Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Handlungskonzept Quantentechnologien

der Bundesregierung

Inhaltsverzeichnis

1. Die Potenziale der Quantentechnologien für Deutschland nutzen 3

2. Große Herausforderungen, außerordentliches Potenzial 8

Quantencomputing und Quantensimulation ... 9
Post-Quanten-Kryptografie und Quantenkommunikation ... 9
Quantensensorik und Quantenmetrologie ... 10
Basistechnologien ... 10
Technologiestand im internationalen Vergleich ... 10
Überblick Technologiestränge ... 13
Quantencomputing und Quantensimulation ... 13
Quantenkommunikation ... 14
Quantensensorik und Quantenmetrologie ... 14

3. Technologie auf Spitzenniveau für Gestaltungskraft und technologische Souveränität 16

A. Quantentechnologien für Wirtschaft, Gesellschaft und staatliche Institutionen nutzbar machen ... 18
Wirtschaftliche Innovationskraft ... 19
Gesellschaftliche Herausforderungen ... 20
Sicherheit und Souveränität ... 22
B. Die Technologieentwicklung mit Blick auf künftige Anwendung zielgerichtet vorantreiben ... 23
Technologische Grenzen verschieben ... 23
Standards setzen ... 23
Technologieleuchtturm: Quantencomputing ... 25
C. Exzellente Rahmenbedingungen für ein starkes Ökosystem schaffen ... 27
Schnittstellen schaffen: die Ökosysteme stärken ... 27
Gründerkultur und innovative Unternehmen stärken ... 27
Interesse wecken, Fachkräfte gewinnen ... 28
Auswirkungen im Blick behalten: Chancen erkennen und Auswirkungen betrachten ... 29

4. Gemeinsam handeln – souverän agieren 31

Gemeinsames Handeln der Bundesregierung ... 31
Interdisziplinäre Schnittstellen ... 32
Vernetzung mit nationalen Akteuren ... 32
Starke internationale Partnerschaften aufbauen und technologische Souveränität sichern ... 32

5. Meilensteine und Mittelplanung 34

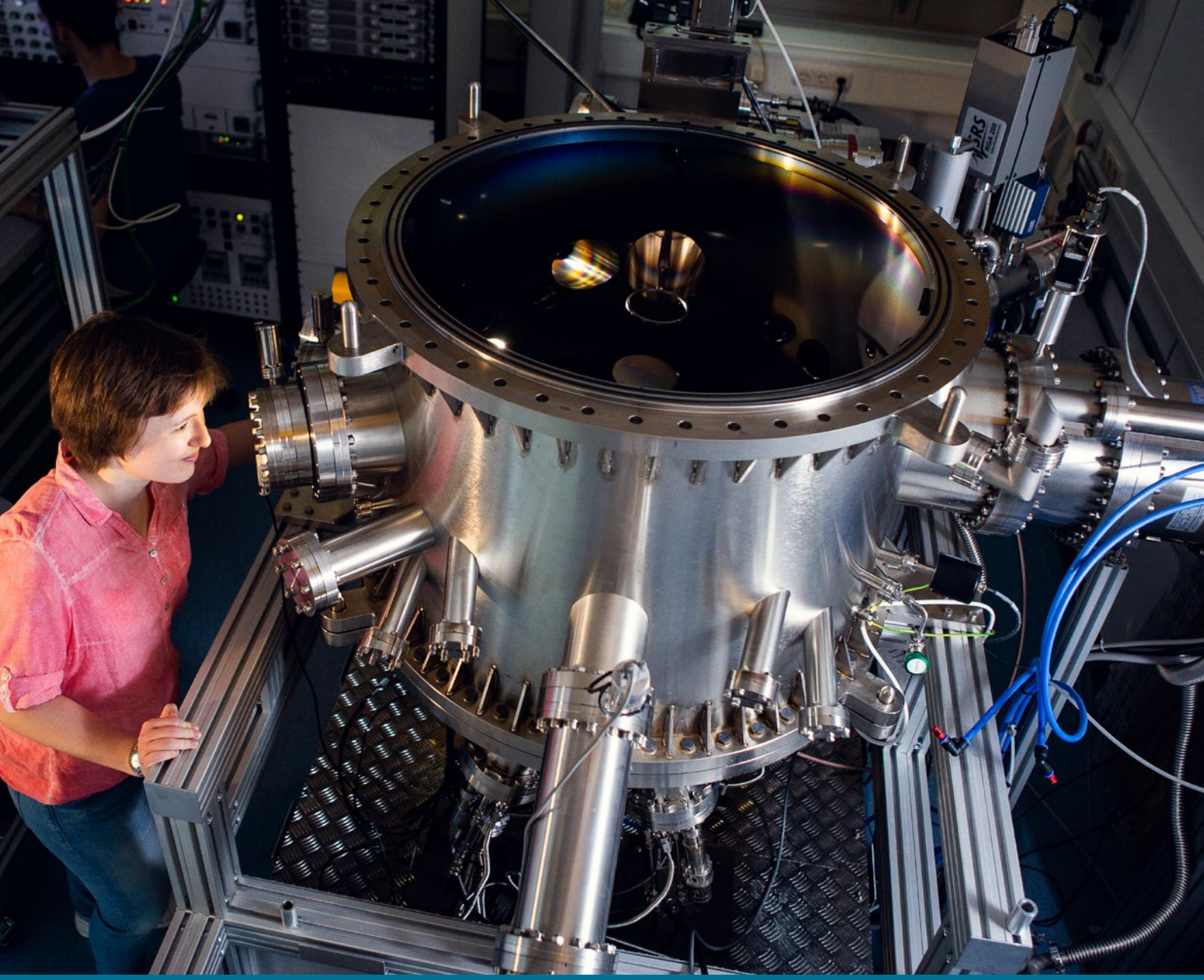
Quantencomputing ... 35
Quantensensorik ... 35
Quantenkommunikation und Post-Quanten-Kryptografie ... 35
Charakterisierung und Standardisierung ... 36
Mittelplanung ... 36

6. Anhang 37

Forschungsprogramme, -strategien und -maßnahmen der Ressorts mit Bezug zum Handlungskonzept ... 37
Übersicht über Aktivitäten von nachgeordneten Behörden, Agenturen und institutionell geförderten Einrichtungen ... 39

7. Glossar 53

Impressum 55



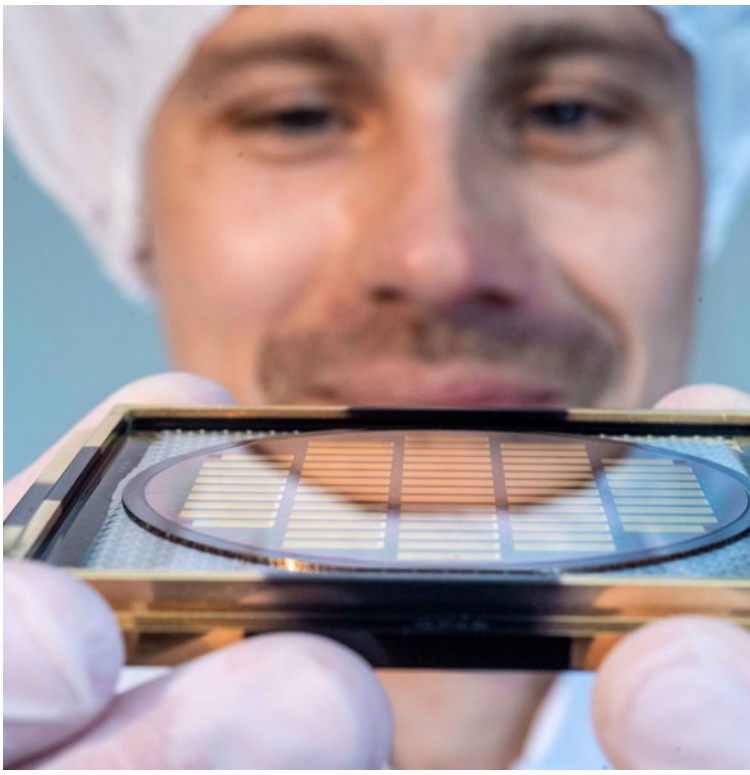
1. Die Potenziale der Quantentechnologien für Deutschland nutzen

Neue Technologien beeinflussen unseren Alltag enorm: Sie sind Basis für die vielfältigen Möglichkeiten der digitalen Welt, Grundlage für effektive Energieerzeugung, neue Formen der Mobilität oder innovative Medizintechnik. Für ein zukunftsfähiges und technologisch souveränes Deutschland ist es entscheidend, kommende Technologien und deren Potenziale möglichst früh zu identifizieren, exzellente Rahmenbedingungen für die künftige Ausgestaltung und Nutzung zu schaffen und den Technologiesprung aktiv mitzugestalten. Quantentechnologien sind eine Zukunftstechnologie mit disruptivem Potenzial und besonders vielversprechenden Anwendungsperspektiven. Obwohl sie sich noch in einem vergleichsweise frühen Entwicklungsstadium befinden, zeichnen sich bereits jetzt innovative Nutzungsmöglichkeiten in Wirtschaft und Gesellschaft ab, die auch die oben genannten Herausforderungen adressieren.

Der Zeithorizont sowie die zu erwartenden Auswirkungen verschiedener Technologiestränge innerhalb der Quantentechnologien sind unterschiedlich:[1] In den Basistechnologien und Basiskomponenten für die Quantentechnologien existiert in Deutschland bereits eine Unternehmenslandschaft aus Start-ups und großen Unternehmen. Auch in der Quantensensorik, den Quantenmaterialien und der Quantenkommunikation haben bereits erste Produkte die Marktreife erreicht. Dagegen ist im Quantencomputing erst mittel- bis langfristig mit einer breiten Nutzung zu rechnen, die dafür aber enormes Entwicklungspotenzial mit sich bringt.[2, 3] Wie jede andere neue Technologie bedeuten auch die Quantentechnologien nicht nur Chancen, sondern auch Herausforderungen. Diese gilt es im Auge zu behalten. Beispielsweise werden Quantencomputer langfristig leistungsfähig genug sein, um die Sicherheit klassischer digitaler Kommunikation mit der heute eingesetzten Kryptografie zu gefährden. Die Migration zu quantencomputerresistenten kryptografischen Verfahren ist daher unumgänglich und muss bereits heute mitgedacht werden.[4]

Deutschland hat in den Quantentechnologien eine gute Position. Aufgrund der ausgewiesenen Forschungslandschaft belegt Deutschland bei entsprechenden Publikationen im internationalen Vergleich Platz vier hinter den USA, China und Großbritannien und weist die meisten Publikationen europäischer Länder auf.[5] Auch bei Patentfamilien findet sich Deutschland hinter China, den USA und Japan unter den ersten vier. Der Schwerpunkt der deutschen Patentfamilien liegt dabei in den Bereichen Quantenmesstechnik und Quantenelektronik.[6] Diese starke Basis gilt es zu nutzen.

Ziel der Bundesregierung ist vor diesem Hintergrund, Deutschland und Europa in den Quantentechnologien mit zielgerichteter, langfristiger Unterstützung an eine internationale Spitzenposition zu bringen und diese zu festigen. Im Quantencomputing gilt es, zu den Technologieführern aufzuschließen. Dies sichert die technologische Souveränität, hebt Wertschöpfungspotenziale und eröffnet große Möglichkeiten

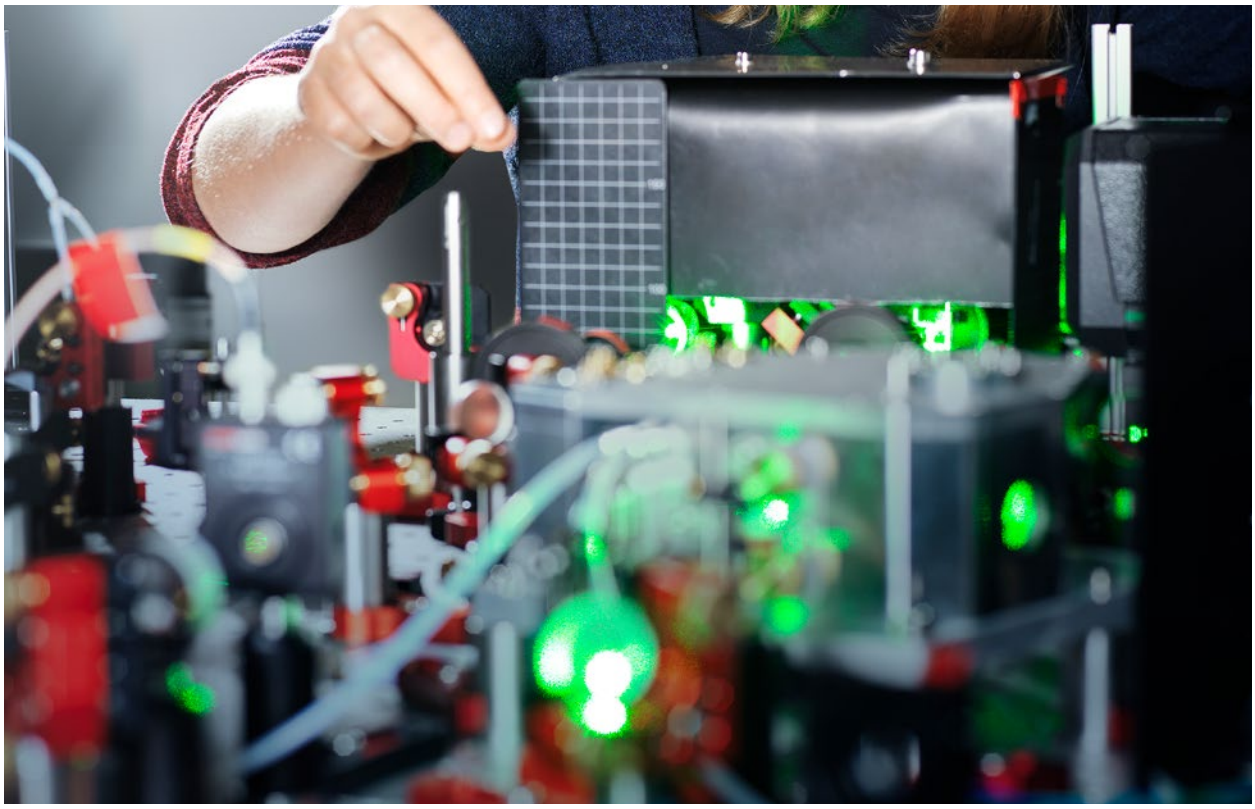


für die Nutzung der Technologie in Wirtschaft und Gesellschaft.

Hierfür muss die anwendungsorientierte Entwicklung von Quantentechnologien in Deutschland gezielt vorangebracht werden. Es gilt,

- die Innovationskraft und technologische Souveränität Deutschlands in den Quantentechnologien zu sichern und auszubauen,
- auf die Entwicklung und Herstellung marktfähiger Produkte hinzuwirken,
- mit Quantentechnologien Beiträge zur Bewältigung der gesellschaftlichen Herausforderungen in Klimaforschung, Energie, Gesundheit, Mobilität und Sicherheit zu leisten,
- Fachkräfte auszubilden, zu gewinnen und Deutschland als einen attraktiven Beschäftigungsstandort für die Quantentechnologien zu entwickeln,

1 Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A.: Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS (2020)
2 McKinsey & Company: Quantum Technology Monitor (abgerufen am 22.11.2022)
3 Boston Consulting Group: What Happens When 'If' Turns to 'When' in Quantum Computing? (2022)
4 Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik BSI: Kryptografie quantensicher gestalten. (2021)
5 McKinsey & Company: Quantum Technology Monitor (abgerufen am 22.11.2022)
6 Kurek, M.: Quantum Technologies Patents, Publications & Investments. Ecole Polytechnique Paris (2020)



- den Menschen Quantentechnologien nahezubringen, die Chancen zu vermitteln und dabei die Auswirkungen aufzuzeigen, und

- ein koordiniertes, gemeinsames Vorgehen der Bundesregierung sicherzustellen.

Zentral hierfür ist es, ein leistungsfähiges Ökosystem zu etablieren, in dem alle relevanten Akteure entlang der Wertschöpfungskette eng vernetzt zusammenarbeiten. Die Verzahnung von Grundlagen- und angewandter Forschung sowie die frühzeitige Einbindung der Endanwender stellen sicher, dass die Technologieentwicklung den tatsächlichen Bedarf im Blick behält. Die Integration von Partnern aus der Wirtschaft ist dabei ein wichtiger Baustein. Auch die aktive Positionierung bei der Entwicklung von Standards sowie die Entwicklung der erforderlichen Quantenmetrologie sind von großer Bedeutung. Ziel ist, auf diese Weise das erwartete enorme Marktpotenzial im Anwendungsbereich zu erschließen.[7] Es müssen auch frühzeitig die Konsequenzen für die Cybersicherheit – und damit für die Digitalisierung Deutschlands – mitgedacht werden, die durch die Entwicklung von Quantentechnologien entstehen.

Mit dem vorliegenden Handlungskonzept gibt sich die Bundesregierung bis zum Jahr 2026 einen politischen Gestaltungsrahmen für ihre Maßnahmen im Bereich Quantentechnologien. Zugleich ist das Konzept Teil einer langfristig angelegten Strategie. Denn um das Potenzial der Quantentechnologien vollständig zu nutzen, werden weitere, über das Handlungskonzept hinausgehende Schritte nötig sein (siehe auch Vision 2036 in Kapitel 3).

Für die Umsetzung der einzelnen Bestandteile des ressortübergreifenden Handlungskonzepts der Bundesregierung sind die Bundesministerien zuständig. Sie werden den Erfolg der jeweiligen Maßnahmen anhand von messbaren Zielen und Meilensteinen überprüfen. Diese Indikatoren werden auf Maßnahmen- und Handlungskonzeptebene fortlaufend beobachtet, geprüft und sukzessive fortgeschrieben und tragen so der dynamischen Entwicklung in den Quantentechnologien Rechnung.

Zur Bewältigung der zentralen Herausforderungen verfolgt die Bundesregierung drei zentrale Handlungsstränge. Diese setzen primär auf eine öffentliche Kofinanzierung mit dem Ziel, private Initiativen und

7 Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A.: Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS (2020)

Investitionen in Deutschland auszulösen, zu verstärken und zu beschleunigen. Je nach Einsatzbereich erfolgt diese in unterschiedlicher Form, etwa durch Aufträge, direkte Projektförderung oder Beteiligungen (insb. Wagniskapital) der öffentlichen Hand.

A. Quantentechnologien für Wirtschaft, Gesellschaft und staatliche Institutionen nutzbar machen

Wir werden die Markterschließung und den Einsatz der Technologien für gesellschaftlich relevante Fragestellungen stimulieren. Bis 2026 wollen wir dazu in Deutschland:

- die Nutzbarkeit und die Anwendung der Quantentechnologien in allen Technologiesträngen insgesamt deutlich ausbauen;
  → Alle Ressorts

- in Deutschland und Europa Quantencomputing für praxistaugliche Anwendungen in Wirtschaft, Verwaltung und Gesellschaft erschließen. Das langfristige Ziel einer technologischen Souveränität beim Quantencomputing in Deutschland und in der EU wird dabei über alle aufeinander aufbauenden Komponenten und Ebenen („full stack“) betrachtet;
  → BMBF, BMWK

- Kompetenzen für das Design und die Entwicklung von Quantenalgorithmen über verschiedene Forschungsschwerpunkte hinweg stärken, beispielsweise im Bereich der Optimierung oder des quantenmaschinellen Lernens;
  → BMBF, BMWK

- anwendungstaugliche Quantenkommunikationskomponenten entwickeln und in den Markt bringen, eine gut vernetzte Quantenkommunikationsindustrie in Deutschland aufbauen und den Transfer von Know-how aus der Wissenschaft in die Wirtschaft sicherstellen;
  → BMBF, BMF, BMI, BMWK

- die Migration zu quantensicherer Kryptografie (Post-Quanten-Kryptografie, PQK) in Deutschland, insbesondere in relevanten Bereichen (z. B. kritische Infrastrukturen), vorantreiben;[8]
  → BMI, BMVg, BMBF

- in der Quantensensorik mit Leuchtturmanwendungen marktfähige Produkte schaffen;
  → BMBF, BMWK

- optische Uhren für die nächste Galileo-Generation entwickeln und gemeinsam mit europäischen Partnern die Entwicklung der nächsten Generation satellitenbasierter Schwerefeld-Quantensensoren (bis zu Technology Readiness Level [TRL] 5) vorantreiben;
  → BMWK

- Auswirkungen und Nutzen der Quantentechnologien in der öffentlichen Verwaltung, insbesondere in der Kommunikationssicherheit, untersuchen und geeignete Maßnahmen umsetzen.
  → BMI, BMF

8 Dies ist auch ein Ziel der Cybersicherheitsstrategie für Deutschland 2021.

B. Die Technologieentwicklung mit Blick auf künftige Anwendung zielgerichtet vorantreiben

Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums vieler Technologiestränge sind weitsichtige und langfristige Maßnahmen notwendig, um Forschung und Entwicklung mit klarer Anwendungsperspektive zielgerichtet voranzutreiben. Bis 2026 wollen wir dazu in Deutschland:

- mit zielgerichteten Maßnahmen die starke Position Deutschlands in den Basistechnologien sichern und ausbauen;
  → BMBF, BMWK

- Chips der nächsten Generation für die Quantentechnologien entwickeln, beispielsweise für Quantencomputer oder Quantensensorik-Anwendungen;
  → BMBF, BMWK

- Quantencomputing-Hardware basierend auf verschiedenen Ansätzen anwendungsorientiert entwickeln. Dabei streben wir einen universellen Quantenrechner auf Augenhöhe mit internationalen Entwicklungen und mindestens 100 individuell ansteuerbaren Qubits an, der mittelfristig auf 500 Qubits skalierbar ist. Daneben soll auch leistungsfähige Spezialhardware für geeignete Anwendungsfelder entwickelt werden;
  → BMWK, BMBF

- Kompetenzen für das Design und die Entwicklung von Quantenalgorithmen über verschiedene Forschungsschwerpunkte hinweg stärken, beispielsweise im Bereich der Optimierung oder des quantenmaschinellen Lernens;
  → BMBF, BMWK

- raumfahrttaugliche und marktfähige Schlüsselkomponenten für Sensorik, Navigation, Kommunikation entwickeln und in den Markt bringen;
  → BMWK

- eine Qualitätsinfrastruktur und eine verlässliche Quantenmetrologie etablieren, um für die Quantentechnologien unabhängige Charakterisierungen, Qualifizierung und Standardisierung für spezifische Komponenten zu schaffen.
  → BMWK, BMBF

C. Exzellente Rahmenbedingungen für ein starkes Ökosystem schaffen

Im internationalen Wettbewerb ist es entscheidend, dass in Deutschland und Europa attraktive und stimulierende Rahmenbedingungen gesetzt werden. Bis 2026 wollen wir dazu in Deutschland:

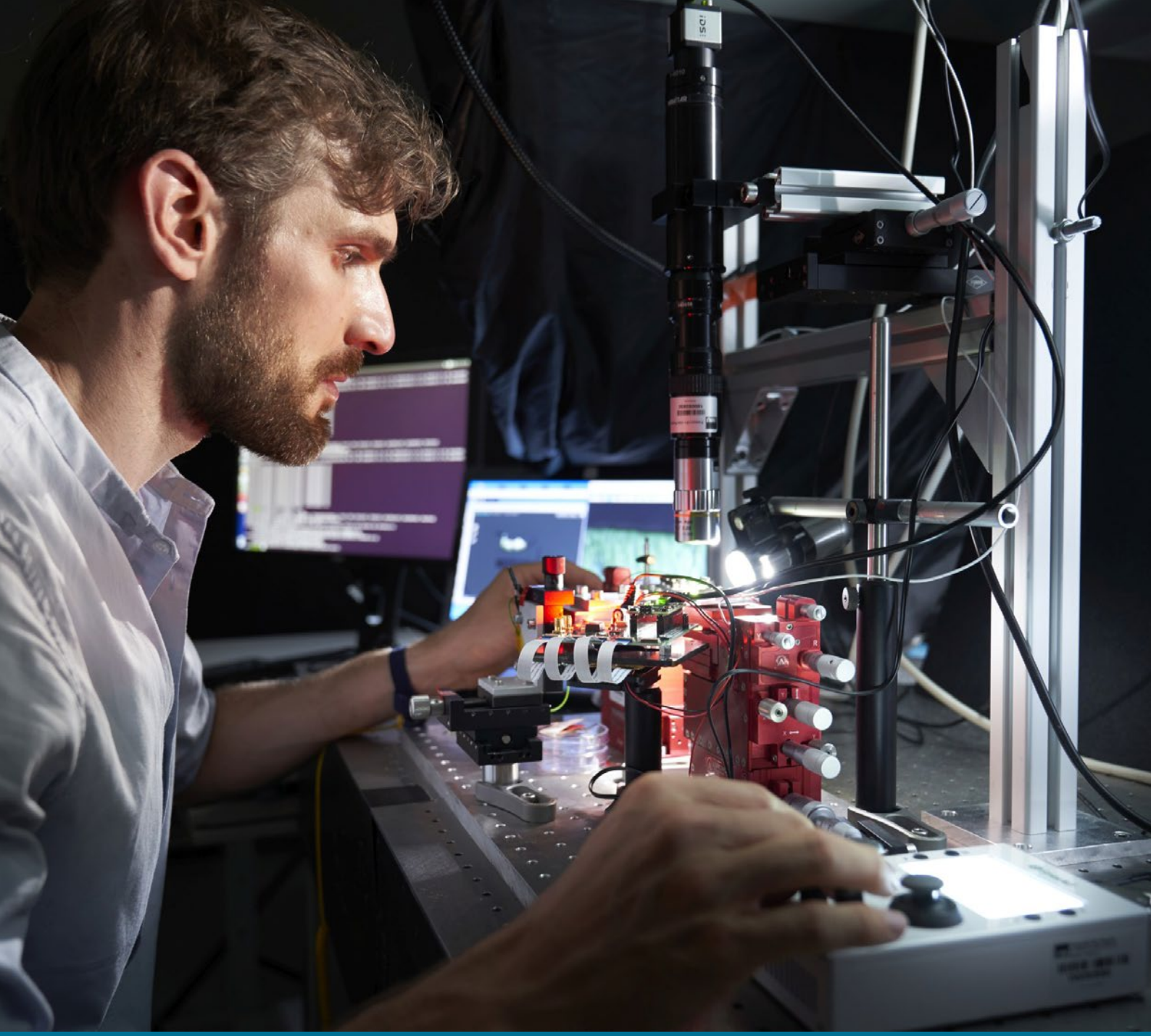
- eine enge Vernetzung aller Akteure und Aktivitäten in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik sicherstellen;
  → Alle Ressorts

- die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften im Bereich der Quantentechnologien mit einem kohärenten Programm stärken, das den akademischen Nachwuchs, technisches Personal und die berufliche Weiterbildung umfasst;
  → BMBF, BMWK

- ein positives Gründungsklima schaffen, um Ausgründungen aus der Academia zu unterstützen;
  → BMBF, BMWK

- auf eine enge Verzahnung mit den europäischen Partnern auf allen Ebenen hinwirken. Dies beinhaltet sowohl die Kooperation bei technologischen Fragestellungen als auch die Entwicklung gemeinsamer Standards, auch solcher zur verantwortungsvollen Nutzung und einer gemeinsamen Qualitätsinfrastruktur.
  → Alle Ressorts

Das Handlungskonzept Quantentechnologien trägt zu den Zielen der „Zukunftsstrategie Forschung und Innovation“ der Bundesregierung bei. Es leistet einen Beitrag zur Sicherung der technologischen Souveränität Deutschlands und Europas in den Zukunftstechnologien. In der operativen Umsetzung wird es je nach technologischer Reife und Anwendungsschwerpunkt von den Fachprogrammen sowie den konkreten Umsetzungskonzepten und Maßnahmen der beteiligten Ressorts untersetzt. Eine Übersicht zum Status quo liefert der Anhang.



2. Große Herausforderungen, außerordentliches Potenzial

Die Quantentechnologien, also die gezielte Kontrolle quantenmechanischer Effekte und deren technologische Nutzung, versprechen enorme Fortschritte für Anwendungen in Wirtschaft, Gesellschaft und in staatlichen Institutionen. Je nach Technologiestrang (Quantencomputing und Quantensimulation, Quantenkommunikation und Post-Quanten-Kryptografie, Quantensensorik und Quantenmetrologie sowie den zugehörigen Basistechnologien) sind Anwendungsreife und Einsatzmöglichkeiten unterschiedlich ausgeprägt.

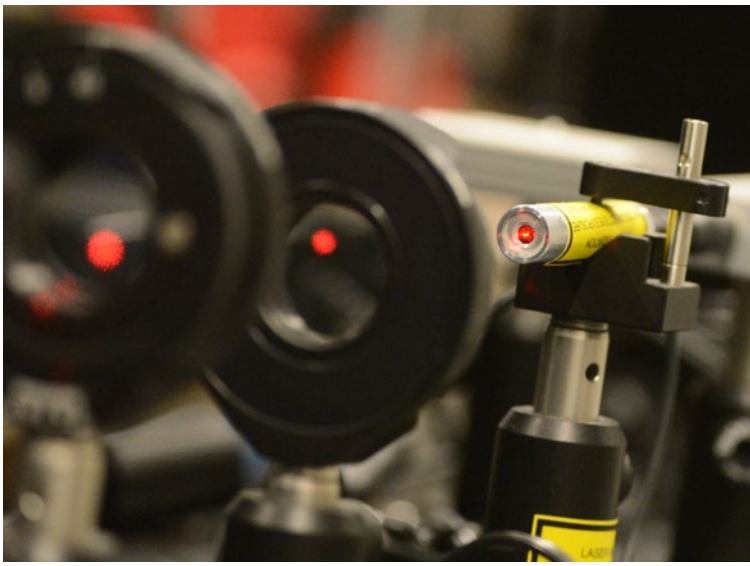
Quantencomputing und Quantensimulation

Am deutlichsten wird das enorme Potenzial beim Quantencomputing. Klassische Computer werden langfristig an ihre Grenzen stoßen, beispielsweise bei der Simulation chemischer Reaktionen und Verbindungen (Materialwissenschaften, Medikamentendesign) oder der Optimierung komplexer, beispielsweise logistischer Systeme. Durch neue Algorithmen auf der Basis von Qubits (Quantenbits) anstelle von klassischen Bits könnte der Quantencomputer hier entscheidende Vorteile liefern. Potenziale werden beispielsweise auch bei Rechnungen für die Wetterdienste und die Modellierung des Klimawandels und dessen Folgen gesehen.

Daher existieren Forschungsarbeiten zu einer Fülle technologisch verschiedener Implementierungen von Quantencomputern (siehe auch Infokasten „Technologieleuchtturm Quantencomputing“) und möglichen Anwendungsfällen. Welche Ansätze letztlich erfolgreich sein werden oder ob verschiedene Implementierungen in bestimmten Anwendungsfällen hervorstechen, lässt sich nicht verlässlich vorhersagen. Die Technologien haben aber das Potenzial, in verschiedensten Anwendungsbereichen und Branchen völlig neuartige Möglichkeiten für Produkte und Dienstleistungen zu schaffen und so den internationalen Wettbewerb maßgeblich zu beeinflussen. Studien gehen langfristig von einem jährlichen Marktvolumen von mehreren Hundert Milliarden Euro allein im Quantencomputing aus.[9] Dies erklärt die weltweit hohe Aufmerksamkeit und das erhebliche finanzielle Engagement für das Thema. Noch müssen aber bei der Entwicklung – sowohl bezogen auf Hardware als auch auf Software – grundlegende Herausforderungen bewältigt werden, die langfristige Forschungs- und Entwicklungstätigkeiten erfordern.

Post-Quanten-Kryptografie und Quantenkommunikation

Auch wenn sie selbst keine Quantentechnologie ist, spielt die Post-Quanten-Kryptografie in diesem Kontext eine wichtige Rolle. Aus Sicht der IT-Sicherheit stellt die Entwicklung von leistungsfähigen



Quantencomputern nämlich eine Bedrohung dar: Der sogenannte Shor-Algorithmus, ein Verfahren der Quanteninformatik, wäre in der Lage, die heute eingesetzte Public-Key-Kryptografie zu brechen. Noch existiert die dafür nötige Quantencomputing-Hardware nicht. Sobald diese jedoch verfügbar ist, würde dies ein unkalkulierbares Risiko darstellen, da derzeit mit solchen Verschlüsselungsverfahren unsere vertrauliche Kommunikation und sicherheitsrelevante Daten abgesichert werden. Schon jetzt könnten verschlüsselte Daten abgehört und aufgezeichnet werden, um mit künftigen Quantencomputern entschlüsselt zu werden („store now, decrypt later“). Dies macht die Entwicklung und Einführung neuer, quantensicherer kryptografischer Verfahren („Post-Quanten-Kryptografie“) zwingend erforderlich, die gegenüber Quantencomputern eine mindestens ebenso hohe Sicherheit bieten sollen wie die oben genannten klassischen Verfahren heute. Dabei ist zu bemerken, dass Post-Quanten-Kryptografie genauso wie die zurzeit eingesetzten Public-Key-Verfahren auf klassischer Hardware implementiert werden kann. Dies unterscheidet sie maßgeblich von den Verfahren der Quantenkommunikation und erlaubt ihren Einsatz auch in Situationen, in denen Quantenkommunikation, zum Beispiel aufgrund von physischen Begrenzungen, nicht möglich ist.

Quantenkommunikation bietet enormes Potenzial, vertrauliche Kommunikation höchst effektiv abzusichern. Für die Quantenverschlüsselung werden quantenphysikalische Effekte wie die Verschränkung

9 Boston Consulting Group: What Happens When ‘If’ Turns to ‘When’ in Quantum Computing? (2022)

oder die nicht vollständige Kopierbarkeit einzelner Photonen zum Schlüsselaustausch genutzt, um Daten sicher zu übertragen. Im Unterschied zu gebräuchlichen kryptografischen Verfahren beruht die hohe Sicherheit der Quantenkryptografie auf physikalischen Naturgesetzen und nicht auf mathematischen Annahmen. Verschiedenste Quantenkommunikationsverfahren wurden zwischenzeitlich in Anwendungen demonstriert, sowohl in Glasfasern als auch zwischen Satelliten und in terrestrischen Freistrahlverbindungen. Für eine breite Anwendungsrelevanz stellen Reichweite und Datenrate aber nach wie vor eine Herausforderung dar. Aus diesem Grund ist die Entwicklung von Quantenrepeatern, die als Knotenpunkte zur Verlängerung der Übertragungsstrecken benötigt werden, als Schlüsselkomponente für die Quantenkommunikation über große Distanzen essenziell.

Quantensensorik und Quantenmetrologie

Die quantenbasierte Messtechnik ist im Bereich der Quantentechnologien vermutlich das Feld mit der höchsten Technologiereife. So kommen beispielsweise Stickstoff-Fehlstellen-Zentren in Diamant bereits in speziellen Mikroskopen zum Einsatz. Auch erste Quantengravimeter sind auf dem Markt verfügbar und ermöglichen die Vermessung des Schwerefelds der Erde für Anwendungen in der Geologie oder Geodäsie.

Quantensensoren bieten auch neue und zu klassischen Technologien komplementäre Anwendungen. Durch den direkten Bezug der Messverfahren auf Naturkonstanten, die durch die kürzliche Neudefinition des SI-Einheitensystems (2019) ohne Unsicherheit festgelegt sind,[10] bieten sie neuartige Möglichkeiten für verlässliche, ubiquitäre und hochgenaue Sensorik. Insgesamt handelt es sich bei der quantenbasierten Messtechnik um ein heterogenes Feld mit unterschiedlichsten Technologien und zahlreichen vielversprechenden, teilweise bereits marktreifen Anwendungsmöglichkeiten.

Die Quantenmetrologie ist jedoch nicht nur auf Quantensensorik beschränkt. Sie befasst sich allgemein mit der Durchführung hochauflösender und hochempfindlicher Messungen physikalischer Parameter unter Verwendung von Quanteneffekten wie der Quantenverschränkung. Damit verspricht die Quantenmetrologie die Entwicklung von Messtechniken, die eine höhere Präzision als dieselbe Messung mit klassischen Methoden ermöglichen. So kann beispielsweise die elektrische Quantenmetrologie die konventionelle Messtechnik zu einer umfassenden Quantenmesstechnik entwickeln. Unter anderem sind programmierbare „Quantenvoltmeter“ bereits auf dem Markt verfügbar.

Basistechnologien

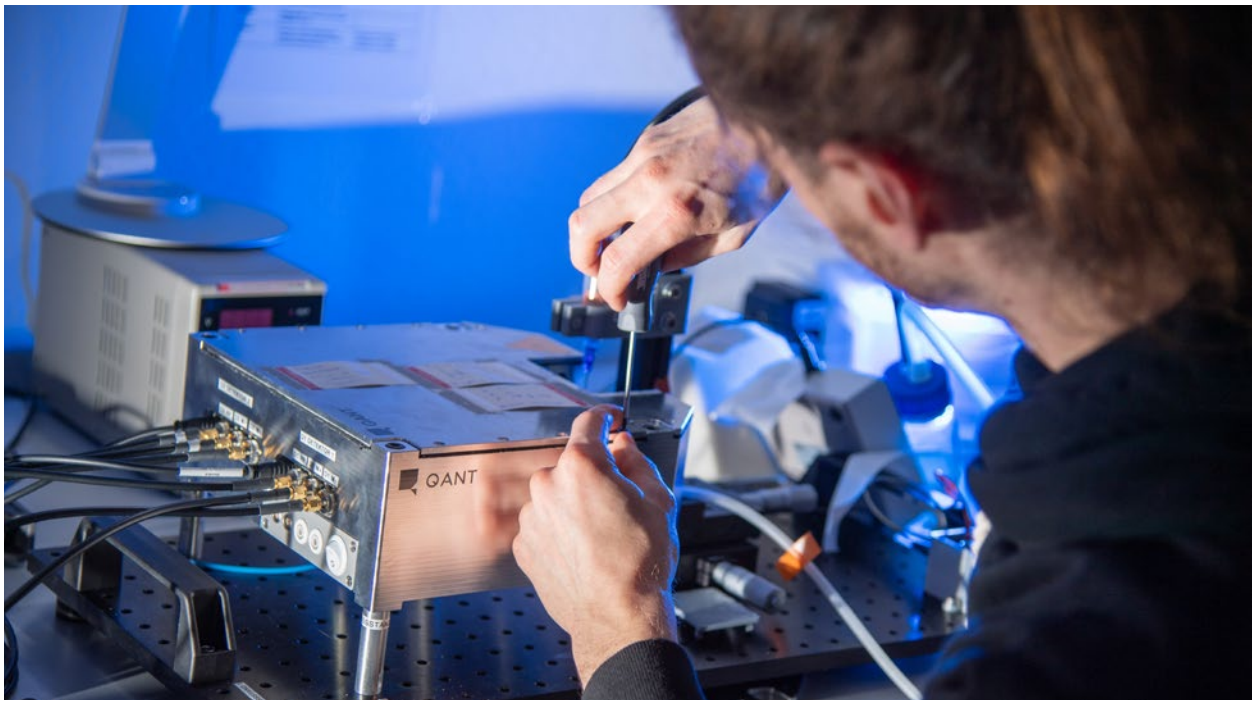
Für die Fortentwicklung der Quantentechnologien ist insbesondere das Querschnittsfeld der Basistechnologien („Enabling Technologies“) unabdingbar. Es entfaltet bereits jetzt wirtschaftliches Potenzial: Erste Märkte für spezielle Laser, Ansteuerungselektronik oder auch Kühltechnik für Quantensysteme sind bereits entstanden. Insbesondere hoch spezialisierte Start-ups und kleine und mittlere Unternehmen (KMU) sind dadurch in der Lage, erste Umsätze zu erzielen. Die zukünftige Herausforderung wird es sein, aus dieser Summe einzelner Komponenten innovative Gesamtsysteme zu entwickeln und weitere Nutzungsmöglichkeiten zu erschließen.

Als Querschnittsaufgabe muss zudem für eine stabile, vertrauenswürdige und zuverlässige Wertschöpfungskette in der aufstrebenden Quantentechnologie-Industrie eine unabhängige metrologische Charakterisierung und Qualifizierung von Komponenten[11] von Beginn an mitgedacht und entwickelt werden. Dies stellt die Gewährleistung von Qualität, nachvollziehbare und gesicherte Leistungsparameter und die Vergleichbarkeit von Quantentechnologie-Komponenten sicher.

Technologiestand im internationalen Vergleich

Im internationalen Vergleich sind derzeit insbesondere im Quantencomputing die USA weltweit führend. So stellen Großkonzerne wie Google und IBM derzeit den Stand der Technik im Bereich des supraleitenden

10 Pfalz, M.: Das neue Maß der Einheiten. Auf: pro-physik.de (2019)
11 Tzalenchuk, A. et al.: The expanding role of National Metrology Institutes in the quantum era. In: Nature Physics 18 (2022)



Quantencomputings. Die USA verfügen in den Quantentechnologien zudem über die höchste Anzahl an Start-ups (92), das höchste eingebrachte Wagniskapital (2,2 Mrd. US-Dollar im Zeitraum 2001 bis 2021) und die meisten akademischen Forschungsgruppen (64).[12] Die nationale Förderung verteilt sich auf verschiedenste nationale Agenturen und Organisationen (u. a. NIST, NASA, DARPA) mit unterschiedlichen thematischen wie auch strategischen Schwerpunkten. Die staatliche Gesamtförderung belief sich im Jahr 2022 auf circa. 0,9 Mrd. US-Dollar.[13]

China hat mit insgesamt 15 Mrd. US-Dollar im internationalen Vergleich mit Abstand die höchste staatliche Förderung verkündet. Konkrete Strukturen und Strategien sind weniger transparent, auf wissenschaftlicher und technologischer Ebene wurden aber bereits wichtige Arbeiten publiziert. So wurde mithilfe des Forschungssatelliten Micius schon 2018 ein interkontinentaler Schlüsselaustausch mit quantenkryptografischen Verfahren demonstriert.[14] Auch bezogen auf das Quantencomputing mehren sich Entwicklungen, die auf einen hohen technologischen Stand schließen lassen.

In der Europäischen Union sind aktuell erhebliche Fördermittel der öffentlichen Hand für die Quantentechnologien angekündigt (7,2 Mrd. US-Dollar EU gegenüber 1,9 Mrd. US-Dollar USA). In Deutschland stehen hiervon allein im Rahmen des Zukunftspakets der Bundesregierung 2 Mrd. Euro für Forschung und Entwicklung in den Quantentechnologien zur Verfügung. Dagegen steht jedoch erheblich weniger Wagniskapital zur Verfügung, insbesondere im Vergleich zu den USA (0,3 Mrd. gegenüber 2,2 Mrd. US-Dollar). Bezogen auf die wissenschaftlichen Veröffentlichungen ist die Europäische Union führend, sowohl in der akademischen Qualität als auch in der Breite. Auch die Anzahl der Start-ups hat sich seit 2015 mehr als verdreifacht,[15, 16] liegt jedoch weit unterhalb der Zahlen der USA.

Für Deutschland gilt es, wirtschaftlich und gesellschaftlich von der Entwicklung der Quantentechnologien zu profitieren und einen souveränen Zugang zu dieser Zukunftstechnologie zu etablieren. Die Ausgangslage wird dabei wie folgt eingeschätzt:

12 McKinsey & Company: Quantum Technology Monitor (abgerufen am 22.11.2022)
13 Gross, N.: Where Is Quantum Technology Going in the Federal Government? Auf: fedtechmagazine.com (2022)
14 Liao, S.-K. et al.: Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network. In: Physical Review Letters 120 (2018)
15 McKinsey & Company: Quantum Technology Monitor (abgerufen am 22.11.2022)
16 Ohne Enabling Technologies

Stärken	Schwächen
• ausgeprägter industrieller Sektor mit vielen potenziellen Nutzern der Technologie • Einbettung in den europäischen Binnenmarkt • hohe öffentliche Investitionen in die Entwicklung der Quantentechnologien • starke Grundlagenforschung • gute Kollaborationskultur zwischen Wissenschaft und Wirtschaft im Rahmen von Verbundforschung • laufende Forschungsarbeiten zu nahezu allen relevanten Technologieplattformen • etablierte Quantenmetrologie • duales Bildungswesen und starke universitäre Ausbildung	• nur wenige Arbeiten im Bereich Quanteninformationstheorie (mangelnde Forschungsaktivität) • potenzielle Anwender noch zurückhaltend beim Einsatz von Quantentechnologien • Stand der angewandten Rechnertechnik insbesondere im Bereich Quantencomputing hinter dem nordamerikanischen Unternehmen • im internationalen Vergleich weniger Wagniskapital sowie höhere administrative Hürden für Gründungen und deren Förderung • ausbaufähige Förderung von Talenten

Chancen	Risiken
• Deutschlands produzierendes Gewerbe könnte von der Nutzung der Technologie überproportional profitieren • gute Co-Design-Möglichkeiten von Anbietern und Anwendern der Technologie • neue Märkte für deutschen Mittelstand als Hersteller spezieller Komponenten • großes wirtschaftliches Potenzial der Domänen Kommunikation, Sensorik und Computing durch neuartige Anwendungen • technologische Souveränität in Europa durch breite Abdeckung der Technologie grundsätzlich erreichbar	• Fachkräftemangel und Abwanderung von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, insbesondere von Top-Expertinnen und -Experten • mögliche Entwicklung einer kritischen Abhängigkeit von außereuropäischer Hard- und Software • Gefahren für Deutschlands hoheitliche und kritische Infrastrukturen sowie technologisch führende Unternehmen aufgrund der Nutzung von Quantencomputern durch andere Staaten • Mangel an Qualität und Vertrauen in die Technologie bei fehlender Vergleichbarkeit und unabhängiger Qualifizierung von Quantentechnologie-Komponenten • Standards werden außerhalb Europas gesetzt und sind inkompatibel mit deutschen Produkten

Diese grobe Analyse zeigt das große Potenzial, das sich für Deutschland aufgrund seiner starken Basis in den Quantentechnologien bietet. Sie bildet die Grundlage der im Folgenden ausgeführten Maßnahmen der Bundesregierung, um Deutschland in den Quantentechnologien in eine internationale Spitzenposition zu bringen und diese zu sichern.

Überblick Technologiestränge

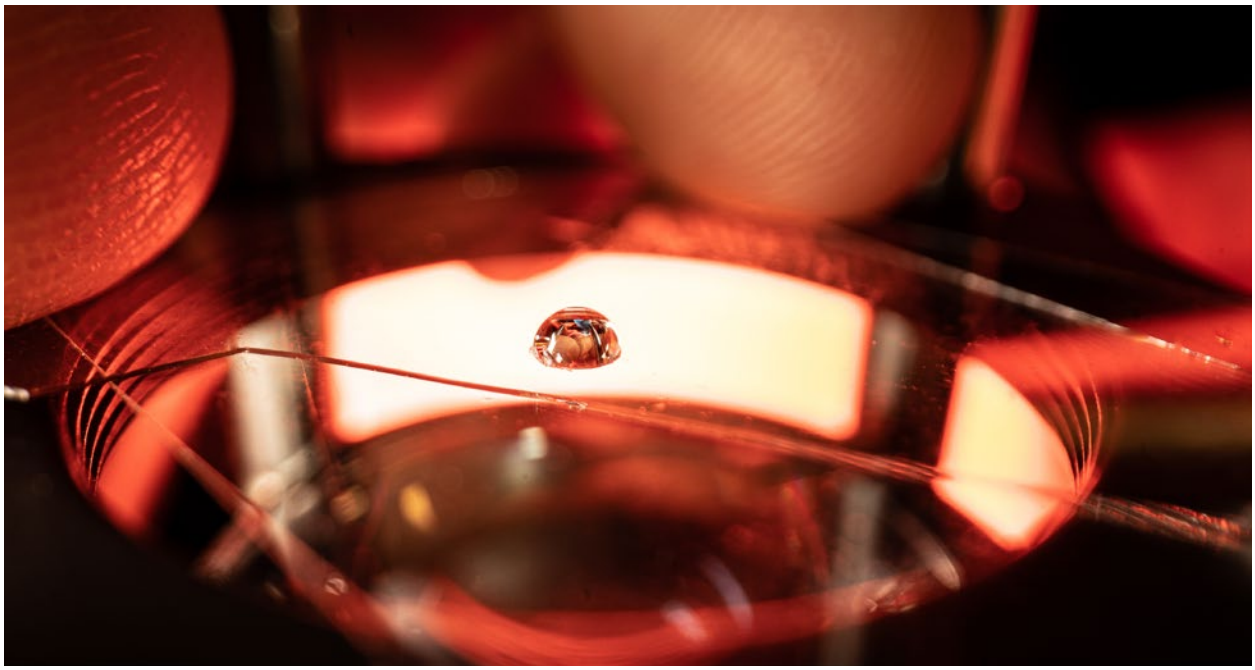
Quantencomputing und Quantensimulation

Während herkömmliche Computer mit Bits arbeiten, die die Werte „0“ oder „1“ annehmen, werden in einem Quantencomputer Quantenbits (Qubits) verwendet. Es handelt sich dabei um quantenmechanische Systeme, die sich in zwei Zuständen „0“ und „1“ oder aufgrund des quantenphysikalischen Effekts der Superposition in einer Überlagerung davon befinden. Somit können Qubits eine beliebige Kombination aus den beiden Zuständen annehmen. Zudem können zwei oder mehrere Qubits miteinander „verschränkt“ werden, sodass sie einen besonderen gemeinsamen Gesamtzustand einnehmen. Eine Veränderung an einem Qubit hat dann sofortige Auswirkungen auf die mit ihm verschränkten beziehungsweise wechselwirkenden Qubits, auch wenn sie räumlich weit voneinander getrennt sind. Dies ist ein fundamental anderes Rechenprinzip als bei klassischen Computern. Aufgrund der mit diesem Ansatz verbundenen enormen Skalierung mit der Qubitzahl wird bereits bei Quantenrechnern mit wenigen Qubits enormes Potenzial für bestimmte Rechenoperationen erwartet.

Ein Quantenrechner definiert sich nicht nur über die bloße Anzahl der nutzbaren Quantenbits (Maß für die Problemgröße), sondern auch über die Fehlerraten einer Operation (sie hilft, die Güte des Ergebnisses abzuschätzen) und die sogenannte Tiefe der implementierbaren Schaltkreise (d. h. der Rechenabläufe der Quantenoperationen auf den Qubits). Schaltkreise mit vielen Operationen hintereinander („große Tiefe“) ermöglichen komplexere Berechnungen. Die Tiefe des Schaltkreises hängt unter anderem davon ab, wie lange gewisse physikalische Zustände aufrechterhalten werden können (sog. Dekohärenzzeit).

Quantencomputer sind inhärent parallel und für riesige Aufgabengrößen geeignet, während klassische Rechner Parallelität erst durch viele parallel arbeitende Funktionseinheiten ermöglichen und bei der Größe der bearbeitbaren Probleme durch ihren Speicher limitiert sind. Durch die Nutzung der quantenmechanischen Prinzipien der Verschränkung und Superposition können Quantenrechner bestimmte Aufgabenstellungen bewältigen, die klassische Computer an ihre Grenzen führen. Bei diesen Aufgaben kann deshalb ein Quantenvorteil erreicht werden, beispielsweise im Sinne einer massiv verkürzten Rechenzeit, die in vielen Fällen eine Lösung überhaupt erst möglich macht. Quantenrechner sind grundsätzlich, aber auch langfristig als Spezialhardware für gewisse Bereiche zu sehen und nicht als Ersatz von bisherigen mikroelektronischen Computern für breite Anwenderkreise.

Die Entwicklung eines praxisrelevanten Quantencomputers erfordert die Erzeugung und Kontrolle zahlreicher Qubits. Diese dürfen ihre Quanteneigenschaften möglichst lange nicht durch die Wechselwirkung mit der Umgebung verlieren (sog. Dekohärenz), müssen sich jedoch zugleich kontrolliert präparieren, verschränken und auslesen lassen. Hierzu werden unterschiedlichste physische Realisierungen von Architekturen für Qubits entwickelt, von Ionenfallen über Elektronen in Halbleiterstrukturen, supraleitende Systeme bis hin zu Kernspins oder Photonen und topologischen Zuständen. Alle technischen Realisierungen haben ihre Vor- und Nachteile und es ist nicht prognostizierbar, welcher der technologischen Ansätze sich durchsetzen wird. Für einen universell programmierbaren Computer sind noch aufwendige Weiterentwicklungen von Hardware und Algorithmen notwendig. Da viele Quantenalgorithmen sehr sensitiv auf Störungen reagieren, ist hierbei auch die Fähigkeit zur Fehlerkorrektur



ein entscheidender Faktor. Neben robusten Qubits werden auch spezielle Algorithmen entwickelt, die die Effizienz der Hardware verbessern. Im Gegensatz zu einem universellen Quantencomputer stellen Quantensimulatoren ein für eine spezifische Fragestellung entwickeltes kontrollierbares System dar. Es wird dazu genutzt, ein anderes Quantensystem nachzuahmen und damit spezifische Prozesse zu simulieren. Quantensimulatoren sind damit in der Lage, praxisrelevante Eigenschaften, beispielsweise in der Materialforschung, zu modellieren.

Quantenkommunikation

In der Quantenkommunikation sind Quantenzustände Grundlage für die sichere Übertragung von Informationen. Quantenzustände werden hierbei für die Schlüsselverteilung in der Quantenkryptografie verwendet. Nach dem sogenannten No-Cloning-Theorem ist es unmöglich, unbekannte Quantenzustände zu kopieren oder störungsfrei zu messen. Aus diesem Grund kann bei einzelnen und bei verschränkten Quanten festgestellt werden, ob die mit ihnen transportierte Information bereits ausgelesen wurde. Somit ist es möglich, einen möglichen Lauschangriff auf die sicher geglaubte Kommunikation festzustellen. Im Vergleich zu bisherigen Verschlüsselungskonzepten beruht die Abhörsicherheit der Datenübertragung nicht auf Komplexitätsannahmen gewisser mathematischer Probleme, sondern auf quantenmechanischen Prinzipien. Da Quantenzustände sehr fragil sind, gehen mit ihrer Übertragung beträchtliche technische Herausforderungen einher. Zum Beispiel sind Quantensignale über weite Entfernungen aufrechtzuerhalten und Störungen zu vermindern.

Um die Vorteile der Quantenkommunikation nutzen zu können, ist diese in bestehenden IT- und Kommunikationsinfrastrukturen qualitativ und quantitativ zu erproben und schrittweise zu integrieren. Zur Erhaltung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit der Kommunikationsinfrastrukturen müssen zudem die Quantensysteme einen Reifegrad erreichen, welcher dem der klassischen IT entspricht. Mögliche Angriffspunkte sind beispielsweise die Schnittstellen zwischen Quanten- und klassischer IT.

Zur künftigen interoperablen Anwendung sowie für ein einheitliches Verständnis der Sicherheit von Quantenkommunikation bedarf es zudem der Standardisierung von grundlegenden Bausteinen wie den verwendeten Protokollen, dem Schlüsselmanagement, der Einbindung von Quantenrepeatern als Knotenpunkten zur Verlängerung der Kommunikationsdistanzen und weiterer Netzwerkelemente.

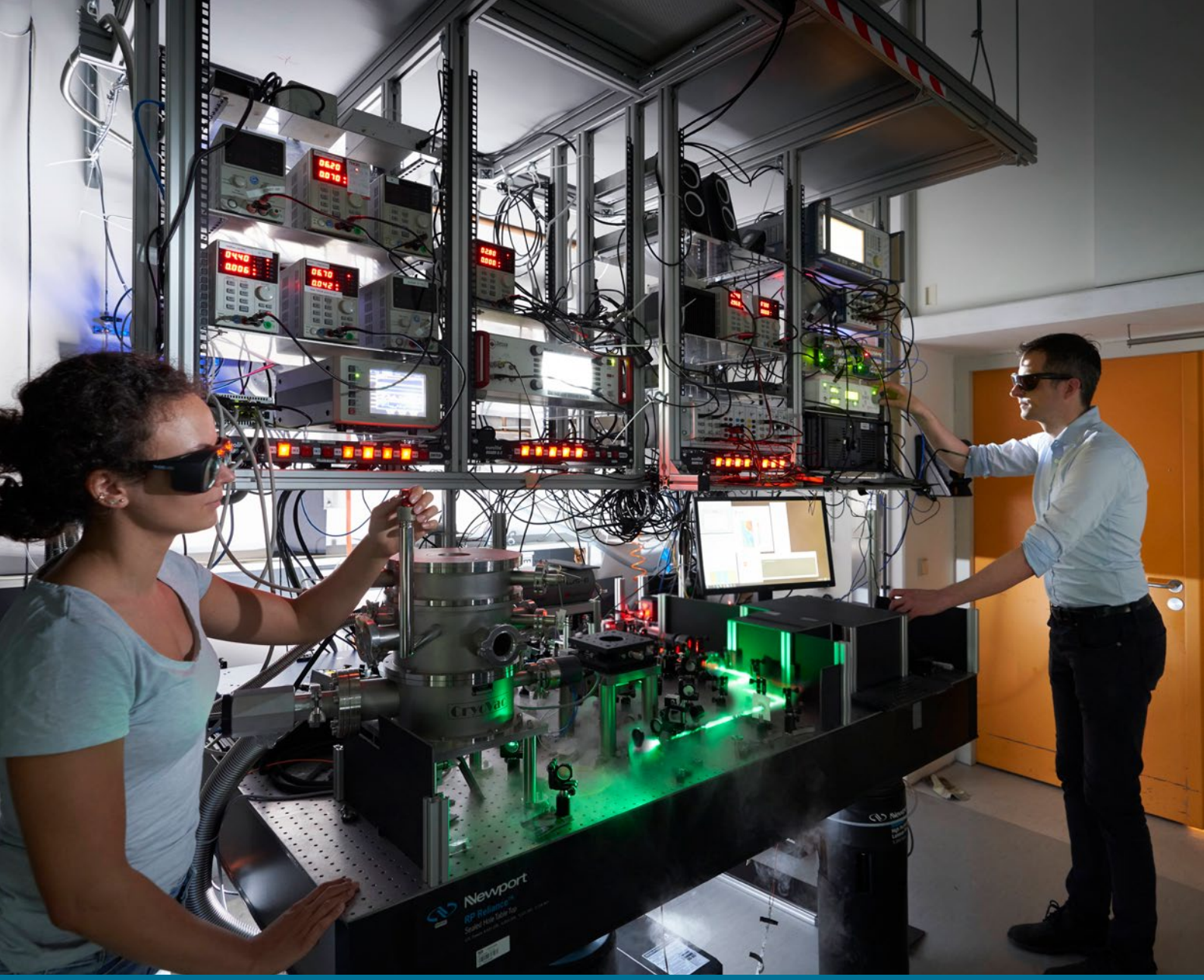
Quantensensorik und Quantenmetrologie

Quantenzustände sind sehr empfindlich gegenüber Einflüssen aus ihrer Umgebung. Im Quantencomputing und in der Quantenkommunikation bedeutet das, dass Qubits sich nur sehr schwer lange genug kontrollieren lassen. Doch was dort eine Herausforderung bedeutet, kann anderswo ein großer Vorteil sein. Denn genau diese Sensitivität auf externe Einflüsse kann andererseits zur höchstpräzisen Messung der zugrunde liegenden physikalischen Größen genutzt werden – beispielsweise von elektrischen und magnetischen Feldern, von Gravitation oder Temperatur.

Eine Grundidee der Quantensensorik besteht darin, zwei Zustände in einem Quantensystem zu verwenden, deren spektroskopisch messbarer Energieunterschied von der Größe des äußeren Einflusses abhängt. Andere Messprinzipien machen sich die Welleneigenschaften von Materie zunutze. In der Quantenoptik erlaubt die Verschränkung von Photonen äußerst präzise Messungen und ermöglicht die Bildgebung in bislang unzugänglichen Spektralbereichen. Durch quantenbasierte Messtechnik kann eine neuartige Präzision erreicht werden, die mit klassischer Messtechnik unerreicht bleibt. Eine Herausforderung ist, alle Umwelteinflüsse abzuschirmen, die die Messung verfälschen könnten.

Eng damit verknüpft ist die Quantenmetrologie: Sie nutzt Quanten für die Festlegung von Maßeinheiten und für andere hochpräzise Forschungsarbeiten. Die Quantenmechanik setzt die ultimative Grenze für die Genauigkeit jeder Messung. Die Quantenmetrologie nutzt daher Quanteneffekte, um die Präzision über die mit klassischen Ansätzen mögliche Genauigkeit hinaus zu erhöhen beziehungsweise Messungen überhaupt erst zu ermöglichen.

Weiter bietet die Quantenmetrologie, auch durch die Neudefinition der SI-Einheiten, die Möglichkeit für driftfreie, selbstreferenzierte und auf das SI rückgeführte Quantensensoren. Diese können deutliche Vorteile gegenüber klassischen Lösungen bieten, beispielsweise als (Druck-)Sensoren in der Prozessautomation, oder quantenelektronische Bauteile, die direkt die neu definierten SI-Einheiten und abgeleitete Größen wie das Volt und das Ampere realisieren.



3. Technologie auf Spitzenniveau für Gestaltungskraft und technologische Souveränität

Quantentechnologien sind eine zukünftige Schlüsseltechnologie, bei der Deutschland auf einer starken Basis aufbaut. Ziel der Bundesregierung ist es, die sich bietenden Chancen zu nutzen und Deutschland und Europa auf diesem Gebiet an der Weltspitze zu etablieren. Durch zielgerichtete Maßnahmen werden Quantentechnologien für Gesellschaft und Wirtschaft nutzbar gemacht und die technologische Souveränität in diesem Feld gesichert. Hierbei orientiert sich die Bundesregierung an einem langfristigen Zielbild, in dem im Jahr 2036 ein fortgeschrittener Technologiestand mit vielfältigen Anwendungen etabliert ist.

Vision 2036

Für die Entwicklung der Quantentechnologien aus einer Zukunfts- in eine zentrale Schlüsseltechnologie ist ein Zeithorizont erforderlich, der den zeitlichen Rahmen dieses Handlungskonzepts deutlich übersteigt. Die Bundesregierung setzt daher auf eine auch von der Expertenkommission Forschung und Innovation geforderte[17, 18] Weiterentwicklung der Maßnahmen und eine langfristige, nachhaltige Förderung und Entwicklung der Technologie. Im Fall des Quantencomputings ist ein technologieneutrales Vorgehen besonders wichtig, solange sich nicht stärker abzeichnet, welche Realisierung von Qubits für die Weiterentwicklung von Quantencomputern am vorteilhaftesten ist. Denkbar ist außerdem, dass sich unterschiedliche Hardwareplattformen für unterschiedliche Anwendungen besonders eignen werden.

Langfristig sollen Quantentechnologien als Schlüsseltechnologie in verschiedensten Anwendungsfeldern etabliert sein. Für das Jahr 2036, zehn Jahre nach Auslaufen dieses Handlungskonzepts, ist unser Zielbild:

- Quantentechnologien sind Kernkomponenten in vielfältigen wirtschaftlichen Anwendungsbranchen. Sie leisten bedeutende Beiträge zur Wertschöpfung in Deutschland und zum Umgang mit den drängenden Zukunftsthemen unserer Gesellschaft, unter anderem:
  - Quantensensoren haben sich in einer Vielzahl von wirtschaftlichen und gesellschaftlich relevanten Anwendungen durchgesetzt. So profitiert das Bauwesen bei der Bodenerkundung von innovativen Sensortypen, in der Medizintechnik ermöglichen Quantensensoren neuartige Diagnosemöglichkeiten und in der Informations- und Kommunikationstechnik gelingt verbesserte Signalverarbeitung durch den Einsatz hochgenauer Atomuhren.
  - Komplexe Anwendungsfälle werden auf in Deutschland hergestellten universellen fehlerkorrigierten Quantencomputern gelöst. Quantencomputer und Spezialrechner, beispielsweise Quantensimulatoren oder Quantenannealer, spielen eine signifikante Rolle in mehreren Branchen, beispielsweise der chemischen und der pharmazeutischen Industrie, der Finanzbranche und dem Automobilsektor.
  - Sensible Daten in Verwaltung und Sicherheitsbehörden werden über verwaltungsinterne Netze ausgetauscht, die auf quantencomputerresistenten Kryptografieverfahren basieren. Die verwaltungsinternen Netze besitzen sichere und definierte Übergänge zu weiteren Kommunikationspartnern. Sensible Daten kritischer Infrastrukturen und der Wirtschaft werden durch quantencomputerresistente Kryptografieverfahren geschützt und in Teilbereichen zusätzlich durch Quantenkommunikation abgesichert. Standorte von wirtschaftlicher, wissenschaftlicher oder hoheitlicher Relevanz sind über ein sicheres EU-weites Quantenkommunikationsnetzwerk verbunden.
  - Die deutschen Aktivitäten im Bereich der Standardisierung und die signifikante Erhöhung der Präzision in Zeit-, Masse- und Stromnormalen durch die Quantenmetrologie bilden die Grundlage für ein internationales quantenbasiertes Standardisierungssystem.

- Quantentechnologien leisten ihren Beitrag dazu, dass die deutsche Wirtschaft auch im Jahr 2036 zu den weltweit zehn innovativsten Volkswirtschaften gehört.[19] Gemeinsam mit Partnern aus der Europäischen Union sind wir technologisch unabhängig in der Herstellung von Produkten und Anwendungen der Quantentechnologien oder stellen kritische Elemente der internationalen Wertschöpfungsketten her (technologische Souveränität).[20]

17 Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A.: Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS (2020)
18 Expertenkommission Forschung und Innovation EFI: Jahresgutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2022 (2022)
19 So liegt Deutschland 2021 mit dem Wert 86,45 auf Platz vier im Bloomberg Innovation Index hinter Südkorea (90,49), Singapur und der Schweiz. Der Rest des Spitzenfeldes der zehn innovativsten Länder mit Indexwerten über knapp 84 liegt recht nahe an Deutschland.
20 Beispielsweise werden die neuesten Generationen von Halbleitern aktuell nicht in Europa, sondern in Südostasien gefertigt. Jedoch hängt die Produktion maßgeblich von Lithografiesystemen aus der Europäischen Union ab, zu denen deutsche Zulieferer wesentliche Komponenten beitragen.

Die Maßnahmen der Bundesregierung gliedern sich in drei Handlungssträngе:

A. Quantentechnologien für Wirtschaft, Gesellschaft und staatliche Institutionen nutzbar machen

Quantentechnologien werden vielfältige neue Möglichkeiten eröffnen: von der Simulation neuer Wirkstoffe über abhörsichere Kommunikation bis hin zu neuartigen Sensoren, die Blindgänger aufspüren oder Navigation ohne Satellitenunterstützung ermöglichen. Vor diesem Hintergrund ist eine zielgerichtete Entwicklung der Technologie notwendig, die stets die möglichen Anwendungsszenarien im Blick hat.

Im Zentrum dieses Handlungskonzepts der Bundesregierung stehen deshalb Maßnahmen, die durch öffentliche Kofinanzierung private Investitionen in Deutschland anreizen, verstärken oder beschleunigen. Je nach Einsatzbereich erfolgt die Unterstützung der öffentlichen Hand in unterschiedlicher Form.

Die Bundesregierung greift dafür auf drei komplementäre und aufeinander abgestimmte Instrumente der Förderung zurück:

- Bei forschungsnahen Themen, die von erheblichem Bundesinteresse sind, wird Forschung und Entwicklung in Unternehmen, Hochschulen und Forschungseinrichtungen auf dem Wege der Projektförderung mit Zuwendungen unterstützt. Diese nicht rückzahlbaren Zuwendungen richten sich primär an anwendungsorientierte Projektkonsortien, die die Wertschöpfungskette von der Technologieentwicklung bis zum Endanwender abdecken.

- Über die gezielte Vergabe von Aufträgen für marktfähige Produkte agiert die öffentliche Hand als ein zentraler Anker- und Referenzkunde für Unternehmen, die solche Hardware in Deutschland entwickeln und herstellen. Beispielhaft hierfür steht das grundfinanzierte Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das innovative Quantencomputer für den Eigenbedarf durch Forschungsaufträge am Markt über die Vergabe von Aufträgen über rund 600 Mio. Euro aus dem Konjunkturpaket beschafft. Positive Ergebnisse der bisherigen Ausschreibungen zeigen, dass der neuartige Ansatz der Quantencomputing-Initiative des DLR sich als ein guter Förderweg eines unternehmerisch geprägten Quantencomputing-Ökosystems in Deutschland bewährt hat.

- Die Finanzierungsbedarfe junger Unternehmen, die neue Entwicklungen zur Marktreife bringen, können auch über direkte Unternehmensbeteiligungen der öffentlichen Hand gedeckt werden. Mit dem neuen Deep Tech and Climate Fonds (DTCF) als Teil des 2021 beschlossenen Zukunftsfonds erweitert die Bundesregierung die etablierten Finanzierungsinstrumente für Start-ups. Der bis zu 1 Mrd. Euro anwachsende Fonds beteiligt sich zu Pari-passu-Bedingungen mit einer längerfristigen Investitionsperspektive direkt an Deep-Tech-Unternehmen und deckt inhaltlich unter anderem auch Quantentechnologien ab. Der DTCF steht hier neben dem etablierten High-Tech Gründerfonds (HTGF) beispielhaft für direkte Unternehmensbeteiligungen der öffentlichen Hand im Bereich des Wagniskapitals.

Um auf die ambitionierten technoökonomischen Ziele des Handlungskonzepts bei Quantentechnologien zu fokussieren und dem haushaltsrechtlichen Vorrang von privaten Mitteln vor öffentlicher Förderung gerecht zu werden, berücksichtigen die Fördermaßnahmen in ihren Rahmenbedingungen sukzessive auch die steigenden Technologiereifegrade.

Ziel des Handlungskonzepts ist es, eine enge Vernetzung der Akteure zu schaffen, die durch gemeinsame Forschung und Entwicklung erste Produkte zeitnah auf dem Markt etablieren. Deutschland kann hierbei

insbesondere von einer großen Zahl potenzieller Anwender aus vielen unterschiedlichen Branchen profitieren.[21] Die rasche und ineinandergreifende Entwicklung erster Pilotanwendungen sowie von Testbeds[22] und Standards wird es erlauben, die Technologie unter realen Nutzungsbedingungen zu testen.

Großes Potenzial sieht die Bundesregierung insbesondere in folgenden Bereichen:

Wirtschaftliche Innovationskraft

Die Entwicklung in den Quantentechnologien ist mittlerweile so weit fortgeschritten, dass diese in den kommenden Jahren in immer mehr Bereiche des Wirtschaftslebens Einzug halten werden. Perspektivisch ist mit der erfolgreichen Anwendung der Quantentechnologien ein enormes Marktpotenzial für deutsche Unternehmen verbunden, die damit innovative Produkte und Dienstleistungen anbieten können. Neben Entwicklung und Vertrieb der Technologie eröffnen sich branchenübergreifend von der Produktentwicklung bis zu Serviceangeboten vielfältige weitere neue Anwendungsmöglichkeiten.

Im Bereich der **Quantensensorik und -kommunikation,** wo bereits erste Produkte auf dem Markt sind, kann die Wirtschaft sowohl im Vertrieb als auch in der Nutzung neuer Technologien profitieren.

Hierfür wird die Bundesregierung im Rahmen dieses Handlungskonzepts die Grundlagen für Forschung und Wirtschaft schaffen, um

- mit Leuchtturmprojekten in der Quantensensorik erste Anwendungen in den Markt zu bringen, beispielsweise bei der Erkundung von Rohstoffen, der Aufklärung von Baugrund oder dem Einsatz hochgenauer inertialer Ortungs- und Navigationssysteme,

- durch gezielte Förderung eine gut vernetzte Quantenkommunikationsindustrie von der Material- und Komponenten- über die Modul- und Netzebenen bis hin zur Cybersicherheit und Software aufzubauen und erste anwendungstaugliche Quantenkommunikationskomponenten aus Deutschland in den Markt zu bringen, die Technologie so weiterzuentwickeln, dass zum Ende der Laufzeit dieses Handlungskonzepts Einsatzmöglichkeiten für Produkte in mindestens fünf verschiedenen Branchen konkret verfolgt werden,

- durch die Quantenmetrologie Voraussetzungen für die Qualitätssicherung im Bereich Quantentechnologien zu schaffen.

21 Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A.: Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS (2020)
22 Beispielsweise die europäischen Konsortien im Rahmen der *Framework Partnership Agreements* Qu-Test und Qu-Pilot

Die Anwendungsperspektive im **Quantencomputing** ist aufgrund größerer Entwicklungsbedarfe eher mittel- bis langfristiger Natur mit einem möglichen Zeithorizont von fünf bis fünfzehn Jahren (siehe auch Infokasten „Technologieleuchtturm Quantencomputing"). Studien zufolge könnte sich die Anwendung zuerst bei Optimierungsproblemen in Industrie und Logistik (z. B. über Quantenannealer), nachfolgend in der Simulation chemischer Prozesse, in KI-basierter Auswertung großer Datenmengen sowie später in der Quantenkryptografie[23] etablieren.

Expertinnen und Experten prognostizieren die eigentliche Wertschöpfung nicht in der Entwicklung der Hardware, sondern vielmehr in der Anwendung in der nächsten Digitalisierungswelle[24], die zahlreiche Branchen betreffen wird. Insbesondere in den Bereichen der chemischen und pharmazeutischen Industrie wird bereits bei einem frühen Entwicklungsstand signifikantes wirtschaftliches Potenzial gesehen.[25] So verursacht die Ammoniaksynthese für die Herstellung von Düngemitteln und Feinchemikalien rund ein bis drei Prozent des weltweiten Energieverbrauchs und einen entsprechenden prozessbedingten CO_2-Ausstoß.[26] Schon eine Optimierung von wenigen Prozentpunkten beim Wirkungsgrad über verbesserte Katalysatoren, die mithilfe von Quantensimulationen entwickelt werden, hätte global eine nennenswerte Auswirkung auf Energieeffizienz und Klimaschutz.

Die Bundesregierung wird durch die Unterstützung der zielgerichteten Entwicklung von Technologien und Anwendungsmöglichkeiten eine starke Basis für das Quantencomputing schaffen (siehe auch Infokasten „Technologieleuchtturm Quantencomputing"):

- In Deutschland und Europa soll das Quantencomputing mittels technologieoffener Entwicklung für praxistaugliche Anwendungen in Wirtschaft und Gesellschaft erschlossen werden.

- Die Bundesregierung unterstützt die Entwicklung über alle aufeinander aufbauenden Komponenten und Ebenen des Quantencomputings („full stack"), insbesondere von Algorithmen und Anwendungssoftware. Die frühzeitige Einbindung von Anwendern ist dabei von größter Bedeutung.

- Aufbauend auf diesen Aktivitäten strebt die Bundesregierung bis 2032 die Erreichung von Quantenvorteilen mit europäischen Hardwarelösungen bei konkreten Anwendungsfällen durch Unternehmen in Deutschland an.

- Es wird eine Qualitätsinfrastruktur für Quantencomputing aufgebaut, die Charakterisierung, Vergleichbarkeit durch Benchmarking, Standardisierung, Konformität und Normung vorantreibt.

Gesellschaftliche Herausforderungen

Weltweit stehen Gesellschaften vor großen Herausforderungen:

Der Klimawandel ist ein globales Phänomen. Seine Bekämpfung und der Umgang mit den Folgen erfordern gleichermaßen gemeinsames globales, europäisches, nationales, regionales sowie lokales Handeln. Ein besseres Verständnis des Erdsystems, der einzelnen Bestandteile des Klimasystems sowie der wesentlichen Einflussfaktoren auf das Klima sowie der Anpassungsnotwendigkeiten an die zu erwartenden oder bereits absehbaren Folgen des Klimawandels trägt dazu bei, adäquate und maßgeschneiderte Lösungen auf die Herausforderungen zu finden. Auch die Sicherung der Energieversorgung ist durch vielfältige internationale Verflechtungen und aufgrund der begrenzten Ressourcen eine globale Aufgabe, die neben der Bewältigung der aktuellen Energiekrise auch langfristig auf internationaler, nationaler und lokaler Ebene angegangen werden muss.

Eng verknüpft mit diesen Aspekten ist die Frage der Mobilität. Die global vernetzte Gesellschaft und Wirtschaft sind ohne Mobilität nicht denkbar. Mobilität ist Rückgrat der Versorgung mit lebensnotwendigen Gütern, Voraussetzung für Inklusion, für Zugang zur Arbeit, Ausbildung und zur Gesundheitsversorgung. Mobilität ist zugleich aber auch grundlegend für Chancengleichheit zwischen den Geschlechtern

23 Roland Berger: Quantum Computing. When will the breakthrough come? In: Roland Berger Focus (2021)
24 Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A.: Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS (2020)
25 McKinsey & Company: Quantum Technology Monitor (abgerufen am 22.11.2022)
26 Wissenschaftliche Dienste des Deutschen Bundestages: Energieverbrauch bei der Produktion von mineralischem Stickstoffdünger. Dokumentation WD 8 – 3000 – 088/18 (2018)

sowie für benachteiligte Bevölkerungsgruppen. Alle Wirtschaftssektoren sind zudem auf funktionierende Verkehre und Logistik angewiesen, da ohne diese Wirtschaften sowie Verkauf und Verteilung von Gütern unmöglich wäre. Insofern gibt es auch eine doppelseitige Abhängigkeit von Mobilität und Energieversorgung. Damit hat Mobilität einen erheblichen Einfluss auf die wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung. Die aktuellen Technologiesprünge haben einen grundlegenden Wandel des Mobilitätssektors sowie des Energiesektors eingeleitet.

Im Bereich Gesundheit stellen der demografische Wandel, die gestiegene Reisetätigkeit, Infektionskrankheiten sowie Erkrankungen, welche aus der sich verändernden Lebenswelt, dem Klimawandel sowie geänderten Ernährungs- und Lebensgewohnheiten resultieren, die medizinische Versorgung vor immer neue Herausforderungen. In diesen Themenfeldern und Sektoren können Quantentechnologien wichtige Beiträge leisten:

Klimaforschung: Mit neuartiger Quantensensorik kann die Überwachung von Klimaveränderungen mittelfristig wesentlich verbessert werden (bspw. Änderungen der Wasservorkommen durch Gravimeter zur Erdbeobachtung). Langfristig wird durch Quantencomputing zudem Potenzial für Verbesserungen in der Simulation von Klimaveränderungen gesehen.

Energieversorgung: Die zukünftige Energieversorgung wird in hohem Maße dezentral sein. Hier werden verteilte Energienetze und lokale Anbieter erneuerbarer Energie sowie private Haushalte in einem komplexen System zusammenarbeiten. Das Zusammenspiel von Angebot und Nachfrage ist ein komplexes Optimierungsproblem, für dessen Lösung sich Quantenannealer und zukünftige Quantencomputer besonders eignen könnten.

Mobilität: Durch verbesserte Sensorik eröffnen sich neue Möglichkeiten in verschiedenen Bereichen der Mobilität, beispielsweise durch verbesserte Lagestabilisierung mit Quantengyroskopen (Anwendung für autonomes Fahren im Straßenverkehr bis zur Raumfahrt). Langfristig kann Quantencomputing neue Ansätze für die Optimierung von Verkehrsströmen schaffen. Für eine hypervernetzte, smarte und autonome Mobilität, die auf Sicherheit und Stabilität in all ihren Bestandteilen und Interaktionen angewiesen ist, zudem auf einem Datenaustausch in Echtzeit in rapide steigenden Mengen basiert, werden Quantentechnologien wichtige Beiträge liefern.

Gesundheit: Durch die Entwicklung von Quantensensoren kann kurz- und mittelfristig der Zugang zu verbesserten oder neuartigen Therapie- und Diagnosemöglichkeiten in der Medizintechnik geschaffen werden. Insbesondere neue Bildgebungsverfahren werden in der Laboranalyse oder der intraoperativen Diagnostik große Bedeutung haben. Langfristig können Quantensensoren zum Beispiel für die Steuerung von Prothesen entwickelt werden. Die Entwicklung von Medikamenten oder Impfstoffen kann durch die Nutzung von Quantencomputern beschleunigt und/oder verbessert werden.

Digitalisierung und künstliche Intelligenz: Die Entwicklung von Systemantworten auf der Basis massiver Daten in Bereichen wie etwa der personalisierten Medizin, des autonomen Fahrens oder der Steuerung in der Infrastruktur von Städten benötigt schnelle Entscheidungsalgorithmen, die von Quantensimulatoren und Quantenalgorithmen immens profitieren und in ihrer Leistungsfähigkeit und Genauigkeit klassischen Verfahren überlegen sein können.

Die Bundesregierung wird die Entwicklung aller Technologiestränge vorantreiben. Insbesondere wird sie

- mit Leuchtturmprojekten in der Sensorik neue Möglichkeiten der medizinischen Diagnostik und Bildgebung schaffen,
- die Vorbereitung einer europäischen Erdbeobachtungs-Mission zur Überwachung von Klimaveränderungen auf Basis von Quantengravimetrie/-gradiometrie unterstützen und dafür die Entwicklung der nächsten Generation satellitenbasierter Schwerefeld-Quantensensoren (bis zu TRL 5) vorantreiben,
- die Entwicklung von optischen Uhren für Satellitennavigationssysteme und Quantengyroskope für die Inertialsensorik zur Anwendungsreife bringen.

Sicherheit und Souveränität

Die zu erwartenden Veränderungen durch die Quantentechnologien werden voraussichtlich tiefgreifende Folgen im Bereich der Digitalisierung und der (Informations-)Sicherheit haben. Dies betrifft beispielsweise Aspekte der Kommunikation, der Kryptografie und Elemente der Sensortechnologien. National und international bestehen damit zunehmend gesteigerte Sicherheitsanforderungen.

Deutschland muss diese Zukunftstechnologien beherrschen, um souverän agieren zu können. Vor diesem Hintergrund wird die Bundesregierung die Voraussetzungen schaffen, um durch Post-Quanten-Kryptografie und ergänzend Quantenkommunikation Datensicherheit für Wirtschaft und öffentliche Verwaltung, Sicherheitsbehörden und Bundeswehr zu gewährleisten.

Hierfür wird die Bundesregierung

- die Migration zur Post-Quanten-Kryptografie in Deutschland vorantreiben,
- die Entwicklung von quantenresistenten kryptografischen Systemen fördern und deren Qualität durch Standards sichern,
- Quantenschlüsselverteilung als die Post-Quanten-Kryptografie ergänzende Technologie sowie Quantenkommunikation fördern,
- die Nutzung von Quantentechnologien in Bundes-/Regierungsnetzen untersuchen und insbesondere die Auswirkungen für die Kommunikationssicherheit betrachten,
- mit Leuchtturmprojekten die Vernetzung von Städten und Wissenschafts- und Behördenstandorten mit Quantenkommunikationsstrecken vorantreiben,
- die Erforschung und Entwicklung von Quantenrepeatern für langreichweitige Quantenkommunikationsverbindungen (> 200 km) fördern,
- die Erforschung der Sicherheit von Quantenkommunikation in praktischen Anwendungen, die Analyse potenzieller Angriffe und effektiver Gegenmaßnahmen fördern,
- die Erforschung von Sicherheitstechnologien auf Basis von quantenmechanischen Prinzipien fördern, beispielsweise von quanteneffektbasierten Sicherheitstoken,
- durch Zusammenführung relevanter Akteure die agile Zertifizierung von Quantenkommunikations- und Quantensensoriktechnologien für den vertrauenswürdigen Einsatz in Wirtschaft und Behörden beschleunigt mitgestalten,
- erste für die Quantenkommunikation notwendige Infrastruktur zur Verfügung stellen.

B. Die Technologieentwicklung mit Blick auf künftige Anwendung zielgerichtet vorantreiben

Technologische Grenzen verschieben

Im Quantencomputing wurden in den vergangenen Jahren große Fortschritte erreicht. Dennoch sind noch viele Entwicklungsschritte nötig, bis ein universeller fehlerkorrigierter Quantencomputer die Anwendungsreife erreichen kann. Daher verfolgt die Bundesregierung dieses Ziel mit einer langfristig angelegten Entwicklungsstrategie (siehe auch Infokasten „Technologieleuchtturm Quantencomputing"). Dies schließt die Systementwicklung auf allen Ebenen („full quantum computing stack") ein. Insbesondere müssen neuartige Ansätze gefunden werden, um Quantencomputing-Chips zu universellen Recheneinheiten zu skalieren.

In der Quantensensorik und der Quantenkommunikation sind die Entwicklungen bereits weiter fortgeschritten und näher an der Anwendung. Dennoch besteht weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf in der Verbesserung der technologischen Parameter, der Messmethoden und der Ausleseprotokolle sowie in der Standardisierung und Zertifizierung. Zudem steht die Verbesserung der Robustheit, der Integrierbarkeit, der Miniaturisierung und der Anwendbarkeit der Technologien im Vordergrund.

Die Bundesregierung unterstützt deshalb begleitend zur gezielten Weiterentwicklung anwendungsfähiger Systeme auch Forschungsarbeiten an den Basistechnologien, die als Grundlage für den weiteren Fortschritt zwingend erforderlich sind. Dies beinhaltet Materialien, Komponenten und Fertigungstechnologien, aber auch grundsätzliche Module für die Präparation, Kontrolle, Manipulation und Detektion von Quantenzuständen. Beispielhafte Technologien von zentraler Bedeutung sind Strahlquellen, Detektoren, Mikrowellentechnologie, Kryotechnik oder kontrolliertes Schichtwachstum.

Die Bundesregierung wird dazu

- die starke Position Deutschlands in den Basistechnologien durch zielgerichtete Förderung sichern und ausbauen,
- marktfähige raumfahrttaugliche photonische und optoelektronische Schlüsselkomponenten für Sensorik, Navigation, Kommunikation entwickeln und in den Markt bringen, beispielsweise mikrointegrierte Laser, Quantenquellen, Detektoren, Modulatoren oder Frequenzkämme,
- die Entwicklung von Quantencomputing-Hardware technologieoffen, basierend auf verschiedenen Realisierungen von Qubits, von der Grundlagenforschung bis hin zu den Anwendungen in der Rechentechnik fördern. Dies erfolgt mit dem Ziel, bis 2026 in Deutschland einen universellen Quantenrechner auf Augenhöhe mit internationalen Entwicklungen und mindestens 100 individuell ansteuerbaren Qubits zu entwickeln, der mittelfristig auf 500 Qubits skalierbar ist. Daneben soll auch leistungsfähige Spezialhardware für geeignete Anwendungsfelder entwickelt werden.

Standards setzen

Fragen von Standardisierung und Normung werden für die künftige Entwicklung, Beherrschung und Verbreitung der Technologie eine entscheidende Rolle spielen. So können Wirtschaftsunternehmen durch Aufbau einer Qualitätsinfrastruktur für Quantentechnologien unterstützt und dadurch Quantentechnologien „made in Germany" als Qualitätsmerkmal weltweit gesetzt werden.

In internationalen Standardisierungskomitees werden Spezifikationen neuer Technologien festgelegt und damit entscheidender Einfluss auf die Ausgestaltung und letztendlich auf den Zugang zum Markt genommen. Vor diesem Hintergrund ist an der technologischen Spitze ein starkes Engagement für den Aufbau einer metrologischen Qualitätsinfrastruktur und verstärkter Weiterführung von bereits laufenden

Aktivitäten[27] in diesem Bereich erforderlich.[28, 29] In einer Roadmap der Fokusgruppe Quantentechnologie von CEN-CENELEC werden die Bedarfe der Standardisierung in diesem Bereich analysiert und ein kohärenter Rahmen vorgeschlagen, der eine effektive Standardisierung in allen Domänen (Computing, Kommunikation, Sensorik) ermöglicht und Dopplungen vermeiden hilft. Konkrete Beispiele sind Charakterisierungsparameter für Komponenten für die Quantenkommunikation oder für Ionenfallen für Quantencomputer, ebenso erste Ansätze für Quantencomputer-Benchmarking. Auf dieser Vorarbeit wurde kürzlich ein von DIN beantragtes *Joint Technical Commitee* JTC 22 bei CEN-CENELEC eingerichtet. Die verstärkten internationalen Maßnahmen im Bereich der Quantentechnologien und angrenzenden Gebiete schlagen sich bereits in ersten Standardsetzungen nieder.[30, 31]

Eine wichtige Rolle kommt in diesem Kontext auch der Entwicklung geeigneter Benchmarks und Charakterisierungen von Quantentechnologie-Komponenten zu, um insbesondere im Bereich des Quantencomputings architektur- und technologieübergreifend quantitative Vergleiche der Leistungsfähigkeit vornehmen zu können. Erste Ansätze finden aktuell beim DIN statt.[32] Eine unabhängige Qualifizierung von Komponenten ist zudem eine wichtige Voraussetzung für stabile Wertschöpfungsketten und damit für die Erschließung des wirtschaftlichen Potenzials. Darüber hinaus trägt eine solche Infrastruktur zum Aufbau von Vertrauen in die Quantentechnologien bei und beugt überzogenen Erwartungen vor.

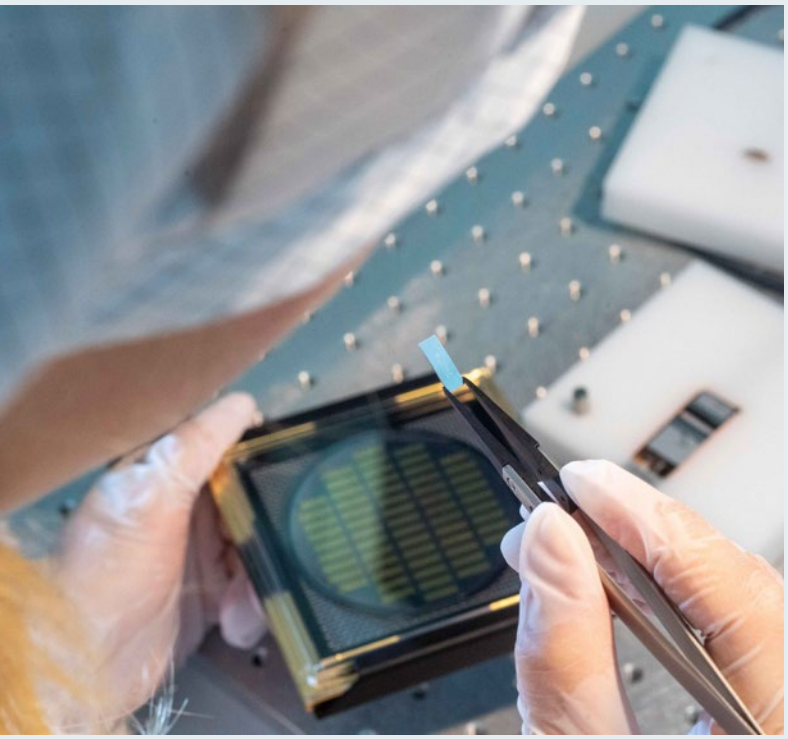
Normung und Standardisierung erfordern, dass die beteiligten Unternehmen auf Augenhöhe interagieren, sich von den Ergebnissen nennenswerte wirtschaftliche Vorteile versprechen und sich hinreichend finanz- und personalstark für eine intensive Gremienarbeit aufstellen. Von der Anzahl und dem Gewicht solcher involvierten Unternehmen hängt grundsätzlich der Einfluss eines Wirtschaftsraums in den internationalen Standardisierungsgremien ab. Die Bundesregierung wird vor diesem Hintergrund in Zusammenarbeit mit den europäischen Partnern auf ein stärkeres deutsches und europäisches Engagement in den Standardisierungsgremien hinwirken. Durch die Förderung eines unternehmerisch geprägten Ökosystems für Quantentechnologien werden letztlich Voraussetzungen für Arbeiten an Standardisierung und Normung gezielt unterstützt. Die bereits in ersten Ansätzen identifizierten Bedarfe für Standards,[33] beispielsweise für relevante Parameter von Quantentechnologie-Komponenten für „verlässliche Datenblätter", bieten die Grundlage für die auf europäischer Ebene harmonisierte und gemeinsam entwickelte Charakterisierung und Qualifizierung sowie die Nutzung von Testbeds.[34, 35]

Die Bundesregierung wird daher

- Standardisierungsaktivitäten im Bereich der Quantentechnologien unterstützen und auf ein stärkeres deutsches und europäisches Engagement in den Standardisierungsgremien hinwirken,

- eine Qualitätsinfrastruktur für Quantentechnologien aufbauen, die durch objektive, unabhängige Charakterisierung, Qualifizierung und Standardisierung von Quantentechnologie-Komponenten und vergleichende architekturunabhängige Benchmarks von Quantencomputern einen Vorteil für die entstehende Quanten-Industrie in Deutschland schafft.

27 CEN and CENELEC Joint Technical Committee 22 (CEN/CLC/JTC 22); van Deventer, O. et al.: Towards European Standards for Quantum Technologies. In: EPJ Quantum Technology 9 (2022); ETSI Industry Specification Group (ISG) on Quantum Key Distribution (QKD)
28 Expertenkommission Forschung und Innovation EFI: Jahresgutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2022 (2022)
29 Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung: Positionspapier Wer sie gestaltet, beherrscht den Markt: Normen und Standards (2021)
30 Projekt *Post-Quantum Cryptography PQC* des National Institute of Standards and Technology des U. S. Department of Commerce
31 International Organization for Standardization ISO: Information technology – Quantum computing – Terminology and vocabulary (ISO/IEC DIS 4879)
32 Deutsches Institut für Normung DIN: Benchmarken von Quantencomputern mit festgelegten KPIs (DIN SPEC 91480)
33 CEN and CENELEC Joint Technical Committee 22 (CEN/CLC/JTC 22); van Deventer, O. et al.: Towards European Standards for Quantum Technologies. In: EPJ Quantum Technology 9 (2022); ETSI Industry Specification Group (ISG) on Quantum Key Distribution (QKD)
34 Beispielsweise die europäischen Konsortien im Rahmen der *Framework Partnership Agreements* Qu-Test und Qu-Pilot
35 Degiovanni, I. P. et al.: EUROMET-EMN-Q: The European metrology network for quantum technologies. In: Measurement: Sensors 18 (2021)



Technologieleuchtturm: Quantencomputing

Im Vergleich zu den anderen Zweigen der Quantentechnologien wird vom Quantencomputing das höchste disruptive Potenzial in den Anwendungen erwartet.[36] Zugleich befindet sich die Technologie noch in einem vergleichsweise frühen Stadium. Zwar sind erste Quantencomputer bereits in der Lage, einfache Rechenoperationen durchzuführen. Diese Systeme besitzen bislang aber noch eine eingeschränkte Rechenleistung, sind fehleranfällig und nur für spezielle Aufgaben einsetzbar. Das volle Potenzial der Technologie kann erst ausgeschöpft werden, wenn ein universell programmierbarer und fehlerkorrigierter Quantenrechner zur Verfügung steht und an die Seite bestehender Rechnerarchitekturen tritt. Hierfür sind noch zahlreiche weitere Entwicklungsschritte notwendig.[37] Für die notwendigen Schritte wird von Expertinnen und Experten ein Zeitraum von mindestens zehn bis fünfzehn Jahren veranschlagt. Wirtschaftlich verwertbare Zwischenergebnisse in den Anwendungsfeldern können schon vorher, innerhalb der nächsten etwa fünf bis fünfzehn Jahre, erwartet werden.[38] Mit Blick auf die technologischen Unwägbarkeiten stellen diese Zeitskalen eine erste grobe Schätzung dar, die Prognosen aus öffentlichen Institutionen[39] und der Industrie[40, 41, 42] sowie das bisherige Entwicklungstempo berücksichtigt.

Spitzentechnologie ist heute in globalen Wertschöpfungsketten organisiert. Bei technisch anspruchsvollen und hoch investitionsintensiven Bereichen können verfügbare volkswirtschaftliche Ressourcen ein limitierender Faktor sein, der eine internationale Zusammenarbeit erforderlich macht. Zugleich haben die COVID-19-Pandemie und der russische Angriffskrieg in der Ukraine aufgezeigt, wie anfällig und verwundbar globale Lieferketten sein können und welcher Wert der technologischen Souveränität in einer unsicher gewordenen Welt zukommt. Die Bundesregierung wird die Technologieentwicklung im Quantencomputing deshalb langfristig unterstützen. Auf Basis der Roadmap eines unabhängigen Expertenrats setzt die Bundesregierung dabei im Rahmen des Konjunktur- und Zukunftspakets ein ambitioniertes Maßnahmenbündel um, das eine technologische Souveränität Deutschlands und Europas auf dem Gebiet des Quantencomputings zum Ziel hat. Das kann bedeuten, dass Deutschland gemeinsam mit Partnern aus der Europäischen Union technologisch unabhängig in der Herstellung entsprechender Hard- und Software wird. Auch eine zentrale Rolle bei kritischen Elementen internationaler Wertschöpfungsketten für das Quantencomputing kann dafür sorgen, dass Deutschland als wichtiger Partner den Zugang zu wirtschaftlich essenziellen Quantenressourcen stets aufrechterhalten kann. Hierbei ist eine Balance zwischen Wettbewerb und Kooperation zu finden.

Kurz- und mittelfristig zielen die Maßnahmen darauf ab, erste Quantenrechner in Deutschland auf dem Stand der Forschung und Technik zu entwickeln. Sie sind zu skalieren und zu verbessern, bis sie einen Quantenvorteil in praxisrelevanten Anwendungen erbringen. Hierauf aufbauend wird die Entwicklung eines universellen, fehlerkorrigierten Systems angestrebt. Die Bundesregierung setzt hierbei auf einen technologieoffenen Ansatz, da zum jetzigen Zeitpunkt

36 Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A.: Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS (2020)
37 Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik BSI: Entwicklungsstand Quantencomputer (2. Aktualisierung 2020)
38 VDI Technologiezentrum GmbH: Roadmap Quantencomputing (2021)
39 Bundestag-Drucksachen 19/25208 und 19/26340
40 IBM: The IBM Quantum Development Roadmap (2022)
41 D-Wave: Clarity. A roadmap for the future of quantum computing (2021)
42 Google Quantum AI: Unveiling our new Quantum AI campus. In: The Keyword (2021)

noch nicht absehbar ist, welche technologische Basis am besten für die verschiedenen Anwendungsgebiete geeignet ist und skaliert werden kann. In regelmäßigen Abständen wird geprüft, welche der Technologiestränge erfolgversprechend sind, und das Maßnahmenportfolio entsprechend angepasst.

Innerhalb dieses Handlungskonzepts zielt die Bundesregierung bis zum Jahr 2026 auf die Entwicklung eines Quantenrechners auf Augenhöhe mit internationalen Entwicklungen und mindestens 100 individuell ansteuerbaren Qubits, der mittelfristig skalierbar auf 500 Qubits ist. Daneben soll auch leistungsfähige Spezialhardware für geeignete Anwendungsfelder entwickelt werden.

Die Arbeiten in der Hardwareentwicklung werden flankiert von Maßnahmen zur Entwicklung von Software und Algorithmen für diese neuartigen Rechner, um Geschwindigkeits- und Qualitätsvorteile nutzen zu können. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund wichtig, dass Expertenschätzungen das maßgebliche Wertschöpfungspotenzial nicht in der Hard- und Software, sondern in der nächsten Digitalisierungswelle und damit in den Anwendungen sehen.[43] Parallel werden Quantensimulatoren weiterentwickelt, die in einigen spezifischen Gebieten ähnliche Quantenvorteile erbringen können wie Quantencomputer, beispielsweise in der Materialforschung oder bei der Verbesserung chemischer Prozesse wie der energieintensiven Herstellung von Düngemitteln.[44]

Konkret verfolgt die Bundesregierung für die Entwicklung von Quantencomputern „made in Germany“ folgende Maßnahmen:

- Entwicklung der grundlegenden Technologieplattformen für Quantencomputer im Wettbewerb: Im Rahmen von Forschungsprojekten werden die Entwicklung von Hardwarekomponenten sowie die Konzeption und Umsetzung zu Demonstrationsaufbauten auf Grundlage der verschiedenen Technologieplattformen öffentlich gefördert.
- Parallel dazu findet die Industrialisierung technisch reiferer Technologien im Rahmen von Aufträgen statt, insbesondere durch die Quantencomputing-Initiative des DLR.
- Aufbau eines Netzwerks für Quantenalgorithmen und -Software: Hier stehen branchenspezifische Anwendungen im Vordergrund, die insbesondere Optimierungsprobleme und Verfahren adressieren, die Recherchen in großen Datenpools adressieren.
- Entwicklung von Basistechnologien: Neben den grundlegenden technologischen Entwicklungen des Quantencomputings bedarf es geeigneter technischer Ausrüstung, unter anderem zur Beherrschung der empfindlichen Quantenzustände.
- Entwicklung von metrologischen Grundlagen zur Vergleichbarkeit von Quantencomputer-Hardware, wie beispielsweise die verlässliche Messung von Qubit-Eigenschaften, Kohärenzzeiten etc.
- Förderung zur Entwicklung von Fachkräften: Dabei gilt es über „Outreach“-Aktivitäten bereits in den Schulen Interesse für die Quantentechnologien zu wecken, Studierende für das Feld zu begeistern und sowohl für akademische als auch Karrierewege in der Wirtschaft Förderformate zu entwickeln. Maßgeschneiderte Programme auf postgradualer Ebene helfen, qualifizierte Spezialistinnen und Spezialisten für die Entwicklung von Quantentechnologien auszubilden.
- Unterstützung von Ausgründungen aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen: Ziel ist der Aufbau eines ganzheitlichen, international wettbewerbsfähigen, unternehmerisch geprägten Ökosystems für Quantentechnologien.

43 Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A.: Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS (2020)
44 Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A.: Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS (2020)

C. Exzellente Rahmenbedingungen für ein starkes Ökosystem schaffen

Schnittstellen schaffen: die Ökosysteme stärken

Um die neuen Technologien anwendungsreif und damit für Wirtschaft und Gesellschaft nutzbar zu machen, ist der Aufbau eines funktionalen, umfassenden Ökosystems erforderlich: von der Grundlagenforschung über die Technologieentwicklung bis zum Anwender, in der Ausbildung technischer Fachkräfte bis zu Ingenieurwissenschaften, Informatik und Physik, aber auch mit flankierenden Maßnahmen zur Vernetzung und mit dem Aufbau einer metrologischen Qualitätsinfrastruktur.

Deutschland bringt eine Reihe von starken Akteuren in allen relevanten Bereichen mit. Ziel der Bundesregierung ist es, eine enge Vernetzung in allen Teilen der Wertschöpfungskette in Form eines unternehmerisch geprägten Ökosystems zu schaffen. Damit soll die zielgerichtete und durch Synergien effiziente Entwicklung von Quantentechnologien ermöglicht werden, die langfristig wirtschaftlich selbsttragend sind.

Mit folgenden Mitteln stärkt die Bundesregierung das Quantentechnologien-Ökosystem:

- Direkte Projektförderung des Bundes richtet sich im Regelfall an Verbünde aus Wirtschaft und Wissenschaft. Es werden Projektkonsortien gefördert, die möglichst alle Teile der Wertschöpfungskette abdecken. Durch die gemeinsame Forschungs- und Entwicklungsarbeit werden enge Bande zwischen Grundlagenforschung, Entwicklung und Anwendung geknüpft und Ideen zielgerichtet verfolgt. Die Entwicklung von Charakterisierung, Qualifizierung und Standardisierung von Quantentechnologie-Komponenten der Wertschöpfungsketten wird von Beginn an mitgedacht und in die Maßnahmen einbezogen.

- Zugleich wird das unternehmerisch geprägte Ökosystem durch kollokierte Forschungsaufträge stimuliert: So werden innovative Quantencomputer für den Eigenbedarf des DLR durch Forschungsaufträge beschafft. Auch in der durch die Bundesregierung ko-finanzierten europäischen Partnerschaft EuroHPC werden Quantencomputer für Standorte des Gauss Centre for Supercomputing in Deutschland in einem demgegenüber geringeren Finanzvolumen beschafft. Mit diesem Instrument werden mittelfristig technologisch reifere Ansätze durch Unternehmen, insbesondere Start-ups, entwickelt. Für hoch innovative Firmen aus dem europäischen Wirtschaftsraum werden über die enge Kooperation mit dem DLR auch Anreize für eine Ansiedlung von Forschung, Entwicklung und Produktion in Deutschland geschaffen.

- Fokussierte Vernetzungstreffen, Seminare und Symposien flankieren die Aktivitäten in Forschung und Entwicklung innerhalb der Technologiestränge. Sie ermöglichen Austausch und Synergien über einzelne Projektkonsortien hinweg. Komplementär dazu werden übergreifende Austauschforen und Seminare angeboten, eine begleitende Analyse des Ökosystems erstellt und Querschnittsthemen in gemeinsamen Workshops diskutiert, um ein schlagkräftiges Ökosystem zu schaffen. Dies stellt zudem sicher, dass Synergien geschaffen und die eingesetzten Ressourcen effizient genutzt werden.

Gründerkultur und innovative Unternehmen stärken

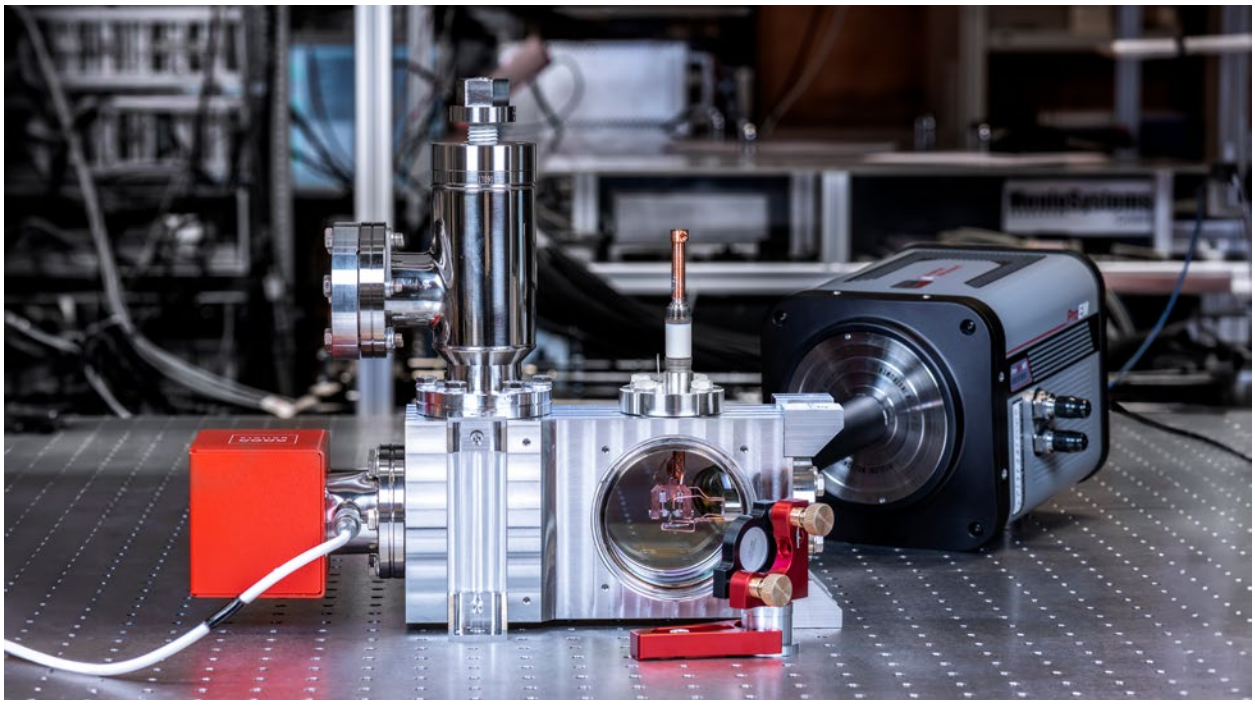
Für die Technologieentwicklung werden Start-ups sowie forschungsstarke kleine und mittlere Unternehmen eine wichtige Rolle spielen. Auch Kooperationsmodelle mit Großunternehmen sind hierbei bewährte Erfolgsfaktoren.

Die Bundesregierung unterstützt junge, innovative Unternehmen hierbei durch

- spezifische Förderung, die es Ausgründungen aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen im Bereich der Quantentechnologien erlauben, innovative Ideen in Richtung einer Anwendung und wirtschaftlichen Verwertung zu überführen,[45]

- den Ausbau des Technologietransfers in allen Facetten auf der Ebene der institutionellen und strategischen Entwicklung von öffentlich grundfinanzierten Forschungseinrichtungen, insbesondere durch Ausgründungen,

45 BMBF-Förderrichtlinie *Enabling Start-up – Unternehmensgründungen in den Quantentechnologien und der Photonik – Quantentechnologien*



- spezifische Förderung[46] und gezielte Ansprache kleiner und mittlerer Unternehmen,

- erleichterten Zugang insbesondere für junge Unternehmen, Start-ups sowie kleine und mittlere Unternehmen zu bestehender Quantentechnologie-Expertise und -Infrastruktur an Universitäten und Forschungseinrichtungen. Dies ist besonders im Deep-Tech-Feld der Quantentechnologie notwendig, um die exzellente Ausgangsposition Deutschlands in der Forschung[47, 48] effektiv in die Anwendung und den Markt zu bringen;

- Vernetzung mit öffentlichen Wagniskapitalgebern (insb. dem High-Tech Gründerfonds, DeepTech & Climate Fonds, SPRIN-D Bundesagentur für Sprunginnovationen) sowie langfristig orientierten, standorttreuen privaten Kapitalgebern.

Interesse wecken, Fachkräfte gewinnen

Die Quantentechnologien sind ein noch vergleichsweise abstraktes und erklärungsbedürftiges Thema, dessen Kommunikation eine große Herausforderung darstellt. Für eine Diskussion der Technologie und ihrer Anwendungen ist jedoch ein allgemein verständlicher Zugang erforderlich. Zudem bedarf es einer realistischen Erwartungshaltung bezüglich des Potenzials, des Entwicklungstempos wie auch der Grenzen der Technologie, insbesondere bei Entscheidungstragenden aus Wirtschaft und Politik. Allgemein verständliche Informationen und spezifisches Wissen zu Anwendungen der Quantentechnologien sind daher auch in der Allgemein- und Schulbildung notwendig.

Bereits heute zeichnen sich Engpässe bei der Gewinnung geeigneter akademischer Fachkräfte ab.[49] Adressatengerechte Vermittlungskonzepte sind daher enorm wichtig. Ziel ist, niederschwellig Interesse zu wecken, um die Fachkräfte von morgen zu begeistern, ebenso wie fachfremden Nutzenden das Potenzial aufzuzeigen. Mitarbeitende in Unternehmen müssen befähigt werden, die Technologie zu nutzen. Und es bedarf natürlich auch hoch qualifizierter Fachkräfte, insbesondere für die Weiterentwicklung der Technologie. Daher gilt es,

- Chancen und Möglichkeiten für verschiedene berufliche Entwicklungspfade aufzuzeigen,

- im Sinne einer evidenzbasierten Bildungs- und Forschungspolitik die Bedarfe von Entwicklerinnen und Entwicklern wie auch Anwenderinnen und

46 BMBF-Förderrichtlinie *KMU innovativ: Photonik und Quantentechnologien*
47 Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A.: Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS (2020)
48 McKinsey & Company: Quantum Technology Monitor (abgerufen am 22.11.2022)
49 McKinsey & Company: Quantum Technology Monitor (abgerufen am 22.11.2022)

Anwendern von Quantentechnologien in Deutschland sowie die einschlägigen Kapazitäten im Bereich der Fachkräfteausbildung zu analysieren, um den Umfang der notwendigen Maßnahmen abzuschätzen,

- Zugänge zu Quantentechnologien in Fachdisziplinen außerhalb der Physik zu erleichtern, insbesondere in nahestehenden Bereichen wie der Informatik und den Ingenieurwissenschaften,

- Aus- und Weiterbildung von Spezialistinnen und Spezialisten in den Quantentechnologien zu unterstützen. Dabei steht insbesondere die Qualifikation von praxiserfahrenen Berufstätigen im Fokus.

Die Bundesregierung hat bereits ein breites Maßnahmenbündel geschnürt. Unter der Dachmarke *Quantum Futur*[50] werden verschiedene Maßnahmen zum Aufbau einer Fachkräftebasis ergriffen: Nachwuchsforschende können ihre erste kleine Arbeitsgruppe aufbauen, Aus- und Weiterbildungskonzepte werden realisiert und auch jüngere Studierende werden im Rahmen einer Akademie sowie einer Preisverleihung für das Thema begeistert. Mit intuitiven und partizipativen „Outreach"-Konzepten für die Quantentechnologien sollen zudem breitere Bevölkerungsschichten angesprochen werden.

Im Rahmen dieses Handlungskonzepts werden diese Maßnahmen gemeinsam mit neuen Ideen zur Wissensvermittlung und zivilgesellschaftlichen Beteiligung weiterentwickelt. Die zukünftig größte Herausforderung wird es sein, die unterschiedlichen Zielgruppen anzusprechen und zu erreichen. Nur so können die Fachkräfte von morgen in ausreichender Zahl zur Verfügung stehen, die richtigen Entscheidungen im Umgang mit dem Thema getroffen und eine gesellschaftliche Akzeptanz zu dem Thema geschaffen werden.

Ein Fokus der Aktivitäten wird auf der verstärkten Förderung exzellenten Nachwuchspersonals liegen: beginnend mit der Vernetzung herausragender Studierender über die spezifische Förderung von Promotionsstudierenden bis hin zu gezielten Maßnahmen wie *Quantum Fellowships* oder akademischen Nachwuchsgruppen für ausgezeichnete Postgraduierte, die für die Technologieentwicklung besonders dringend benötigt werden. Daneben sollen insbesondere Jugendliche in den Blick genommen werden, die die nächste Generation von Fachkräften im entstehenden Quantentechnologiemarkt stellen können. Dazu sollen altersgerechte, aktivierende Formate des forschenden Lernens entwickelt werden, beispielsweise durch partizipative Aktionen in Schulen.

Zugleich soll auch die Weiterbildung von Berufserfahrenen und technischem Personal aus thematisch nahestehenden Feldern vorangetrieben werden, da in diesem Bereich besonders gute Perspektiven für eine Verbreiterung der Fachkräftebasis gesehen werden.[51]

Auswirkungen im Blick behalten: Chancen erkennen und Auswirkungen betrachten

Für den Aufbau einer Zukunftstechnologie müssen neue Entwicklungen frühzeitig erkannt und strategisch berücksichtigt werden. Die Bundesregierung baut für ihre Maßnahmen auf die Ergebnisse breit angelegter Agenda- und Strategieprozesse unter Beteiligung von Expertinnen und Experten aus

50 BMBF-Initiative *Quantum Futur*
51 McKinsey & Company: Quantum Technology Monitor (abgerufen am 22.11.2022)

Wissenschaft und Wirtschaft.[52, 53] Zudem werden die Positionierungen von Expertenkommissionen[54], Akademien[55] und Verbänden[56, 57] berücksichtigt.

Aufgrund der schnellen Entwicklung der Technologie steht die Bundesregierung zudem in ständigem Austausch mit der Fachszene, um neue Entwicklungen frühzeitig berücksichtigen zu können. Hierzu wird auf Fachgremien mit externer Expertise zurückgegriffen, teilweise in festen Beratungskreisen, teilweise in Fachgesprächen zu konkreten Themenfeldern. Im Rahmen der Begleitforschung wird zudem ein systematisches, kontinuierliches Monitoring des Ökosystems aufgesetzt.

Zugleich muss eine Beteiligung von Bürgerinnen und Bürgern zur Akzeptanz neuer Quantentechnologien die Technologieentwicklung begleiten. Eine direkte und frühzeitige Zusammenarbeit zwischen Forschenden und späteren Nutzerinnen und Nutzern im Rahmen der partizipativen Technikentwicklung fördert praxisnahe und bedarfsorientierte technische Lösungen. Quantentechnologien werden die Gesellschaft an vielen Stellen verändern: Vom direkten Kontakt mit der neuen Technologie in Medizin, Mobilität und bei der Kommunikation über Fragen der Resilienz bis hin zu Fragen der inneren und äußeren Sicherheit – Bürgerschaft und Wirtschaft, Staat und Gesellschaft werden vielfältig von den neuen Entwicklungen tangiert werden. Bislang stehen in der Diskussion die Chancen und Optionen der Technologie im Vordergrund. Risiken werden derzeit zumeist im Sinne von Entwicklungsrückständen gegenüber konkurrierenden Ländern diskutiert. Mit der fortschreitenden Reife und Anwendung der Technologien werden sich aber auch zunehmend Fragen zu gesellschaftlichen und kulturellen Einflüssen stellen, zur Technikfolgenabschätzung sowie zur Verhinderung von adversen Nebenwirkungen.

Neben gesamtgesellschaftlichen Fragen sozialer Effekte durch die Auswirkungen auf den Alltag und die Arbeitswelt stehen beispielsweise im Bereich des Innovationsmanagements die Diskussionen im Vordergrund, wie sich der Zugang zu Quantentechnologien (z. B. durch kleine und mittlere Unternehmen) auswirkt, welchen Effekt Quantentechnologien auf einzelne Industrien und Lieferketten oder auf die nationale Sicherheitsvorsorge haben und welche spezifischen Innovationen sie bewirken.

Nicht zuletzt werden Quantentechnologien erheblichen Einfluss auf die moderne Kryptografie nehmen. Sobald leistungsfähige Quantencomputer verfügbar werden, wird die Sicherheit heute standardmäßig verwendeter Kryptografieverfahren nicht mehr gewährleistet sein. Quantenkommunikation kann dieses Problem durch quantenbasierte Schlüsseleinigung lösen.[58] In Kombination mit der auf mathematischen Prinzipien beruhenden Post-Quanten-Kryptografie kann die Vertraulichkeit von sensiblen Informationen langfristig gewahrt bleiben. Die durch die Technik neu entstehenden Risiken, insbesondere für die Informationssicherheit und den Datenschutz, müssen jedoch evaluiert, mit der sich entwickelnden Technik nachgehalten und wirkungsvolle Gegenmaßnahmen konzipiert werden.

Insgesamt gilt es, frühzeitig die Folgewirkungen im Blick zu behalten, möglichen Fehlentwicklungen zeitnah entgegenzuwirken und eine offene Diskussion mit den gesellschaftlichen Akteuren zu führen.

52 VDI Technologiezentrum GmbH: Roadmap Quantencomputing (2021)
53 VDI Technologiezentrum: Agenda Quantensysteme 2030 (2021)
54 Expertenkommission Forschung und Innovation EFI: Jahresgutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2022 (2022)
55 Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A.: Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. acatech IMPULS (2020)
56 Bundesverband der Deutschen Industrie e.V. (BDI): Europa zum führenden Standort für Quantentechnologien entwickeln (2021)
57 Bitkom: Leitfaden Quantentechnologien in Unternehmen (2022)
58 Deutsche Bank Research: Wirtschaftlich-technologische Revolution durch Quantum 2.0: Neue Supertechnologien kommen in Reichweite (2021)

4. Gemeinsam handeln – souverän agieren

Gemeinsames Handeln der Bundesregierung

Die Bundesregierung koordiniert ihre Maßnahmen in den Quantentechnologien auf verschiedenen Ebenen in ressortübergreifender Weise gemeinsam. Ziel ist es, Doppelarbeiten zu vermeiden, Schnittstellen sowie Übergabepunkte zu definieren und Entwicklungsstränge über die jeweiligen Zuständigkeitsbereiche der Ressorts hinaus zusammenzuführen.

Die Aktivitäten der Ressorts werden von vornherein gemeinsam gedacht und regelmäßig auf Leitungs- und Arbeitsebene abgestimmt. Zentrales Gremium auf Arbeitsebene ist ein Ressortkreis, in dem alle thematisch involvierten Ressorts zu den aktuellen Entwicklungen und geplanten Maßnahmen themenorientiert zusammenarbeiten.

Zudem erfolgt im Rahmen der Projektförderung eine gemeinsame und frühzeitige Koordinierung der Aktivitäten, um Synergien herzustellen. Dies beinhaltet gemeinsame, ressortübergreifende Aktivitäten zur Stärkung der Ökosysteme und der Vernetzung zwischen verschiedenen geförderten Akteuren.

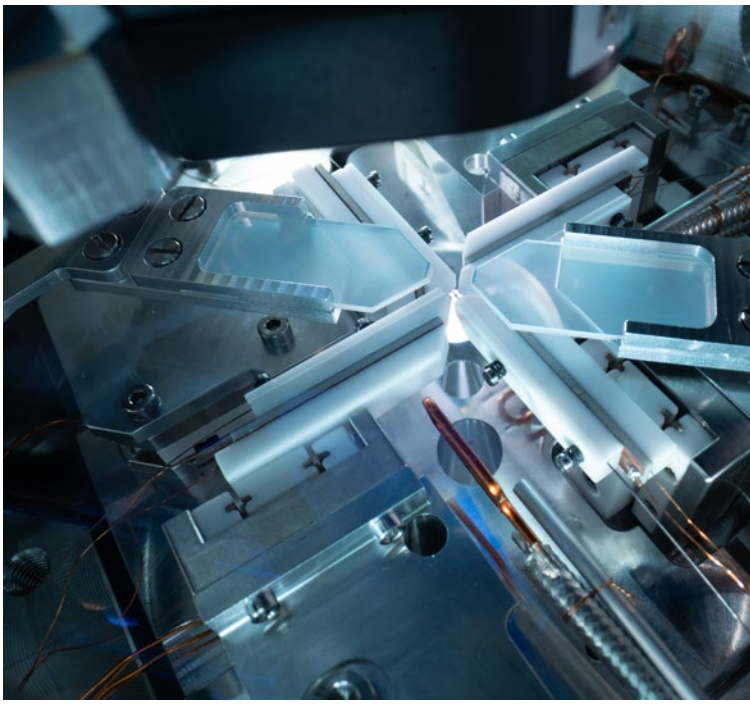
Mit zunehmendem technologischen Fortschritt und größerer Anwendungsnähe erwartet die Bundesregierung von der gewerblichen Wirtschaft schrittweise eine wachsende Verantwortung für das Ökosystem und die Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten. Die Bundesregierung wird diese Entwicklung durch flankierende Analysen begleiten und ihre Maßnahmen auf dieser Basis anpassen und weiterentwickeln.

Interdisziplinäre Schnittstellen

Das interdisziplinäre Feld der Quantentechnologien besitzt Berührungspunkte mit mehreren anderen Schlüsseltechnologien. Wichtig ist auch die Anschlussfähigkeit an bestehende Technologien, beispielsweise die Einbettung von Quantencomputing in die Infrastrukturen des „High-Performance Computings“ (HPC), die Erstellung von „Software Stacks“ oder die Einbettung von Quantenkommunikation in die moderne Informations- und Kommunikationstechnologie, insbesondere an der Schnittstelle zu künstlicher Intelligenz. Zudem erfordert die Weiterentwicklung auch technologische Fortschritte beispielsweise im Bereich der Mikroelektronik, der Photonik und der Kryotechnik. Diese Verankerung wird durch gemeinsame Projekte in den Schnittstellen und die Verortung in den relevanten Forschungsprogrammen sichergestellt. Folglich existieren Schnittmengen mit unterschiedlichen anderen Programmen der Bundesregierung oder einzelner Ressorts, beispielsweise im Bereich der Mikroelektronik, des Hoch- und Höchstleistungsrechnens, der Cyber- und der IT-Sicherheit oder der Weltraumforschung (siehe auch Anhang „Forschungsprogramme, -strategien und -maßnahmen der Ressorts mit Bezug zum Handlungskonzept“).

Vernetzung mit nationalen Akteuren

Die Maßnahmen sind eng verknüpft mit den Aktivitäten von institutionell durch die Bundesregierung geförderten Einrichtungen, die auf dem Gebiet der Quantentechnologien aktiv sind. Eine Übersicht der Maßnahmen dieser Einrichtungen ist im Anhang ausgeführt.



In Deutschland existieren starke regionale Zentren, die durch gezielte Maßnahmen der Bundesländer unterstützt werden. Eine enge Vernetzung mit den spezifischen Maßnahmen und Schwerpunktsetzungen der Bundesländer wird in regelmäßigen Abstimmungsrunden auf Arbeitsebene sichergestellt. Wichtige Impulse ergeben sich zudem aus dem engen Kontakt mit Akademien und Verbänden.

Starke internationale Partnerschaften aufbauen und technologische Souveränität sichern

Ziel der Bundesregierung ist es, durch ganzheitliche Förderung eines unternehmerisch geprägten Quantentechnologie-Ökosystems einen souveränen Zugang zu allen relevanten Bausteinen dieser Zukunftstechnologie zu sichern und deren Entwicklung und Anwendung auf Augenhöhe und im Sinne unserer Werte mitzugestalten. Dabei setzt die Bundesregierung auf einen strategischen europäischen Ansatz mit dem politischen Ziel der technologischen Souveränität.[59]

Europäische Maßnahmen, die sich dezidiert den Quantentechnologien widmen, werden auf europäischer Ebene seit 2018 hauptsächlich im *Quantum Flagship* zusammengeführt, ergänzt beispielsweise

59 Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF: Technologisch souverän die Zukunft gestalten (2021)

durch europäische Förderung von metrologischen Aspekten im Rahmen von *Euramet*.[60, 61] Nach abgeschlossener Ramp-up-Phase des Flagships sollen nun die Weichen für eine erfolgreiche Umsetzung gestellt werden. Dazu werden im Rahmen der Programme *Horizon Europe* wie auch *Digital Europe* Forschung und Entwicklung ebenso wie der Aufbau von Infrastruktur unterstützt. Eine Vernetzung der nationalen mit den europäischen Fördermaßnahmen findet auf unterschiedlichen Ebenen statt. So werden im Rahmen der *QuantERA*-Initiative transnationale Förderprojekte unterstützt. Auch bei größeren strukturellen Maßnahmen wie der paneuropäischen Beschaffung von Quantencomputern und deren Integration in eine HPC-Umgebung in EuroHPC[62] oder dem Aufbau eines europäischen Quantenkommunikationsnetzes *(EuroQCI)*[63] und dessen Weltraumkomponente SAGA finden eine enge Abstimmung mit der EU-Kommission, der ESA und anderen EU-Mitgliedstaaten sowie ein Pooling von nationalen und europäischen Mitteln statt. Weiter wurde das *Framework Partnership Agreement* für „open testing and experimentation" gestartet, das die Zusammenführung von europäischen Testbeds zu den Quantentechnologien zum Ziel hat.[64] Im Bereich der Standardisierung wird die Publikation der Roadmap zu Bedarfen der Standardisierung der europäischen CEN-CENELEC in den nächsten Monaten erwartet.[65, 66]

Insbesondere in Fragen der technologischen Souveränität gilt es, sich weiterhin eng mit den europäischen Partnern abzustimmen. Besonders im Quantencomputing und in der Quantenkommunikation soll mit den europäischen Partnern im weltweiten Wettbewerb eine Spitzenposition erreicht und Europa als Technologieanbieter positioniert werden. Dadurch soll auch verhindert werden, dass Europa in kritische Abhängigkeiten gerät.[67]

Diese europäischen Initiativen verstärkt die Bundesregierung durch gezielte bi- und multilaterale Aktivitäten mit Partnern. Voraussetzungen für diese Initiativen sind, dass sie

- eine Zusammenarbeit im Sinne unserer Werte und auf Augenhöhe erlauben,
- dem Ziel der technologischen Souveränität förderlich sind und
- einen gegenseitigen Mehrwert der Zusammenarbeit durch die komplementäre Ergänzung von Kompetenzen und Technologien erwarten lassen.

In Kombination mit den nationalen und europäischen Aktivitäten können auf diese Weise gezielte Impulse gesetzt und das Ökosystem gestärkt werden.

Neben der gezielten Stärkung von Kooperationen muss zugleich auch die Gefahr von Know-how-Abflüssen ins außereuropäische Ausland ernst genommen werden. Vor diesem Hintergrund verfolgt die Bundesregierung in ihren Maßnahmen verschiedene Ansätze, um den Abfluss von technologischem Fachwissen in dieser Zukunftstechnologie zu unterbinden, beispielsweise durch das Instrument der Rücklizenzierung für Auftragnehmer im Rahmen der Quantencomputing-Initiative des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR), durch entsprechende Regelwerke der Projektförderung sowie durch Maßnahmen im Rahmen des Außenwirtschaftsrechts.

60 Degiovanni, I. P. et al.: EURAMET-EMN-Q: The European metrology network for quantum technologies. In: Measurement: Sensors 18 (2021)
61 EURAMET – The European Association of National Metrology Institutes
62 The European High Performance Computing Joint Undertaking EuroHPC JU: New calls: The first EuroHPC quantum computers and upgrades to existing EuroHPC systems (2022)
63 European Commission: The European Quantum Communication Infrastructure Initiative EuroQCI
64 Beispielsweise die europäischen Konsortien im Rahmen der *Framework Partnership Agreements* Qu-Test und Qu-Pilot
65 Liao, S.-K. et al.: Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network. In: Physical Review Letters 120 (2018)
66 CEN and CENELEC Joint Technical Committee 22 (CEN/CLC/JTC 22); van Deventer, O. et al.: Towards European Standards for Quantum Technologies. In: EPJ Quantum Technology 9 (2022); ETSI Industry Specification Group (ISG) on Quantum Key Distribution (QKD)
67 Europäische Kommission: Europäisches Chip-Gesetz (2023)

5. Meilensteine und Mittelplanung

Der Erfolg des Handlungskonzepts wird an Meilensteinen gemessen, die als forschungspolitische Ebene der Zielerreichungskontrolle dienen. Sie werden regelmäßig überprüft und bei Bedarf der dynamischen Entwicklung des internationalen Forschungsfelds angepasst. Zum Ende der Laufzeit des Handlungskonzepts im Jahr 2026 sollen in Deutschland je nach Technologiestrang folgende Meilensteine erreicht sein:

Quantencomputing

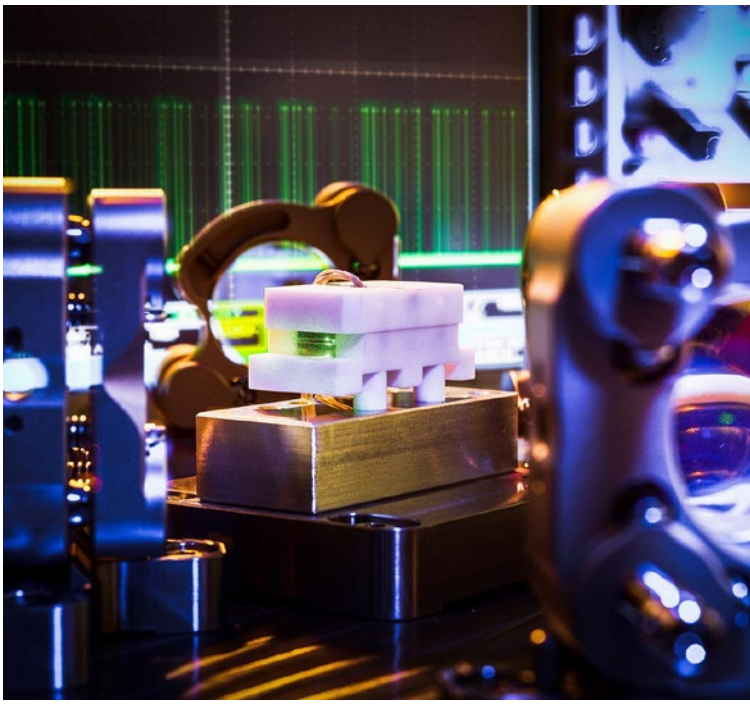
Ziel ist, dass Deutschland technologisch zu den führenden Akteuren im Quantencomputing außerhalb der EU aufschließt. Dabei geht es primär um Wettbewerbsfähigkeit im rein technischen Sinne wie die Verfügbarkeit von Quantenhardware, deren Leistungsfähigkeit sowie eine Potenzialschätzung für die Skalierung, Fehlerraten und Fehlerkorrektur. Zu den messbaren technologischen Zielen gehören im Jahr 2026:

- Verfügbarkeit eines international wettbewerbsfähigen Quantenrechners mit mindestens 100 individuell ansteuerbaren Qubits, skalierbar auf 500 Qubits

- Entwicklung leistungsfähiger Spezialhardware für geeignete Anwendungsfelder des Quantencomputings

- Darüber hinaus soll die technoökonomische Entwicklung des unternehmerischen Ökosystems für Quantencomputing in Deutschland innerhalb der EU zu den Top drei gehören und im europäischen Verbund mindestens das Niveau von wichtigen außereuropäischen Industriestaaten wie den USA oder Japan erreichen. Zugehörige quantitative Indikatoren umfassen:
  - Umsätze, Mitarbeiterzahl und Profitabilität, kumuliert über die Unternehmen des Ökosystems in Deutschland
  - Entwicklung der Patentzahl mit Bezug zu Quantencomputing durch Unternehmen des Ökosystems und durch deutsche Forschungseinrichtungen
  - Grad der Abdeckung von Quantencomputing-relevanten Technologiezweigen durch Unternehmen des Ökosystems
  - Ergänzend soll der Vernetzungsgrad der Unternehmen im Ökosystem erfasst werden: Mit wie vielen Unternehmen oder wissenschaftlichen Partnern besteht im Durchschnitt eine Kooperation oder sonstige wirtschaftliche Vernetzung wie Kapitalbeteiligungen, Ausgründungen usw.?

- Im Quantencomputing sind mindestens 60 Endanwender in Deutschland aktiv, unter anderem in Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft.



Quantensensorik

In der Quantensensorik will die Bundesregierung die vielversprechenden technologischen Entwicklungen in Wirtschaft, Gesellschaft und staatlichen Institutionen in die Anwendung bringen. Im Jahr 2026 soll in Deutschland folgender Entwicklungsstand erreicht sein:

- fünf neue Produkte in der Quantensensorik am Markt sowie

- optische Uhren, die die Anforderungen der nächsten Generation der Galileo-Uhren erfüllen

Quantenkommunikation und Post-Quanten-Kryptografie

In der Quantenkommunikation und der Post-Quanten-Kryptografie will die Bundesregierung bis 2026 folgende Meilensteine erreichen:

- Etablierung von ersten abhörsicheren, das heißt quantenverschlüsselten, Kommunikationsteststrecken zwischen ausgewählten Behördenstandorten

- Weitere Start-ups/Firmen sind im Bereich der Quantenkommunikation in Deutschland gegründet.

- Realisierung eines bundesweiten Glasfaser-Backbones für die Quantenkommunikation und die Zeit- und Frequenzverteilung

- Demonstration erster Quantenrepeater-Teststrecken
- Start erster Testsatelliten zur Quantenschlüsselverteilung
- Erstellung einer Strategie der Bundesregierung für die Migration zu Post-Quanten-Kryptografie in Deutschland
- Weiterführung der Migration zu Post-Quanten-Kryptografie für den Hochsicherheitsbereich
- Einleiten der Migration zu Post-Quanten-Kryptografie in weiteren sicherheitskritischen Bereichen
- Integration von Post-Quanten-Kryptografie-Verfahren in praxistaugliche IT-Sicherheitslösungen

Für eine spätere Überführung in Produktivsysteme sind im Anschluss weitere Schritte im Bereich der Prüfung, Zulassung und technischen Ertüchtigung der beteiligten Komponenten und Infrastrukturen erforderlich.

Charakterisierung und Standardisierung

Um Quantentechnologien „made in Germany“ als weltweites Qualitätsmerkmal zu etablieren, zielt die Bundesregierung bis 2026 auf die

- Etablierung einer Qualitätsinfrastruktur für Quantentechnologien für objektive, unabhängige Charakterisierungen, Qualifizierung und Standardisierung von Quantentechnologie-Komponenten und vergleichende Benchmarks.

Zusätzlich werden die Wirkungen der Maßnahmen der Bundesregierung durch weitere übergreifende und themenspezifische Indikatoren verfolgt, die im Rahmen von Evaluationen der diesem Handlungskonzept zugrunde liegenden Programme (siehe auch Anhang) ausgewertet werden.

Mittelplanung

Insgesamt sind während der Laufzeit des Handlungskonzepts für die Weiterentwicklung der Quantentechnologien in den beteiligten Ressorts Haushaltsmittel in Höhe von circa 2,18 Mrd. Euro in der geltenden Finanzplanung vorgesehen. Die Maßnahmen werden ergänzt durch die Aktivitäten der institutionell durch die Bundesregierung mitfinanzierten Wissenschaftsorganisationen, die in diesem Zeitraum für Forschung in den Quantentechnologien einen Mitteleinsatz von circa 850 Mio. Euro planen.

Es gilt ein genereller Finanzierungsvorbehalt. Soweit konkrete Maßnahmen oder daran anknüpfende zukünftige Maßnahmen zu Ausgaben im Bundeshaushalt führen, stehen sie unter dem Vorbehalt verfügbarer Haushaltsmittel beziehungsweise Planstellen/Stellen und präjudizieren keine laufenden oder künftigen Haushaltsverhandlungen. Die Ressorts unterstützen die Umsetzung der Strategie entsprechend ihren Zuständigkeiten und finanziellen Mitteln. Etwaiger Mehrbedarf an Sach- und Personalmitteln muss finanziell und stellenmäßig innerhalb des jeweiligen Einzelplans gegenfinanziert werden, zusätzliche Mittel stehen nicht zur Verfügung.

6. Anhang

Forschungsprogramme, -strategien und -maßnahmen der Ressorts mit Bezug zum Handlungskonzept

Zukunftsstrategie Forschung und Innovation der Bundesregierung[68]

Die Zukunftsstrategie Forschung und Innovation schafft die Grundlagen dafür, dass Deutschland und Europa eine entscheidende Rolle bei den großen forschungs- und innovationspolitischen Themen der kommenden Jahre spielen werden. Auf ihrer Basis wollen wir Impulse und Erfahrungen nutzen und aus den aktuellen Krisen als Treiber gesellschaftlicher Veränderungsprozesse lernen.

Digitalstrategie der Bundesregierung[69]

Die Digitalstrategie führt die politischen Schwerpunkte der Bundesregierung beim Querschnittsthema Digitalisierung unter einem Dach zusammen und bildet den übergeordneten Rahmen für die Digitalpolitik bis 2025. Die Strategie gibt einen Überblick über die wesentlichen digitalpolitischen Vorhaben, die jedes Ressort in eigener Verantwortung umsetzt.

68 Die Bundesregierung: Zukunftsstrategie Foschung und Innovation (2023)
69 Bundesministerium für Digitales und Verkehr BMDV: Digitalstrategie (Aktualisierung 2023)

Forschungsprogramm Quantensysteme – Spitzentechnologie entwickeln. Zukunft gestalten.[70]

Das Forschungsprogramm *Quantensysteme – Spitzentechnologie entwickeln. Zukunft gestalten.* setzt den strategischen Rahmen für die Forschungsförderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) in den Zukunftstechnologien Photonik und Quantentechnologien in den nächsten zehn Jahren. Die Förderung folgt dabei der Mission des Forschungsprogramms: Deutschland in der nächsten Dekade im europäischen Verbund im Quantencomputing und in der Quantensensorik an die Weltspitze führen und die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in den Quantensystemen ausbauen. Ziel ist zudem, die technologische Souveränität zu sichern und die Chancen der Quantensysteme für eine moderne und nachhaltige Wirtschaft und Gesellschaft zu nutzen.

Digital. Sicher. Souverän[71] – Forschungsrahmenprogramm der Bundesregierung zur IT-Sicherheit

Mit dem Forschungsrahmenprogramm *Digital. Sicher. Souverän.* stärkt die Bundesregierung die exzellente Forschung für IT-Sicherheit und Privatheit und bereitet den Weg für wirtschaftliche Prosperität und technologische Souveränität in Deutschland und Europa. Forschungsförderung zur Quantenkommunikation ist ein wichtiger Bestandteil des Rahmenprogramms. Die Ziele hinsichtlich der Quantenkommunikation sind vor allem die Verbesserung der Leistungsfähigkeit und Robustheit von Quantenkommunikationskomponenten und anderer quantenmechanisch basierter Sicherheitskonzepte, die Entwicklung hybrider Quantenkommunikationssysteme auf Basis verschiedener Übertragungs- und Speichertechnologien und die Weiterentwicklung von sicheren und effizienten Konzepten für Quantennetzwerke und deren Einbindung in die bestehenden klassischen Kommunikations- und IT-Infrastrukturen. Um den Herausforderungen einer Entschlüsselung durch Quantencomputer zu begegnen, soll parallel erforscht werden, wie eine Migration zur Post-Quanten-Kryptografie erfolgen kann. Zudem sollen mögliche Angriffsstrategien auf Quanteninformationssysteme analysiert und wirksame Gegenmaßnahmen entwickelt werden.

Hoch- und Höchstleistungsrechnen für das digitale Zeitalter. Forschung und Investitionen zum High-Performance Computing.

Mit dem Programm fördert das BMBF den Ausbau der Recheninfrastruktur in den Exascale-Bereich und Innovationen im High-Performance Computing, treibt Anwendungen in der Wirtschaft voran und stärkt das Hochleistungsrechnen an Hochschulen. Dies wird flankiert durch Forschungsansätze zur Entwicklung effizienter und leistungsfähiger Hard- und Software für künftige Rechnersysteme und Anwendungen. Um neue Rechentechnologien wie das Quantencomputing schneller in die Anwendung zu bringen, sollen diese in das bestehende Ökosystem des High-Performance Computings eingebunden werden. Weiterhin liefern Zentren für das Supercomputing, beispielsweise die Standorte des Gauss Centre for Supercomputing, gute Voraussetzungen für die Integration von Quantencomputern.

Mikroelektronik. Vertrauenswürdig und nachhaltig. Für Deutschland und Europa. – Rahmenprogramm der Bundesregierung für Forschung und Innovation 2021–2024[72]

Eine wichtige technologische und strukturelle Schnittstelle besteht insbesondere im Bereich der Mikroelektronik, deren Förderung im Rahmenprogramm *Mikroelektronik. Vertrauenswürdig und nachhaltig. Für Deutschland und Europa.* verankert ist. So ist die dort adressierte klassische Elektronik eine wichtige Enabling-Technologie insbesondere für die Ansteuerung von Quantencomputer-Chips. Auch prozesstechnisch gibt es eine Überlappung bei der Herstellung von halbleiterbasierten Quantenchips.

Cybersicherheitsstrategie für Deutschland 2021[73]

Die im Jahr 2021 veröffentlichte Cybersicherheitsstrategie bildet den strategischen Rahmen für das Handeln der Bundesregierung im Bereich der Cybersicherheit für die nächsten fünf Jahre. Sie beschreibt die grundsätzliche, langfristige Ausrichtung der Cybersicherheitspolitik der Bundesregierung in Form von Leitlinien, Handlungsfeldern sowie strategischen Zielen. Sie hat einen aktiven gestaltenden Charakter und soll ein zielgerichtetes und abgestimmtes Zusam-

70 Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF: Forschungsprogramm Quantensysteme (2022)
71 Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF: Digital. Sicher. Souverän. Forschungsrahmenprogramm der Bundesregierung zur IT-Sicherheit (2021)
72 Bundesministerium für Bildung und Forschung BMBF: Mikroelektronik. Vertrauenswürdig und nachhaltig. Für Deutschland und Europa. Rahmenprogramm der Bundesregierung für Forschung und Innovation 2021–2024 (2020)
73 Bundesministerium des Innern und für Heimat BMI: Cybersicherheitsagenda für Deutschland: Infrastrukturen schützen, Cyberkriminalität bekämpfen (2022)

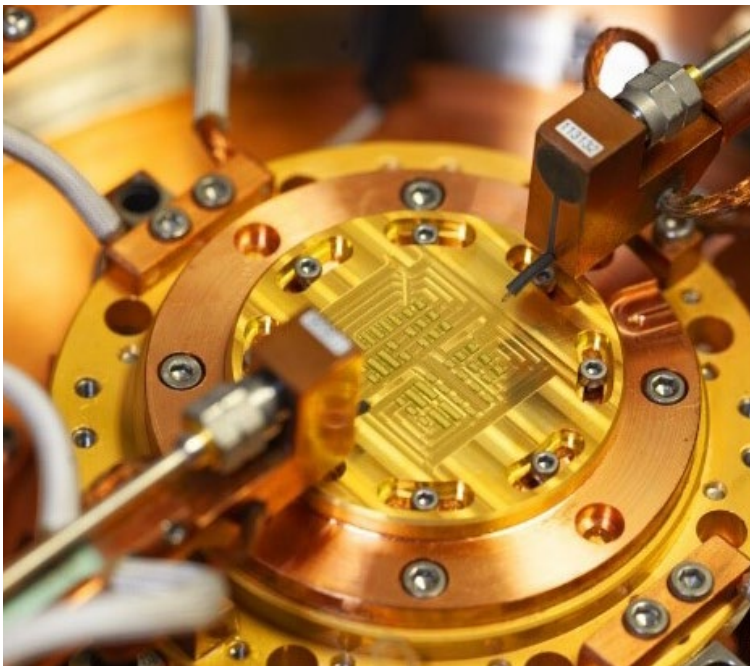
menwirken aller Akteure ermöglichen und fördern. Die Cybersicherheitsstrategie für Deutschland und die Cybersicherheitsstrategien der Länder ergänzen sich dabei gegenseitig und intensivieren damit die föderale Zusammenarbeit. Eingebettet in die Europäische Cybersicherheitsstrategie trägt die Cybersicherheitsstrategie für Deutschland zudem auch zur Gestaltung der digitalen Zukunft Europas bei.

Nationales Programm für Weltraum und Innovation – das Weltraumprogramm der Bundesregierung

Das Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) fördert über die Raumfahrtagentur im Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) auf Basis des *Nationalen Programms für Weltraum und Innovation* die deutsche Raumfahrtforschung in Forschungs- und Entwicklungsvorhaben deutscher Unternehmen, Forschungseinrichtungen und Hochschulen. In den vergangenen zwei Jahrzehnten wurde in Grundlagenforschungsprojekten eine hohe Technologie-Entwicklungskompetenz für Raumfahrt-Quantentechnologie aufgebaut. Die Ergebnisse und Kompetenzen werden nun unter Ausbau der deutschen Führungsrolle in Anwendungen überführt und die Potenziale der Quantentechnologie für die Satellitennavigation (optische Uhren und Inertialnavigation), Satellitenkommunikation (Quantenschlüsselverteilung), Erdbeobachtung (Gravimetrie/Gradiometrie) sowie Automatisierungstechnologie und Robotik (Quantencomputing zur Erhöhung der Autonomie zukünftiger Raumfahrtsysteme) erschlossen.

Technologieprogramm *Quanten-Computing – Anwendungen für die Wirtschaft* und Großprojekt *PlanQK – Plattform und Ökosystem für quantengestützte Künstliche Intelligenz*

Mit diesem Technologieprogramm unterstützt das BMWK Forschungs-, Entwicklungs- und Innovationsvorhaben, welche die technische Machbarkeit und wirtschaftliche Tragfähigkeit des Quantencomputings am Beispiel von relevanten, praktischen Anwendungsfällen insbesondere des Mittelstands nachweisen und demonstrieren. Die adressierten Quantencomputing-Anwendungen beinhalten unter anderem die Materialsimulation für die Wasserstoffforschung, maschinelles Lernen für die Bewertung von Gebrauchtfahrzeugen bis hin zur Optimierung von Prozessen in Produktion und Logistik. Außerdem werden innerhalb der Fördermaßnahmen

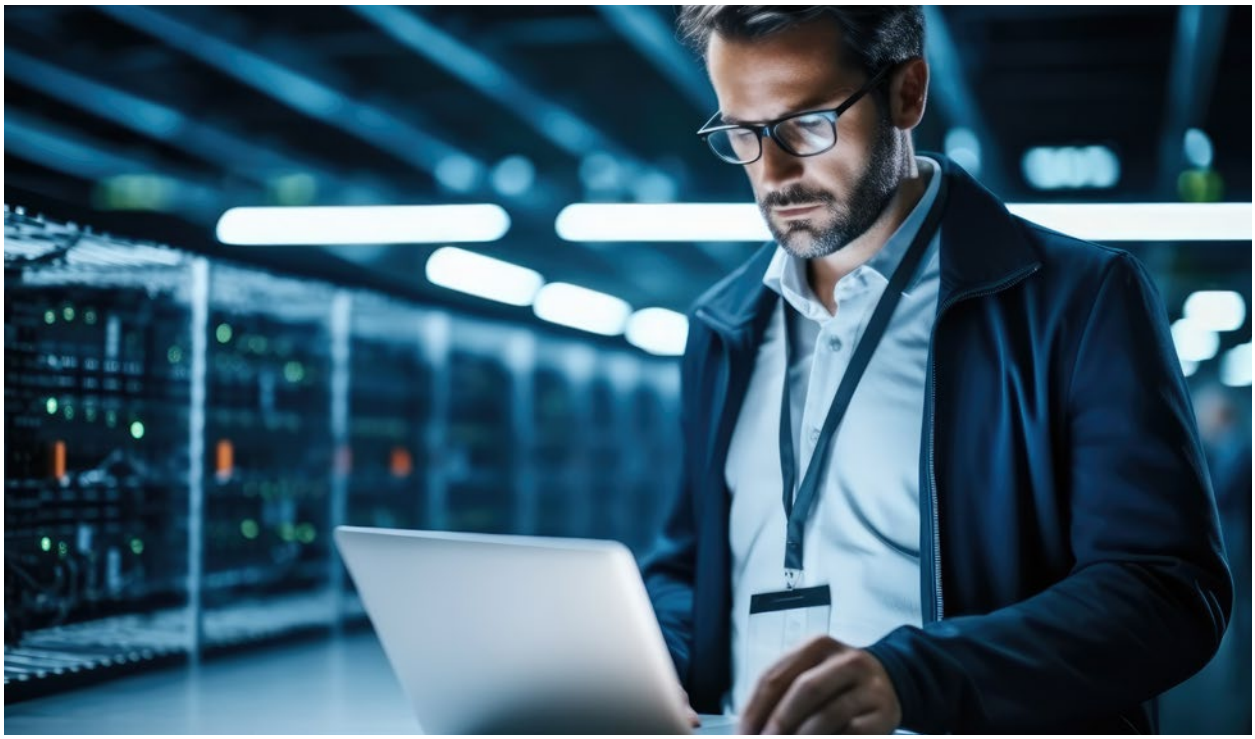


Grundlagen für in Deutschland und Europa betriebene DSGVO-konforme Cloud-Lösungen für Quantencomputing erarbeitet. Darüber hinaus bietet die im Großprojekt *PlanQK – Plattform und Ökosystem für quantengestützte Künstliche Intelligenz* entwickelte Plattform bereits Anwendern und Entwicklern von Software für Quantencomputing einen öffentlichen Zugang für die Nutzung und gemeinsame Implementierung von Quantencomputing-Lösungen. In Summe werden zehn Verbundprojekte mit insgesamt 67 Partnern aus Wirtschaft und Wissenschaft mit rund 50 Mio. Euro gefördert.

Übersicht über Aktivitäten von nachgeordneten Behörden, Agenturen und institutionell geförderten Einrichtungen

Agentur für Innovation in der Cybersicherheit GmbH (Cyberagentur)

Die Cyberagentur finanziert und fördert mittel- bis langfristige Forschungsvorhaben mit hohem Disruptionspotenzial auf dem Gebiet der Cybersicherheit und diesbezüglicher Schlüsseltechnologien. Hierbei soll die Cyberagentur bewusst risikofreudig (offene Innovations- und Wagniskultur) mit hohem technologischem Ehrgeiz agieren. Die Cyberagentur ist keine Einrichtung der universitären Forschung und forscht nicht eigenständig im Rahmen von Programmen und Projekten. Sie hat das Ziel, im Rahmen ihrer unter-



nehmerischen und wissenschaftlichen Freiheit, Themen der Cybersicherheit und diesbezüglicher Schlüsseltechnologien der inneren und äußeren Sicherheit bedarfsgerecht und anwendungsbezogen voranzutreiben und hierdurch einen Beitrag zur technologischen Souveränität Deutschlands im Cyber- und Informationsraum zu leisten.

Im Rahmen der aktuellen Strategie der Cyberagentur (2022–2025) sollen auch Forschungsvorhaben zur Förderung der Cybersicherheit auf dem Gebiet der Quantentechnologien ausgeschrieben werden.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI)

Das BSI hat im März 2020 erste quantensichere Verfahren empfohlen und in seinem Leitfaden *Kryptografie quantensicher gestalten* vom Dezember 2021 ausführlichere Einschätzungen und Empfehlungen zur Migration zu quantencomputerresistenten Verfahren herausgegeben.[74] Im Hochsicherheitsbereich stehen bereits zugelassene Produkte zur Verfügung, die quantencomputerresistente Verfahren umgesetzt haben. Daneben führt das BSI Projekte zur Untersuchung der Sicherheit der Quantum Key Distribution durch, die zur Entwicklung vertrauenswürdiger und sicherer Produkte beitragen sollen.

Das BSI beteiligt sich an der Standardisierung der von ihm empfohlenen quantensicheren Verfahren FrodoKEM und Classic McEliece bei ISO/IEC. Im Oktober 2022 wurde in der ISO/IEC SC27 WG2 nach einem Vorschlag des BSI ein Preliminary Work Item für das *Projekt Inclusion of key encapsulation mechanisms for PQC in ISO/IEC standards* ins Leben gerufen. Aus diesem Projekt sollen ISO-Standards für FrodoKEM und Classic McEliece hervorgehen.

Um den Forschungsstand zu Quantencomputern weiter zu verfolgen, werden im Projekt *Laufende Aktualisierung der Studie Entwicklungsstand Quantencomputer* in den kommenden drei Jahren jährlich Revisionen der 2017 erstellten und bereits zweimal aktualisierten Studie ***Entwicklungsstand Quantencomputer*** durchgeführt. In der ersten Revision der Studie werden insbesondere der NISQ-Bereich (Noisy Intermediate Scale Quantum) verstärkt behandelt und die Entwicklungen bei der Fehlerkorrektur diskutiert. Zudem soll ein erweitertes Verständnis von betrieblichen Kriterien erlangt sowie die Beschreibungen von Algorithmen, Fehlerkorrektur und Plattformen fortgeschrieben werden. Nach Abschluss der Revision wird die neue Version auf der oben genannten Webseite verfügbar sein.

74 Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik BSI: Kryptografie quantensicher gestalten (2021)

Im Rahmen des 2017 abgeschlossenen BSI-Projekts *Sichere Implementierung einer allgemeinen Kryptobibliothek* wurde ein BSI-Entwicklungszweig inklusive detaillierter Kryptodokumentation für die Kryptobibliothek Botan geschaffen. Im aktuellen BSI-Projekt *Pflege und Weiterentwicklung der Kryptobibliothek Botan* wird nun eine Auswahl von quantencomputerresistenten Verfahren unter Berücksichtigung aktueller Entwicklungen im NIST-Standardisierungsprozess und der BSI-Empfehlungen in Botan implementiert. Hierdurch soll eine nach gegenwärtigem Kenntnisstand geprüfte Kryptobibliothek für den Einsatz und die Verwendung von Post-Quanten-Kryptografie geschaffen werden, um den breiten Einsatz quantencomputerresistenter Kryptografie zu fördern.

Im aktuellen BSI-Projekt *Integration von Post-Quanten Kryptografie in den E-Mail-Client Thunderbird* wird eine quantencomputerresistente Ende-zu-Ende-Verschlüsselung (E2EE) mit verschlüsselten und digital signierten E-Mails umgesetzt. Dazu wird die auf OpenPGP basierende Public-Key-Kryptografie des populären E-Mail-Clients Thunderbird um Verschlüsselungs- und Signaturverfahren aus der Post-Quanten-Kryptografie erweitert. Neben den Implementierungstätigkeiten ist ein großer Teil des Projekts ein entsprechender Standardisierungsentwurf in Form eines RFC Internet Drafts, der zur Einreichung in die OpenPGP-Arbeitsgruppe der Internet Engineering Task Force (IETF) vorgesehen ist.

In der bis Februar 2023 laufenden Machbarkeitsstudie *Quantencomputerresistente Authentisierung für VS-IT-Systeme* werden die Implikationen quantencomputerresistenter Authentisierungsverfahren auf bestehende und in der Entwicklung befindliche VS-IT-Systeme durch einen externen Auftragnehmer untersucht. Betrachtet werden dabei die derzeit im NIST-Standardisierungsprozess befindlichen Signaturalgorithmen sowie die Produkte der beim BSI bekannten Hersteller von VS-IT-Systemen. Insbesondere Einschränkungen wie Performanz der Signaturalgorithmen, Kryptoagilität sowie die Migrationsfähigkeit der VS-IT-Systeme werden in dieser Machbarkeitsstudie berücksichtigt.

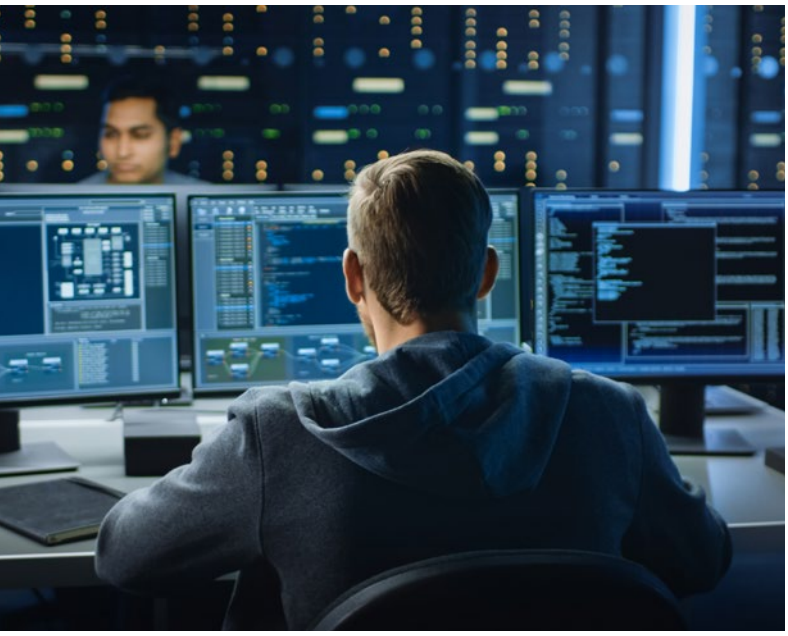
In Zusammenarbeit mit dem European Telecommunications Standards Institute (ETSI) hat das BSI die Erstellung eines ersten Protection Profile für Module zur Quantenschlüsselverteilung (QKD) nach Common Criteria vorangetrieben. Das Protection Profile, das sich auf die Betrachtung von Prepare-and-measure-Protokollen und Punkt-zu-Punkt-Verbindungen beschränkt, liegt nun in einer ersten Version vor und soll zeitnah zertifiziert werden. Es stellt einen ersten Schritt hin zu einer Evaluierungsmethodologie dar, macht aber die Erarbeitung weiterer Standards und einer Hintergrunddokumentation erforderlich, bis tatsächlich eine Zertifizierung konkreter Produkte möglich ist.

Um eine sichere Implementierung von QKD-Protokollen zu erreichen, ist ein solides Verständnis der möglichen Seitenkanalangriffe auf QKD-Module erforderlich, die bereits für viele konkrete Implementierungen demonstriert wurden. Dazu hat das BSI die Erstellung einer Studie in Auftrag gegeben, die den wissenschaftlichen Forschungsstand zu Seitenkanalangriffen auf QKD-Systeme einheitlich und vollständig darstellen soll. Dies ist ein erster erforderlicher Schritt hin zur Erstellung einer Evaluierungsmethodologie für QKD-Seitenkanalangriffe.

Das BSI ist, im engen Schulterschluss mit der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB), an der Koordination des BMBF-geförderten *Schirmprojekt Quantenkommunikation Deutschland* beteiligt. Zentrales Ziel des *Schirmprojekts Quantenkommunikation Deutschland* ist es, die Quantenkommunikation als in der Praxis nutzbare, sichere und in Deutschland und Europa kommerziell verfügbare Technologie zu etablieren. Das BSI legt dabei seinen Fokus auf die frühzeitige Betrachtung von Aspekten der Informationssicherheit (beispielsweise die Sicherheit von QKD-Protokollen).

Bundesdruckerei GmbH

Die Bundesdruckerei GmbH samt ihrer Tochtergesellschaft Maurer Electronics GmbH ist ein führendes deutsches Hightech-Sicherheitsunternehmen mit Hauptsitz in Berlin. Mit innovativen Lösungen, Produkten und Technologien „made in Germany“ schützt sie Identitäten und Daten. So schafft sie Vertrauen und Rechtssicherheit in der digitalen Gesellschaft – und ermöglicht das souveräne Handeln von Staaten, Unternehmen sowie Bürgerinnen und Bürgern in der analogen und der digitalen Welt. Als Unternehmen der Bundesdruckerei-Gruppe und mit der Erfahrung von über 250 Jahren ebnet das Unternehmen den Weg in eine sichere digitale Zukunft. Die Bundesdruckerei GmbH besitzt aktuell über 4.100 nationale



und internationale Patente, beschäftigt derzeit rund 2.600 Mitarbeitende und hat 2021 einen Umsatz von 642 Mio. Euro erzielt.

Mit Quantentechnologien beschäftigt sich die Bundesdruckerei seit den Projekten *PlanQK* und *PoQuiID*. Das Interesse in beiden Projekten waren ein Proof-of-Concept zu Anwendungsszenarien mit den sich im Aufbau befindlichen Quantencomputing-Kapazitäten der Projektpartner. 2021 kam das Projekt *Qu-Gov – Quantentechnologien für die Bundesverwaltung* hinzu, eine direkte Beauftragung des Bundesfinanzministeriums. Hier wird ein Top-down-Ansatz verfolgt, in dem für Use Cases aus dem hoheitlich-behördlichen Umfeld Proof-of-Concepts beziehungsweise Proof-of-Values erarbeitet und plattformoffen evaluiert werden. Bis Ende 2024 werden so Quantentechnologien für die Bundes(finanz)verwaltung evaluiert, erforscht und erste Anwendungsfälle getestet. Themenschwerpunkte hierbei sind

- Quanteninformation und -sicherheit,
- Quantenanalytik und
- quantenbezogene (Daten-)Souveränität.

Das Projekt setzt auf Partner aus Wissenschaft, Industrie, Start-ups und Verwaltung und auf Kooperationen. Erste Partner konnten schon gefunden werden beziehungsweise sind in der Auswahl. Dieses Projekt stellt eine Schnittstelle zwischen Wissenschaft, Industrie und Verwaltung dar und sieht sich so als Enabler für eine moderne, zukunftsorientierte Verwaltungsstruktur, die nahtlos an die digitalen Themen wie Bundes-Datenatlas und Bundes-KI-Kompetenzzentrum anknüpfen soll.

Die Bundesdruckerei gründet zu dieser Zeit mit der DB Systel GmbH die *Bundesquantenallianz* (BQA), um mit bundes- beziehungsweise bundesnahen Unternehmen über das Projekt hinaus an Quantentechnologien für die Bundesverwaltung zu forschen. Derzeit ist die BQA mit weiteren Bundeseinrichtungen wie der PTB oder der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Diskussion. Diese BQA ist damit eine sinnvolle Ergänzung zu den bis dato kommunizierten diversen „Quantenallianzen" in Deutschland, da sie explizit Unternehmen und Behörden im Bundesbesitz adressiert und die im Projekt *Qu-Gov* gewonnenen Erkenntnisse multiplizieren kann. Weitere Informationen unter **bundesdruckerei-gmbh.de**.

BWI GmbH

Die BWI GmbH ist – als einhundertprozentige Bundesgesellschaft – das IT-Systemhaus der Bundeswehr. Als Bindeglied zwischen Militär und Industrie betreibt und entwickelt die BWI die IT der deutschen Streitkräfte, führt digitale Transformationsprojekte durch und erprobt sowie implementiert innovative Anwendungsfälle. Insbesondere bei Letzterem liegt der Fokus der BWI auf dem frühzeitigen und anwendungsorientierten Einsatz von neuartigen Technologien. Hierbei grenzt sich die BWI in ihrem Leistungsportfolio deutlich von der Forschung ab, setzt die BWI vorrangig auf Forschungsergebnissen auf und ermöglicht deren anschließende Umsetzung in die Praxis. Dazu wurde im Bereich Innovation & Technologie der BWI das Competence Center Quantum Enabled Technologies gegründet.

Erklärtes Ziel ist es, für Quantentechnologien im BWI- und Bundeswehrumfeld zu sensibilisieren. Durch Markt- und Technologiescreenings, Wissenstransfer aus Beratungsprojekten sowie vereinzelten Erprobungen erfolgen konkrete Ableitungen von Handlungsempfehlungen für das Service-Portfolio der BWI.

Deutsche Forschungsgemeinschaft e. V. (DFG)

Primäre Aufgabe der DFG ist die Förderung von erkenntnisgeleiteter Spitzenforschung. Die DFG ist insbesondere auf denjenigen Gebieten aktiv, wo die Forschung selbst ihre Themen findet und der Dy-

namik wissenschaftlicher Erkenntnisprozesse folgt. Antragsberechtigte Einzelpersonen, Gruppen oder Institutionen können deshalb jederzeit und zu jedem Thema Förderanträge bei der DFG einreichen. Die steigende Nachfrage sowohl in der Einzelförderung als auch im Rahmen von koordinierten Programmen und damit einhergehend auch das steigende Bewilligungsvolumen im Bereich der Quantentechnologie zeigen, dass die Instrumente der DFG die Bedarfe im gesamten Spektrum der Förderung aufgreifen.

Im Jahr 2021 befanden sich insgesamt 149 Vorhaben mit einer jahresbezogenen Bewilligungssumme von 58,6 Mio. Euro mit direktem Bezug zum Forschungsfeld Quantentechnologie in der laufenden Förderung. Davon entfielen 40,4 Mio. Euro auf Exzellenzcluster.[75] Dies entspricht einem Anstieg von rund elf Prozent innerhalb von drei Jahren.

Bei koordinierten Programmen (Sonderforschungsbereiche, Graduiertenkollegs, Exzellenzcluster) sind häufig einzelne Forschungsbereiche stark quantentechnologisch geprägt, während das gesamte Konsortium eher natur- und ingenieurwissenschaftliche Grundlagenforschung verfolgt.

Im Zuge ihres gestalterischen und strategischen Handelns im Europäischen Forschungsraum beteiligt sich die DFG am ERA-Net ***QuantERA.*** Der EU-geförderte Verbund von 39 Forschungsförderorganisationen aus 31 Ländern unterstützt insbesondere durch Ausschreibungen für transnationale Projekte die Forschung an Quantentechnologien. Die DFG war bei der letzten Ausschreibung für die Förderung von Beteiligungen aus Deutschland an grundlagenwissenschaftlich orientierten Projekten verantwortlich. Die 19 von der DFG teilfinanzierten Projekte starten 2022. Die nächste Ausschreibung, an der sich die DFG zu beteiligen plant, wird 2023 erfolgen.

Im Rahmen zweier Großgeräte-Initiativen zur Erforschung von Quantentechnologie, die 2021 gestartet wurden, unterstützt die DFG acht Universitäten mit insgesamt circa 17,7 Mio. Euro. Ziel von Großgeräteinitiativen ist es, neueste Technologie für Forschung nutzbar zu machen. Es wurden zwei Ausschreibungen durchgeführt: *Spin-basierte Quantenlichtmikroskope* und *Testumgebungen für Quantenkommunikation* (QCDE).

Darüber hinaus fördert die DFG ebenfalls seit 2021 das Graduiertenkolleg ***Promovierte Experten für photonische Quantentechnologien***, welches das Ziel verfolgt, eine neue Berufsgruppe der „Photonischen Quanteningenieurinnen und Quanteningenieure“ zu etablieren.

Deutscher Wetterdienst (DWD)

Wetter- und Klimasimulationen stellen aufgrund ihres Bedarfs an Rechenleistung und Speicherkapazität einen primären Anwendungsfall für die Nutzung von Hochleistungsrechner(HPC)-Infrastrukturen dar. Mit der *ICON-Consolidated*-Entwicklungslinie bereitet der DWD unter anderem mit seinen Partnern aus dem ICON-Konsortium (Max-Planck-Institut für Meteorologie [MPI-M], Deutsches Klimarechenzentrum [DKRZ], Karlsruher Institut für Technologie [KIT]) das Wetter- und Klimamodell *ICON* auch für zukünftige HPC-Architekturen vor. Bei ausreichender Technologiereife wird dies auch für auf Quantencomputing basierende Architekturen erfolgen. Die zu erwartende extreme Rechenleistungssteigerung wird noch genauere Simulationen der atmosphärischen Prozesse in einer nie erreichten Auflösung erlauben und gleichzeitig die Unsicherheiten besser quantifizieren. Eine Entwicklung des Quantencomputings für die Anwendung der Lösungen von mathematischen Gleichungen, mit denen Prozesse in der Atmosphäre beschrieben werden, ist daher sehr sinnvoll und geboten.

Forschungsinstitut Cyber Defence und Smart Data (FI CODE) an der Universität der Bundeswehr München

Das FI CODE ist seit 2018 bis zunächst 2023 ein sogenannter IBM Quantum Hub und hat damit einen von weltweit nur wenigen exklusiven Zugängen zur IBM-Quantencomputer-Infrastruktur.

Die derzeitige Verfügbarkeit von kleinen, mit Rauschen behafteten Quantencomputern ermöglicht es so den Forscherinnen und Forschern am FI CODE,

75 Folgende Exzellenzcluster haben einen sehr starken inhaltlichen Bezug zu Quantentechnologien:
- *Komplexität und Topologie in Quantenmaterialien (CT.QMAT)*
- *QuantumFrontiers – Licht und Materie an der Quantengrenze*
- *CUI: Advanced Imaging of Matter*
- *Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST)*
- *Materie und Licht für Quanteninformation (ML4Q)*

Quantenalgorithmen und -heuristiken sowie Fehlerminderungsschemata zu testen und Experimente zur Erforschung und Anwendung der Quanteninformationsverarbeitung auszuführen.

Auf dem Weg zur Praxisrelevanz des Quantencomputings werden am FI CODE verschiedene Anwendungen in den Bereichen Optimierung, Machine Learning und Quantensimulation verfolgt und Methoden zur Schaltkreisoptimierung und Fehlerminderung entwickelt. Das FI CODE beabsichtigt, die Kooperation mit IBM als IBM Q Hub über das Jahr 2023 hinaus zu verlängern.

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V. (FhG)

Die Fraunhofer-Gesellschaft ist die weltweit führende Organisation für anwendungsorientierte Forschung. Mit ihrer Fokussierung auf zukunftsrelevante Schlüsseltechnologien sowie auf die Verwertung der Ergebnisse in Wirtschaft und Industrie spielt sie eine zentrale Rolle im Innovationsprozess.

Quantentechnologien befinden sich derzeit in der entscheidenden Anfangsphase der zweiten Quantenrevolution, die disruptive Veränderungen in Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft auslösen wird. Die Fraunhofer-Gesellschaft stellt sich dieser Herausforderung in den Quantentechnologien in folgender Weise:

- Die Fraunhofer-Gesellschaft identifiziert auf der Grundlage ihrer Anwendungskompetenz in enger Kooperation mit den Partnern aus der Wirtschaft Quanten-Mehrwerte in Communication, Computing, Imaging und Sensing.

- Die Fraunhofer-Gesellschaft befähigt unter Nutzung etablierter Technologieplattformen in einem ganzheitlichen Ansatz
  - die Wissenschaft zu exzellenter Grundlagenforschung
  - und die Wirtschaft zu herausragenden Innovationen in den Quantentechnologien.

- Die Fraunhofer-Gesellschaft qualifiziert disziplinübergreifend und weltoffen in enger Zusammenarbeit mit den Universitäten Absolventinnen und Absolventen sowie vorhandene Fachkräfte der Natur- und Technikwissenschaften und trägt aktiv zu einem Community-Building bei.

- Die Fraunhofer-Gesellschaft betreibt ein aktives Patentportfoliomanagement und befördert im Rahmen der Programme ihrer Leistungszentren Gründungen von Unternehmen in den Quantentechnologien.

- Die Fraunhofer-Gesellschaft unterstützt die Entwicklung von Technologien im Bereich Quantencomputing insbesondere durch den Aufbau eines deutschlandweiten Kompetenznetzwerks Quantencomputing und im Rahmen ihrer Kooperation mit der IBM Deutschland GmbH. Sie setzt erhebliche Eigenmittel ein, um der wissenschaftlichen Community, Wirtschaft, KMU und Start-ups das System in Ehningen zur Verfügung zu stellen, und betreibt daran Forschung im Bereich Quantencomputing – allein und in Konsortien. Eine Weiterführung der Zusammenarbeit mit IBM über den aktuellen Vertrag hinaus (02/2020–02/2024) wird angestrebt.

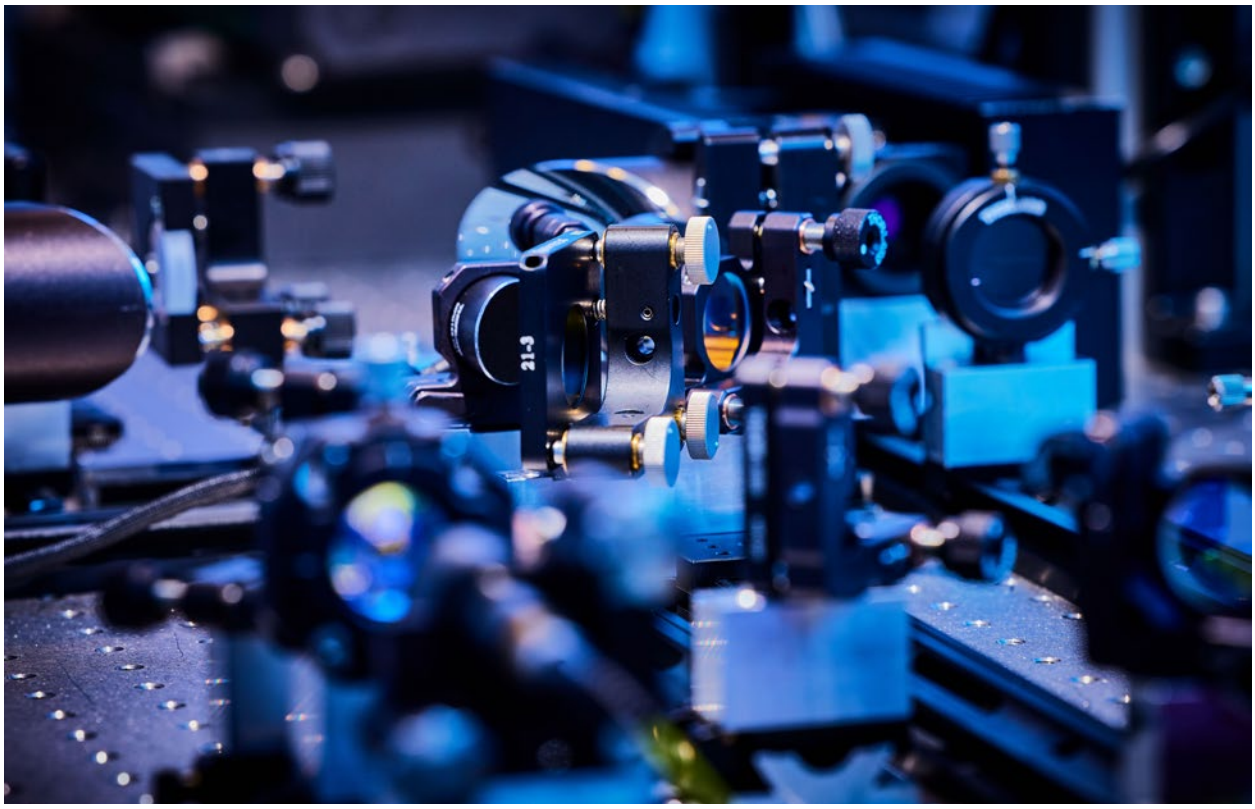
Die Fraunhofer-Gesellschaft widmet sich seit 2016 intensiv dieser Schlüsseltechnologie und förderte bereits 2017 mit dem Leitprojekt *QUILT* (Fokus: Quantenimaging, mit hohem Anspruch an wissenschaftliche Exzellenz und starkem Anwendungspotenzial) die ersten groß angelegten Forschungsaktivitäten.

Komplementär dazu bietet die Fraunhofer-Gesellschaft der deutschen FuE-Landschaft unter deutschen/europäischen Rechts- und Datengrundlagen und Datenlokalität Zugriff auf einen bereits existierenden Quantencomputer.

Auch in Zukunft will die Fraunhofer-Gesellschaft gezielt das Potenzial der Quantentechnologien in Deutschland und Europa befördern und sieht die Chancen dafür insbesondere in folgenden Bereichen:

- Gezielter Aufbau von Systemkompetenz zur Mitgestaltung eines wissenschaftlichen und technologischen Paradigmenwechsels

- Mitwirkung an einer souveränen, paneuropäischen digitalen Infrastruktur mit quantengesicherten Netzwerken zum Schutz von Staat, Industrie und Bürgerrechten und quantenbeförderten Rechenkapazitäten für FuE in Energie, Klima und Gesundheit



- Portfolio von Schutzrechten und IP-Pooling für „freedom-to-move“ in Europa

- Etablieren von Fabs und Pilotlinien für geschlossene Lieferketten in einem kompetitiven und autonomen deutsch-europäischen Wirtschaftsraum, so auch der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) mit dem Modul *Quanten- und Neuromorphes Computing*.

Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren e. V. (HGF)

Die Helmholtz-Zentren, die zur Forschung in der Quantentechnologie beitragen,[76] sind in der Plattform *Helmholtz-Quantum* organisiert, die für die Helmholtz-Gemeinschaft eine übergreifende Strategie veröffentlicht hat.[77] Darin sind fünf Quantentechnologiefelder identifiziert, auf denen die Zentren mit ihrer Forschung mit unterschiedlichen Schwerpunkten beitragen: 1. Quantencomputing, 2. Quantenkommunikation, 3. Quantensensorik, 4. Quantenmaterialien und Grundlagenforschung sowie 5. Quantensimulationen und numerische Verfahren.

Die aktuelle Forschung reicht vom Verständnis grundlegender Quantenphänomene über das Design von Quantenzuständen bis hin zur Entwicklung von Komponenten für die Realisierung und den Einsatz von voll funktionsfähigen Geräten sowie Prototypen. Geplant ist es, Infrastrukturen zusammen mit den Nutzergemeinschaften zu entwickeln und bereitzustellen, inklusive Austauschplattformen und Qualifizierungsprogrammen, um Potenziale für die Implementierung von Anwendungen, Co-Design und zukünftiges Personal zu heben. Dazu gehören Materialcharakterisierungsplattformen, Quantencomputer in Höchstleistungsrechenzentren oder die Entwicklung eines breit verwendbaren Softwarepakets für Quantencomputing. Eine starke Materialexpertise ist langfristig für exzellente, disruptive Technologien notwendig, während die Integration von Quantencomputern in Höchstleistungsrechenzentren sowohl das volle Potenzial des Quantencomputings zugänglich macht als auch die Nutzercommunity frühzeitig anbindet. Große Softwarepakete erreichen inzwischen die Komplexität von Infrastrukturen und sind eine Voraussetzung für Anwender. Im Bereich der

76 Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR), Forschungszentrum Jülich (FZJ), GSI Helmholtz-Zentrum für Schwerionenforschung (GSI), Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB), Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Karlsruhe Institute of Technology (KIT)

77 Helmholtz-Gemeinschaft: Researching the second Quantum Revolution (2021)

Sensorik ist unter anderem die Lab-on-Chip-Integration von Quantensensoren für Anwendungsbereiche wie Biologie oder Medizin erklärtes Ziel.

Gemeinsam mit Partnern aus Universitäten, Forschungsorganisationen und der Industrie will die Helmholtz-Gemeinschaft weitreichende technologische Ziele für die nächsten zehn Jahre und darüber hinaus definieren und diese auf allen Ebenen, von den wissenschaftlichen Grundlagen bis hin zu Systemtechnik sowie Anwendungen, gemeinsam verfolgen.

In den letzten Jahren konnten weitere herausragende internationale Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler für die Gemeinschaft gewonnen werden. Viele Zentren bauen neue Institute zur Erforschung von Quantentechnologien auf und die Gemeinschaft investiert in zentrale Infrastrukturen, die als technologische Drehscheibe große Fortschritte ermöglichen werden. In der Helmholtz-Gemeinschaft arbeiten (Stand 2021) bereits circa 500 Menschen direkt an der Forschung zu Quantentechnologien. Die Forschenden leiten und beteiligen sich an kleinen und großen Projekten, die zum Beispiel vom BMBF, der Europäischen Union oder Helmholtz selber gefördert werden, und sind damit eng in die nationale und europäische Strategie eingebunden.

Beispiele für konkrete Ziele der nächsten fünf Jahre, wie sie im Strategiepapier formuliert sind:

- Systematische Weiterentwicklung der vielversprechenden skalierbaren Plattformen für die Realsierung mehrerer Qubits, um über den Stand der Technik hinausgehende Demonstratoren im kleinen Maßstab mit bis zu 100 Qubits und niedrigen Fehlerraten für Quantencomputer und -simulationen zu realisieren

- Entwicklung von handhabbaren elektrisch betriebenen On-Chip-Einzelphotonen-Emittern, die bei Raumtemperatur und im Telekommunikationsband arbeiten

- Robuste und miniaturisierte optische Quantensysteme (Lab-on-Chip-Technologien) für hochpräzise Raum-, Zeit- und Beschleunigungsmessungen unter rauen Weltraumbedingungen[78]

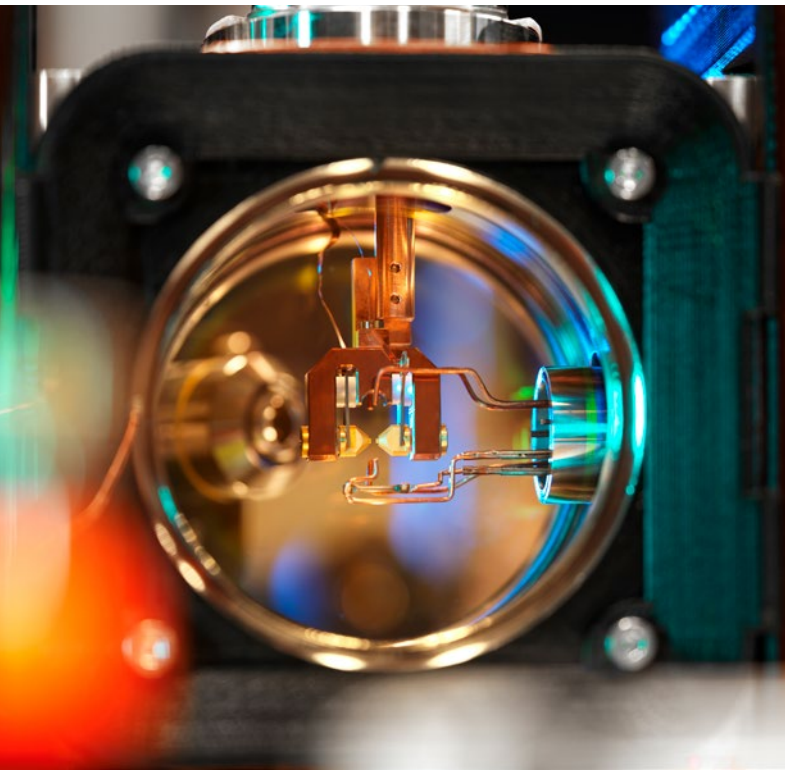
- Erforschung neuartiger Materialien als Quelle für neue metrologische Standards und innovative Qubit-Konzepte, die über die derzeitigen Festkörper-Qubit-Systeme hinausgehen. Erstellung systematischer mehrdimensionaler Phasendiagramme für Materialkandidaten in Bezug auf elektronische und magnetische Eigenschaften, Topologie und potenzielle Funktionalität

- Entwicklung von Algorithmen, Methoden und Werkzeugen für disruptive Rechengeräte zur Lösung sehr schwieriger und bisher unlösbarer Rechenprobleme in Wissenschaft und Industrie

- Erforschung der technologischen Grundlagen für ein abhörsicheres Quantenkommunikationsnetz in Deutschland und Europa[79]

Einen zusätzlichen Beitrag des DLR außerhalb der programmorientierten Forschungsförderung der HGF bildet die mit rund 740 Mio. Euro aus dem Konjunkturpaket für den Bau von Quantencomputersystemen, Entwicklung von Software und ersten Anwendungen ausgestattete Quantencomputing-Initiative des DLR. Der Ansatz der Initiative sieht vor, die Systeme durch Beauftragung von Unternehmen, insbesondere Start-ups, zu realisieren. Dazu fließen 80 Prozent der Mittel in die Unternehmen, die ihre Vollkosten decken und sogar eine Gewinnmarge erzielen können. Das ist besonders wichtig für finanzschwache kleine und mittlere Unternehmen beziehungsweise Start-ups. So wird durch die Entwicklung von Quantencomputern für die Forschungsfelder des DLR parallel ein industrielles Ökosystem aufgebaut. Zugleich sollen so die Ergebnisse (geistiges Eigentum) und Mitbestimmungsrechte in diesem potenziell sensiblen Technologiebereich für das DLR gesichert werden, die ausführenden Unternehmen aber Handlungsfreiheit durch eine Rücklizenz erhalten. Zudem werden unter anderem durch Kollokation an den DLR-Instituten in Hamburg und Ulm Anreize für eine Ansiedlung von einschlägigen innovativen Unternehmen aus dem europäischen Wirtschaftsraum in Deutschland gegeben.

78 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR: So genau wie nie – Neue Uhren für die Satelliten-Navigation der Zukunft (15.07.2021)
79 Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt DLR: Erste quantengesicherte Videokonferenz zwischen zwei Bundesbehörden (10.08.2021)



Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e. V. (MPG)

Die Max-Planck-Gesellschaft (MPG) hat frühzeitig begonnen, Grundlagenforschung zu Quantenwissenschaften und -technologien (Quantum Science and Technology, QST) im Sinne der zweiten Quantenrevolution zu fördern. 1981 wurde das Max-Planck-Institut (MPI) für Quantenoptik in Garching gegründet, 1993 das experimentelle Teilinstitut des MPI für Gravitationsphysik in Hannover, 1994 das MPI für die Physik komplexer Systeme in Dresden und 2009 das MPI für die Physik des Lichts in Erlangen. Darüber hinaus beschäftigen sich auch die Max-Planck-Institute für Festkörperforschung in Stuttgart, für Informatik in Saarbrücken, für Kernphysik in Heidelberg, für Multidisziplinäre Naturwissenschaften in Göttingen, für die Chemische Physik fester Stoffe in Dresden, für die Struktur und Dynamik der Materie in Hamburg, für Mikrostrukturphysik in Halle, für Mathematik in den Naturwissenschaften in Leipzig, für Intelligente Systeme in Tübingen, für Sicherheit und Privatsphäre in Bochum sowie das Fritz-Haber-Institut in Berlin zum Teil mit Aspekten dieser Thematik. Mit der Grundlagenforschung zu QST an all diesen Instituten sieht sich die MPG als Wegbereiter und Unterstützer der aktuellen Fachprogramme für Quantentechnologien.

Die MPG sieht QST als strategisch wichtige Themen an, nicht nur in Bezug auf die Grundlagenforschung, sondern auch im Hinblick auf den potenziellen volkswirtschaftlichen Nutzen. Deutschland ist im Bereich der Grundlagen exzellent positioniert und kann im weltweiten Wettbewerb um QST eine führende Rolle übernehmen.

Die MPG bringt im Bereich QST zentrales Know-how ein, unter anderem in den folgenden Feldern:

- Quantencomputing (Garching, Erlangen, Bochum, Tübingen)
- Quantensimulation (Garching, Erlangen, Dresden, Hamburg)
- Quantenkryptografie, Quantenkommunikation, Quanteninternet (Garching, Erlangen, Bochum)
- Quanteninformationstheorie (Garching, Leipzig, Saarbrücken)
- Quantensensorik, Quantenmetrologie, Quantenimaging (Stuttgart, Hannover, Heidelberg, Garching, Göttingen)
- Quantenbauelemente (Halle, Stuttgart, Dresden, Garching, Erlangen)
- Quantenmaterialien (Stuttgart, Hamburg, Halle, Dresden)

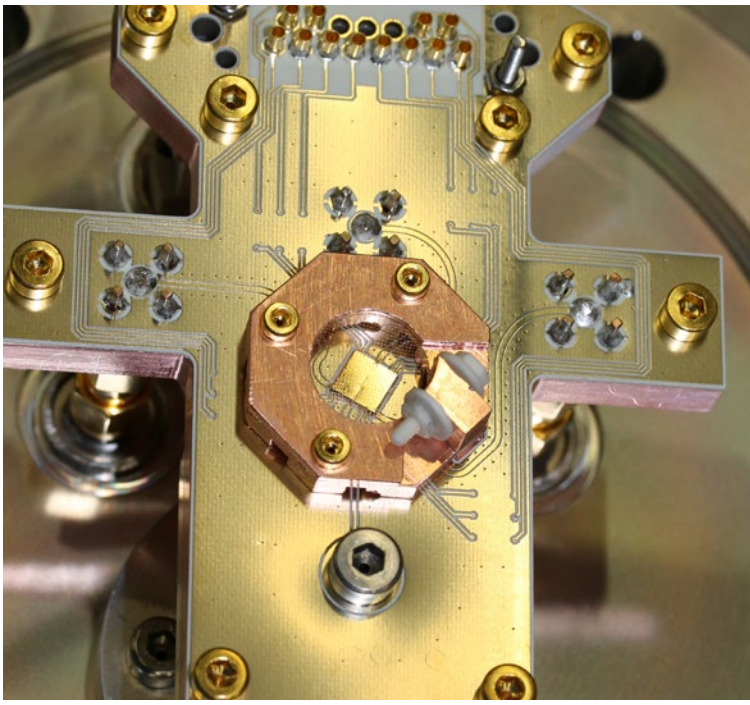
Ihren Beitrag zur nationalen Strategie sieht die MPG vor allem in der Fortführung und dem Ausbau exzellenter Grundlagenforschung. Dazu gehören auch die Erschließung neuer Themenfelder, das Augenmerk auf die Patentierung neuer Ideen, die Förderung von Ausgründungen und Start-ups sowie das Mitwirken in nationalen und internationalen Forschungsnetzwerken. Die MPG leistet wesentliche Beiträge zur Überführung von grundlegenden Phänomenen der zweiten Quantenrevolution in anwendungsrelevante Technologien.

So war die MPG maßgeblich am Expertenrat beteiligt, der die zentralen Herausforderungen im Bereich Quantencomputing benannt und Anfang 2021 in Form einer nationalen Roadmap Handlungsempfehlungen für das zukünftige Vorgehen ausgesprochen hat.

Die MPG hat ihre Strategie bezüglich der Quantenwissenschaften und -technologien (QST) geschärft; nach innen als auch nach außen gerichtet wurden umfangreiche Aktivitäten gestartet, von denen zwei nachfolgend kurz erläutert werden:

Max Planck Quantum Alliance (MPQA)
Ein wichtiger Bestandteil einer nachhaltigen Langzeitstrategie für die MPG im Bereich QST ist die Etablierung einer international sichtbaren Dachorganisation, die die verschiedenen Aktivitäten (neue und bestehende) innerhalb der MPG vereint und eine Plattform für die Umsetzung weiterer Maßnahmen bietet. Diese *MPQA*-Initiative zielt darauf ab, die weltweite Sichtbarkeit der MPG in QST zu erhöhen, innerhalb der MPG die Zusammenarbeit der beteiligten Abteilungen im Bereich QST zu stärken und die Wettbewerbsfähigkeit bei der Gewinnung von den international sehr umkämpften Spitzentalenten zu erhöhen. Da einige der QST-Forschungsthemen zwischen den Kernbereichen verschiedener Institute angesiedelt sind (insbesondere was die wissenschaftlichen Konzepte und/oder die erforderlichen technologischen Infrastrukturen betrifft), stellt die Interdisziplinarität der QST eine ständige Herausforderung dar.

Munich Quantum Valley (MQV)
Die MPG ist treibende Kraft bei der Initiative *Munich Quantum Valley,* die als europaweit einzigartiges Netzwerk seiner Art Quantencomputing und Quantentechnologien in Bayern etablieren soll. Die Mitglieder der Initiative (die Bayerische Akademie der Wissenschaften [BAdW], die Ludwig-Maximilians-Universität München [LMU], die Technische Universität München [TUM], die Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg [FAU], die Fraunhofer-Gesellschaft [FhG], das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt [DLR] und die MPG) haben am 27. Januar 2022 die Gründungsurkunde des MQV-Vereins unterzeichnet. Der Freistaat Bayern unterstützt die Initiative bis 2025 mit 300 Mio. Euro Fördermitteln aus der *Hightech-Agenda Bayern*. Hinzu kommen über 80 Mio. Euro aus den Förderprogrammen des BMBF (aus dem Zukunftspaket Quantentechnologien) und des BMWK hinzu, die durch gemeinsame Anträge der Mitglieder der Initiative eingeworben wurden. Bislang haben sich über 40 wissenschaftliche Einrichtungen, Forschungsinstitute und Unternehmen unter dem Dach des *MQV* zusammengeschlossen.



Hauptziel der Initiative ist es, in den nächsten fünf Jahren ein Zentrum für Quantencomputing und Quantentechnologien (ZQQ) zu errichten. Dieses Zentrum soll den Zugang zu Computern ermöglichen, die auf den drei derzeit vielversprechendsten Technologien des Quantencomputings basieren: supraleitende, ionische und atomare Qubits. Dabei sind Forschung und Industrie eng verzahnt, um effizienten Technologietransfer zu gewährleisten und die Gründung von Start-up-Unternehmen zu fördern. Die Initiative sieht auch die Einrichtung eines Quantentechnologieparks vor, der von den Forschungseinrichtungen zusammen mit den mehr als 20 deutschen und europäischen Hightech-Unternehmen im Großraum München, die großes Interesse oder bereits Aktivitäten im Bereich QST zeigen, genutzt werden kann. Darunter sind Firmen wie Airbus, attocube, BMW, Fujitsu, Google, Huawei, Infineon, Menlo Systems, Microsoft, OHB, Rohde & Schwarz, Siemens, Toptica Photonics und Volkswagen. Gemeinsam werden so Forschungskapazitäten gebündelt und beschleunigt wissenschaftliche Erkenntnisse in marktfähige Produkte umgesetzt. Zudem werden diese Aktivitäten unterstützt durch Qualifizierungs- und Ausbildungsangebote sowie Förderprogramme für Quantentechnologie-Start-ups.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) ist im Rahmen ihrer gesetzlichen Beauftragung verantwortlich für die Rückführung im Bereich des Mess-

wesens und die Bereitstellung von Dienstleistungen, auch im Bereich der Quantentechnologien. Beispiele für PTB-relevante Quantentechnologien sind hochgenaue Quantenstandards für elektrische Größen (Widerstand, Spannung), hochgenaue Sensoren für Magnetfelder, für Druck oder für Temperatur, Einzelelektronenpumpen mit hochgradig nicht klassischen Eigenschaften sowie Einzelphotonenquellen und -detektoren für die Quantenradiometrie und Quantenkryptografie. Des Weiteren gehören ultrastabile und genaue optische Uhren mit weitreichenden Anwendungsfeldern in der Kommunikation, in der Navigation und in der Geodäsie zu den bedeutenden Forschungsergebnissen der PTB. In der Vergangenheit hat die PTB die Weiterentwicklung der Quantenmetrologie und der Quantensensorik im Rahmen ihrer regelmäßigen strategischen Planungen aufgrund des enormen wirtschaftlichen Potenzials und der zu erwartenden Nachfrage aus Forschung und Industrie konsequent ausgebaut.

Im Rahmen der Darstellung der SI-Einheiten, die seit 2019 maßgeblich auf der Quantenphysik beruhen, vereint die PTB die wichtigsten Felder der Quantentechnologie (QT) in einer technologisch führenden Position unter einem Dach und zeichnet sich durch eine seit Langem bestehende, enge Zusammenarbeit mit der Industrie aus. Dies versetzt die PTB in die Lage, die deutsche Wirtschaft in einzigartiger Weise zu unterstützen. So können in Deutschland weltweit einmalige neue Wirtschaftsfelder erschlossen werden und damit ein deutlicher Standortvorteil in Deutschland entwickelt werden.

Zu diesem Zweck wird seit 2019 das im Rahmenprogramm *Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt* genannte Quantentechnologie-Kompetenzzentrum QTZ aufgebaut als Schnittstelle der PTB für Zugang zu Quantentechnologie-Expertise und -Infrastruktur für Partner aus Industrie und Wissenschaft. Zentrales Ziel ist die Unterstützung der Entwicklung von Quantentechnologien mit ökonomischem Potenzial. Dies ermöglicht es, das Expertenwissen der PTB und ihre Rolle als nationales Metrologie-Institut für die Ausschöpfung des Potenzials der Quantentechnologien effektiv zu nutzen, um optimalen gesellschaftlichen und ökonomischen Mehrwert zu erzeugen.

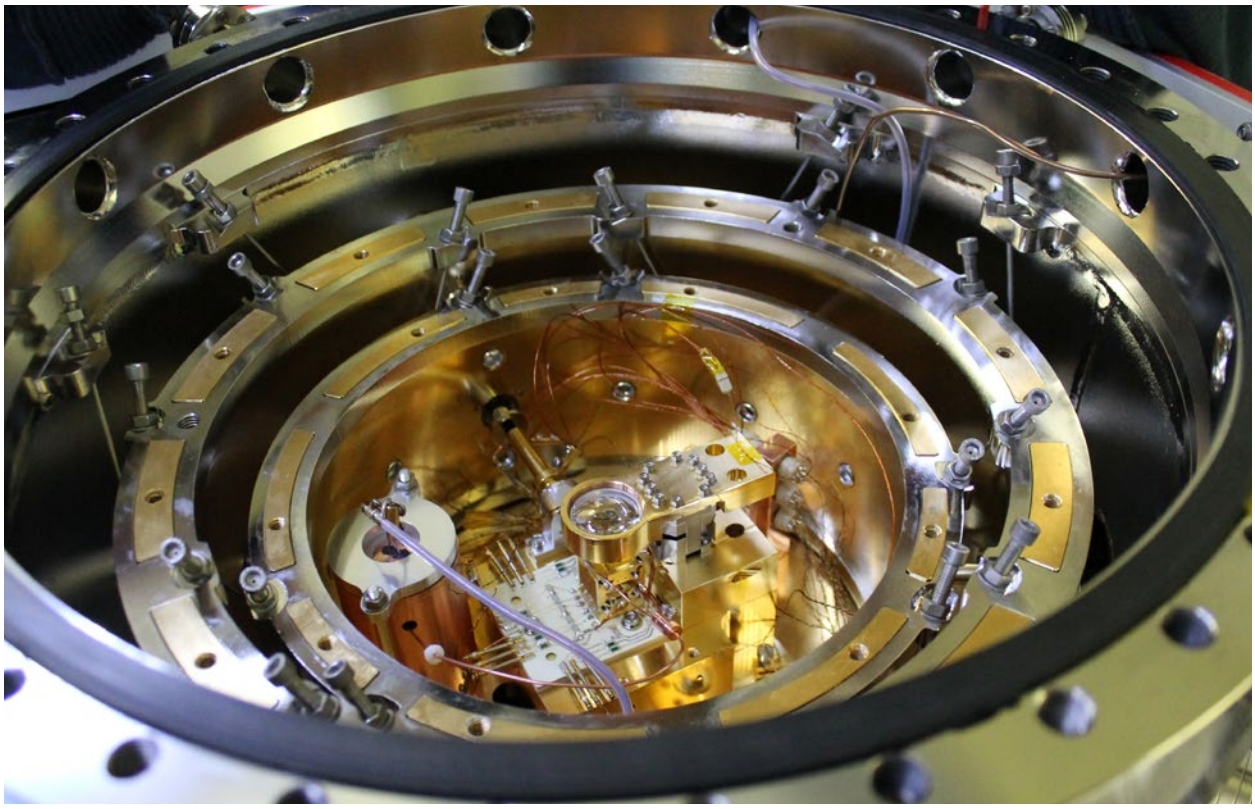
Das QTZ konzentriert sich dabei auf die im Folgenden kurz erläuterten Aktionsfelder:

1. **Robuste Komponenten und Technologien.** Für die Anwendung der Quantentechnologie im Markt sind robuste und anwenderfreundliche Quantentechnologie-Komponenten und -Geräte erforderlich, die auch von Nichtexpertinnen und -experten in der rauen Umgebung eines Industriebetriebs genutzt werden können. Die PTB ermöglicht die Weiterentwicklung von bereits in der PTB (und anderen Forschungsinstitutionen) etablierten Quantentechnologie-Komponenten für diesen Praxiseinsatz.

2. **Kalibrierungen und Dienstleistungen.** Eine wichtige Voraussetzung für die kommerzielle Nutzung sind verlässliche und vergleichbare Quantentechnologie-Komponenten und die Sicherstellung und Zertifizierung von Spezifikationen zur Qualitätssicherung durch Kalibrierung und Charakterisierung. Mit diesen originären Dienstleistungen der PTB als unabhängigem nationalen Metrologie-Institut schafft die PTB eine wichtige, belastungsfähige Basis für den Weg der Quantentechnologie in den Markt.

3. **Anwenderplattformen im QTZ.** Die Anwenderplattformen bieten robuste und anwenderfreundlich ausgelegte Messplätze in wesentlichen Bereichen der Quantentechnologie und sollen, unterstützt von Personal und Infrastruktur der PTB, von externen Partnern genutzt werden können. Das Ziel ist es hier, Partnern eigene Erfahrungen in der Quantentechnologie zu ermöglichen, ohne dass diese selbst die Infrastruktur aufbauen müssen, die gerade in der Quantentechnologie typischerweise sehr hohe Investitionen und Vorlaufzeiten verlangt. Fehlender Kontakt und mangelnde Erfahrung mit den eingesetzten Techniken beziehungsweise deren zeitaufwendiger Aufbau stellen eine weitere Herausforderung insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) dar. Gerade in einem potenziell sehr dynamischen und disruptiven Feld wie der Quantentechnologie kann dies ein großer und schwer aufzuholender Nachteil in der Konkurrenzfähigkeit sein, den das QTZ überbrücken helfen soll.

4. **Hands-on Training, Quantum Education und Unterstützung von Start-ups.** Für die Umsetzung der QT am Markt bedarf es gut ausgebildeten Personals, für das es zurzeit noch keine ausreichenden Aus-



bildungsangebote gibt. Die bereits an der PTB bestehenden Verbindungen zu wichtigen Akteuren aus der Industrie bieten einen ausgezeichneten Ausgangspunkt, um zeitnah und nach Bedarf eine solche „quantum work force“ auszubilden, unter Verwendung der besonders für diesen Zweck geeigneten Anwenderplattformen. Eine weitere Möglichkeit zum Wissenstransfer besteht in der Anregung und Förderung von Unternehmensgründungen.

In jüngster Vergangenheit engagiert die PTB sich verstärkt in verschiedenen QT-Aktivitäten, um die Aspekte oben umzusetzen.

Die PTB ist Gründungsmitglied des ***Quantum Valley Lower Saxony (QVLS).*** Aus diesem sich entwickelnden QT-Ökosystem sind jüngst Initiativen zur Stärkung der Industrie hervorgegangen:

- Die PTB betreibt mit den *QVLS*-Partnern gemeinsam einen ***QT-Hightech-Inkubator.*** Durch Förderung des Landes Niedersachsen wird aktuell 14 Teams (Start-ups und jungen Unternehmen) eine Impulsförderung inklusive der Nutzung von technischer Infrastruktur und weiterer Unterstützung gewährt.
- Das jüngst ausgewählte Zukunftscluster ***QVLS-iLabs*** (Start voraussichtlich März 2023) komplementiert den Hightech-Inkubator durch die Zusammenarbeit mit etablierter Industrie. Die PTB koordiniert – im engen Schulterschluss mit dem BSI – das BMBF-geförderte *Schirmprojekt Quantenkommunikation Deutschland*. Zentrales Ziel dieses Projekts ist es, die kohärente Entwicklung der Quantenkommunikation zu befeuern, als Plattform für alle relevanten Partner aus Deutschland zu fungieren und damit eine starke Rolle Deutschlands und Europas in der Kommerzialisierung der Quantenkommunikation zu sichern. Auf diese Weise werden Synergien gehoben, Dopplungen vermieden und so die optimale Nutzung von Ressourcen aus Forschung und Industrie gesichert und damit die wettbewerbliche Position im internationalen Umfeld signifikant gestärkt und perspektivisch die technologische Souveränität gesichert. DIN ist über eine Unterbeauftragung direkt mit in das Projekt eingebunden. Neben dem Schirmprojekt wird die für die industrielle Umsetzung notwendige Metrologie ebenfalls in verschiedenen aktuellen Forschungsprogrammen, beispielsweise zum Quantencomputer-Demonstratoren, von Beginn an mitentwickelt. Diese Aktivitäten sind technologieoffen und erstrecken sich über diverse Architekturen.

Für die industrielle Erschließung der QT ist die Mitwirkung bei der Standardisierung ein wichtiger Faktor – Standards, die außerhalb Europas gesetzt werden, dürfen nicht die Kompatibilität von in Europa entwickelten QT-Komponenten einschränken. Es ist im Interesse einer starken Position Deutschlands, bei der Standardisierung mitzuwirken. Die PTB arbeitet bei diversen Standardisierungsaktivitäten mit: Beispielsweise hat die PTB seit 2019 den Ko-Vorsitz der ***Focus Group on Standardisation*** von CEN-CENELEC, DIN stellt das Sekretariat. Auf dieser Vorarbeit wurde kürzlich ein von DIN beantragtes „Joint Technical Commitee" JTC 22 bei CEN-CENELEC bewilligt, das im März 2023 seine Gründungssitzung in Berlin abhalten wird.

Weiter erarbeitet die PTB gemeinsam mit verschiedenen Partnern **Weiterbildungsangebote für die Industrie.** Das Ziel ist hier, eine kohärente und in Deutschland gut abgestimmte Entwicklung von Angeboten zu unterstützen, Dopplungen zu vermeiden und Interessierten aus der Industrie einen effektiven und einfachen Zugang zu ermöglichen, jenseits von thematischen oder regionalen Interessen.

Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz e. V.

Die Institute der Leibniz-Gemeinschaft decken in der Wertschöpfungskette den Bereich von der Grundlagenforschung zu Quantenphänomenen und Materialien über Material- und Bauelemententwicklung sowie systemischer Heterointegration bis zu prototypischen Lösungen ab. Sie forschen an einer großen Vielfalt an Materialsystemen und Technologieansätzen zur Entwicklung innovativer Lösungen. Völlig neue Möglichkeiten ergeben sich beispielsweise in der gelebten Zusammenführung von Forschungen in der Mikroelektronik und den Materialwissenschaften. Hier werden neue oxidische, metallische, organische und hybride Funktions- und Nanomaterialien und Strukturen erforscht, die großes Potenzial für zukünftige Mikro- und Nanotechnologien haben und damit Aspekte integrierter Smart Systems, der Nanoelektronik und des Quantencomputings aufgreifen.

In der Leibniz-Gemeinschaft forschen im Wesentlichen die folgenden Institute im Bereich der Quantentechnologien: Das Ferdinand-Braun-Institut – Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH), das Leibniz-Institut für Festkörper und Werkstoffforschung (IFW), das Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP), das Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ), das Leibniz-Institut für Oberflächenmodifizierung (IOM), das Leibniz-Institut für Photonische Technologien (IPHT), das Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik (PDI) sowie das Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik (WIAS).

Zusätzlich werden in der disziplinären Breite der Leibniz-Gemeinschaft auch wirtschafts- und sozialwissenschaftliche Aspekte der neuen Technologien betrachtet und neue Anwendungsbereiche in Natur-, Umwelt- und Lebenswissenschaften erschlossen.

Die interdisziplinär aufgestellten Leibniz-Institute forschen in den drei Schwerpunkten Quantenkommunikation, Quantenmetrologie und -sensorik und Quantencomputing sowie zu den Enabling-Technologien, insbesondere zu Photonik, Laser-, Mikrowellen-, Signal- und Kryotechnik, Steuerelektronik, integrierte Systeme und neue Softwarealgorithmen. Sie entwickeln Materialien für Quantentechnologien und charakterisieren die entsprechenden optischen, elektrischen und strukturellen Eigenschaften, forschen an Effekten der Licht-Materie-Wechselwirkung und Phänomenen der Quanten- und Nanophotonik und leisten so einen grundlegenden Beitrag zu erkenntnisorientierten Forschungsfragen der Quantenphysik. Die Leibniz-Institute versorgen darüber hinaus europäische Forschungsinstitute mit kritischen Materialsystemen, wie zum Beispiel isotopenreinen Halbleitern, und leisten damit einen wichtigen Beitrag zur Erhöhung der Resilienz des Europäischen Forschungsraums. Mithilfe innovativer Prozesse und Prozesstechnologien, aber auch durch Modellierung und Simulation gelingt es, neue Komponenten zu entwerfen und zu entwickeln: elektronische oder opto-elektronische Halbleiterkomponenten, Multi-Qubit-Schaltungen, Quantensensoren und -detektoren, Qubit-Kontroll-, Ansteuer- und Auslese-schaltungen. Einzelne Leibniz-Institute beherrschen die systemische und hybride Integration dieser Komponenten und ermöglichen Proof-of-Concept-Demonstratoren, komplexe Systeme, industrietaugliche Prototypen bis zu Kleinserienproduktion. Für eine abhörsichere Übertragung von verschlüsselten Informationen forschen die Institute im Bereich der Quantenkommunikation zu photonischen Modulen und deren Mikrointegration. In der Quantenmetro-

logie und -sensorik für Navigation, Synchronisierung von Netzwerken, medizinische Diagnostik sowie hochempfindliche bildgebende Techniken werden atomare Quantensensoren, Quantensensoren auf Basis von optisch gepumpten Magnetometern und auf der Basis von Defektzentren sowie sensorische Oberflächen erforscht und entwickelt.

Im Bereich des Quantencomputings, welches für potenzielle Aufgaben in kritischen Anwendungsfeldern wie der Chemie, Meteorologie, dem Finanzwesen und für die Material- oder Medikamentenentwicklung wichtig ist, erforschen die Institute sowohl supraleitende sowie spinbasierte Quantenbit-Systeme als auch Komponenten und Module für optisches photonisches Quantencomputing sowie für Quantencomputing auf Basis isotopenreiner Halbleitersysteme und Ionen.

Die Leibniz-Institute wirken sowohl national in relevanten Projekten, wie dem Exzellenzcluster *ct.qmat – Complexity and Topology in Quantum Matter,* der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland, *QSolid – Quantencomputer im Festkörper, MUNIQC-SC – Munich Quantum Valley Quantencomputer Demonstratoren – Supraleitende Qubits* oder *QYRO – Kernspinbasierte Quantengyroskope für New Space Anwendungen,* als auch international, wie zum Beispiel bei *BECCAL – Bose-Einstein Condensate and Cold Atom Lab* auf der internationalen Raumstation mit. Unter dem Dach des Leibniz-Strategieforums *Technologische Souveränität* haben die Leibniz-Institute 2021 begonnen, ihre Expertise unter anderem zu den Quantentechnologien in einem Cluster zu bündeln und die Zusammenarbeit zu vertiefen.

Zentrum für Digitalisierungs- und Technologieforschung der Bundeswehr (dtec.bw)

Das dtec.bw ist ein von beiden Universitäten der Bundeswehr getragenes wissenschaftliches Zentrum und als Maßnahme Bestandteil des Konjunkturprogramms *Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken* der Bundesregierung von 2020. Es unterliegt der akademischen Selbstverwaltung. Die Mittel, mit dem das dtec.bw vom Geschäftsbereich des Bundesministeriums der Verteidigung (BMVg) ausgestattet wurde, werden an beiden Universitäten der Bundeswehr zur Finanzierung von Forschungsprojekten und Projekten zum Wissens- und Technologietransfer eingesetzt. Eines der laufenden Projekte ist *MuQuaNet – das Quanten-Internet im Großraum München*.

Ziel des Projekts ist es, mit der UniBw München als Kernpunkt ein quantensicheres Kommunikationsnetz für Forschung und Evaluierung zu entwickeln, aufzubauen, zu betreiben und weiteren Forschungseinrichtungen, Behörden und Dienststellen der Bundeswehr zur Verfügung zu stellen. Aus unterschiedlichen Komponenten aufgebaut, soll es die nahtlose Integration in heutige Netzkommunikation vorbereiten, die vielfältigen Einsatzmöglichkeiten demonstrieren und als Blaupause für den Aufbau maßgeschneiderter, hochsicherer Kommunikationsnetze dienen.

7. Glossar

Fehlstellen in Diamant oder NV-Zentren
Verunreinigungen eines Diamantgitters durch einzelne Fremdatome, wie Stickstoff („Nitrogen-Vacancy“). Hierdurch bildet sich ein Anregungsspektrum aus, welches – auch bei Raumtemperatur – als Einzelphotonenquelle, als Recheneinheit eines Quantencomputers oder durch seine Sensibilität gegenüber Magnetfeldern als hochempfindlicher Sensor eingesetzt werden kann.

FuE: Forschung und Entwicklung
Bezeichnet vor allem vorwettbewerbliche Arbeiten in einem Unternehmen oder einer Forschungseinrichtung mit einem signifikanten technischen Risiko. Im Gegensatz zur wettbewerblichen oder experimentellen Entwicklung sowie Produktenwicklung.

Full Stack
Bezeichnet die Summe aller aufeinander aufbauenden Komponenten einer Plattform beziehungsweise eines technischen Gesamtsystems. Ursprünge des Begriffs liegen in der Softwareentwicklung. Bezogen auf das Quantencomputing werden die Hardwarekomponenten aber ebenso einbezogen.

Galileo
Ein von der Europäischen Union betriebenes System von Navigationssatelliten, vergleichbar mit dem amerikanischen GPS (Global Positioning System).

KMU: Kleine und mittlere Unternehmen
Entsprechend der EU-Definition Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeitenden und einem Jahresumsatz von höchstens 50 Mio. Euro oder einer Bilanzsumme von höchstens 43 Mio. Euro.

NISQ: Noisy Intermediate Scale Quantum Computer
Zwischenziel der Realisierung „mittelgroßer“ Quantencomputer mit 50 bis einigen 100 Qubits. Diese sollen das Potenzial von Quantencomputern jenseits von Simulationen aufzeigen, werden aber aufgrund mangelnder Kontrolle über alle Qubits in ihrer Rechenleistung noch stark eingeschränkt sein.

Optische Uhr
Auch Atomuhr. Die Frequenzen von Atomübergängen, meist Cäsium oder Rubidium, können genutzt werden, um daraus ein hochgenaues Zeitsignal zu berechnen. Das Verfahren kommt seit Jahrzehnten für die Messung der Weltzeit zum Einsatz. Weitere technologische Fortschritte des Verfahrens können es aber auch für den künftigen Einsatz in der Telekommunikation oder zur Messung der absoluten Höhe im Gelände befähigen (relativistische Geodäsie).

PQK: Post-Quanten-Kryptografie
Beschreibt das Erfordernis, aktuelle Verschlüsselungsverfahren weiterentwickeln oder ersetzen zu müssen, wenn diese auf Basis der neuen Rechenmöglichkeiten von Quantencomputern als nicht mehr sicher erachtet werden können.

QKD: Quantum Key Distribution
Verschlüsselungstechnologie für die Datenkommunikation. Im Gegensatz zu aktuell eingesetzten Methoden nutzt die QKD die quantenmechanische Eigenschaft der Verschränkung von Zuständen bei der Datenübertragung und ist damit intrinsisch abhörsicher beziehungsweise Abhören könnte immer detektiert werden und würde zum Zusammenbruch der Kommunikation führen.

Quantengyroskop
Bezeichnet ein Messgerät, welches unter Ausnutzung von Quanteneffekten Rotationsbewegungen und dessen Drehraten misst. Einsatzgebiet von (Quanten-) Gyroskopen sind insbesondere Navigationsanwendungen.

Qubits: Quantenbits
Kleinste logische Recheneinheit eines Quantencomputers in Analogie zu den Bits des klassischen Computers. Im Gegensatz zu diesen können Qubits beliebige Zustände auch zwischen „0“ und „1“ annehmen, was eines der wesentlichen Merkmale und potenziellen Vorteile eines Quantencomputers darstellt.

TRL: Technology Readiness Level
Beschreibt den Reifegrad von Technologien. Die Skala reicht dabei von TRL 1 (Beschreibung des Funktionsprinzips) bis TRL 9 (Qualifiziertes System mit Nachweis des erfolgreichen Einsatzes). Das TRL 5 beschreibt einen Versuchsaufbau in Einsatzumgebung.

Impressum

Herausgeber
Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Quantentechnologien; Quantum Computing
53170 Bonn

Download unter
bmbf.de/publikationen

Stand
April 2023

Text
Die Bundesregierung

Gestaltung
neues handeln AG

Bildnachweise
Titel: Fraunhofer ILT, Aachen/Volker Lannert
S. 3, 19, 34: Bayerische Akademie der Wissenschaften BAdW/
Kai Neunert
S. 4, 11, 25: TRUMPF Gruppe
S. 5, 28, 47, 48, 50: Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB
S. 6, 8, 16, 29: MCQST/Jan Greune
S. 9: MPQ/Thorsten Naeser
S. 14: MCQST
S. 18: AdobeStock/Vladimir Borovic
S. 21: AdobeStock/Gorodenkoff/aLListar/peopleimages.com
S. 22: AdobeStock/Have a nice day
S. 31, 32: MCQST/Christoph Hohmann
S. 35, 37, 45: Fraunhofer ILT, Aachen/Volker Lannert
S. 39: Fraunhofer IAF
S. 40: AdobeStock/visoot (KI-generiert)
S. 42: AdobeStock/Gorodenkoff

Diese Publikation wird als Fachinformation des Bundesministeriums für Bildung und Forschung kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

@BMBF_Bund
@bmbf.de
@bmbf.bund

bmbf.de