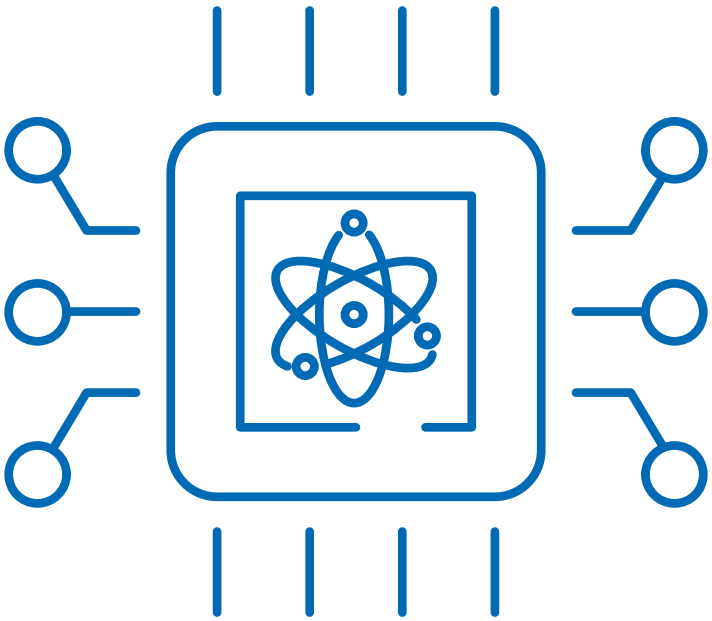
VDE Positionspapier



Quanten-technologien

VDE

Empfohlene Zitierweise
VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.:
VDE Positionspapier Quantentechnologien,
Offenbach am Main (Oktober 2025)

Autoren
Prof. Dr. Immanuel Bloch, LMU München
Prof. Dr. Tommaso Calarco, FZ Jülich
Dr. Michael Förtsch, Q.ANT GmbH
Dr. Sebastian Luber, Infineon Technologies AG
Dr. Heike Riel, IBM Research
Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Fraunhofer IOF
Dr. Thomas Strohm, Robert Bosch GmbH
Dr. Frederick Struckmeier, PioneerLight Technology GmbH
Prof. Dr. Jörg Wrachtrup, Uni Stuttgart

Redaktion
Dr. Thomas Becks, VDE Mitglieder- & Technologienetzwerke, Innovation
Tel: +49 69 6308-311
thomas.becks@vde.com

Vorbemerkung
VDE Positionspapiere geben – entsprechend der Positionierung des VDE als neutraler, technisch-wissenschaftlicher Verband – gemeinsame Erkenntnisse der Mitglieder der Task Force wieder. Die Gemeinschaftsergebnisse werden im konstruktiven Dialog aus häufig unterschiedlichen Positionen erarbeitet. Die Studien spiegeln daher nicht unbedingt die Meinung der durch ihre Mitarbeiter vertretenen Unternehmen und Institutionen wider.

Herausgeber:
VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e.V.
Fachgesellschaft Mikroelektronik,
Mikrosystem- und Feinwerktechnik
Merianstraße 28
63069 Offenbach am Main
Tel. +49 69 6308-330
gmm@vde.com
www.vde.com

Titelbild: © VDE

Oktober 2025

Inhaltsverzeichnis

1. Motivation und Vorgehensweise 4

2. Kurzfassung 5

2.1 Quantenstandort Deutschland 5

2.2 Deutschland im internationalen Vergleich 5

2.3 Impulse zur Stärkung Deutschlands 6

3. Quantentechnologien 9

3.1 Quantencomputing und Quantensimulation 9

3.2 Quantenkommunikation und Post-Quanten-Kryptografie 10

3.3 Quantensensorik und Quantenmetrologie 10

3.4 Basistechnologien und Systeme 11

3.5 Quantenökosystem 12

4. Herleitung der Impulse 12

4.1 Eine gemeinsame Vision entwickeln und mit Roadmaps untermauern 12

4.2 Ökosysteme und Infrastruktur ausbauen 13

4.3 Forschungs- und Innovationsförderung effizient gestalten 14

4.4 Wettbewerb um die besten Köpfe gewinnen 18

4.5 Anwendung in den Mittelpunkt stellen und Anwender aktiv heranführen 18

4.6 Internationale Normung und Standardisierung begleiten 19

4.7 Quantum Initiative Deutschland aufbauen 20

5. Statements der Autoren 22

5.1 Autorenliste 23

6. Fazit 24

7. Literatur 25

8. Glossar 27

1. Motivation und Vorgehensweise

Im Sommer 2020 hat die Bundesregierung im Rahmen des Konjunktur- und Zukunftspakets zwei Milliarden Euro für Quantentechnologien bereitgestellt. Im April 2023 folgte dann ihr „Aktionskonzept Quantentechnologien“ [BMBF 2023], um Deutschland bis 2026 wirtschaftlich in der Weltspitze der Quantentechnologien zu etablieren. Das Konzept basiert auf den Erkenntnissen der „Agenda Quantensysteme 2030“ [VDI-TZ 2021], in der bereits 2021 über 300 Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie den Forschungsbedarf und die Herausforderungen der nächsten Jahre zusammengetragen haben. Die hohe Bedeutung des Themas spiegelt sich auch im Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit [EFI 2025] wider, das dem Thema ein eigenes Kapitel widmet.

Es lohnt sich daher, zu Beginn des Jahres 2025 eine Bestandsaufnahme vorzunehmen und auf dieser Basis Impulse für ein kohärentes und zielgerichtetes weiteres Vorgehen zu geben. Das VDE Impulspapier Quantentechnologien will hierzu einen Beitrag leisten. Kohärenz und Fokussierung sind für Deutschland aus drei weiteren Gründen von zentraler Bedeutung:

- Wir stehen vor erkennbaren Herausforderungen bei der Gestaltung kommender Bundeshaushalte in wirtschaftlich und politisch schwierigen Zeiten. Die Förderung sollte aus der Breite kommend jetzt fokussiert werden. Wir benötigen eine Optimierung der Forschungsförderung hinsichtlich Zielen, Themen, Auswahl und Koordinierung.
- Deutschland fehlen große IT-Technologieunternehmen wie AWS Amazon Web Services, Apple, IBM und Microsoft, die Quantentechnologien mit großem Engagement in ihren FuE-Agenden vorantreiben. Wir setzen auf die immer erfolgreichere Verzahnung von Grundlagenforschung, Start-ups und Industrie, die Koordination erfordert.
- In der Vergangenheit konnten wir unsere großen Erfolge in der Grundlagenforschung oft nicht oder nicht schnell genug in Wertschöpfung durch Innovation und damit wirtschaftlichen Erfolg umsetzen. Erfolgreiche Grundlagenforschung muss zum Schlüssel für Wertschöpfung und Wohlstand werden.

Die Bedeutung des Themas Quantentechnologien als Deep Tech mit dem Potenzial für disruptive Innovationen wird nicht nur durch positive wirtschaftliche Prognosen unterstrichen. Die Generalversammlung der Vereinten Nationen hat das Jahr 2025 zum „Internationalen Jahr der Quantenwissenschaften und Quantentechnologien“ und den Beginn einer neuen Ära ausgerufen.

Das VDE Impulspapier Quantentechnologien gibt konkrete Anregungen für Veränderungen. Diese sollten in Wissenschaft, Wirtschaft und Politik diskutiert werden. Denn gerade im Bereich Deep Tech sind rasante Veränderungen und Disruptionen die Regel. Das Impulspapier ist in Zusammenarbeit mit Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft entstanden, die sich seit Jahren mit der Entwicklung von Quantentechnologien beschäftigen. Auf Basis einer Ist-Analyse wurden Leitfragen entwickelt, die nach den Chatham-House-Regeln mit den Experten diskutiert wurden. Das so entstandene Konzeptpapier wurde gemeinsam zum Impulspapier weiterentwickelt.

2. Kurzfassung

Quantentechnologien können in vielen Branchen zu bahnbrechenden Innovationen führen. Dazu gehören Chemie, Cybersicherheit, Finanzen, Lebenswissenschaften, Materialwissenschaften, Medizin, Mobilität und Telekommunikation. Die Bundesregierung hat daher seit 2020 Maßnahmen ergriffen, um Deutschland als führenden Standort für industrielle Anwendungen auf Basis von Quantentechnologien zu etablieren. Wie bei Deep Tech üblich, sind auch bei den Quantentechnologien schnelle Veränderungen und Disruptionen die Regel. Dies und der Arbeitsbeginn einer neuen Bundesregierung geben Anlass, das Erreichte einzuordnen und Impulse für die kommenden Jahre zu setzen.

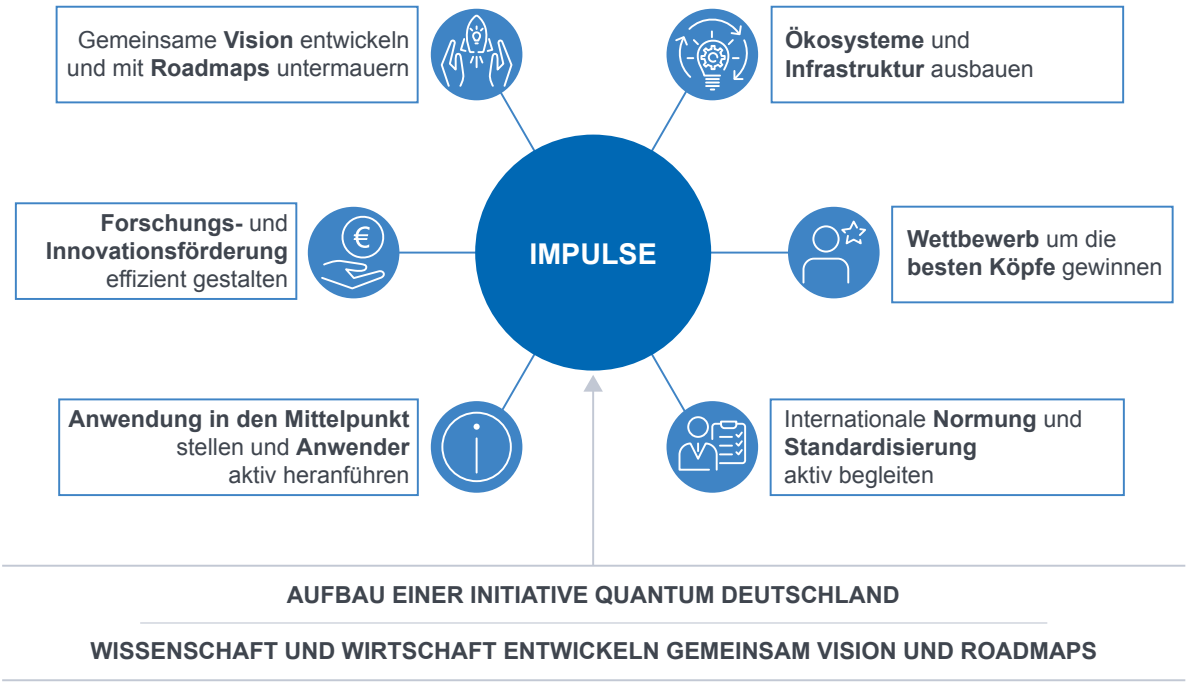
2.1 Quantenstandort Deutschland

Die Zusammenarbeit zwischen Grundlagenforschung und jungen Unternehmen funktioniert in Deutschland sehr gut. So wird unsere international hoch angesehene Grundlagenforschung mit der Industrialisierung und Skalierung verbunden. Dies trotz teilweise hoher bürokratischer Hürden, wie z. B. dem in Deutschland oft sehr streng ausgelegten Wettbewerbsrecht. In den Regionen München, Stuttgart/Ulm, Jülich und Braunschweig haben sich gut funktionierende Ökosysteme gebildet, die diese Verzahnung etablieren konnten. Erste Produkte wie Quantenmagnetometer, Partikelsensoren, Gravimeter und Produkte für IT-Sicherheit kommen gerade auf den Markt. Deutschland sollte aber auch das Land der Anwender von Quantentechnologien werden. Hier ist noch eine gewisse Zurückhaltung zu beobachten, die auf mangelndes Wissen, zu wenig Erfahrung und einen eher evolutionären Ansatz in vielen Branchen zurückzuführen ist. Zudem sind die Quantentechnologien (insbesondere das Quantencomputing) teilweise noch nicht unausgereift und einige Jahre davon entfernt, der Industrie und den Endnutzern einen konkreten Nutzen bieten zu können.

2.2 Deutschland im internationalen Vergleich

Das Fehlen großer IT-Technologieunternehmen wie in den USA versucht Deutschland durch funktionierende Ökosysteme aus Grundlagenforschung, Industrie und Start-ups zu kompensieren. Diese Ökosysteme werden von der Bundesregierung mit erheblichen Fördermitteln unterstützt. In der Förderpolitik sind ungenutzte Potenziale erkennbar. Projekte und Projektförderungen sind mitunter nicht zielgerichtet genug. Die Ministerien und Referate folgen drei Handlungssträngen und lassen sich bei der Entwicklung ihrer Maßnahmen jeweils von Experten beraten. Im Ergebnis sind Lücken oder Überschneidungen erkennbar. Die Forschungsförderung in den USA ist sehr zielgerichtet, Unternehmen in der Scale-up-Phase erhalten mehr Risikokapital als in Deutschland. Südkorea hat eine gemeinsame Vision von Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft, die von Großunternehmen gesetzt wird, China setzt enorme Ressourcen ein. Betrachtet man die einzelnen Technologiefelder, so ergibt sich folgendes Bild:

- Deutschland liegt beim **Quantencomputing** zwei bis drei Jahre zurück, andere verfolgen einen stringenteren Ansatz.
- Bei der **Quantensimulation,** also der Modellierung und Simulation komplexer Quantensysteme, liegt Deutschland in der Spitzengruppe.
- In der **Quantenkommunikation** ist Deutschland mit ersten Versuchsnetzen im internationalen Spitzenfeld unterwegs. Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) und die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) koordinieren in einem Schirmprojekt die nachhaltige Sicherung des Technologietransfers aus der Wissenschaft in die Wirtschaft und die Schaffung der Grundlagen für den Aufbau einer deutschen Quantenkommunikationsindustrie.
- Deutschland agiert auf dem Gebiet der **Quantensensorik** und **Quantenmetrologie** auf Augenhöhe mit der internationalen Spitze.



2.3 Impulse zur Stärkung Deutschlands

Deutschland sollte sich in der nächsten Entwicklungsphase auf die erfolgskritischen Themen konzentrieren und dort die Entwicklung beschleunigen, seine Ökosysteme weiter ausbauen und die Anwender von Quantentechnologien stärker unterstützen und einbinden. Vor diesem Hintergrund lassen sich sieben Impulse ableiten, die im Folgenden mit Vorschlägen für Maßnahmen unterlegt werden.

Eine gemeinsame Vision entwickeln und mit Roadmaps untermauern

Deutschland kann auf dem Erreichten aufbauen und seine Stärken weiter stärken. Dazu brauchen wir

- eine **gemeinsame Vision für Quantentechnologien** (Moonshot-Ansatz), die von Wissenschaft und Wirtschaft entwickelt und von Politik (bis in die Leitungsebene) und Gesellschaft getragen wird,
- von Expertinnen und Experten entwickelte **Technologie- und Entwicklungs-Roadmaps** mit messbaren Zielen und Meilensteinen, die von den Ministerien mit gezielten Förderprogrammen unterstützt werden,
- einen **ehrlichen Umgang mit Erwartungen** und einen **konstruktiven Umgang mit weniger erfolgreichen Projekten,** die in der Innovationsforschung nicht ungewöhnlich sind.

Ökosysteme und Infrastruktur ausbauen

Deutschland profitiert von einer immer besseren inhaltlichen und fachlichen Verzahnung von Grundlagenforschung, Industrie und Start-ups, die Quantentechnologien in die Anwendung bringen.

- Die Quanten-Ökosysteme in den Regionen München, Stuttgart/Ulm, Jülich und Braunschweig sollten als **Zentren für Quantentechnologien strategisch ausgebaut** werden.
- Die öffentlich geförderten **Hightech-Infrastrukturen** in diesen Ökosystemen sollten nach festgelegten Regeln auch **für andere Projekte niedrigschwellig zugänglich** sein.
- **Pilotlinien,** die **mit konstanter Qualität** arbeiten, sind wichtig, um die Produktreife zu erhöhen. Die **Wirtschaft sollte eng in die Umsetzung solcher Pilotlinien eingebunden werden,** um zu vermeiden, dass öffentlich geförderte Initiativen zu einer ungewollten Konkurrenz für die Unternehmen werden. Zur Überbrückung der defizitären Startphase sollten finanzielle Ausgleichszahlungen an die beteiligten Unternehmen erfolgen.
- Start-ups konzentrieren sich auf ihre Quantenkompetenz. **Mentoren unterstützen Start-ups** mit Lösungskompetenz zu Basistechnologien. Die **Industrie stellt Basistechnologien in Kleinserien zur Verfügung.** Dafür werden **fördertechnisch Anreize** geschaffen.
- **Partnering mit etablierten Unternehmen** hilft dabei das Scale-up von Start-ups zu beschleunigen. Das kann auch die **Aggregation von Start-ups** bedeuten, die sich komplementär ergänzen.
- Der Staat unterstützt die Wirtschaft bei der **Nutzung von Quantentechnologien für Pilotprojekte,** und fördert den entstehenden Markt als **Ankerkunde und durch Forschungskäufe.**

Forschungs- und Innovationsförderung effizient gestalten

In der anlaufenden Legislaturperiode sollte die Bundesregierung ihre Förderung kohärent gestalten, weniger breit, sondern thematisch auf die kritischen Pfade fokussiert. Sie sollte bestehende Ökosysteme stärken und die Nutzer einbeziehen. Aus der Betrachtung der vergangenen Jahre lassen sich folgende Impulse ableiten:

- Unsere Grundlagenforschung ist die Basis für Innovationen. **Grundlagenforschung muss konsequent gefördert werden. Forschende brauchen Freiräume.**
- Der **Wissenschaftsstandort Deutschland** ist in den letzten Monaten für internationale Forscherinnen und Forscher wieder interessanter geworden. **Anreize für ihre Ansiedlung** sollten geschaffen werden.
- Der bereits erfolgreich funktionierende **Transfer von der Grundlagenforschung in die angewandte Forschung und insbesondere Produktentwicklung und Industrialisierung sollte weiter ausgebaut werden.** Die Förderprogramme sind entsprechend auszugestalten.
- Die **Förderung von Existenzgründungen** sollte **intensiviert** und finanziell aufgestockt werden. Dazu sind auch die nationalen/europäischen **Bestimmungen und Subventionsregeln** im internationalen Vergleich zu **überprüfen** und wenn notwendig zu **ändern.**
- **Für etablierte Unternehmen sollten Anreize geschaffen werden,** frühzeitig in dieses Innovationsfeld einzusteigen und so die Entwicklung und Industrialisierung in Kooperation mit Start-ups und der akademischen Forschung massiv zu beschleunigen.
- **Hardwareentwicklung und Informationstechnik** zur Nutzung und Integration der entwickelten Komponenten in Geräte und Systeme sollten in Förderprogrammen und Förderprojekten **gemeinsam unterstützt** werden.
- **Keine Trennung von Hard- und Software** nach Ressorts oder Förderprogrammen, da sie in der Anwendung zusammenwirken. Eine Trennung kann zwischen Grundlagen- und Anwendungsforschung erfolgen.
- Die **Vergabe von Fördermitteln** sollte auf der Grundlage von messbaren **Zielen und Zwischenzielen** erfolgen, laufende Projekte in **Experten-Reviews** einem Stresstest unterzogen werden, nach dem Ziele bei nachvollziehbaren Gründen geändert werden dürfen. Ein **Stopp von Projekten** sollte **ohne nachträgliche Sanktionen** möglich sein.
- Die **Zusammenarbeit** zwischen den beteiligten Ressorts und Bundesministerien sollte besser abgestimmt, **kohärenter** sein und **einer Top-down-Strategie folgen.** Es ist zu prüfen, ob hierfür auch **neue Strukturen in den Bundesministerien** oder **ressortübergreifende Strukturen** sinnvoll sind.

Die DLR[1] Quantencomputing Initiative arbeitet außerhalb des regulären Förderschemas mit Ausschreibungen. So wurde ein neues Finanzierungsmodell geschaffen, das sich ähnlich bei der ESTEC[2] bereits bewährt hat. Einige Unternehmen konnten sich wegen der Ausschreibungsbedingungen nicht beteiligen. Hier könnte nachgesteuert werden, indem die **Intellectual Property Rights grds. bei den Unternehmen bleiben,** die **Haftungsanforderungen** beim Ausfall von Konsortialpartnern **gesenkt** und die **Mittel nur an nationale Organisationen vergeben** werden und hierfür ggf. die beihilferechtlichen Rahmenbedingungen angepasst werden.

Deutschland ist gut beraten, sich bei den Quantentechnologien in enger Abstimmung mit der Europäischen Union zu positionieren und die Skaleneffekte der EU aktiv zu nutzen.

- Die **EU-Pilotlinien** sollten den oben genannten Anforderungen an nationale Pilotlinien folgen und auf die **Industrialisierung von Kleinserien** ausgerichtet sein.
- Die **Entwicklung und Anwendung von Quantencomputern** sollte in der EU **zusätzlich zum JU EuroHPC**[3] mit eigenen Fördermitteln ausgestattet werden.
- In der EU sollte ein **freier Zugang zu Quantencomputern zu marktüblichen Preisen** geschaffen werden. So können potenzielle Nutzer frühzeitig Lernkurven durchlaufen.
- Auch in der EU sollte eine **thematisch fokussierte Förderung** erfolgen. **Deutschland** sollte sich daher intensiv an der Entwicklung der geplanten **europäischen Roadmap beteiligen.** Zudem sollte Deutschland dazu beitragen, dass die QT-Aktivitäten der EU und derer Mitgliedstaaten miteinander koordiniert werden.
- Ähnlich wie in Deutschland sollte auch die EU auf **exzellenzbasierte regionale Ökosysteme** setzen, **die europaweit miteinander vernetzt sind.**
- Als größter Beitragszahler sollte Deutschland stärker darauf achten, dass die **eingesetzten Mittel nach Deutschland zurückfließen** bzw. einen **Nutzen für deutsche Aktivitäten bieten.**

Die Wissenschaft will auf dem Gebiet der Quantentechnologien weltweit und ideologisch multilateral in einer Welt der Vereinten Nationen (UN) zusammenarbeiten. Ziel ist die Mobilisierung aller Fähigkeiten der Menschheit für ein beschleunigtes Verständnis der Natur, für Wohlstand und neue Fähigkeiten. Trotz der zunehmenden Abschottung der großen Wirtschaftsräume gegeneinander gibt es dafür auch Chancen:

1 DLR – Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
2 ESTEC – European Space Research and Technology Centre
3 JU EuroHPC – European High Performance Computing Joint Undertaking

- Die Politik sollte die internationale **Zusammenarbeit mit gleichgesinnten Ländern** auch über die Grenzen der EU hinaus stärken und intensivieren.
- Sie kann dabei auf **bewährte Modelle wie das CERN**[4] zurückgreifen, dessen Infrastruktur und Daten im Jahr 2023 ca. 12.000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus über 80 Ländern zur Verfügung stand.

Wettbewerb um die besten Köpfe gewinnen

Deutschland und seine Ökosysteme für Quantentechnologien stehen im internationalen Wettbewerb um die besten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, Nachwuchsforschenden und Innovatoren. Wissen ist die einzige natürliche Ressource Deutschlands. Um diese zu stärken,

- sollten wir durch eine öffentlichkeitswirksame Berichterstattung über Quantentechnologien und Deep Tech insgesamt mehr junge Menschen **für physikalisch-technische Studiengänge begeistern,**
- sollten wir Postdoktoranden durch **attraktive Forschungsangebote oder Möglichkeiten/Unterstützung zur Unternehmensgründung** in Deutschland halten,
- sollten wir uns darüber im Klaren sein, dass im (globalen) Wettbewerb der Regionen **Quantentechnologien dort angesiedelt werden, wo junge Menschen leben und arbeiten wollen,**
- können wir durch einfache Maßnahmen, wie die zeitliche Synchronisation der Bewerbungs- und Auswahlverfahren mit internationalen Gepflogenheiten, die besten **Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler aus aller Welt** nach Deutschland holen.

Anwendung in den Mittelpunkt stellen und Anwender aktiv heranführen

Deutschland agiert oft zu technologiegetrieben. Die größte Herausforderung ist derzeit jedoch nicht die Technologie, sondern deren wahrgenommener Mehrwert und damit eine zurückhaltende Nachfrage seitens der Anwenderinnen und Anwender. Maßnahmen zur Stärkung der Anwendung sind:

- **Neue Veranstaltungsformate,** in denen Anwenderinnen und Anwender alles über verschiedene, für sie relevanten Technologien (auch Quantentechnologien) und ihre Potenziale erfahren und die **besten Partner für eine Zusammenarbeit finden.**
- **Anwenderinnen und Anwender werden** bei der pilothaften Anwendung von Quantentechnologien durch Förderzusagen **unterstützt und berichten** im Gegenzug öffentlich über ihre Erfahrungen.
- Gründerinnen und Gründer achten stärker auf **Kosten- und Nutzungsvorteile für die Nutzerinnen und Nutzer,** beziehen diese frühzeitig in die Produktentwicklung ein und sorgen für mehr **Gebrauchstauglichkeit.**
- **Die öffentliche Hand tritt als Anwender** von Quantentechnologien auf.

Internationale Normung und Standardisierung begleiten

Normen und Standards geben Investitionssicherheit und schaffen Märkte. Im Übergang von der Grundlagenforschung zum Produkt gilt: „Standardisierung ist immer zu früh und immer zu spät." Folgende Impulse können abgeleitet werden:

- Für einen **schnellen Markthochlauf** sollten Quantensensoren/Quantencomputer **über vorhandene Standardschnittstellen** in IoT-Systeme/HPC-Architekturen integrierbar sein.
- **Zukünftige Standards** werden von den leistungsfähigsten Komponenten und Systemen gesetzt. Das versuchen derzeit China und US-Unternehmen. Dies Anstrengungen sollten wir **aktiv begleiten.**
- In Europa haben CEN/CENELEC die weltweit **erste Normungsroadmap für Quantentechnologien** veröffentlicht, um Europa an die Spitze der Standardisierung zu bringen. Diesen Weg sollten wir **unterstützen.**

Quantum Initiative Deutschland aufbauen

Es gibt seit kurzem einen Vorstoß zur Gründung von „Quantum Deutschland, der nationalen Initiative für Quantentechnologien". Die Gründung einer **Quanteninitiative Deutschland, die eine Roadmap entwickelt und die Politik berät,** kann ein sinnvoller Weg sein, unseren Wirtschaftsstandort zu stärken und schnell und effizient den Weg von der Grundlagenforschung in die Anwendung zu finden. Diese Initiative sollte unterstützt werden durch

- **unterschiedlichen Fachdisziplinen** (physikalische Technologien, Informationstechnik, Mikrosystemtechnik, Elektrotechnik, Maschinenbau etc.),
- **beteiligte Branchen** (Institute, Halbleiterindustrie, Computerindustrie, Kommunikationsindustrie etc.) und
- **alle Unternehmensgrößen** (Start-ups, Scale-ups, Mittelstand und Großindustrie).

Wichtig ist der Fokus auf Ziele und Inhalte mit agilen, anpassungsfähigen Strukturen.

4 CERN – Europäische Organisation für Kernforschung

3. Quantentechnologien

Die Entwicklung der Quantentechnologien schreitet voran. Sie haben das Potenzial, bis 2035 Werte in Billionenhöhe zu schaffen. Quantentechnologien umfassen Quantencomputing, Quantensensorik und Quantenkommunikation. Insbesondere im Bereich Quantencomputing werden vier Sektoren von zukünftigen Quantentechnologie-Anwendungen profitieren: Chemie, Lebenswissenschaften, Finanzen und Mobilität. Hier sind bis 2035 Umsätze und Kosteneinsparungen von bis zu zwei Billionen US-Dollar möglich [McKinsey 2024].

In den vergangenen drei Jahren gab es in der deutschen und europäischen Forschung keine größeren Durchbrüche aber eine stetige Verbesserung der Quantentechnologien.

3.1 Quantencomputing und Quantensimulation

Der Fokus beim Quantencomputing liegt derzeit darauf, einen „Quantenvorteil" zu erzielen, also in einigen nützlichen Anwendungen besser zu sein als ein konventioneller Computer. Danach wird erwartet, dass Quantencomputing durch Miniaturisierung und Skaleneffekte kostengünstiger wird. In der Regel muss der gesamte Stack selbst entwickelt werden, da potenzielle Zulieferer aufgrund der geringen Stückzahlen und der unklaren Entwicklung des Quantencomputings das Risiko scheuen, sich aktiv in die Wertschöpfungskette einzubringen. Dies stellt insbesondere Start-ups im Bereich Quantencomputing vor große Herausforderungen, da sie nicht über die notwendigen Entwicklungsressourcen verfügen und die Komplexität teilweise unterschätzen. Hier sollte eine stärkere Brücke zur Industriekompetenz geschlagen werden.

Quantencomputer können unterschiedlich technologisch skalierbar realisiert werden. Weiter fortgeschritten sind Quantencomputer basierend auf

- in mikrostrukturierten Ionenfallen gefangenen Ionen,
- auf supraleitenden Qubits in supraleitenden Mikrowellenresonatoren, oder auf
- neutralen Atomen in optischen Gittern, oder auf
- Stickstoff-Fehlstellen-Zentren in Diamant, oder auf
- Elektronenspins in Quantenpunkten von Halbleitern oder auf
- Photonik.

Die Hardware von Quantencomputern hat in den letzten zwei Jahren durch die Verbesserung der Quantenfehlerkorrektur Fortschritte gemacht. Aufgrund der instabilen Natur von Qubits (Quantenbits – Quantensystem mit zwei Zuständen) sind Quantencomputer heute noch sehr fehleranfällig. Werden mehrere Rechenschritte hintereinander ausgeführt, verrauschen die Ergebnisse. Sie sind unbrauchbar, weil der Übergang zwischen den Zuständen durch unbeabsichtigte, äußere Einflüsse passiert. Qubit-Fehler zu erkennen und während des Rechnens zu korrigieren, ist das Ziel der Quantenfehlerkorrektur.

Neben den immensen Herausforderungen bei der Hardware liegen die größten Hürden derzeit vor allem im Bereich der Software für Quantencomputer. Es gibt nur wenige sehr gute Basisalgorithmen. Daher können nur Probleme gelöst werden, die sich auf diese Basisalgorithmen zurückführen lassen. Dies schränkt den Lösungsraum ein oder führt zu ineffizienten Lösungen. Es stellt sich daher die Frage, welche Klasse von Problemen mit Quantencomputern prinzipiell effizienter gelöst werden kann als mit klassischen Computern. Hier ist eine breitere Basis an Basisalgorithmen unbedingt notwendig. Informatikerinnen und Informatiker schauen eher auf die Rechengeschwindigkeit, ihr Ziel ist deren exponentielle Steigerung. Der industrielle Anwender will kostengünstige Lösungen für seine Probleme. Hier besteht ein Zielkonflikt, der gelöst werden muss. Entscheidende Lösungen hierfür kommen derzeit nicht aus Deutschland.

Kommerzialisierbare Quantencomputer, die in Hyperscale-Architekturen eingesetzt werden können, sind in diesem Jahrzehnt nicht zu erwarten. Derzeit wird in der Presse viel übertrieben positiv über Quantencomputer berichtet. In Europa gibt es nur wenige Unternehmen, die funktionierende Quantencomputer bauen: IBM Research in Zürich, IQM Finland Oy in Finnland, Pasqual in Frankreich und Alpine Quantum Technologies (AQT) in Innsbruck gehören dazu. Europa hat also durchaus die Fähigkeit, eigene Quantencomputer zu bauen. Wir haben in Europa keine technische Schwäche, sondern eine wirtschaftliche. Hier sollte mehr Realismus eingefordert werden. **Deutschland liegt beim Quantencomputing zwei bis drei Jahre zurück, andere verfolgen einen stringenteren Ansatz. Bei Quantencomputer, die auf Ionenfallen oder supraleitenden Ansätzen basieren, liegen wir weiter zurück.**

Weitere Ansätze gehen in Richtung von Quantencomputing bei Raumtemperatur. So entwickelt beispielsweise die Firma Advanced Quantum in Zusammenarbeit mit dem DLR einen mobilen Zwei-Qubit-Quantencomputing-Demonstrator, der den Festkörperspin in Siliziumkarbid nutzt. Dieses bisher eher aus der Leistungselektronik bekannte Halbleitermaterial könnte den Betrieb von Quantencomputern bei Raumtemperatur auf dem Schreibtisch ermöglichen. Auch Stickstoff-Fehlstellen-Zentren in Diamantgittern (NV Zentren) können Raumtemperatur-Quantencomputing ermöglichen, hier gibt es ebenfalls Start-ups wie SaxonQ mit funktionierenden Maschinen.

Bei der Quantensimulation, also den Grundlagen der Quantenphysik und der Modellierung von Quantensystemen, liegt Deutschland in der Spitzengruppe.

3.2 Quantenkommunikation und Post-Quanten-Kryptografie

Die Quantenkommunikation wird wahrscheinlich eine Schlüsseltechnologie für die Sicherheit digitaler Infrastrukturen in unserer Gesellschaft werden. Sie verspricht durch die Nutzung quantenphysikalischer Effekte eine abhörsichere Übertragung in Kommunikations- und Informationsnetzen.

Technisch werden bei der Quantenkommunikation Quantenzustände über kurze bis lange Distanzen ausgetauscht. Bei langen Distanzen steht die schnelle und abhörsichere Kommunikation im Vordergrund. Hier kann mit vergleichsweise einfachen Methoden gemessen werden, ob die Verbindung abgehört wird. Allerdings setzen die Verlustmechanismen in der Glasfaser den erzielbaren Übertragungsdistanzen Grenzen. Quanten-Repeater bieten hier eine Lösung. Die Technologie ist aber komplex. Erste Schritte auf dem Weg zu einsetzbaren Quanten-Repeatern wurden 2023 demonstriert.

Die Quantenkommunikation über kürzere Distanzen ermöglicht einen einfacheren Aufbau skalierbarer Quantencomputer analog zu einem Parallelrechner in der digitale Welt. Supraleitende Schaltkreise, in denen Qubits in Mikrowellenphotonen kodiert sind, bilden derzeit die führende Plattform für Quantencomputer. Diese Qubits sind jedoch an die ultrakalte Umgebung eines Verdünnungskühlschranks gebunden, um zu verhindern, dass thermisches Rauschen die empfindlichen Quantenzustände zerstört. Dies kann aufgrund der Kühlvolumina eine Herausforderung für die Skalierung der Systeme darstellen. Eine mögliche Lösung ist die Nutzung modularer Systeme mit supraleitende Schaltkreise, die bei Raumtemperatur durch superschnelle Quantenkommunikation untereinander verbunden werden.

Schon heute müssen Verschlüsselungsverfahren entwickelt werden, die auch gegen zukünftige Angriffe mit Quantencomputern gewappnet sind. Bei der Quantenkryptographie oder Quantenschlüsselverteilung (QKD – Quantum Key Distribution) wird der Schlüssel zu einer geheimen Information auf der Basis einzelner Quantenzustände erzeugt. Während die Verschlüsselung weiterhin mit weitgehend quanten-sicheren Methoden der klassischen symmetrischen Kryptographie geschieht (z. B. AES-256, ein Advanced Encryption Standard), erfolgt die Erzeugung gemeinsamer geheimer Schlüssen der Kommunikationspartner nun physikalisch und nicht mehr mathematisch. Sie kann daher auch von Quantencomputern nicht mehr geknackt werden. In Ergänzung gibt es die Post-Quanten-Kryptografie (PQK), die auch mit herkömmlichen Computern funktioniert. Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik und die Physikalisch-Technische Bundesanstalt arbeiten im Rahmen des Schirmprojekts SQuaD [SQuaD 2025] mit ca. 20 Partnerorganisationen intensiv an beiden Verfahren. Im Rahmen der QuNET-Initiative [QuNET 2025] wurden in Zusammenarbeit mit der Industrie erste Demonstratoren entwickelt:

- Hybride QKD-PQK Ansatz in einer heterogenen Netzwerkarchitektur für DV-, CV-QKD[1] sowie verschränkungsbasierte Protokolle in Faser und Freistrahl-Übertragungen zwischen BMBF und BSI im Modell eines Behördennetzwerks.
- Demonstration einer mobilen QKD-Einheit für Freistrahl-Übertragungen mit kBit/s Schlüsselraten im Tandem mit Faser-Netzwerken für ad-hoc Übertragungen im urbanen Ökosystem von Jena.
- Demonstration einer >100 km sternförmigen, multi-user QKD-Architektur im Berliner Netzwerk zur gesicherten Übertragung von persönlichen Daten im Anwendungsszenario einer öffentlichen Dienstleistung der Bundesdruckerei zur Ausstellung von Ausweisdokumenten.

Erste QKD-Systeme wurden z. B. von den deutschen Start-ups KEEQuant und Quantum Optics Jena bereits für terrestrische Infrastrukturen ausgeliefert. Hier kommen die Aufträge noch primär aus dem öffentlichen Bereich, aber erste Kunden aus verschiedenen Wirtschaftsbereichen sind aktiv, z. B. im Banken- und Finanzsektor. Dies sind nur erste Schritte der Wertschöpfung, die aber bereits heute stattfinden und im internationalen Raum noch ausgeprägter sind, z. B. explorative Aktivitäten im Bereich QKD sichere Kommunikation von HSBC, J.P. Morgan, Crédit Agricole, Japan Post Bank, CITI Group, RBC, Barclays, Wells Fargo, ING, etc.

In der Quantenkommunikation ist Deutschland mit ersten Versuchsnetzen im internationalen Spitzenfeld unterwegs. Eine funktionierende nationale Community hat sich gebildet.

3.3 Quantensensorik und Quantenmetrologie

Quantensensoren können bestehende Produkte ersetzen oder ganz neue Märkte erschließen. Deshalb arbeiten auch führende Halbleiterhersteller wie Bosch mit Bosch Quantum Sensing [Bosch QS 2025] und Infineon Technologies [Infineon 2025] an diesem Thema. Ein weiterer Grund ist, dass einige der dort produzierenden Technologielinien relativ einfach um Komponenten für Quantensensoren und Quantentechnologien im Allgemeinen erweitert werden können.

1 CV-QKD: Continous Quantum Key Distribution; DV-QKD: Discrete Quantum Key Distribution

Erste Quantenmagnetometer sind bereits auf dem Markt. Mit Quantenmagnetometern können Magnetfelder im Frequenzbereich von DC bis zu einigen kHz mit sehr kleinen Sonden (Volumen z. B. 0,24 l [QANT 2025a]) gemessen werden. Typische Anwendungsgebiete sind die Medizintechnik und die Messung von Erdmagnetfeldern zur Exploration von seltenen Metallen. In der Magnetokardiographie, einem typischen Beispiel aus der Medizintechnik, ermöglichen sie die Simulation der elektrophysiologischen Erregung des Herzmuskels aus der Messung des Herzmagnetfeldes.

Gegenwärtige Entwicklungen in der Quantensensorik bieten grundlegende Leistungssprünge sowie gänzlich neue Funktionen als Treiber für kurz- bis mittelfristige Einführung in die Anwendung im Medizinsektor. Neben den technischen Herausforderungen sind Zertifizierungsprozesse in medizinischen Anwendungen ein wesentlicher Faktor im Zeithorizont zur Einführung. Erste konkrete Anwendungen und Produkte sind aus technischer Sicht in den nächsten 5 (+/- 2) Jahren denkbar, können jedoch durch die notwenigen Prüfverfahren und Zulassungsbedingen für den Medizinsektor verlangsamt werden.

In einem BMBF-Förderprojekt wird seit 08.2022 ein Quantengyroskop für die genaue Ausrichtung von Satelliten entwickelt: Implementation 2024, Start des Satelliten in 04.2027 [BMBF QYRO 2025]. Ein Partikelsensor zur Echtzeitanalyse von Größe, Geschwindigkeit und Flugbahn von Partikeln ist ebenfalls auf dem Markt [QANT 2025c]. Typische Anwendungen sind in Biotechnologie, Chemie und Werkstoffentwicklung. Erste tragbare Quantengravimeter zur Messung von Massenänderungen im Untergrund sind am Vulkan Ätna in Italien im Einsatz [Antoni-Micollier 2022].

Derzeit gibt es nur einen kleinen Markt für Quantensensoren. Die Einführung von Quantensensoren in großen Stückzahlen hängt von der Anwendung und der Halbleiterindustrie ab. Beispiel Automobilindustrie: Diese geht aufgrund der notwendigen Robustheit (mechanische Belastung, Temperaturbelastung, Lebensdauer) sehr konservativ an Neuentwicklungen heran. Neue Sensoren in lange erprobten Technologien müssen einen Performance-Vorteil von 30 % bieten. Bei neuen Technologien, wie z. B. der Quantentechnologie, müssen die PerformanceVorteile unabhängig von der bestehenden Erprobung bei 100 % liegen. Für die Halbleiterindustrie beginnen die interessanten Jahresstückzahlen oft erst im sieben- oder achtstelligen Bereich. Hier müssen neue Strategien für den Markthochlauf entwickelt werden.

In der Quantenmetrologie werden Quanten für die Festlegung von Maßeinheiten und für andere hochpräzise Forschungsarbeiten genutzt. 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 steigern oder Messungen überhaupt erst zu ermöglichen. Die PTB in Braunschweig leistet hier grundlegende Arbeiten.

Deutschland agiert auf dem Gebiet der Quantensensorik und Quantenmetrologie auf Augenhöhe mit der internationalen Spitzenforschung.

3.4 Basistechnologien und Systeme

Viele Start-ups haben eine Kernkompetenz in Quantentechnologien und starten mit dem Wissen eines Laboraufbaus in einer wissenschaftlichen Einrichtung. Sie unterschätzen oft die Komplexität vermeintlicher Randthemen und den Aufwand für die Industrialisierung des Produktes. Häufig wollen sie das gesamte Produkt im eigenen Unternehmen entwickeln und produzieren, verfügen nicht über ausreichende Entwicklungsressourcen oder scheitern an der Komplexität der notwendigen Basistechnologien. Dazu gehören unter anderem Mikrosystemtechnik, Aufbau- und Verbindungstechnik, Elektronik, Glaszellen, Vakuumkomponenten und Kühlung.

Potenzielle Anbieter von Basistechnologien wiederum scheuen die kleinen Stückzahlen, die insbesondere in der Anlaufphase nachgefragt werden. Hier sollte eine stärkere Brücke zur Industriekompetenz geschlagen werden. Start-ups benötigen regelmäßigen und verlässlichen Output aus Pilotlinien. Diese sind aber oft in Forschungseinrichtungen angesiedelt, die per Auftrag die Technologie in diesen Pilotlinien an sich weiterentwickeln sollen und daher keinen regelmäßigen und verlässlichen Output liefern können. Beim Eintritt in die Scale-up-Phase müssen die Zulieferer dynamisch mitwachsen können. Funktionierend Ansätze wie die Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) können übernommen werden. Diese bietet technologische Angebote und Kooperationsmöglichkeiten.

Deutschland hat eine wettbewerbsfähige bis führende Position bei Methoden, Materialsystemen und Produktionsverfahren für die systematische Integration von Quantensystemen und die konsequente Skalierung entsprechender Plattformen.
Deutschland verfügt über ausgeprägte FuE-Kapazitäten und -Ressourcen in kritischen Enabling-Technologien der Optik und Nanophotonik sowie der Halbleiterfertigung und Mikroelektronik, die in Schlüsselbereichen der Integration und Skalierung eine entscheidende Rolle spielen, z. B. in Photonic Integrated Circuits (PICs) und photonischen und mikroelektronischen Chiparchitekturen sowie in klassischen, hochintegrierten optischen und mikroelektronischen Informationstechnologien zur Einbettung und Steuerung von Quantensystemen. Diese Kompetenzfelder sind von besonderer Bedeutung für mittel- bis langfristige Entwicklungsstrategien von Technologien mit ausgeprägten Leistungsmerkmalen und Entwicklungen mit hohem Technologiereifegrad (TRL).

3.5 Quantenökosystem

Für einen schnellen Markterfolg ist es sinnvoll, Quantentechnologien über bereits standardisierte Schnittstellen in bestehende Systemumgebungen zu integrieren. Dies gilt sowohl für Quantencomputer, die über IEEE-Standardschnittstellen (z. B. für X86-Kompatibilität) in bestehende Rechnerarchitekturen integriert werden, als auch für Quantensensoren, die in heutige IoT-Netzwerke eingebunden werden. Eine ggf. notwendige neue Infrastruktur darf nicht zu einer Barriere für die Markteinführung quantentechnologischer Produkte werden.

Eine solche Anbindung über heutige Standardschnittstellen geht allerdings Kompromisse ein, kann die volle Leistungsfähigkeit von Quantentechnologien oft nicht ausschöpfen. Deshalb sollte schon heute über Quantenökosysteme / Quantennetzwerke nachgedacht werden. Sie verbinden Quantenprozessoren und Quantensensoren. Dies ermöglicht eine absolut abhörsichere Kommunikation und leistungsfähige verteilte Sensornetzwerke. Die Quanteninformation wird dabei mittels Lichtteilchen (Photonen) über Glasfaserleitungen zwischen den Netzwerkknoten ausgetauscht. Eine andere Art der Datenerfassung und -verarbeitung! Dieses Ökosystem muss sich dem Vergleich mit klassischen Methoden stellen, um am Markt erfolgreich zu sein.

4. Herleitung der Impulse

Aus der Ist-Analyse und den Expertengesprächen lassen sich folgende Impulse für Politik, Wissenschaft und Wirtschaft ableiten.

4.1 Eine gemeinsame Vision entwickeln und mit Roadmaps untermauern

Die Quantentechnologien machen derzeit erkennbare Fortschritte. Aber der Weg zu erfolgreichen (Massen-) Produkten ist lang. Wir brauchen einen langen Atem. Aber es gibt Beispiele aus der Vergangenheit, dass sich lange Wege lohnen können. So hat die Laserlithografie 30 Jahre gebraucht. Heute ist sie ein großer Erfolg. Unternehmen wie ASML, Zeiss und Trumpf profitieren stark davon.

Die Position Deutschlands im internationalen Vergleich wird je nach Technologiefeld bei Quantentechnologien unterschiedlich bewertet. Sie reicht von „in der Weltspitze“ bis zu „einige Jahre zurück“ (siehe Kapitel 3). Erste Produkte sind auf dem Markt, eine dynamische Marktentwicklung wird aber erst nach 2030 erwartet. In der letzten Legislaturperiode von Bundeskanzlerin Angela Merkel wurde durch Förderung eine starke Dynamik in Gang gesetzt. Diese und darauf aufbauende Programme laufen nun aus. In der nächsten Phase sollten wir auf Fokussierung und Industrialisierung setzen. Das bedeutet, die Zusammenarbeit von Grundlagenforschung, Start-ups und etablierten Technologieunternehmen gezielt zu unterstützen, um die entwickelten Technologien konsequent selbst zu verwerten.

Die Steuerung der Forschungsförderung für die Technologieentwicklung in Deutschland erfolgt derzeit aus den einzelnen Bundesministerien heraus. Das gemeinsame „Handlungskonzept Quantentechnologien“ [BMBF 2023] liest sich hier und da wie ein bottom-up zusammengestelltes Papier der beteiligten Referate. Externe Experten sind auf deren Ebene zwar oft eingebunden, eine geschlossene Strategieentwicklung wird jedoch nicht erkennbar. Bei der Umsetzung des Konzepts verzahnen sich die Abteilungen und Referate nicht immer optimal oder blockieren sich im schlimmsten Fall gegenseitig.

Deutschland sollte auf dem Erreichten aufbauen und seine Stärken weiter stärken. Dazu brauchen wir eine gemeinsame Vision (Moonshot-Ansatz). Diese sollte von Wissenschaft und Wirtschaft gemeinsam entwickelt werden. Die Politik greift diese auf und unterstützt. Das hat in der Vergangenheit bereits gut funktioniert. Beispiel Photonik: Anfang der 90er Jahre spielte Deutschland in der Photonik keine Rolle. Mit dem damals verfolgten Ansatz ist Deutschland zum Leitanbieter geworden. Gerade die letzten Jahre haben gezeigt, dass Deutschland die Wertschöpfungsketten dort, wo es notwendig ist, auch selbst unter Kontrolle haben sollte.

Die Begeisterung für Quantentechnologien sollte bis in die Führungsebenen spürbar sein. Die Vision wird durch gemeinsam in der Fach-Community entwickelte Technologie-Roadmaps untermauert, die jährlich fortgeschrieben und angepasst werden. Das entstandene Ökosystem steuert sich selbst und wird von Politik und Ministerien unterstützt. Dabei sollten wir realistisch und ehrlich bleiben, was kurz- und mittelfristig erreichbare Produkte und wirtschaftliche Ziele angeht, um keine falschen Erwartungen zu wecken. Produktentwicklungen mit Quantentechnologien sind potenziell disruptiv mit der Möglichkeit des Scheiterns. Wir müssen auch damit leben können, dass von 10 guten Ideen nur eine erfolgreich sein wird. Bis zum Ende dieses Jahrzehnts wird es nicht im großem Maßstab zum Aufbau von Arbeitsplätzen kommen. Die Kommunikation in die Politik sollte hier ehrlich und seriös sein, mit einer realistischen Einschätzung der Potenziale, die die Spannung auf-

rechterhält. Im Gegenzug muss die Politik Verantwortung übernehmen.

Ein ähnlicher Ansatz etabliert sich auf EU-Ebene. Das Quantum Community Network [QCN 2025] als Teil des EU Quantum Flaggschiff-Programms bringt die Wissenschaft zusammen. Hier wird eine FuE-Roadmap entwickelt. Die Industrie trifft sich im QuIC – European Quantum Industry Consortium [QuIC 2025]. Hier wird eine Industrie-Roadmap erarbeitet. Beide Roadmaps sollen miteinander verzahnt werden und als Blaupause für EU-Ausschreibungen dienen. So soll die notwendige wirtschaftliche Dynamik unterstützt werden.

Dass solche Ansätze notwendig sind, zeigt ein Blick in die Vergangenheit. Google, Facebook, Intel, Apple und andere große US-Konzerne sind mit Themen und Technologien groß geworden, die nicht in Deutschland entwickelt oder die hier nicht engagiert genug verfolgt wurden. Aufgrund der Marktmacht und der Finanzkraft dieser Unternehmen für Forschung und Entwicklung droht Deutschland nun zunehmend die darauf aufbauenden Themen zu verpassen. Das darf bei den Quantentechnologien nicht passieren. In 10 bis 20 Jahren werden industrielle Themen von Quantentechnologien bestimmt (Sensorik, Kommunikation, Computing). Die deutsche Politik muss daher heute aktiv werden und einen langen Atem haben. Sie sollte sich in der EU strategisch positionieren und deren Aktivitäten aktiv mitgestalten.

4.2 Ökosysteme und Infrastruktur ausbauen

In Deutschland gibt es keine Zentren wie Cambridge, Stanford oder Harvard, die innerhalb der USA zu den forschungsstärksten und renommiertesten Universitäten der Welt gehören und deshalb besonders gefördert werden. Ebenso fehlen uns die Tech-Giganten, die enorme Mittel in neue Technologien investieren und die komplette Forschungs- und Entwicklungsagenda aus einer Hand realisieren können. Die in Deutschland etablierten Pfade von der Grundlagenforschung bei der Max-Planck-Gesellschaft, den Helmholtz-Instituten und den Exzellenzuniversitäten über die Fraunhofer-Gesellschaft in die Wirtschaft sind für sich schnell entwickelnde und disruptive Themen wie die Quantentechnologien oft zu starr und zu langsam.

Deutschland profitiert jedoch von einer immer besser funktionierenden inhaltlichen und fachlichen Verzahnung von Grundlagenforschung, Start-ups und Industrie, die Quantentechnologien in die Anwendung bringen. In und um München, Stuttgart/Ulm, Jülich und Braunschweig sind in den letzten Jahren gut funktionierende Ökosysteme mit vielen Start-ups entstanden. Diese Ökosysteme sollten als Zentren für Quantentechnologien strategisch ausgebaut werden. Regionen wie Hamburg, Jena und weitere sollten daraufhin untersucht werden. Der intellektuelle Austausch zwischen Grundlagenforschung und Unternehmen sollte noch stärker gefördert werden.

Die Ökosysteme stehen als Garant für eine Full-Stack-Entwicklung von der technologischen Basis bis zum System, von der physikalischen Technologie bis zur Softwaresteuerung. Die Vernetzung dieser Ökosysteme zum Wissensaustausch erfolgt über zu etablierende Kompetenznetzwerke. Wichtig ist eine Kultur, die auch offen mit Misserfolgen umgeht. Fehlschläge und Irrwege sind bei Technologieentwicklungen und Innovationsprojekten unvermeidlich. Durch eine offene und transparente Kommunikation dieser Misserfolge können Lernkurven verkürzt und die Erfolgswahrscheinlichkeit für den Durchbruch der Technologie insgesamt erhöht werden.

Eine großflächige Ansiedlung von hochtechnologisch ausgestatteten Reinräumen außerhalb dieser Ökosysteme sollte aus Effizienzgründen überdacht werden. Hier ist in der Vergangenheit viel dupliziert worden, weil in Deutschland oft an gleichen Themen parallel geforscht wird. Die Investitionen werden immer höher und müssen für weitere Stakeholder nutzbar gemacht werden. So sollte beispielsweise ein optimierter Reinraum für die supraleitenden QuBits zentralisiert entstehen, der wie eine Foundry wirkt. So könnten Entwicklungsmechanismen der Mikroelektronik kopiert werden. „Ergänzen statt duplizieren“ könnte bei Investments ein wichtiger Leitgedanke sein. Die Einbindung von Wirtschaftsakteuren zur Nutzung der dort vorhandenen Infrastruktur als Alternative zum Neubau in Instituten sollte ebenfalls Teil der Überlegungen sein

Die in den Ökosystemen geschaffene Infrastruktur kann von frei zugänglichen Prüfständen bis hin zu dedizierten Messplätzen und technologischen Pilotlinien reichen. Wenn diese mit öffentlichen Mitteln geschaffen wurden, sollten sie nach festgelegten Regeln auch für andere Projekte niedrigschwellig zugänglich sein. Die USA können hier als Vorbild dienen. In Chicago werden zentrale Einrichtungen vorgehalten, die gemietet und nach Nutzungsdauer bezahlt werden können. Mit der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland (FMD) gibt es auch eine potenzielle Lösung aus Deutschland. Die FMD ist ein Forschungsverbund im Bereich der Mikro- und Nanoelektronik, in dem Institute der zwei Forschungsorganisationen Fraunhofer-Gesellschaft und Leibniz-Gemeinschaft kooperieren. Sie dient potenziellen Interessenten und Kunden als Anlaufstelle für Fragestellungen und Projekte und bietet auch Kooperationsmöglichkeiten an.

Der einfache und niederschwellige Zugang zu Pilotlinien und Basistechnologien ist insbesondere für Start-ups von hoher Bedeutung. Daher ist es wichtig, die Rolle einer Pilotlinie zu definieren. Aus Sicht eines Start-ups, das an einer gesicherten Kleinserienproduktion interessiert ist, läuft eine Pilotlinie mit konstanter Qualität des Outputs. Dies setzt eine stabile Technologie voraus, die nur langsam und sicher verändert wird. Häufig treten Forschungseinrichtungen als Betreiber von Pilotlinien auf. Diese haben aber andere Interessen. Sie wollen in ihren Forschungsprojekten Technologielinien verbessern, was eben nicht zu einem konstanten Output

führen kann. Dieser Widerspruch muss aufgelöst werden. Hier kann auch die Halbleiterindustrie eine wichtige Rolle spielen. Es wäre sinnvoll, wenn Start-ups Halbleiterunternehmen beauftragen könnten.

Start-ups stehen häufig vor dem Problem, sich neben ihrer Kernkompetenz auch fundierte Kenntnisse in Basistechnologien wie Mikrosystemtechnik, Aufbau- und Verbindungstechnik, Elektrotechnik und Kühlung aneignen zu wollen. Sie müssen lernen, nicht alles selbst machen zu wollen. Viel Geld (Beispiel USA) hilft hier nicht unbedingt, weil es gerade dazu verleitet, alles selbst entwickeln zu wollen. Das kann zu großer Komplexität führen. Viele dabei auftretende Probleme sind aber bereits gelöst, die Lösungen dem Start-up aber nicht bekannt. Hier können erfahrene Mentoren helfen, die das Start-up mit Lösungsanbietern zusammenbringen. Die Zusammenarbeit mit entsprechend spezialisierten Unternehmen kann erfolgversprechender sein. Allerdings sind Kleinserien für entsprechende Anbieter oft wirtschaftlich nicht interessant genug. Hier sollten fördertechnische Anreize geschaffen werden.

Wenn die Start-ups in die Wachstumsphase kommen, kann ein Partnering helfen, diesen Prozess zu beschleunigen. Eine Aggregation von Start-ups, die sich ideal ergänzen, kann ein weiteres probates Mittel sein. Ein Beispiel aus Frankreich: Pasqal, das die Hardware für Quantencomputer entwickelt verschmolz mit Qu&Co, das Quantenalgorithmen und Software entwickelt.

In den USA stehen derzeit einige Start-ups zu Quantencomputing und Quantentechnologien vor Finanzierungsproblemen. Die VC-Geber ziehen sich zurück, weil sich innerhalb des versprochenen Zeitraums von 3 – 5 Jahren keine Rückflüsse einstellen. Bekanntes Beispiel ist die Zapata Computing Holdings Inc., die aus dem MIT heraus gegründet und mit ca. 400 M$ Risikokapital unterstützt wurde. Zapata hat im Oktober 2024 Konkurs angemeldet und seinen Geschäftsbetrieb eingestellt. Viele Start-ups konnten allerdings die aktuelle Aufmerksamkeit zur Refinanzierung nutzen.

Europa hat Behutsamkeit im Umgang mit Start-ups gelernt. So hat die EU bereits 2016 eine „Startup and Scaleup Initiative“ begonnen zur Beseitigung von Hindernissen für Start-ups, die sich im Binnenmarkt vergrößern wollen.

Auch die Großindustrie kann neben den Basistechnologien auch Quantentechnologien entwickeln. Beispielsweise ist IBM ist aktuell sehr stark mit eigenen Quantenchips. Als Großunternehmen hat IBM seit vielen Jahren niederschwellige Forschung im Bereich Quantencomputing betrieben. Das zahlt sich jetzt aus. Das gibt ein Beispiel, was niederschwellige aber kontinuierliche Forschung bewirken kann.

Die Softwareentwicklung für industrielle Anwendungen mit Quantencomputern muss heute beginnen, um den Wettbewerbsvorsprung halten oder ausbauen zu können. Der Staat sollte als Brücke dienen, bis der Markt sich selbst trägt. Der Staat kommt seiner Aufgabe der Infrastrukturbereitstellung derzeit nur teilweise nach. Beispielsweise werden Quantencomputer vom DLR und der Cyberagentur beschafft. Eine Unterstützung der Wirtschaft bei der Beschaffung/Nutzung von Quantencomputern und Quantentechnologien in Pilotprojekten sollte vorgesehen werden.

4.3 Forschungs- und Innovationsförderung effizient gestalten

Nationale Anstrengungen

Die Bundesregierung setzt bei der Förderung der Quantentechnologien in erster Linie auf eine öffentliche Kofinanzierung mit dem Ziel, private Initiativen und Investitionen in Deutschland auszulösen, zu verstärken und zu beschleunigen. Dies schreibt sie in ihrem Handlungskonzept Quantentechnologien [BMBF 2023], an dem die sechs Bundesministerien BMBF, BMDV, BMF, BMI, BMWK und BMvG beteiligt sind. BMBF und BMWK sind für die Grundlagenforschung und den Transfer in Produkte zuständig.

Sie schreibt in ihrem Handlungskonzept „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.“

Diese Aussagen halten einem Faktencheck nicht immer stand. BMBF und BMWK agieren mit Stärken und Schwächen, aber bisher oft parallel und ohne Verbindung zueinander. Oft wollen beide das Gleiche tun und stehen in Konkurrenz zueinander. So sind parallele Aktivitäten von BMBF und BMWK erkennbar, wie z. B.:

- BMWK: Vernetzungsprojekt PlanQK [PlanQK 2022] aus dem BMWK-Förderaufruf „Digitale Technologien“
- BMBF: folgte ein Jahr später mit dem Projekt QuCUN „Das Quantum Computing User Network in Deutschland“ [QuCUN 2025]

Die Referate und Projektträger kennen sich oft gut aus und setzen eigene Ideen um, meist begleitet von externen Experten. Diese Ideen sind gut formuliert, aber im internationalen Vergleich oft verspätet. Allerdings verfolgen Ressorts und Projektträger teilweise zu intensiv eigene Interessen und nutzen den Ressortkreis eher zur Information als zur Entwicklung und Abstimmung eines gemeinsamen Entwicklungsplans. Mit den zwei

Milliarden Euro für Quantentechnologien, die im Sommer 2020 im Rahmen des Konjunktur- und Zukunftspakets bereitgestellt wurden, konnte trotzdem eine breite Förderdynamik ausgelöst werden. Besonders positiv war der Einsatz „neuer“ Förderinstrumente. Zuvor war es oft gängige Praxis, Mittel aus bestehenden Titeln zu kumulieren. Psychologisch ein anderer Impuls für die beteiligten Referate. Aufgrund der Forderung des Bundestages nach einer schnellen Mittelvergabe wurden unterschiedliche technologische Ansätze gefördert. Eine strategische Verzahnung der Projekte und eine Themenfokussierung waren kaum möglich. Die USA konnten in diesen Jahren mit einer gezielten Förderung mehr Fahrt aufnehmen.

Im Ergebnis führt das zu stärker fragmentierten FuE-Aktivitäten und einer Streuung der Entwicklung über eine Vielzahl von technologischen Ansätzen, Vorhaben und Akteuren. Länder, die im europäischen und internationalen Raum eine Spitzenposition einnehmen, verfügen über effiziente Mechanismen, um die Kompetenzen und Ressourcen der Schlüsselakteure zu bündeln und das entsprechende Ökosystem in der Wertschöpfung zusammenzuführen. Dazu gehört auch die Identifikation und Fokussierung nationaler Alleinstellungsmerkmale und der gezielte Aufbau einer Spitzenposition in strategisch ausgewählten Bereichen.

Ein Blick in die USA lohnt sich. Dort erfolgt die Förderung sehr zielgerichtet als missionsorientierte Spitzenforschung. Oft steht die Anwendung im Mittelpunkt. Experimentierfreude und Projekterfolg stehen im Vordergrund. Das bringt Vorteile bei Ergebnisqualität und Geschwindigkeit. Ein Beispiel ist die Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA) als wichtiger Förderer. DARPA-Projekte haben in der Regel harte Ziele, die einem Masterplan folgen. Die DARPA begleitet ihre Projekte inhaltlich sehr eng. In regelmäßigen Review-Meetings überprüfen externe Expertinnen und Experten den Stand der Zielerreichung. Das sind echte Stresstests für das Erreichte, bürokratische Fragen spielen kaum eine Rolle. Ein negatives Ergebnis eines Reviews kann durchaus zum Abbruch des Projekts führen. Aufgrund der DARPA-Förderung haben sich rund um renommierte Universitätsstandorte in den USA Scharen von kleinen Unternehmen angesiedelt, die enorm flexibel und leistungsfähig auf Ausschreibungen reagieren. Eine ähnliche Szene entsteht langsam auch in Deutschland. Wenn ein Thema in seinem Lebenszyklus die reine Grundlagenforschung verlässt, kann ein solcher Ansatz auch in Deutschland sehr sinnvoll sein.

Beispiel Quantencomputing in Frankreich. Dort erfolgt eine fokussierte Förderung und gezielte FuE Aktivitäten in einer begrenzenten Anzahl von QC-Plattformen (Photonisch, Neutrale Atome), vertreten durch mehrere Startups mit hoher Sichtbarkeit im internationalen Spitzenbereich (Pasqal, Quandela, Welinq).

In Deutschland gibt es häufig eine eher strukturell ausgerichtete Förderung, die nicht mit spezifischen Zielen verbunden ist bzw. bei Nichterreichung der Ziele keine wirklichen Konsequenzen nach sich zieht. Bei der Projektdurchführung ist in Deutschland generell ein Kontrollversuch in organisatorische Richtung erkennbar. Nicht die Projektergebnisse werden in qualifizierten Reviews überprüft, sondern der Weg dorthin und die Mittelverwendung. Das wirktoft sehr bürokratisch und wenig zielführend. Förderprojekte können als Hochrisikoprojekte nicht immer erfolgreich abgeschlossen werden. Hier sollte es notfalls auch zum Abbruch von Projekten kommen können. Dies ist eine dringend notwendige Neuerung in der deutschen Förderlandschaft. Aber viele Teilergebnisse sind wichtig für die Community oder können für andere Projekten und Entwicklungen verwertet werden. Das macht Projektreviews durch Experten so wichtig, die diese Informationen in die Community tragen.

Mit der Vergabe von Aufträgen zum Bau eines Quantencomputers an zwei Konsortien für Hardware und Software hat die DLR Quantencomputing Initiative [QCI 2025] eine neue Finanzierungsmöglichkeit geschaffen. Sie folgt dem Vorbild des European Space Research and Technology Centre (ESTEC), das in ähnlicher Weise Ausschreibungen zum Bau von Satelliten und Forschungseinrichtungen durchführt. Das neue Modell des DLR wird grundsätzlich positiv bewertet. In einigen Punkten besteht noch Optimierungsbedarf:

- Die Intellectual Property Rights (IPR) gehen von den beauftragten Unternehmen auf das DLR über. Dies hält viele geeignete Unternehmen von einer Teilnahme ab. Das Airforce Research Laboratory (AFRL) verlangt bei vergleichbaren Ausschreibungen nur einen Firmensitz in den USA, damit die IPR eindeutig in den USA liegen.
- Es werden hohe Haftungsanforderungen gestellt, wie z. B. die Kompensation des Ausfalls eines Projektpartners durch das Konsortium.
- Die Mittel werden nicht nur an nationale Partner vergeben.
- Die Auswahl der förderungsfähigen Plattformen war teilweise intransparent.

Aus dieser Analyse und den Aussagen in den vorangegangenen Kapiteln lassen sich eine Reihe von Impulsen ableiten:

- Die Förderung der Grundlagenforschung in Deutschland ist exzellent, die Forscherteams spielen international in der ersten Liga. Sie darf nicht nachlassen. Grundlagenforschung ist die Basis für den Transfer in Innovationen.
- Die Verzahnung von Grundlagenforschung, angewandter Forschung und Produktentwicklung in Unternehmen (oft Start-ups) ist entscheidend. Sie sollte nach der Grundlagenförderung im Fokus stehen. Hier findet bereits ein erfolgreicher Transfer statt, der weiter ausgebaut werden sollte.

- Die Förderung sollte sich auf die in München, Stuttgart/Ulm, Jülich und Braunschweig entstandenen Ökosysteme für Quantentechnologien konzentrieren. Die dort mit Fördermitteln aufgebauten Einrichtungen sollten nach festen Regeln auch anderen Forschern und Entwicklern zur Verfügung stehen. Ein gutes Förderinstrument ist die Zukunftscluster-Initiative Cluster4Future (Clusters4Future.de: clusters4future). Sie ist regional ausgerichtet, bezieht dort alle relevanten Partner ein und ist auf einen Zeitraum von 3-6-9 Jahren angelegt. Solche Förderinstrumente unterstützen sich schnell entwickelnde, disruptive Themen sehr gut. Weitere Fokusregionen wie z. B. Hamburg und Jena sollten auf zusätzliche Unterstützung hin untersucht werden.
- Existenzgründungen sollten insgesamt stärker gefördert werden. Dazu sollten auch die Regelungen zur Subventionsvermeidung überprüft werden. So beteiligen sich deutsche Großunternehmen teilweise lieber an US-amerikanischen als an deutschen Start-ups. Die Finanzierung von Start-ups muss grundsätzlich verbessert werden. In Ländern wie Großbritannien und den USA gibt es eine höhere Toleranzschwelle und eine Kultur für die Finanzierung von Start-ups in der Wachstumsphase. Hier könnten Modelle entwickelt werden, bei denen das BMWK unterstützt, obwohl das Verbundprojekt beim BMBF angesiedelt ist.
- Start-ups könnten ähnlich wie auf Business Angels auch auf Technology Angels zugreifen. Diese erfahrenen Mentorinnen und Mentoren bringen die Start-ups mit Lösungsanbietern für Basistechnologien zusammen, was die Entwicklungskomplexität reduziert. Der richtige Technologie-Support mit den richtigen Kontakten kann wichtiger sein als eine Erhöhung der Fördergelder.
- Quantentechnologien und Informationstechnik zur Nutzung und Integration der entwickelten Komponenten in Geräte und Systeme sollten in Förderprojekten gemeinsam unterstützt werden. Eine Trennung von Hard- und Software nach Ressorts oder Förderprogrammen ist nicht sinnvoll, da sie in der Anwendung gemeinsam wirken. Eine Trennung könnte zwischen Grundlagen- und Anwendungsforschung erfolgen.
- Nicht nur Grundlagenforschung und angewandte F&E sollten gefördert werden, sondern auch Anwenderinnen und Anwender, die entsprechende Technologien als First Mover in Pilotanwendungen einsetzen. So schaffen wir den schnellen Transfer in die Anwendung und können die Vorteile der Quantentechnologien für den Wirtschaftsstandort nutzen. Hier ist eine unbürokratische Förderung mit innovativen Methoden gefragt.
- Die Zusammenarbeit zwischen den Referaten und Ministerien sollte kohärenter werden. Mit externen Expertinnen und Experten entwickelte Roadmaps können hier ebenso helfen wie neue Strukturen. Der Ansatz „Structure follows Strategy“ wird in Deutschland oft zitiert, aber in der Praxis weniger oft gelebt.

In Deutschland tritt die Quantenförderung nun in eine zweite große Phase ein. Nachdem wir in den vergangenen Jahren mit einer eher breit angelegten Förderung viele grundlegende Erkenntnisse gewonnen haben, können wir mit diesen Impulsen die Förderung fokussieren. So können wir unsere Ziele schneller und effizienter erreichen.

Europäische Anstrengungen

Die Forschungsförderung der Europäischen Union ist eine wichtige Säule für die Entwicklung der Quantentechnologien in Europa. Davon kann auch Deutschland als größter Beitragszahler der EU profitieren. Im Jahr 2016 rief der damalige EU-Kommissar für Digitale Wirtschaft und Gesellschaft, Günther Oettinger, die Quanten-Community dazu auf, eine gemeinsame europäische Strategie für Quantentechnologien zu entwickeln. 3.400 Personen aus Wissenschaft und Industrie unterstützten das „Quantum Manifesto“ [de Touzalin et al. 2016], das im Mai 2016 in den Niederlanden veröffentlicht wurde.

Als Folgemaßnahme zum Quantenmanifest wurde 2018 das EU Quantum Technologies Flagship [EQF 2025] ins Leben gerufen, das Forschungseinrichtungen, die Industrie und öffentliche Geldgeber zusammenbringt, um die wissenschaftliche Führung und Exzellenz Europas im Bereich der Quantentechnologien zu festigen und auszubauen. Es soll die Arbeit von Hunderten von Quantenforschern über einen Zeitraum von zehn Jahren mit einem erwarteten EU-Budget von 1 Milliarde Euro unterstützen. Ziel ist es, die europäische Forschung bei der Umsetzung in kommerzielle Anwendungen zu unterstützen, die das disruptive Potenzial der Quantentechnologie voll ausschöpfen. Das Flaggschiff fördert Projekte in den vier zentralen Anwendungsbereichen Quantencomputer, Quantensimulation, Quantenkommunikation sowie Quantensensing und -metrologie.

Das Flaggschiff folgt seiner strategischen Forschungsagenda für Quantentechnologien [EQF 2020], zu der mehr als 2.000 europäische Quantenexperten beigetragen haben. Die langfristige Vision ist die Entwicklung eines Quanteninternets in Europa, in dem Quantencomputer und -sensoren über Quantenkommunikationsnetze miteinander verbunden sind. Die aktuelle Phase des Quantum Technologies Flagship (gefördert im Rahmen von „Horizon Europe“) mit einem Gesamtbudget von über 400 Millionen Euro und mehr als zwanzig neuen Projekten läuft. Weitere wichtige Fördermaßnahmen in Europa laufen im Rahmen des European Chips Act und von EuroHPC (European High Performance Computing Joint Undertaking) [JU EuroHPC 2025].

Mit dem European Chips Act sollen Versorgungsengpässe bei Halbleitern überwunden und die Produktion

von Halbleitern in Europa gesteigert werden. Dafür sollen 43 Milliarden Euro bereitgestellt werden, davon 3,3 Milliarden Euro aus dem EU-Haushalt. Mit dem Chips Act plant die EU den Aufbau von Pilotlinien, die von quasi-staatlichen RTOs betrieben werden sollen. Die Pilotlinien sollen die Lücke zwischen Labordemonstration und Großproduktion schließen. Sie sollen die prototypische Umsetzung von Innovationen in größerem Maßstab ermöglichen, um einen reibungsloseren Übergang zur Produktion zu gewährleisten und das Gesamtrisiko zu verringern. Eine Pilotlinie ist allerdings definiert als ein produktiver Demonstrator für die Chipfertigung, der mit gleichbleibender Qualität arbeitet. RTOs sind von ihren Aufgaben und ihrer Denkweise her grds. oft nicht qualifiziert, industrielle Prozesse zu betreiben. Für Halbleiter gibt es in Europa nur zwei RTOs mit Pilotlinien, die nach dieser Definition arbeiten:

- Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC) in Löwen, Belgien mit über 5.000 Experten aus 96 Ländern [IMEC 2025]
- CEA-Leti *(Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information),* ein Forschungsinstitut für Elektronik und Informationstechnologie mit Sitz in Grenoble in Frankreich mit über 2000 Experten [CEA 2025]

Im Übergang von der Invention zur Innovation müssen die Pilotlinien für die Chipfertigung nach qualifizierten industriellen Prozessen laufen. Dies muss in der nächsten Ausschreibung unbedingt mit einer klaren Definition der Pilotlinie und messbaren Zielen formuliert werden. Aus technologischer Sicht werden Themen wie integrierte Photonik für die Anbindung, Modulatoren und die Erweiterung in den extremen Ultraviolettbereich wichtig.

Mit der Gründung eines gemeinsamen Unternehmens für europäisches Hochleistungsrechnen haben die EU und ihre 25 Mitgliedsstaaten die Voraussetzungen für den Aufbau einer europäischen Supercomputer-Infrastruktur geschaffen. Diese soll in Zukunft auch Quantencomputer umfassen. So integriert das JU EuroHPC seine Quantencomputer mit sechs Quantencomputern in Tschechien, Deutschland, Spanien, Frankreich, Italien und Polen.

Für das Quantencomputing sollten idealerweise neue und unabhängige Mittel eingesetzt werden. Der Zugriff auf bestehende Budgets birgt Gefahren in der Konkurrenz zu klassischen Technologien, die unmittelbar für eine Anwendung zur Verfügung stehen. Eine Positionierung des Quantencomputings im JU EuroHPC birgt den Zwang, Quantencomputer mit klassischen Computern zu verbinden, was mitunter kontraproduktiv sein kann.

Die Entwicklung und Anwendung von Quantencomputern sollte in der EU zusätzlich zu EuroHPC mit eigenen Fördermitteln ausgestattet werden. In der EU sollte ein freier Zugang zu Quantencomputern zu marktüblichen Preisen geschaffen werden.

Einzelne europäische Staaten haben gegenüber den USA wenig Chancen. Die EU sollte die technologische Souveränität über die Hardware und Software erlangen. Auf europäischer Ebene sollte eine gemeinsame Position und Linie entwickelt werden.

Für die Förderung in der EU gilt ähnliches wie für die Förderung in Deutschland:

- Die Förderung sollte nicht in der Breite erfolgen, sondern sich auf Exzellenzzentren konzentrieren, die wiederum für einen intensiven Austausch miteinander vernetzt sind.
- Durch ergänzende Projekte zum Aufbau von europaweiten Netzwerken können auch Regionen an das Thema herangeführt werden, die derzeit noch nicht exzellent in diesem Bereich sind.

Deutschland legt insgesamt zu wenig Wert auf den Rückfluss der eingezahlten Mittel nach Deutschland. Frankreich geht hier geschickter vor. Deutschland sollte darauf Einfluss nehmen, dass europäische Fördermittel und deren deutsche Anteile stärker auf deutsche Bedarfe/Belange ausgerichtet werden (Beispiel ESTEC).

Internationale Anstrengungen

Die Wissenschaft will auf dem Gebiet der Quantentechnologien weltweit, ideologisch multilateral in einer Welt der Vereinten Nationen (UN) zusammenarbeiten. Ziel ist die Mobilisierung aller Fähigkeiten der Menschheit für ein beschleunigtes Verständnis der Natur für Wohlstand und neue Fähigkeiten. Mit Regionen wie China befinden wir uns aber nicht in einem freundschaftlichen Kompetenzstreit, sondern in einem Verdrängungswettbewerb. Gemeinsame Wertschöpfung findet nicht mehr statt. Hinzu kommt die doppelte Verwendung für Militärtechnologie in einigen Ländern, die von vielen Wissenschaftlern kritisch gesehen wird.

Die Politik sollte die internationale Zusammenarbeit mit gleichgesinnten Ländern auch über die Grenzen der EU hinaus stärken und intensivieren. Dies kann durch ein pragmatisches, am gegenseitigen Nutzen orientiertes Vorgehen geschehen. Ein möglicher Ansatz ist der Aufbau internationaler Kooperationen mit verlässlichen Partnern. Vorbild ist hier CERN, die Europäische Organisation für Kernforschung. CERN wird von 23 europäischen Mitgliedsstaaten und Israel getragen. Mit rund 2.500 Mitarbeitern ist CERN das weltweit größte Forschungszentrum auf dem Gebiet der Teilchenphysik. Mehr als 10.000 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus 80 Nationen nutzten 2023 die Infrastruktur oder Daten des CERN.

4.4 Wettbewerb um die besten Köpfe gewinnen

Deutschland und seine Ökosysteme für Quantentechnologien stehen im internationalen Wettbewerb um die besten Köpfe aus Wissenschaft, Forschung und Innovation. Wissen ist Deutschlands einzige natürliche Ressource.

Die Zahl der Studienanfänger in der Physik stagniert seit 25 Jahren, in der Elektro- und Informationstechnik ist sie rückläufig [VDE 2022]. Daran konnten auch Programme wie MINT [MINT 2025] und Anstrengungen von Verbänden und Industrie nichts ändern. Diese Entwicklung wird zunehmend zu einem grundsätzlichen Problem für den Hochtechnologiestandort Deutschland. In der Vergangenheit haben katalytische Effekte wie das Mondlandeprogramm der NASA und die Berichterstattung darüber zur besten Sendezeit viele junge Menschen in technisch-physikalische Studiengänge gelockt. Solche visionären Moonshots, mit denen sich ganze Generationen identifizieren können, fehlen.

Deutschland ist als Studienort für ausländische Studierende in naturwissenschaftlich-technischen Studiengängen hoch angesehen. Bei entsprechenden Angeboten gibt es auch Kandidaten, die sonst in Richtung US-amerikanischer Elitehochschulen tendieren. Ein Beispiel gibt die Max Planck School of Photonics, deren Konzept sich auch auf Quantentechnologien anwenden ließe. Sie bietet ambitionierten Nachwuchsforscherinnen und Nachwuchsforschern aus der ganzen Welt die Möglichkeit, ihre Promotion in einem einzigartigen Netzwerk zu schreiben. In der zweijährigen „Study Phase“ absolvieren exzellente Bachelor-Absolventinnen und Absolventen einen Master in Photonics an einer der drei Hochschulen Erlangen-Nürnberg, Jena oder Karlsruhe. In der anschließende „Research Phase“ führen Sie ein „PhD Research Project“ an einem von 16 Partnerinstituten durch. Angenommene Master-Absolventen können direkt damit einsteigen. Mitentscheidend für den Erfolg ist die zeitliche Synchronisierung des Bewerbungs- und Auswahlprozesses zu den US-Amerikanischer Elite-Hochschulen, der im November für das Sommersemester des Folgejahres beginnt.

Jährlich bewerben sich etwa 1.000 Personen. In einem kompetitiven Auswahlverfahren, das auf einem Bewerbungspapier, einer schriftlichen Prüfung und Interviews mit zwei Fellows beruht, werden davon 20 Personen ausgewählt. Das Programm läuft seit fünf Jahren sehr erfolgreich. Die Dieter Schwarz Stiftung fördert das Programm seit 2025, das BMBF zunächst bis 2028 und wahrscheinlich darüber hinaus. Die Teilnehmer bezahlen keine Studiengebühren, sondern bringen sich in die Betreuung von Lehrveranstaltungen ein.

An den Hochschulen der Quantentechnologie-Ökosysteme München, Stuttgart/Ulm, Jülich und Braunschweig interessieren sich derzeit ausreichend viele Studierende für Quantentechnologien. Bereits im Grundstudium wird die „Awareness“ für eine spätere Forschungstätigkeit oder eine eigene unternehmerische Tätigkeit in einem Start-up geschaffen. Die Institute berichten, dass sie genügend Interessenten für eine Forschungstätigkeit finden. Sie müssen aber mehr werben als noch vor einigen Jahren. Die besten Köpfe wollen oft in einer attraktiven Region wie München mit einem funktionierenden Quanten-Ökosystem arbeiten und Quantentechnologien mit hoher intrinsischer Motivation vorantreiben. Die von der Politik bisweilen bevorzugte Ansiedlung von Hightech in strukturschwachen Regionen („Technologie säen, Arbeitsplätze ernten“) funktioniert in der Regel eher schlecht.

Von den Postdoktoranden bleiben etwa 50 % in der Forschung, 50 % gehen in die Industrie oder in Start-ups. Das ist ein gutes Zeichen für den Stand der Quantentechnologien vor Ort. Das Feedback aus der Industrie ist durchweg positiv. Sie hat keine Probleme, an den Nachwuchs zu kommen, wenn sie für sich und ihre Themen wirbt.

In den USA werden viele herausragende Institute von Deutschen geleitet. Amerikanische Großunternehmen werben erfolgreich um deutsche Postdoktoranden mit Einstiegsgehältern, die bis zu 100 % über den deutschen Professorengehältern liegen. Dieser Brain Drain ist problematisch. Aufgrund der aktuellen politischen Umwälzungen in den USA und deren internationale Auswirkungen ist aber auch ein umgekehrter Effekt erkennbar. Die Attraktivität des Wissenschaftsstandorts USA geht derzeit zurück. Demgegenüber gewinnt Deutschland an Attraktivität. Als Konsequenz gelingt Deutschland bereits die Abwerbung erster führender internationaler Wissenschaftler.

Um die besten Köpfe in Deutschland zu halten oder nach Deutschland zu holen, müssen Möglichkeiten geschaffen werden, interessante und wirtschaftlich erfolgversprechende Themen im Rahmen einer Unternehmensgründung selbstständig zu bearbeiten. Dazu sind neue Förderansätze erforderlich. Ein hervorragendes Beispiel ist die 2002 von Susanne Klatten gegründete gemeinnützige UnternehmerTUM GmbH [UNTERNEHERTUM 2025]. Diese Ansätze gilt es weiter auszubauen. Hier setzen auch die Impulse aus Kapitel 4.3 an.

4.5 Anwendung in den Mittelpunkt stellen und Anwender aktiv heranführen

Deutschland agiert oft zu technologiegetrieben. Die größte Herausforderung ist derzeit jedoch nicht die Technologie, sondern der vom Kunden wahrgenommene Mehrwert. Der potenzielle Anwender hat teilweise keine klare Vorstellung von Quantentechnologien („Markt des Obskuren“). Die Anbieterseite begnügt sich häufig mit Demonstratoren, die prinzipiell die Möglichkeiten von Quantentechnologien aufzeigen. Gründer müssen über wirkliche Mehrwerte für Anwender nachdenken. Das können Kosten- oder Nutzungsvorteile sein. Sie sollten Anwenderinnen und Anwender

frühzeitig und intensiv in ihren Entwicklungsprozess einbeziehen und so auch die Gebrauchstauglichkeit ihrer Produkte sicherstellen. Bei der Quantenkommunikation gibt es mit der physikalischen Sicherheit der Informationsübertragung einen objektiven Mehrwert und deshalb derzeit eine positive Entwicklung.

In Deutschland sollte die Anwendungsforschung stärker gefördert werden. Sinnvoll sind Veranstaltungen mit potenziellen Anwenderinnen und Anwendern, in denen über Sensorik für ihre Aufgaben diskutiert wird. Dabei muss es darum gehen, sowohl die Zukunftspotenziale bestehender Technologien aufzuzeigen als auch neue Technologien wie Quantensensoren mit ihren Potenzialen vorzustellen. Viele Entwicklerinnen und Entwickler in der Industrie schauen zu wenig über den „eigenen Tellerrand" hinaus. Diskussionen mit Systemingenieuren, was mit einzelnen Technologien heute und in Zukunft technisch möglich ist, sollten gefördert werden. Beispiel Magnetfeldmessung: heute sind 200 pT/√Hz technisch möglich, perspektivisch auch 90 pT/√Hz. Quantensensoren sind mit 10 pT/√Hz bereits heute um den Faktor 10 besser. Aber gibt es hierfür eine sinnvolle (Massen)Anwendung? Das lässt sich nur in Anwenderdiskursen herausfinden.

Dazu sollten neue Veranstaltungsformate entwickelt werden, bei denen die Anwender alles über die verschiedenen Technologien (auch Quantentechnologien) und ihre Potenziale erfahren und die besten Partner für eine Zusammenarbeit finden. Auch hier liefern die USA gute Ideen. So führt die Personal Connected Health Alliance [PCH Alliance 2025] Formate durch, bei denen sich Anwender- und Technologieunternehmen an einen runden Tisch setzen. Zunächst stellen die Anwender ihre Use Cases vor, dann die Technologieunternehmen ihre Lösungen. Anschließend bleibt genügend Zeit für individuelle Matching-Gespräche, die von den Teilnehmern selbst organisiert werden. Die Veranstaltung lebt von der Offenheit der Teilnehmer am Runden Tisch.

In solchen Veranstaltungen kann auch ein Grundverständnis füreinander entwickelt werden. Ein Sensor im Auto zum Beispiel trägt eine große Verantwortung. Er muss robust sein und in allen denkbaren Situationen sicher funktionieren. Deshalb ist die Automobilindustrie in der Regel kein First Mover für neue Technologien. Innovationen in bekannten Technologien müssen hier einen Vorteil von mindestens 30 % bieten, Innovationen in neuen Technologien einen Vorteil von mindestens 100 %.

Die Industrie muss sich auf den Einsatz von Quantencomputern vorbereiten. Sie will Anwendungsfälle untersuchen, in denen der Einsatz eines Quantencomputers Vorteile bringen würde, d.h. im Wesentlichen (deutlich) schneller wäre. Typische Anwendungen sind die Fabrik- und Logistiksteuerung sowie hochkomplexe Fragestellungen aus den Materialwissenschaften und zu physikalischen Effekten wie die Simulation der Absorption von Molekülen auf Oberflächen.

Zu diesem Zweck wurde in Deutschland das Quantum Technology & Application Consortium (QUTAC) gegründet, in dem 14 namhafte deutsche Großunternehmen vorwettbewerblich zusammenarbeiten. Im Vordergrund steht die inhaltliche Arbeit, die von mehreren Arbeitsgruppen getragen wird. Ziel ist es, Algorithmen auf optimierten Quantencomputern auf ihre Industrietauglichkeit zu testen. Zu diesem Thema veröffentlicht QUTAC drei bis fünf Publikationen pro Jahr. Dabei geben Veröffentlichungen, in denen Quantenforscher die Leistungsfähigkeit ihrer Maschinen an Beispielsimulationen demonstrieren, oft den Anstoß für entsprechende Untersuchungen von QUTAC. Zu diesem Zweck mietet das Konsortium Rechenzeit auf Quantencomputern. Der Kauf von Quantencomputern ist derzeit nicht wirtschaftlich und wäre für das Konsortium auch kartellrechtlich schwierig.

In Deutschland kann auch die öffentliche Hand als Anwender auftreten. Innovationsprojekte mit neuen Technologien sind in der Investition häufig teurer als vergleichbare mit Standardtechnologien. Erst bei den Betriebskosten können sie ihre Vorteile ausspielen. Die öffentliche Hand kann mit Innovationszuschüssen arbeiten, wenn sich höhere Anfangskosten durch niedrigere Lebenszykluskosten amortisieren. Dies kann mit Methoden wie der Kapitalwertmethode vergleichend untersucht werden. In den USA geht man pragmatisch vor und beauftragt führende Universitäten mit solchen Untersuchungen. In Deutschland handelt es sich häufig um Entscheidungen einzelner Personen, die ihren Fokus oft grundsätzlich auf Risikovermeidung legen.

4.6 Internationale Normung und Standardisierung begleiten

Für den entstehenden Markt für Quantensensoren und Quantencomputer ist es wichtig, dass diese in bestehende IoT-Systeme und Computerarchitekturen integriert werden können. Hierfür gibt es bereits Schnittstellenstandards. Für die Quantenkommunikation ist eine neue Normung und Standardisierung sinnvoll, da die Interoperabilität zwischen verschiedenen Anwendern sichergestellt werden muss. Diese Standards mit gezielter Funktion und Bedarf in der Entwicklung des Ökosystems können ein wichtiger Motor für eine wettbewerbsfähige Entwicklung in der EU und Deutschland sein. So sind ETSI-Profile entscheidend für den Aufbau einer europäischen Quantenkommunikationsinfrastruktur (EuroQCI) und für die Zusammenarbeit der zahlreichen EU-Partner mit unterschiedlichen QKD-Technologien und -Protokollen sowie für die Zusammenführung der verschiedenen europäischen und nationalen QCI-Segmente zu einem gesamteuropäischen Netzwerk als gemeinsamen Bezugspunkt.

Viele Themen befinden sich noch im Bereich der Grundlagenforschung. Hier sollte nicht zu früh mit Normung und Standardisierung begonnen werden. Beispielsweise bringt die Standardisierung von Compilern

und Hochsprachen im Quantencomputing derzeit noch keinen Nutzen. Die Lösung der aktuellen Aufgaben erfordert die volle Leistungsfähigkeit der Maschinen. Die Programmierung erfolgt daher durchgängig in maschinenspezifischem Assemblercode.

Beim Quantencomputing und der Quantensensorik ist die Überlegenheit der quantenbasierten Systeme in der alltäglichen Anwendung für den Kunden noch nicht nachweisbar, weil noch zu viel im Wandel ist. Letztlich entscheidet die Leistungsfähigkeit. Zukünftige Standards werden durch die leistungsfähigsten Komponenten und Systeme definiert. Große Unternehmen mit fortgeschrittenen Produktentwicklungen versuchen daher derzeit, erste Standards zu setzen. So wollen Google und IBM eigene Schnittstellen durchsetzen, was einer Quasi-Standardisierung durch Marktmacht gleichkommt. IBM war z. B. Treiber des Quantenvolumens als Standard, der die Fähigkeiten und Fehlerraten eines Quantencomputers angeben soll, aber umstritten ist. Auch aus China kommen strategische Ansätze. Es gilt: „Wer Standards prägen kann, hat Wettbewerbsvorteile". China und große US-Unternehmen wissen das und agieren entsprechend offensiv. Deutschland sollte ein wachsames Auge auf Länder wie die USA und China haben und deren Motivation verstehen. Wir sollten die entstehenden Normen und Standards und die dafür verantwortlichen Gremien aktiv begleiten. Nur so können wir verhindern, dass sich Märkte abschotten oder einzelne technische Lösungen quasi Monopolcharakter erlangen.

Einen wichtigen Schritt auf diesem Weg haben die europäischen Normungsorganisationen CEN und CENELEC getan. Sie haben im Jahr 2023 die weltweit erste übergreifende Normungsroadmap für Quantentechnologien veröffentlicht [CEN|CENELEC 2023]. Die „Standardization Roadmap on Quantum Technologies" ist ein Leitfaden, der Normungsvorschläge und -bedarf für alle Bereiche der Quantentechnologie aufzeigt. Dies ist ein Versuch, Europa an die Spitze der Standardisierung von Quantentechnologien zu bringen. Deutschland und Europa sollten alles tun, um diesen Weg zu unterstützen.

4.7 Quantum Initiative Deutschland aufbauen

Um eine gemeinsame nationale Strategie zum Quantencomputing zu entwickeln, hat die Bundesregierung ein hochrangig besetztes Expertengremium aus Wirtschaft und Wissenschaft beauftragt, die zentralen Herausforderungen in diesem Bereich zu identifizieren und Handlungsempfehlungen für das weitere Vorgehen zu formulieren. Dieses Gremium hat Anfang 2021 die „Roadmap Quantencomputing" vorgelegt [Expertenrat 2021].

Der Expertenrat hat sich die Orchestrierung aller Maßnahmen durch eine ressortübergreifende Dachorganisation – die Deutsche Quantengemeinschaft DQG – vorgestellt. Die DQG soll keine Behörde oder Organisation mit Budgetverantwortung sein, sondern mit strategischer Kompetenz die Roadmap regelmäßig aktualisieren und die effiziente Umsetzung der Gesamtstrategie sicherstellen.

Nachdem dieser Gedanke von staatlicher Seite nicht aufgegriffen wurde, gibt es seit kurzem eine Initiative zur Gründung von „Quantum Deutschland, der nationalen Initiative für Quantentechnologien". Quantum Deutschland soll alle Handlungsstränge der Quantentechnologien umfassen. Die Initiative soll Wissenschaft (Universitäten, Forschungsverbünde, Forschungs- und Technologieeinrichtungen), Industrie (Startups, KMU, mittlere und große Firmen) und Beratungsunternehmen und Risikokapitalgeber einbeziehen.

Die Initiative verfolgt die folgenden übergeordneten Ziele:

- Deutschland wird in der Erforschung, Entwicklung, Standardisierung und Anwendung von Quantentechnologien und der zugehörigen Schlüsseltechnologien eine **weltweit führende Position** einnehmen, **souverän** agieren, **wettbewerbsfähig** sein und als unverzichtbarer globaler Partner gelten.
- Wissenschaftliche Ergebnisse werden konsequent in **ökonomisch relevante Anwendungen** überführt und die **Wertschöpfung** in Deutschland wird gestärkt.
- Ein **langfristiges und koordiniertes Engagement** der relevanten Akteure im deutschlandweiten Quantentechnologie-Ökosystem wird sichergestellt, wobei die Grundlagenforschung sowie die Ausbildung von Fachkräften an Universitäten kontinuierlich weiterentwickelt und Forschungs- und Wirtschaftssicherheit gewährleistet werden.

Die übergeordneten Ziele werden durch folgende Maßnahmen adressiert:

- Endanwenderinne, Endanwender und Technologieentwicklerinnen, Technologieentwickler aus Großindustrie, KMU und Startups werden **systematisch** mit Akteurinnen und Akteuren der Wissenschaft verbunden, um die Ausrichtung der jeweiligen Handlungsstränge entlang einer gemeinsamen Roadmap zu ermöglichen und dadurch den **Wissens- und Technologietransfer** zu stärken.
- Die Initiative stellt sich als **kompetenter Ansprechpartnerin** zur Verfügung, die mit **einer fundierten Stimme** der Politik, der Gesellschaft und internationalen Partnern zur Seite steht. Quantum Deutschland wird die Stimme des deutschen Quantentechnologie-Ökosystems.
- **Brücken** zwischen den Quantentechnologien und zu angrenzenden Technologien (bspw. HPC und KI) werden sichergestellt.
- Die Initiative wird durch die Einbindung von **Spitzenvertreterinnen und Spitzenvertretern** der beteilig-

ten Unternehmen, wissenschaftlichen Einrichtungen und Universitäten gestärkt.

Für die erfolgreiche Entwicklung von Quantentechnologien müssen Expertinnen und Experten aus unterschiedlichen Fachdisziplinen (physikalische Technologien, Informationstechnik, Mikrosystemtechnik, Elektrotechnik, Maschinenbau etc.), Branchen (Institute, Halbleiterindustrie, Computerindustrie, Kommunikationsindustrie etc.) und Unternehmensgrößen (Start-ups, Scale-ups, Mittelstand und Großindustrie) eng verzahnt zusammenarbeiten.

Die Erfahrungen der letzten Jahre mit anderen Technologien zeigen, dass diese Zusammenarbeit neu organisiert werden muss. Zu oft wird in Deutschland versucht, neue Querschnittsthemen wie die Quantentechnologie in bestehende Strukturen zu integrieren. Die Gründung einer Quanteninitiative Deutschland, die schnell in die fachlich-inhaltliche Arbeit einsteigt, ist ein sinnvoller Weg, unseren Wirtschaftsstandort zu stärken und schnell und effizient den Weg von der Grundlagenforschung in die Anwendung zu finden. Die Initiative soll auf des Thema fokussieren. Sie darf nicht zum Selbstzweck werden und sollte sich mit ihren Strukturen agil an die Notwendigkeiten anpassen.

Auf der Nationalen Konferenz IT-Sicherheitsforschung, vom 17. bis. 19. März 2025 in Berlin hat sich gezeigt, dass eine Community für Quantenkommunikation bereits besteht. Anschlussfähigkeit zum BSI ist hergestellt. Wichtige Partner mit Praxiswissen und Marktzugang sind die Unternehmen Rohde & Schwarz und die Telekom. Andere Initiativen und Netzwerke sind im Impulspapier genannt. Diese sollten alle in die anzustellenden Überlegungen aggregierend einbezogen werden.

5. Statements der Autoren

Wir schaffen Ökosysteme aus Grundlagenforschung, Technologien, Start-ups und größeren Unternehmen, die mit passenden Förderprogrammen und aktiver Partnerzusammenführung an einen Tisch gebracht werden. Das könnte auch eine Blaupause für andere Bereiche werden.

Prof. Dr. Immanuel Bloch (LMU)

Europa hat eine langfristige Strategie aus einem Guss, die Wissenschaft, Politik und Wirtschaft integriert. Deutschland sollte sich auch eine solche Strategie geben.

Prof. Dr. Tommaso Calarco (FZ Jülich)

Quantentechnologien sollten aus Anwendersicht gemeinsam mit aktuell klassischen Technologielösungen und deren Perspektiven betrachtet werden, um zu technologisch und wirtschaftlich optimalen Lösungen zu gelangen.

Dr. Michael Förtsch (Q.ANT)

Aus Deutschland kommen in fünf Jahren zumindest kritische Komponenten für die leistungsfähigsten Quantencomputer der Welt.

Dr. Sebastian Luber (Infineon)

Wir fahren die „nationalistische“ Debatte zurück und überwinden die Abgrenzung zwischen den Wirtschaftsräumen.

Dr. Heike Riel (IBM Research)

Die Aufgabenteilung zwischen den beiden Bundesministerien BMBF und BMWK sollte nach Grundlagen und Anwendungen erfolgen. Es sollten konsequent Professuren auf der Schnittstelle zwischen physikalischer Technik und Informationstechnik eingerichtet werden.

Dr. Frederick Struckmeier (beim Interview: Trumpf SE + Co. KG, derzeit: PioneerLight Technology GmbH)

Wir müssen in Deutschland schneller werden beim Transfer von Ergebnissen aus der Grundlagenforschung in Produkte. Hierfür müssen wir Start-ups ein stabiles Umfeld und mehr Kapital geben. Der Transfer von IP-Rechten aus der Hochschule in ein Start-up ist mit großen Hürden versehen. Und wo ein deutsches Start-up 15 Millionen Euro Risikokapital bekommt, erhält ein vergleichbares US Start-up 150 Millionen Dollar.

Dr. Thomas Strohm (Robert Bosch GmbH)

Als Schlüssel zum Erfolg sollte Deutschland eine agilere Start-up-Förderung gelingen.

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup (Uni Stuttgart)

In den USA wird viel Venture Capital Geld in Quantentechnologien investiert. Die Kapitalge-ber ziehen sich aber oft nach drei bis fünf Jahren zurück. Deutschland und Europa sollten hier den notwendigen „langen Atem“ aufbringen und ehrlich bleiben hinsichtlich der notwen-digen Entwicklungszeiten.

Prof. Dr. Andreas Tünnermann (Fraunhofer IOF)

5.1 Autorenliste

Prof. Dr. Immanuel Bloch

- Lehrstuhl für Experimentalphysik – Quantenoptik an der LMU München
- Direktor am Max-Planck-Institut für Quantenoptik, München
- Sprecher des Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST)

Prof. Dr. Tommaso Calarco

- Lehrstuhl für die Theorie der Quanteninformation and der Universität zu Köln
- Direktor des Institute for Quantum Control (PGI-8) im Peter Grünberg Institut (PGI) des Forschungszentrum Jülich
- Professor für Physik der kondensierten Materie an der Universität Bologna
- Vorsitzender des Quantum Community Network – EU Quantum Flagship

Dr. Michael Förtsch

- CEO Q.ANT GmbH, Stuttgart

Dr. Sebastian Luber

- Senior Director for Technology & Innovation, Infineon Technologies AG
- Leiter der konzernweiten Expertengruppe zu Quantentechnologien der zweiten Generation

Dr. Heike Riel

- IBM Fellow, Head of Science of Quantum and Information Technology, IBM
- Lead of IBM Research Quantum Europe at IBM Research

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

- Leiter des Fraunhofer-Instituts für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF in Jena
- Direktor des Instituts für Angewandte Physik an der Friedrich-Schiller-Universität Jena
- Mitglied des Direktoriums des Helmholtz-Instituts Jena
- Sprecher der Max Planck School of Photonics

Dr. Thomas Strohm

- Chief Expert für Quantentechnologien in der Bosch Forschung am Standort Renningen Robert Bosch GmbH
- Vice President European Quantum Industry Consortium (QuIC)
- Aktiv im Deutschen Quantum Technologies and Applications Consortium (QUTAC)

Dr. Frederick Struckmeier

- Geschäftsführung, BLECHNEXT, PioneerLight Technology GmbH

Prof. Dr. Jörg Wrachtrup

- Head of Department 3rd Physics Institute, Uni Stuttgart
- Head of Center for Applied Quantum Technology an der Uni Stuttgart
- Fellow am Max-Planck-Institut für Festkörperforschung, Stuttgart

6. Fazit

Quantentechnologien bieten Deutschland die Chance, eine führende Rolle in einer der bedeu-tendsten technologischen Entwicklungen des 21. Jahrhunderts einzunehmen. Um dieses Po-tenzial voll auszuschöpfen, bedarf es einer kohärenten Förderstrategie, die alle relevanten Akteure einbezieht und die Anforderungen des Marktes berücksichtigt. Deutschland sollte sich in der nächsten Entwicklungsphase auf die erfolgskritischen Themen konzentrieren und dort die Entwicklung beschleunigen, seine Ökosysteme weiter ausbauen und die Anwenderinnen und Anwender von Quantentechnologien stärker unterstützen und einbinden. Vor diesem Hintergrund lassen sich sieben Impulse ableiten:

- Eine gemeinsame Vision entwickeln und mit Roadmaps untermauern
- Ökosysteme und Infrastruktur ausbauen
- Forschungs- und Innovationsförderung effizient gestalten
- Wettbewerb um die besten Köpfe gewinnen
- Anwendung in den Mittelpunkt stellen und Anwender aktiv heranführen
- Internationale Normung und Standardisierung begleiten
- Quantum Initiative Deutschland aufbauen

Der VDE appelliert an die Politik, auf den bisherigen Erfolgen aufzubauen und die notwendigen Rahmenbedingungen zu schaffen, um Deutschland langfristig als führenden Standort für Quantentechnologien zu etablieren. Nur durch gemeinsame Anstrengungen und eine langfristige Perspektive können die technologischen und wirtschaftlichen Chancen dieser Zukunftstechnologie realisiert werden. Der VDE beteiligt sich gerne und aktiv an der kurzfristigen Ausgestaltung der nächsten Schritte.

7. Literatur

[Antoni-Micollier 2022] Antoni-Micollier, L. et al: Detecting Volcano-Related Underground Mass Changes with a Quantum Gravimeter, in: Geophysical Research Letters, AGU Advanced Earth and Space Sciences, 06.2022, [online], https://agupubs.onlinelbrary.wiley.com/doi/10.1029/2022GL097814

[BMBF 2023] BMBF: Handlungskonzept Quantentechnologien, Bonn, Deutschland: BMBF, 2023.

[BMBF QYRO 2025] Projekt QYRO, 31.01.2025, [online] https://www.quantentechnologien.de/forschung/foerderung/leuchtturmprojekte-der-quantenbasierten-messtechnik/qyro.html [Bosch QS 2025] Bosch Quantum Sensing, 31.01.2025, [online] https://www.bosch-quantumsensing.com

[C4F 2025] Die Ziele der Zukunftscluster-Initiative „Wissens- und Technologietransfer mit neuen mutigen Visionen“, in: Cluster4Furure Innovationsnetzwerke für unsere Zukunft, 31.01.2025, [online] https://www.clusters4future.de/foerderinitiative/ziele-der-zukunftscluster-initiative

[CEA 2025] Mission and organization, in: CEA-Leti Laboratoire d'électronique et de technologie de l'information, 31.01.2025, [online] https://www.leti-cea.com/cea-tech/leti/english/Pages/Leti/About-Leti/mission-organization.aspx

[CEN|CENELEC 2023] CEN-CENELEC Focus Group on Quantum Technologies (FGQT): Standardization Roadmap on Quantum Technologies, CEN/CENELEC, 2023.

[de Touzalin et al. 2016] de Touzalin, Marcus, Heijman, Cirac, Murray, Calarco: Quantum Manifesto – A New Era of Technology, Netherlands 2016

[EFI 2025] EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation (EFI): Gutachten zu Forschung, Innnovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2025, Berlin: EFI.

[EQF 2025] Introduction to the Quantum Flagship, in: Quantum Flagship, 31.01.2025, [online] https://qt.eu/about-quantum-flagship/

[EQF 2020] The European Quantum Flagship: Strategic Research Agenda, Düsseldorf, Deutschland: VDI Technologiezentrum GmbH, 2020.

[EQF 2025] Unser Ökosystem, in: DLR Quantencomputing Initiative, 31.01.2025, [online] https://qci.dlr.de [Expertenrat 2021] Roadmap Quantencomputing

[IMEC 2025] Design and foundry services, in: Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC), 31.01.2025, [online] https://www.imec-int.com/en

[Infineon 2025] Quantum computing – game changer of tomorrow, 31.01.2025, [online] https://www.infineon.com/cms/en/product/promopages/quantumcomputing/

[JU EuroHPC 2025] R&I Calls, in: EuroHPC Joint Undertaking, 31.01.2025, [online] https://eurohpc-ju.europa.eu/index_en

[McKinsey 2024] Mohr, N. et al.: Quantum Tech Monitor, USA: McKinsey & Company, 2024.

[MINT 2025] Handlungsschwerpunkte, in: Nationale Initiative „MINT Zukunft schaffen!“, 31.01.2025, [online] https://mintzukunftschaffen.de/handlungsschwerpunkte/

[PCH Alliance 2025] Who we are, in: Personal Connected Health Alliance, 31.01.2025, [online] https://www.pchalliance.org/who-we-are

[PlanQK 2022] PlanQK – Plattform und Ökosystem für Quantenunterstützte Künstliche Intelligenz, in: Projekte des ersten BMWK-Förderaufrufs „Digitale Technologien“, 31.01.2025, [online] https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Standardartikel/KuenstlicheIntelligenzProjekte/KuenstlicheIntelligenz_ErsterFoerderaufruf/ki-projekt_plan-qk.html

[QANT 2025] Produktbroschüre: Q.ANT NPS – The Photonic AI Accelerator, Stuttgart, Deutschland: Q.ANT, 2025.

[QANT 2025a] Produktbroschüre: Native Sensing: Neue Dimensionen der Magnetfeldsensorik, Stuttgart, Deutschland: Q.ANT, 2025.

[QANT 2025c] Produktbroschüre: Kompakter Partikelsensor für Analysen in Echtzeit, Stuttgart, Deutschland: Q.ANT, 2025.

[QCI 2025] Unser Ökosystem, in: DLR Quantencomputing Initiative, 31.01.2025, [online] https://qci.dlr.de

[QCN 2025] Quantum Community Network (QCN), in: Quantum Flagship, 31.01.2025, [online] https://qt.eu/structure-governance/quantum-community-network

[QuCUN 2025] Das Quanting Computer User Network in Deutschland (QuCUN), 31.01.2025, [online] https://www.qucun.de

[QuIC 2025] Who we are, in: European Quantum Industry Association (QuIC), 31.01.2025, [online] https://www.euroquic.org

[QuNET 2025] Die Anwendungsszenarien der Quantum Key Distribution (QKD), in: Die QuNET-Initiative – Hochsichere Kommunikation durch Quantenphysik, 31.01.2025, [online] https://qunet-initiative.de

[SQuaD 2025] Hintergrund, in: SQuaD Schirmprojekt Quantenkommunikation Deutschland, 31.01.2025, [online] https://www.squad-germany.de/hintergrund/

[UnternehmerTUM 2025] Entdecke unser Angebot, in: UnternehmerTUM, 31.01.2025, [online] https://www.unternehmertum.de/?_gl=1*ns3ncm*_up*MQ..*_gs*MQ..&gclid=EAIaIQobChMIkP_Iyv-siwMVzkFBAh1o4QIkEAAYASAAEgL-wPD_BwE

[VDE 2022] Schanz, M.: Arbeitsmarkt 2022 – Elektroingenieurinnen und Elektroingenieure – Zahlen | Fakten | Schlussfolgerungen, Offenbach am Main, Deutschland, VDE e.V., 2022.

[VDI-TZ 2021] Programmausschuss Photonik und Quantentechnologie-Communities: Agenda Quantensysteme 2030, Düsseldorf, Deutschland: VDI Technologiezentrum GmbH, 2021

8. Glossar

AES	Advanced Encryption Standard, ein NIST-Standard
AFRL	Airforce Research Laboratory *der US Airforce*
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMDV	Bundesministerium für Digitales und Verkehr
BMF	Bundesministerium der Finanzen
BMI	Bundesministerium des Innern und für Heimat
BMvG	Bundesministerium der Verteidigung
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CENELEC	Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung
CERN	Europäische Organisation für Kernforschung
CV-QKD	Continous Quantum Key Distribution
Cyberagentur	Agentur für Innovation in der Cybersicherheit GmbH
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DQG	Deutsche Quantengemeinschaft
DV-QKD	Discrete Quantum Key Distribution
ESTEC	European Space Research and Technology Centre
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EU	Europäische Union
EuroHPC	European High Performance Computing Joint Undertaking
EuroQCI	Europäische Quantenkommunikationsinfrastruktur
FMD	Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland
FuE	Forschung und Entwicklung
HPC	High Performance Computing
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IPR	Intellectual Property Right
JU EuroHPC	European High Performance Computing Joint Undertaking
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MINT	Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik
NIST	National Institute of Standards and Technology
NV	Nitrogen-Vacancy center (Stickstoff-Fehlstellenzentrum)
PIC	Photonic Integrated Circuit (Integrierte Optik)
PlanQK	Plattform und Ökosystem für Quantenunterstützte Künstliche Intelligenz
PQK	Post-Quanten-Kryptografie
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
QCN	Quantum Community Network
QKD	Quantum Key Distribution
QuBit	Quantenbit – Quantensystem mit zwei Zuständen
QuCUN	Quantum Computing User Network
QuIC	European Quantum Industry Consortium
QUTAC	Quantum Technology & Application Consortium
RTO	Research and Technology Organisation
SPRIN-D	Bundesagentur für Sprunginnovationen
TRL	Technology Readiness Level (Technologiereifegrad)
UN	United Nations / Vereinte Nationen
VDE	Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V.
VDI	Verein Deutscher Ingenieure e.V.
X86	Bezeichnung für die Mikroprozessorfamilie, die auf den Intel-Mikroprozessoren 8086 und 8088 basiert.

VDE Verband der Elektrotechnik
Elektronik Informationstechnik e. V.
Merianstr. 28
63069 Offenbach am Main

Tel. +49 69 6308-0
Fax +49 69 6308-9865
info@vde.com
www.vde.com

VDE