKD* <https://www.toshiba.eu/pages/eu/Cambridge-Research-Laboratory/fibre-quantum-key-distribution> (accessed 30 Jul 2024)
- [104] Kalachev A A 2023 Quantum Repeaters: Current Developments and Prospects *Bull. Lebedev Phys. Inst.* **50** S1312-S1329
- [105] Nicolas Sangouard and Hugo Zbinden *What are single photons good for* (arXiv)
- [106] Elena Arenskötter, Tobias Bauer, Stephan Kucera, Matthias Bock, Jürgen Eschner and Christoph Becher 2023 Telecom quantum photonic interface for a 40Ca^+ single-ion quantum memory *npj Quantum Inf*
- [107] HSBC 2023 *HSBC becomes first bank to join the UK's pioneering commercial quantum secure metro network* <https://www.hsbc.com/news-and-views/news/media-releases/2023/hsbc-becomes-first-bank-to-join-the-uks-pioneering-commercial-quantum-secure-metro-network> (accessed 30 Jul 2024)
- [108] J I Cirac, S J van Enk, P Zoller, H J Kimble and H Mabuchi Quantum communication in a quantum network
- [109] Quantum Flagship *Strategische Forschungs- und Industrieagenda 2030* <https://qt.eu/publications> (accessed 30 Jul 2024)
- [110] van Meter R and Devitt S J 2016 Local and Distributed Quantum Computation *Computer* **49** 31–42
- [111] P. Kómár, E. M. Kessler, M. Bishof, L. Jiang, A. S. Sørensen, J. Ye & M. D. Lukin, 2014 A quantum network of clocks *Nat. Phys.* **10**
- [112] Gill S S, Kumar A, Singh H, Singh M, Kaur K, Usman M and Buyya R 2022 Quantum computing: A taxonomy, systematic review and future directions *Softw Pract Exp* **52** 66–114
- [113] Wilhelm F K, Steinwandt R, Zeuch D and Frey J 2023 *Entwicklungsstand Quantencomputer* (Bonn: Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik)

- [114] Just B 2021 *Quantencomputing kompakt: spukhafte Fernwirkung und Teleportation endlich verständlich* (Berlin: Springer-Verlag GmbH Deutschland)
- [115] Pospiech G 2021 *Quantencomputer & Co: Grundideen und zentrale Begriffe der Quanteninformation verständlich erklärt* (Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden)
- [116] Zulehner A and Wille R 2023 *Einführung in die Entwurfsautomatisierung für Quantencomputer* (Cham: Springer Nature Switzerland AG)
- [117] Linke N and Müller M 2020 Mit Ionen ist zu rechnen: Quantencomputer auf Basis von Ionen in Fallen *Physik in unserer Zeit* **51** 168–75
- [118] Stollenwerk T 2021 *Umfeldstudie Quantencomputing* (Köln: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt)
- [119] Preskill J 2018 *Quantum Computing in the NISQ era and beyond* (Institut for Quantum Information and Matter and Walter Burke Institut for Theoretical Physics, California Intitut of Technology)
- [120] bayern innovativ 2023 *Skalierbarer Quantencomputer mit neutralen Atomen: planqo gewinnt 29 Millionen Euro-Auftrag des DLR* <https://www.bayern-innovativ.de/de/seite/skalierbarer-quantencomputer-mit-neutralen-atomen> (accessed 8 Jul 2024)
- [121] Jeong H 2023 Converting qubits *Nat. Photon.* **17** 131–2
- [122] Tafuri E (ed) 2019 *Quantum Bits with Josephson Junctions*
- [123] Munich Quantum Valley o. J. *Supraleitende Qubits* <https://www.munich-quantum-valley.de/de/forschung/forschungsbereiche/supraleitende-qubits> (accessed 8 Jul 2024)
- [124] Citro R, Guarcello C and Pagano S 2024 *Josephson junctions, superconducting circuits, and qubit for quantum technologies*
- [125] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt 2022 *So werden Diamanten zu Qubits* <https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2022/04/so-werden-diamanten-zu-qubits> (accessed 8 Jul 2024)
- [126] Agarwal K, Rai H and Mondal S 2023 Quantum dots: an overview of synthesis, properties, and applications *Mater. Res. Express* **10** 1–26
- [127] Schneider J and Smalley I 2024 *Was ist ein Qubit?* <https://www.ibm.com/de-de/topics/qubit> (accessed 8 Jul 2024)
- [128] Hossenfelder S 2021 *Rechnen mit Qubits im Jahr 2021: Sechs technische Konzepte für Quantencomputer* <https://www.heise.de/select/ct/2021/17/2117410351882465724>
- [129] Grumbling E and Horowitz M 2019 *Quantum Computing* (Washington, D.C.: The National Academies of Science, Engineering and Medicine)
- [130] Lau J W Z, Lim K H, Shrotriya H and Kwek L C 2022 NISQ computing: where are we and where do we go? *AAPPS Bull.* **32**
- [131] Kagermann H, Süssenguth F, Körner J and Liepold A 2020 *Innovationspotenziale der Quantentechnologie der zweiten Generation (acatech IMPULS)* (München: acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften)

- [132] Castelvechi D 2024 IBM releases first-ever 1,000-Qubit Quantum Chip: The company will now focus on developing smaller, more reliable processors *Nature* 238
- [133] Rötger A 2024 *Wo Quantencomputer wirklich punkten können* <https://blogs.helmholtz.de/research-field-information/2024/03/27/wo-quantencomputer-wirklich-punkten-koennen/> (accessed 8 Jul 2024)
- [134] Mohseni M, Read P, Neven H, Boixo S, Denchev V, Babbush R, Fowler A, Smelyanskiy V and Martinis J 2017 Commercialize quantum technologies in five years *Nature* **543** 171–4
- [135] Abbott A 2021 Quantum computers to explore precision oncology *Nature biotechnology* **39** 1324–5
- [136] Fraunhofer Gesellschaft 2021 *Personalizing cancer treatment with quantum computing* <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2021/august-2021/personalizing-cancer-treatment-with-quantum-computing.html> (accessed 8 Jul 2024)
- [137] ATOS 2018 *Atos, Bayer und die RWTH Aachen beschleunigen medizinische Forschung mit Quantum-Computing* https://atos.net/de/2018/pressemitteilungen_2018_11_07/atos-bayer-und-die-rwth-aachen-beschleunigen-medizinische-forschung-mit-quantum-computing (accessed 8 Jul 2024)
- [138] Bobier J-F, Gerbert P, Burchardt J and Gourévitch A 2020 *A Quantum Advantage in Fighting Climate Change* <https://www.bcg.com/publications/2020/quantum-advantage-fighting-climate-change> (accessed 8 Jul 2024)
- [139] Kaiser O S, Klein Claudius and Malanowski N 2023 *Quantentechnologien und zukünftige Arbeitswelten* (Düsseldorf: Hans-Böckler-Stiftung)
- [140] Wilms A and Neukart F (eds) 2022 *Chancen und Risiken von Quantentechnologien: Praxis der zweiten Quantenrevolution für Entscheider in Wirtschaft und Politik* (Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH)
- [141] Mainzer K 2020 *Quantencomputer: Von der Quantenwelt zur Künstlichen Intelligenz* (Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag GmbH Deutschland)
- [142] Wengenmayr R 2022 *Sensibel in der Bayphase: Mythenumrankt, leistungsstark und empfindlich: Jens Eisert erklärt, wie Quantencomputer funktionieren und wie weit fortgeschritten ihre Entwicklung ist* <https://www.fu-berlin.de/presse/publikationen/tsp/2022/tsp-oktober-2022/81-quantencomputer/index.html> (accessed 8 Jul 2024)
- [143] Nikolov P 2020 Solved and Unsolved Problems in Quantum Computing *Journal of Informatics and Innovative Technologies (JIIT)* **2-3**
- [144] Troyer M, Viola Benjamin E and Gevorkian A 2024 *Quantum for Good and the Social Impact of Quantum Computing*
- [145] Coenen C, Grinbaum A, Grunwald A, Milburn C and Vermaas P 2022 Quantum Technologies and Society: Towards a Different Spin *Nanoethics* **16** 1–6
- [146] WEF 2024 *Quantum Economy Blueprint* (Cologny/Geneva: World Economic Forum)
- [147] Umweltbundesamt 2023 *Quantencomputing als nächste Computergeneration* <https://www.umweltbundesamt.de/quantencomputing-als-naechste-computergenera->

- [160] DLR 2021 *Konzepte für den Bau von deutschen Quantencomputern* https://www.dlr.de/de/aktuelles/nachrichten/2021/03/20210708_konzepte-fuer-den-bau-von-deutschen-quantencomputern (accessed 1 Aug 2024)
- [161] Bundesregierung 2023 *Kabinett beschließt Handlungskonzept Quantentechnologie* <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/forschung/quantentechnologien-2186404> (accessed 1 Aug 2024)
- [162] BMBF 2023 *Handlungskonzept Quantentechnologien der Bundesregierung* (Bonn: Bundesministerium für Bildung und Forschung)
- [163] BMBF 2022 *Quantensysteme: Zukunftstechnologien für Innovation und Fortschritt* https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/digitale-wirtschaft-und-gesellschaft/quantensysteme/quantensysteme_node.html (accessed 1 Aug 2024)
- [164] BMBF 2024 *Forschungsrahmenprogramm IT-Sicherheit - Vernetzung und Sicherheit digitaler Systeme* https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/forschung/it-sicherheit/digital_sicher_souveraen (accessed 1 Aug 2024)
- [165] BMBF o.a. *QuNET-Initiative: Mit Quantenkommunikation vertrauliche Daten um ein Vielfaches sicherer machen* <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/forschung/it-sicherheit/qunet> (accessed 1 Aug 2024)
- [166] DLR o.a. *Wir gestalten das Ökosystem Quantencomputing* – <https://qci.dlr.de/oekosystem/die-dlr-quantencomputing-initiative/> (accessed 1 Aug 2024)
- [167] PTB 2024 *Quantentechnologie-Kompetenzzentrum (QTZ) an der PTB* <https://www.ptb.de/cms/nc/ptb/kompetenzzentren/qtz.html> (accessed 1 Aug 2024)
- [168] STMWK 2021 *Über 80 Millionen Euro Fördermittel für Quantenforschung an bayerische Universitäten und Bayerische Akademie der Wissenschaften* <https://www.stmwk.bayern.de/wissenschaftler/meldung/6730/ueber-80-millionen-euro-foerdermittel-fuer-quantenforschung-an-bayerische-universitaeten-und-bayerische-akademie-der-wissenschaften.html> (accessed 1 Aug 2024)
- [169] Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg 2023 *QuantumBW WHERE POSSIBILITY becomes reality: Quantenstrategie Baden-Württemberg* (Stuttgart: Ministerium für Wissenschaft, Forschung und Kunst Baden-Württemberg)
- [170] Senatskanzlei 2021 *Stärkung des Wissenschafts- und Wirtschaftsstandortes: „Berlin Quantum Alliance“ geht an den Start* <https://www.berlin.de/sen/archiv/wissenschaft-2016-2021/2021/pressemitteilung.1127033.php> (accessed 1 Aug 2024)
- [171] Behörde für Wissenschaft, Forschung, Gleichstellung und Bezirke 2022 *Hamburg soll an die Spitze im Quantencomputing: Senat beschließt 34 Millionen Euro starkes Maßnahmenpaket* (Behörde für Wissenschaft, Forschung, Gleichstellung und Bezirke)
- [172] Quantum Valley Lower Saxony 2023 *QVLS-Q1: Der Quantencomputer made in Niedersachsen* <https://qvl.de/de/startseite/ueber-qvls/aktivitaeten/qvls-q1-der-quantencomputer-made-in-niedersachsen/> (accessed 1 Aug 2024)
- [173] MWIKE 2024 *„EIN Quantum NRW“: Nordrhein-Westfalen bündelt seine Kräfte für den Aufbruch ins Quantenzeitalter* <https://www.wirtschaft.nrw/ein-quantum-nrw-nordrhein-westfalen-buendelt-seine-kraefte-fuer-den-aufbruch-ins-quantenzeitalter> (accessed 1 Aug 2024)

- [174] Thüringer Ministerium für Wirtschaft, Wissenschaft und Digitale Gesellschaft 2021 *Thüringer Quanten-Forschung erhält Energieschub* <https://www.invest-in-thuringia.de/news/thueringer-quanten-forschung-erhaelt-energieschub/> (accessed 1 Aug 2024)
- [175] EC 2024 *EU-Mitgliedstaaten verpflichten sich zur Zusammenarbeit bei Quantentechnologien von Weltklasse* <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/news/eu-member-states-commit-cooperating-world-class-quantum-technologies> (accessed 1 Aug 2024)
- [176] DLR 2024 *Alle Tests bestanden: DLR QCI nimmt 4-Qubit-Demonstratoren SQ-RT und XQ1i ab – DLR Quantencomputing-Initiative* <https://qci.dlr.de/alle-tests-bestanden-dlr-qci-nimmt-4-qubit-demonstratoren-sq-rt-und-xq1i-ab/> (accessed 1 Aug 2024)
- [177] VDI 2022 *Projektlandkarte Quantencomputer-Demonstrationsaufbauten* <https://www.quantentechnologien.de/projektlandkarten/quantencomputing.html> (accessed 1 Aug 2024)
- [178] LZR 2024 *Deutschlands erster hybrider Quantencomputer am Leibniz-Rechenzentrum* <https://www.quantum.lrz.de/de/bits-von-qubits/detail/deutschlands-erster-hybrider-quantencomputer-am-leibniz-rechenzentrum> (accessed 1 Aug 2024)
- [179] LZR 2023 *Euro-Q-Exa: Quantencomputing mit HPC voranbringen* <https://www.quantum.lrz.de/de/bits-von-qubits/detail/euro-q-exa> (accessed 1 Aug 2024)
- [180] BMBF 2024 *DemoQuantDT: Quantenschlüsselaustausch im deutschen Telekommunikationsnetz für höhere IT-Sicherheit* <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/demoquantdt> (accessed 1 Aug 2024)
- [181] Forteza P, Herteman J-P and Kerenidis I 2019 *Quantique : le virage technologique que la France ne ratera pas*
- [182] La Maison Élysée 2021 *Présentation de la stratégie nationale sur les technologies quantiques* <https://www.elysee.fr/emmanuel-macron/2021/01/21/presentation-de-la-strategie-nationale-sur-les-technologies-quantiques> (accessed 1 Aug 2024)
- [183] Gouvernement 2023 *Stratégie nationale pour les technologies quantiques* <https://www.entreprises.gouv.fr/fr/numerique/politique-numerique/strategie-nationale-pour-technologies-quantiques> (accessed 1 Aug 2024)
- [184] CNRS 2021 *French research at the heart of the Quantum Plan* <https://news.cnrs.fr/articles/french-research-at-the-heart-of-the-quantum-plan> (accessed 1 Aug 2024)
- [185] <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/strategie-nationale-sur-les-technologies-quantiques-faire-de-la-france-un-acteur-majeur-de-ces-49233> 2021 *Stratégie nationale sur les technologies quantiques : faire de la France un acteur majeur de ces technologies au niveau européen et international* <https://www.enseignementsup-recherche.gouv.fr/fr/strategie-nationale-sur-les-technologies-quantiques-faire-de-la-france-un-acteur-majeur-de-ces-49233> (accessed 1 Aug 2024)
- [186] Gouvernement 2023 *France National Quantum Strategy: Annual Report March 2023* (Gouvernement)
- [187] CNRS 2024 *The 'Quantum Technologies' acceleration PEPR* <https://www.cnrs.fr/en/pepr/pepr-dacceleration-technologies-quantiques> (accessed 1 Aug 2024)

- [188] MajuLab 2022 *The Quantum Priority Research Programme and Equipment (PEPR) has launched* | Majulab <https://majulab.cnrs.fr/the-quantum-priority-research-programme-and-equipment-pepr-has-launched/> (accessed 1 Aug 2024)
- [189] Gouvernement 2024 *France 2030 : Point d'étapes trois ans après le lancement de la stratégie nationale des technologies quantiques et lancement du programme Proqcima* <https://www.info.gouv.fr/actualite/france-2030-point-detapes-trois-ans-apres-le-lancement-de-la-strategie-nationale-des-technologies-quantiques-et-lancement-du-programme-proqcima> (accessed 1 Aug 2024)
- [190] VDI 2024 *Förderung trinationaler Projekte in den Quantentechnologien* <https://www.quantentechnologien.de/artikel/foerderung-trinationaler-projekte-in-den-quantentechnologien.html> (accessed 1 Aug 2024)
- [191] Mörsch T 2022 *USA und Frankreich vereinbaren Zusammenarbeit bei Quantentechnologien* <https://www.kooperation-international.de/aktuelles/nachrichten/detail/info/usa-und-frankreich-vereinbaren-zusammenarbeit-bei-quantentechnologien> (accessed 1 Aug 2024)
- [192] EuroHPC 2024 *EuroHPC JU launches procurement for a new quantum computer in France* https://eurohpc-ju.europa.eu/eurohpc-ju-launches-procurement-new-quantum-computer-france-2024-01-30_en (accessed 1 Aug 2024)
- [193] UKRI 2024 *UK National Quantum Technologies Programme* <https://uknqt.ukri.org/> (accessed 1 Aug 2024)
- [194] Department for Science, Innovation & Technology 2023 *National Quantum Strategy* (Department for Science, Innovation & Technology)
- [195] UKRI 2024 *Governance* <https://uknqt.ukri.org/about-us/governance/> (accessed 1 Aug 2024)
- [196] UKRI 2024 *EPSRC Quantum Technology Research Hubs: outline stage* <https://www.ukri.org/opportunity/epsrc-quantum-technology-research-hubs/> (accessed 1 Aug 2024)
- [197] NQCC *National Quantum Computing Centre: Annual Report 2023* (National Quantum Computing Centre)
- [198] UKRI 2024 *Our programme* <https://uknqt.ukri.org/our-programme/> (accessed 1 Aug 2024)
- [199] Department for Science, Innovation and Technology 2023 *National Quantum Strategy Missions* <https://www.gov.uk/government/publications/national-quantum-strategy/national-quantum-strategy-missions> (accessed 1 Aug 2024)
- [200] de Touzalin A, Marcus C, Heijman F, Ignacio C, Richard M and Tommaso C 2016 *Quantum Manifesto for Quantum Technologies*
- [201] Quantum Flagship 2017 *Quantum Technologies Flagship Final Report* (Quantum Flagship)
- [202] Quantum Flagship 2024 *Introduction to the Quantum Flagship* <https://qt.eu/about-quantum-flagship/> (accessed 1 Aug 2024)

- [203] EC 2024 *The European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI) Initiative* <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/european-quantum-communication-infrastructure-euroqci> (accessed 1 Aug 2024)
- [204] EuroHPC JU 2022 *Selection of six sites to host the first European quantum computers* https://eurohpc-ju.europa.eu/selection-six-sites-host-first-european-quantum-computers-2022-10-04_en (accessed 1 Aug 2024)
- [205] EC 2024 *Horizon Europe* https://research-and-innovation.ec.europa.eu/funding/funding-opportunities/funding-programmes-and-open-calls/horizon-europe_en (accessed 1 Aug 2024)
- [206] EC 2023 *Quantum Tech Flagship Ramp-up Phase Report* <https://digital-strategy.ec.europa.eu/en/news/quantum-tech-flagship-ramp-phase-report> (accessed 1 Aug 2024)
- [207] EC 2023 *Europäisches Chipgesetz: Die Initiative Chips for Europe | Gestaltung der digitalen Zukunft Europas* <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/factpages/european-chips-act-chips-europe-initiative> (accessed 1 Aug 2024)
- [208] EIC 2024 *EIC Accelerator Challenges* https://eic.ec.europa.eu/eic-funding-opportunities/eic-accelerator/eic-accelerator-challenges_en (accessed 1 Aug 2024)
- [209] QuantERA 2024 *About QuantERA* <https://quantera.eu/about/> (accessed 1 Aug 2024)
- [210] EC 2024 *Flaggschiff von Quantum Technologies* <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/policies/quantum-technologies-flagship> (accessed 1 Aug 2024)
- [211] Quantum Flagship 2024 *Quantum Communication Infrastructure* <https://qt.eu/ecosystem/quantum-communication-infrastructure> (accessed 1 Aug 2024)
- [212] Quantum Flagship 2024 *European Quantum Industry Consortium (QuIC)* <https://qt.eu/ecosystem/industry/quic> (accessed 1 Aug 2024)
- [213] EC 2024 *Europäische Erklärung zu Quantentechnologien* <https://digital-strategy.ec.europa.eu/de/library/european-declaration-quantum-technologies> (accessed 1 Aug 2024)
- [214] Government of Canada 2022 *Canada's National Quantum Strategy* (Government of Canada)
- [215] Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada 2024 *NSERC - Innovate - National Quantum Strategy* https://www.nserc-crsng.gc.ca/Innovate-Innovate/NQS-SQN_eng.asp (accessed 1 Aug 2024)
- [216] NRC 2024 *Applied Quantum Computing Challenge program* <https://nrc.canada.ca/en/research-development/research-collaboration/programs/applied-quantum-computing-challenge-program> (accessed 1 Aug 2024)
- [217] NRC 2024 *Quantum Research and Development Initiative - National Research Council Canada* <https://nrc.canada.ca/en/research-development/research-collaboration/programs/quantum-research-development-initiative> (accessed 1 Aug 2024)
- [218] Mitacs 2024 *What we do* <https://www.mitacs.ca/about/what-we-do/> (accessed 1 Aug 2024)
- [219] ISED 2024 *Innovation Superclusters Initiative - Home* <https://ised-isde.canada.ca/site/global-innovation-clusters/en> (accessed 1 Aug 2024)

- [220] ISED 2023 *National Quantum Strategy* <https://ised-isde.canada.ca/site/national-quantum-strategy/en> (accessed 1 Aug 2024)
- [221] Publications Ontario 2024 *Ontario Investing in Quantum Science Innovation in Waterloo* <https://news.ontario.ca/en/release/1004075/ontario-investing-in-quantum-science-innovation-in-waterloo> (accessed 1 Aug 2024)
- [222] ISED 2024 *Innovative Solutions Canada: Annual Report 2022–23* <https://ised-isde.canada.ca/site/innovative-solutions-canada/en/innovative-solutions-canada-annual-report-2022-23#11> (accessed 1 Aug 2024)
- [223] NSERC 2024 *NSERC and the NRC launch a collaborative funding opportunity to advance the industrial readiness of quantum sensing* https://www.nserc-crsng.gc.ca/Media-Media/NewsDetail-DetailNouvelles_eng.asp?ID=1438 (accessed 1 Aug 2024)
- [224] ISED 2024 *Quantum communications* <https://ised-isde.canada.ca/site/innovative-solutions-canada/en/quantum-communications-0> (accessed 1 Aug 2024)
- [225] ISED 2024 *Quantum computing* <https://ised-isde.canada.ca/site/innovative-solutions-canada/en/quantum-computing-0> (accessed 1 Aug 2024)
- [226] ISED 2024 *Quantum sensing* <https://ised-isde.canada.ca/site/innovative-solutions-canada/en/quantum-sensing-0> (accessed 1 Aug 2024)
- [227] Government of Canada 2024 *Policy on Sensitive Technology Research and Affiliations of Concern* <https://science.gc.ca/site/science/en/safeguarding-your-research/guidelines-and-tools-implement-research-security/sensitive-technology-research-and-affiliations-concern/policy-sensitive-technology-research-and-affiliations-concern> (accessed 1 Aug 2024)
- [228] NSERC 2024 *NSERC-National Science Foundation – Collaboration on quantum science and artificial intelligence* https://www.nserc-crsng.gc.ca/Innovate-Innovate/NSERC-NSF-CRSNG_eng.asp (accessed 1 Aug 2024)
- [229] NSERC 2024 *NSERC-French Agence nationale de la recherche (ANR) call for proposals on quantum technologies* https://www.nserc-crsng.gc.ca/Innovate-Innovate/ANR-ANR/Research-Recherche_eng.asp (accessed 1 Aug 2024)
- [230] CERC 2024 *Canada Excellence Research Chairs* <https://www.cerc.gc.ca/home-ac-cueil-eng.aspx> (accessed 1 Aug 2024)
- [231] Omaar H 2023 *The U.S. Approach to Quantum Policy* (Center for Data Innovation)
- [232] NQCO 2024 *National Quantum Strategy* <https://www.quantum.gov/strategy/> (accessed 1 Aug 2024)
- [233] NQCO 2024 *About the National Quantum Initiative* <https://www.quantum.gov/about/> (accessed 1 Aug 2024)
- [234] NQCO 2024 *The National Quantum Coordination Office* <https://www.quantum.gov/nqco/> (accessed 1 Aug 2024)
- [235] Johnny Kung, PhD and and Muriam Fancy A *Quantum Revolution - Report on Global Policies for Quantum Technology*
- [236] QED-C 2023 *Who we are* <https://quantumconsortium.org/> (accessed 1 Aug 2024)

- [237] U.S. DOE Office of Science 2024 *National QIS Research Centers* <https://science.osti.gov/Initiatives/QIS/QIS-Centers> (accessed 1 Aug 2024)
- [238] NSF *Quantum Leap Challenge Institutes (QLCI)* (National Science Foundation)
- [239] NIST *NIST Announces First Four Quantum-Resistant Cryptographic Algorithms* <https://www.nist.gov/news-events/news/2022/07/nist-announces-first-four-quantum-resistant-cryptographic-algorithms>
- [240] NQCO 2024 The United States and Germany Sign Joint Statement to Enhance Cooperation in Quantum *National Quantum Coordination Office*
- [241] Cao C, Suttmeier R P and Simon D F 2006 China's 15-year science and technology plan *Physics Today* **59** 38–43
- [242] Elsa B. Kania and John Costello 2018 *Quantum Hegemony?: China's Ambitions and the Challenge to U.S. Innovation Leadership* <https://www.cnas.org/publications/reports/quantum-hegemony>
- [243] *THE 13TH FIVE-YEAR PLAN FOR ECONOMIC AND SOCIAL DEVELOPMENT OF THE PEOPLE'S REPUBLIC OF CHINA* <https://en.ndrc.gov.cn/policies/202105/P020210527785800103339.pdf> (accessed 31 Jul 2024)
- [244] The People's Government of Fujian Province 2021 *Outline of the 14th Five-Year Plan (2021-2025) for National Economic and Social Development and Vision 2035 of the People's Republic of China* https://www.fujian.gov.cn/english/news/202108/t20210809_5665713.htm
- [245] Central People's Government of the People's Republic of China 2024 *Action Plan for the Construction of Informatization Standards (2024-2027)* https://www.gov.cn/lianbo/bumen/202405/content_6954255.htm
- [246] Greg Austin *Quantum Sensing: Comparing the United States and China* (The International Institute for Strategic Studies)
- [247] State council 2022 *The State Council on the issuance of the measurement development plan (2021-2035)* https://www.gov.cn/zhengce/content/2022-01/28/content_5670947.htm (accessed 18 Jul 2024)
- [248] The Chinese Ministry of Industry and Information Technology (MIIT, 工业和信息化部, 教育部, Ministry of Science and Technology, 科学技术部, 交通运输部, Ministry of Culture and Tourism (文化旅游部), State-owned Assets Supervision and Administration Commission of the State Council, 国务院国有资产监督管理委员会, 国务院国资委), and Chinese Academy of Sciences, 中国科学院 and 中科院) 2024 *Implementation Opinions of Seven Ministries Including the Ministry of Industry and Information Technology on Promoting the Innovative Development of Future Industries: Ministry of Industry and Information Technology (2024) No. 12* <https://cset.georgetown.edu/publication/future-industry-implementation-opinions/> (accessed 31 Jul 2024)
- [249] CAICT *CAICT Homepage* <http://www.caict.ac.cn/english/>

- [250] National Nature Science Foundation of China *National Nature Science Foundation of China Homepage* <https://www.nsf.gov.cn/> (accessed 18 Jul 2024)
- [251] Zhang Q, Xu F, Li L, Liu N-L and Pan J-W 2019 Quantum information research in China *Quantum Sci. Technol.* **4** 40503
- [252] National Nature Science Foundation of China *Construction and manipulation of second-generation quantum systems* <https://www.nsf.gov.cn/publish/portal0/tab1190/info83264.htm> (accessed 18 Jul 2024)
- [253] 2021 *Outline of the 14th Five-Year Plan for National Economic and Social Development of Anhui Province and the Long-Term Goals for 2035* (安徽省国民经济和社会发展第十四个五年计划和2035年远景目标纲要) <https://www.ndrc.gov.cn/fggz/fzylgh/dffzgh/202104/P020210408558077118783.pdf> (accessed 31 Jul 2024)
- [254] Institute for Quantum Optics and Quantum Information (IQOQI) of the Austrian Academy of Sciences 2024 *satellite-based-quantum-communication* <https://www.iqoqi-vienna.at/research/zeilinger-group/satellite-based-quantum-communication>
- [255] Wei Qi 2023 *A Brief Introduction to the Latest Progress of China's QKD Industry* https://docbox.etsi.org/Workshop/2023/02_QUANTUMSAFECRYPTOGRAPHY/TECHNICALTRACK/WORLDTOUR/CASQUANTUMNETWORK_QI.pdf (accessed 31 Jul 2024)
- [256] Zhong H-S *et al* 2020 Quantum computational advantage using photons *Science (New York, N.Y.)* **370** 1460–3
- [257] Xinhua News 2023 *China Focus: China's computational power gains new strength with 255-detected-photon quantum computer* <https://xcb.ustc.edu.cn/info/1011/24046.htm>
- [258] Staff Reporters 2024 *'Origin Wukong' Ushers in China's Quantum Computing Era* <http://www.stdaily.com/English/ChinaNews/202405/ae6a9b4ede984de59c3870e9b529aa24.shtml>
- [259] Committee on Science Space and Technology 2023 *Full Committee Hearing - Advancing American Leadership in Quantum Technology* <https://science.house.gov/2023/6/full-committee-hearing>
- [260] CAICT(China Institute of Information and Communications Technology and Standards) 2023 *量子计算发展态势研究报告 (Research report on the development trend of quantum computing)* <http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/ztbg/202312/P020231228351430445406.pdf>
- [261] Asia and Pacific Research Center, Japan Science and Technology Agency 2023 *Policy and R&D trends of Quantum Technology in the leading countries of the Asia and Pacific regions* https://spap.jst.go.jp/investigation/downloads/2022_rr_01_en.pdf
- [262] the Cabinet Office 2016 *The 5th Basic Plan for Science and Technology* <https://www8.cao.go.jp/cstp/kihonkeikaku/index5.html>

- [263] The Council for Science, Technology and Innovation 2021 *Quantum Technology Innovation Strategy* https://www8.cao.go.jp/cstp/tougosenryaku/ryoushisenryaku_r.pdf
- [264] The Council for Science, Technology and Innovation 2022 *The Vision of Quantum Future Society* https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/ryoshimirai_220422.pdf
- [265] The Council for Science, Technology and Innovation 2023 *The Strategy for Creating Quantum Future Industry* https://www8.cao.go.jp/cstp/ryoshigijutsu/230414_mirai.pdf
- [266] Expert Panel on Quantum Technology Innovation, Government of Japan 2024 *Promotion Measures for the Development of Quantum Industries* https://www8.cao.go.jp/cstp/english/outline_promotionmeasures.pdf
- [267] Secretariat for Quantum Strategic Industry Alliance for Revolution *Q-Star Homepage* <https://qstar.jp/en> (accessed 31 Jul 2024)
- [268] *Quantum Technology Innovation Hubs* <https://qih.riken.jp/en/>
- [269] 2021 *Moonshot Goal 6* <https://www8.cao.go.jp/cstp/moonshot/concept6.pdf>
- [270] the Cabinet Office *Strategic Innovation Promotion Program (SIP)* https://www8.cao.go.jp/cstp/gaiyo/sip/sip_3/keikaku/13_ryousi.pdf (accessed 18 Jul 2024)
- [271] Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung ISI and Universität des Saarlandes 2024 *Monitoring-Bericht 1 - Quantenkommunikation* <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/dc597f63-802e-4206-be4f-78a49f16a5c1/details>
- [272] Dohyun Kim, Jungho Kang, Tae Woo Kim, Yi Pan, and Jong Hyuk Park 2021 The Future of Quantum Information Challenges and Vision *Journal of Information Processing Systems* **17**
- [273] Government of the Republic of Korea 2017 *Mid- to Long-Term Master Plan in Preparation for the Intelligent Information Society: Managing the Fourth Industrial Revolution* <https://k-erc.eu/wp-content/uploads/2017/12/Master-Plan-for-the-intelligent-information-society.pdf> (accessed 31 Jul 2024)
- [274] Quantum in Korea *Initiatives* <https://quantuminkorea.org/initiatives/>
- [275] Ministry of Science and ICT *In 2035, Korea Becoming the Global Hub for Quantum Economy!* <https://www.msit.go.kr/eng/bbs/view.do?sCode=eng&mId=4&mPid=2&pageIndex=&bbsSeqNo=42&nttSeqNo=828&searchOpt=ALL&searchTxt=> (accessed 18 Jul 2024)
- [276] Ministry of Science and ICT *Korea to announce national strategy to become a technology hegemon* <https://www.msit.go.kr/eng/bbs/view.do?sCode=eng&mId=4&mPid=2&pageIndex=&bbsSeqNo=42&nttSeqNo=746&searchOpt=ALL&searchTxt=>
- [277] STIP *STIP Compass* <https://stip.oecd.org/stip/interactive-dashboards/policy-initiatives> (accessed 31 Jul 2024)
- [278] Kim Ji-seop, Kim Seo-young 2024 *S. Korea to launch quantum cloud services, UAM test flights* <https://www.chosun.com/english/national-en/2024/02/15/R65DC6VLG5AGRHYCGBAEFRZAWI/> (accessed 31 Jul 2024)

- [279] Quantum in Korea *Organizations* <https://quantuminkorea.org/organizations/>
- [280] National Research Funation of Korea *NRF Hompage* <https://www.nrf.re.kr/eng/index> (accessed 18 Jul 2024)
- [281] IITP(Institute of Information & CommunicationS Technology Planning & Evaluation) 2024 *IITP Homepage* <https://www.iitp.kr/en/main.it>
- [282] KISTEP(Korea Insitute of S&T Evaluation and Planning) 2024 *KISTEP Homepage* <https://www.kistep.re.kr/eng/>
- [283] Johnny Kung 2021 *A Quantum Revolution: Report on Global Policies for Quantum Technology* <https://cifar.ca/cifarnews/2021/04/07/a-quantum-revolution-report-on-global-policies-for-quantum-technology/#topskipToContent>
- [284] 2020 *SK Broadband to Become the First Telecommunications Company to Apply Quantum Cryptography Technology to Public Network* <https://english.et-news.com/20201022200001>
- [285] Ministry of Science and ICT 2024 *MSIT begins to cultivate quantum technology* <https://www.msit.go.kr/eng/bbs/view.do?sCode=eng&mId=4&mPid=2&pageIn-dex=&bbsSeqNo=42&nttSeqNo=627&searchOpt=ALL&searchTxt=>
- [286] Reiß T, Fan C, Friedrichsen N, Gnann T, Hüttemann P, Sauer A, Thielmann A and Wietschel M *Energiespeicher-Monitoring für die Elektromobilität (EMOTOR). Län-derbericht*
- [287] Endo Chie , Kaufmann Tanja , Schmuch Richard , Thielmann Axel *Benchmarking In-ternational Battery Policies*
- [288] Jin-Won Kim 27,07,2023 *S.Korea to inject more than \$2.3 bn in quantum science, tech by 2035: The country aims to join the world's top four powerhouses in the promising field of physics and engineering* <https://www.kedglobal.com/tech,-media-tele-com/newsView/ked202306270025>
- [289] IDQ 19.07.022 *IDQ and SK Broadband complete phase one of nation-wide Korean QKD Network* <https://www.idquantique.com/idq-and-sk-broadband-complete-phase-one-of-nation-wide-korean-qkd-network/>
- [290] KOISRA 2024 *South Korea's Quantum Strategy Vision for 2035* <https://www.koisra.co.kr/insights/south-koreas-quantum-strategy-vision-for-2035/>
- [291] Kroll H, Berghäuser H, Blind K, Neuhäusler P, Scheifele F, Thielmann A and Wydra S 2022 *Schlüsseltechnologien*
- [292] Bitkom 2023 *Stellungnahme Stellungnahme zum Handlungskonzept Quantentechnolo-gien der Bundesregierung* <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2023-06/Bitkom-StellungnahmeHandlungskonzeptQuantentechnologien.pdf> (accessed 1 Aug 2024)
- [293] Quantum Business Network UG 2023 *QBN's official statement on Germany's Action Plan on Quantum Technologies* <https://qbn.world/qbn-official-statement-on-germanys-action-plan-on-quantum-technolo-gies/#:~:text=QBN%E2%80%99s%2011%20KEY%20RECOMMENDA-TIONS%20Strengthen%20the%20ecosystem%20through,providing%20favoura-ble%20conditions%20for%20entrepreneurs%20and%20technology%20transfer.> (ac-cessed 1 Aug 2024)