



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung

**HIGHTECH  
STRATEGIE**   
Köpfe. Kompetenzen. Innovationen.

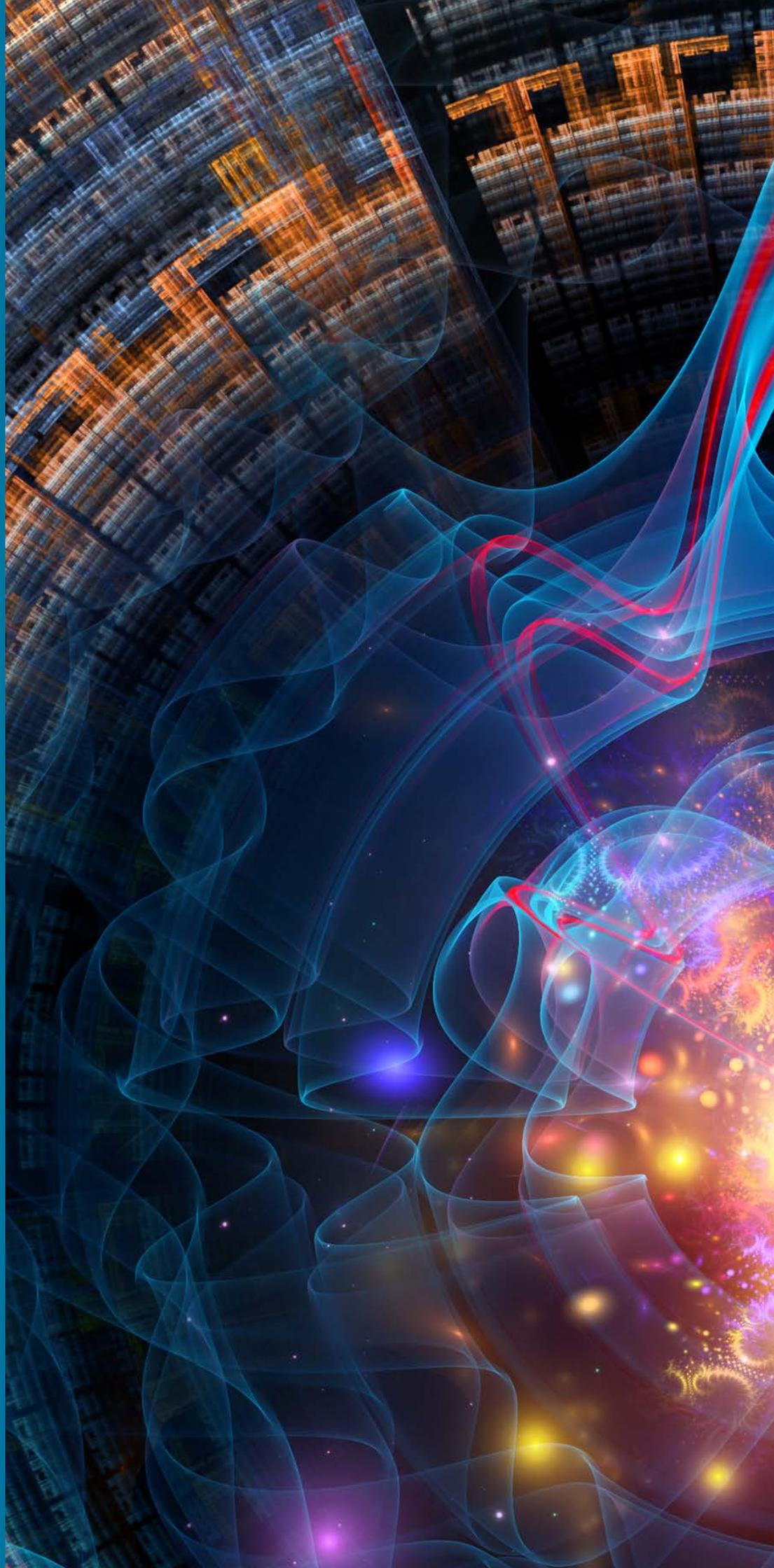
# Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt

Rahmenprogramm der Bundesregierung



# Inhaltsverzeichnis

1	Einführung	3
1.1	Quantentechnologien – die nächste Revolution	3
1.2	Wo stehen die Quantentechnologien heute?	6
2	Schwerpunkte der Forschung in Deutschland	9
2.1	Quantencomputer	9
2.2	Quantenkommunikation	10
2.3	Quantenbasierte Messtechnik	11
2.4	Basistechnologien für Quantensysteme	12
3	Die Maßnahmen der Bundesregierung	14
3.1	Die Forschungslandschaft für die Quantentechnologien ausbauen	14
3.2	Forschungsnetzwerke für neue Anwendungen schaffen	15
3.3	Leuchtturmprojekte für industrielle Wettbewerbsfähigkeit etablieren	20
3.4	Sicherheit und technologische Souveränität gewährleisten	22
3.5	Die internationale Zusammenarbeit gestalten	27
3.6	Die Menschen in unserem Land mitnehmen	28
4	Mittelplanung	32
5	Anhang: Trägerorganisationen und Ressortforschung	33
5.1	Deutsche Forschungsgemeinschaft	33
5.2	Max-Planck-Gesellschaft	33
5.3	Fraunhofer-Gesellschaft	34
5.4	Helmholtz-Gemeinschaft	38
5.5	Leibniz-Gemeinschaft	41
5.6	Physikalisch-Technische Bundesanstalt	44
5.7	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik	47
5.8	Agentur für Innovation in der Cybersicherheit	48
	Impressum	49



# 1 Einführung

## 1.1 Quantentechnologien – die nächste Revolution

---

Wir erforschen und steuern unsere Welt heute mit hoch entwickelten digitalen Instrumenten: Kameras, Computer, Sensoren. Wir arbeiten und leben in starkem Maße auf der Basis digitaler Technologien.

Unsere Welt besteht aber tatsächlich nicht aus Nullen und Einsen, sondern aus Quanten. Das erkannten Max Planck und Albert Einstein zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Die Träger physikalischer Wechselwirkungen sind nicht beliebig teilbar, sondern treten in einer bestimmten „Mindestgröße“ auf – als „Quanten“. Unsere Welt ist also eine Quantenwelt, in der auf der Ebene der Atome und ihrer Bestandteile die Regeln der Quantenmechanik gelten – eigenartige Regeln, die unserem Alltagsverständnis in manchen Punkten zu widersprechen scheinen.

Wenn die Welt eine Quantenwelt ist, dann müssten Quantensysteme uns dabei helfen können, sie besser zu verstehen und effizienter zu organisieren – das ist die Idee der Quantentechnologien. Was wäre, wenn wir unsere Welt künftig auf eine völlig neuartige technologische Basis stellen können mit bislang unbekanntem Geräten und Verfahren, die nach den Regeln der Quantenmechanik arbeiten? Könnten wir dann Zusammenhänge erkennen, die uns bislang verborgen sind? Könnten wir Aufgaben lösen, an denen wir bislang scheitern, z. B. weil unsere heutigen Computer dafür viel zu viel Zeit und Energie brauchen? Wie können solche neuen Technologien uns im Alltag wirklich von Nutzen sein?

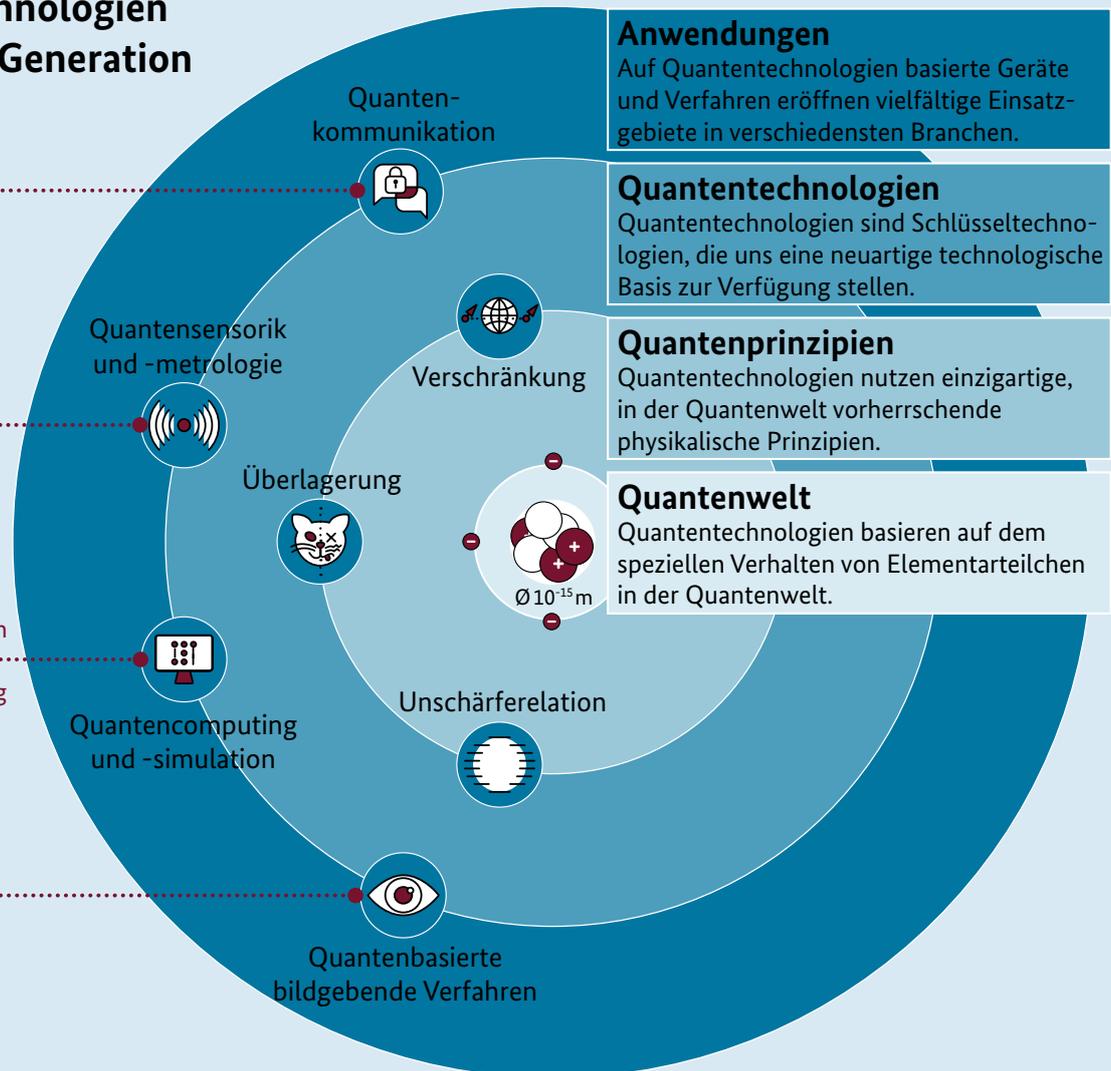
## Quantentechnologien der zweiten Generation

- IT-Sicherheit
- Datenschutz
- Verschlüsselte Übertragung

- Medizintechnik
- Navigation
- Erdbeobachtung per Satellit

- KI/Maschinenlernen
- Mustererkennung
- Materialentwicklung

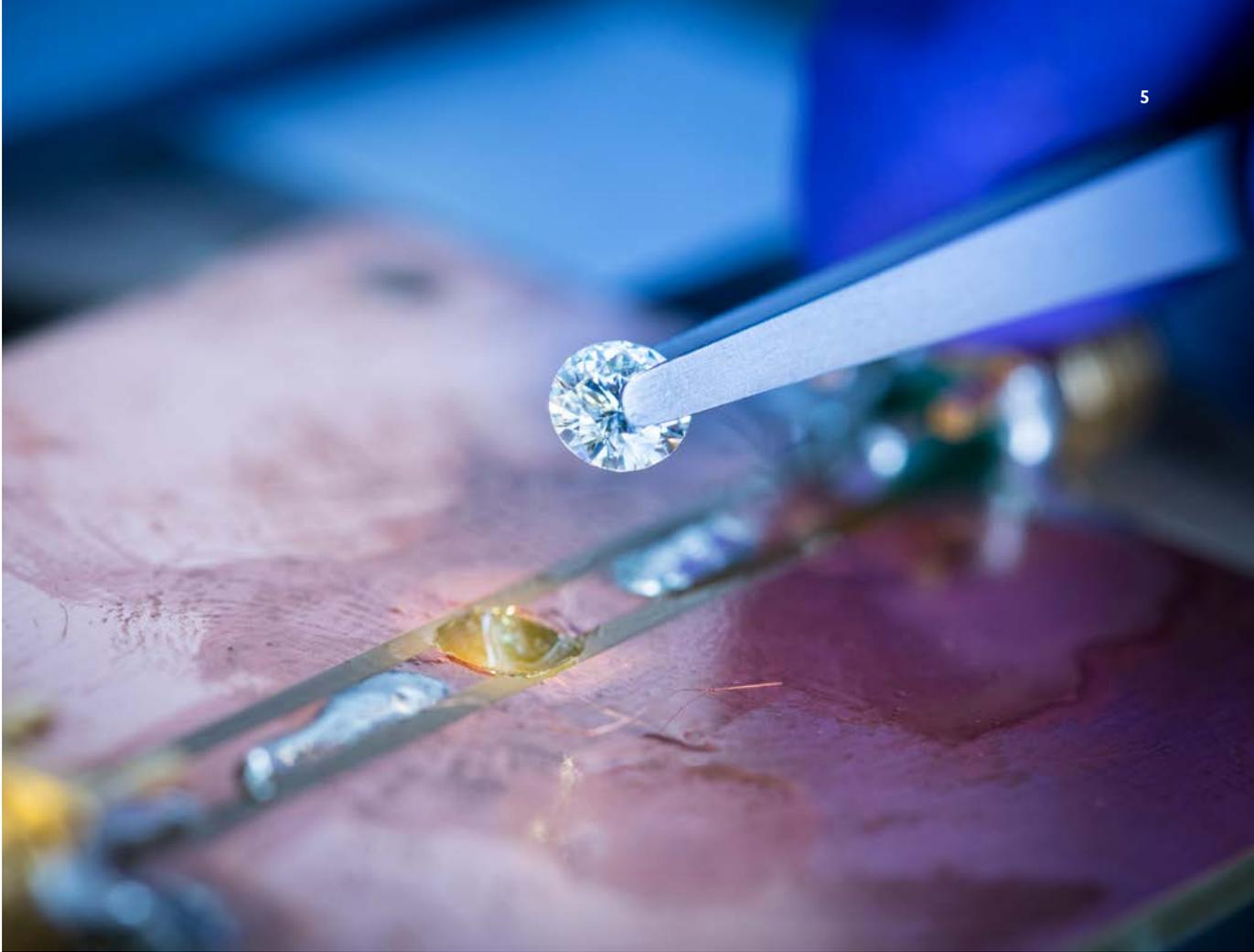
- Automatisierung
- Medizinische Diagnostik
- Halbleiterfertigung



Die Leistungsfähigkeit von Internetverbindungen hängt z. B. mit der Genauigkeit des Zeittaktes zusammen, der sie synchronisiert. Die besten Uhren auf der Welt gehen heute so genau, dass ihre mittlere Abweichung gerade einmal eine Sekunde im Zeitalter des Universums beträgt. Mit Quantentechnologien könnte man solche extrem genauen Uhren so leicht und robust bauen, dass sie nicht nur in einigen wenigen Messlaboren eingesetzt werden können, sondern auch als „Taktgeber“ in Kommunikationsnetzen. Diese würden damit deutlich leistungsfähiger, und gute Internetanbindungen könnten preiswerter werden. Das Gleiche gilt für Navigationssysteme: Wenn ihr Zeittakt präzise genug wäre, dann könnte man damit etwa Baumaschinen auf der Baustelle steuern. Quantentechnologien könnten also unseren Arbeitsalltag verändern.

Unsere Welt ist eine Quantenwelt. Die Träger physikalischer Wechselwirkungen sind nicht beliebig teilbar, sondern treten in einer bestimmten „Mindestgröße“ auf – als „Quanten“. Auf der Ebene der Atome und ihrer Bestandteile gelten die Regeln der Quantenmechanik – eigenartige Regeln, die unserem Alltagsverständnis in manchen Punkten zu widersprechen scheinen. Sie haben aber große Bedeutung für viele Bereiche unseres Lebens.

Magnetfelder kann man heute nur mit großen Maschinen sehr genau messen, z. B. mit Magneto-Enzephalografie-Geräten (MEG) in der Klinik. Diamant-Quantensensoren bieten eine Möglichkeit, MEG-Geräte so



zu verkleinern, dass man sie auch mobil verwenden könnte, z. B. für die Steuerung von Geräten, die behinderten Menschen im Alltag helfen.

Manche Aufgaben kann man heute auch noch gar nicht befriedigend lösen. Dazu gehört z. B. die Analyse von Finanzmärkten oder die Optimierung von Fahrtrouten und Verkehrssystemen. Wissenschaftler<sup>1</sup> überlegen, ob man solche Aufgaben durch Simulationen in speziellen Quantensystemen lösen könnte. Das würde dabei helfen, Finanzkrisen besser vorherzusehen oder den Verkehr effizienter zu steuern. Vielleicht gelingt es auch, Quantencomputer zu entwickeln, auf denen man spezielle Quantensoftware laufen lassen kann. Klassische Computer können aufgrund ihrer Bindung an digitale Rechenprogramme bestimmte Berechnungen grundsätzlich nicht oder nicht in endlicher Zeit und ohne großen Energieverbrauch durchführen. Ein Beispiel ist die Zerlegung (Faktorisierung) von großen Zahlen in Primzahlen, die eine zentrale Rolle bei der Datenverschlüsselung spielt. Ein anderes Beispiel ist die Suche in sehr großen Datenmengen.

Die Eigenschaften von Quantensystemen kann man für innovative Anwendungen nutzen. In künstlichen Diamanten lassen sich beispielsweise sehr gut Quantenzustände für hochempfindliche Messungen von Magnetfeldern herstellen. Perspektivisch können so präzise Messinstrumente wie Hirnstrommessgeräte, die aktuell nur in Kliniken verfügbar sind, entwickelt und in verkleinerter Form für den persönlichen Bereich nutzbar gemacht werden.

<sup>1</sup> Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird an einigen Stellen auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichermaßen für beiderlei Geschlecht.

## 1.2 Wo stehen die Quantentechnologien heute?

---

Schon heute nutzt fast jeder täglich Quantentechnologien: Computer, Datennetze oder auch ein Großteil der medizinischen Bildgebung – all diese technologischen Errungenschaften wären ohne Quanteneffekte nicht denkbar, denn Bauteile wie Transistoren, Dioden und Laser nutzen Prinzipien der Quantenphysik. Deutschland ist bei diesen „Quantentechnologien der ersten Generation“ wissenschaftlich und wirtschaftlich höchst erfolgreich.

Ein hervorragendes Beispiel dafür ist der Laser. Aus einem ursprünglich rein wissenschaftlichen Phänomen haben Institute und Unternehmen ein Gerät entwickelt, das heute in der Forschung, bei der Produktion von Maschinen und Fahrzeugen, beim 3D-Druck, in der Messtechnik, in der Kommunikation und in vielen Alltagsgeräten verwendet wird. Besonders leistungsfähige Laserquellen und -maschinen werden häufig in Deutschland hergestellt.

Wenn es jetzt darum geht, Quanteneffekte nicht mehr nur indirekt zu nutzen, sondern sie gezielt zu kontrollieren, dann ist es das Ziel der Bundesregierung, dass deutsche Institute und Unternehmen auch diese Entwicklung gestalten und führend umsetzen. Solche „Quantentechnologien der zweiten Generation“ können z. B. sehr viel genauere Messgeräte ermöglichen, die Sicherheit bei der Datenkommunikation stark verbessern oder deutlich leistungsfähigere Satelliten und Computer hervorbringen. Die Möglichkeiten dieser Technologien sind so groß, dass sie erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaft und Gesellschaft haben können und auch sicherheitspolitisch von hoher Relevanz sind. Der Wettlauf um die industrielle Realisierung solcher Technologien hat international bereits begonnen. Aktivitäten dazu gibt es in allen führenden Ländern. Einige Beispiele:

- Quantentechnologien stehen in China im Fokus des politischen Interesses und genießen daher starke politische Unterstützung und umfangreiche finanzielle Förderung. Der Start des weltweit ersten Satelliten zur Quantenschlüsselverteilung (QKD – Quantum Key Distribution) 2016 ist ein vielbeachtetes Beispiel.

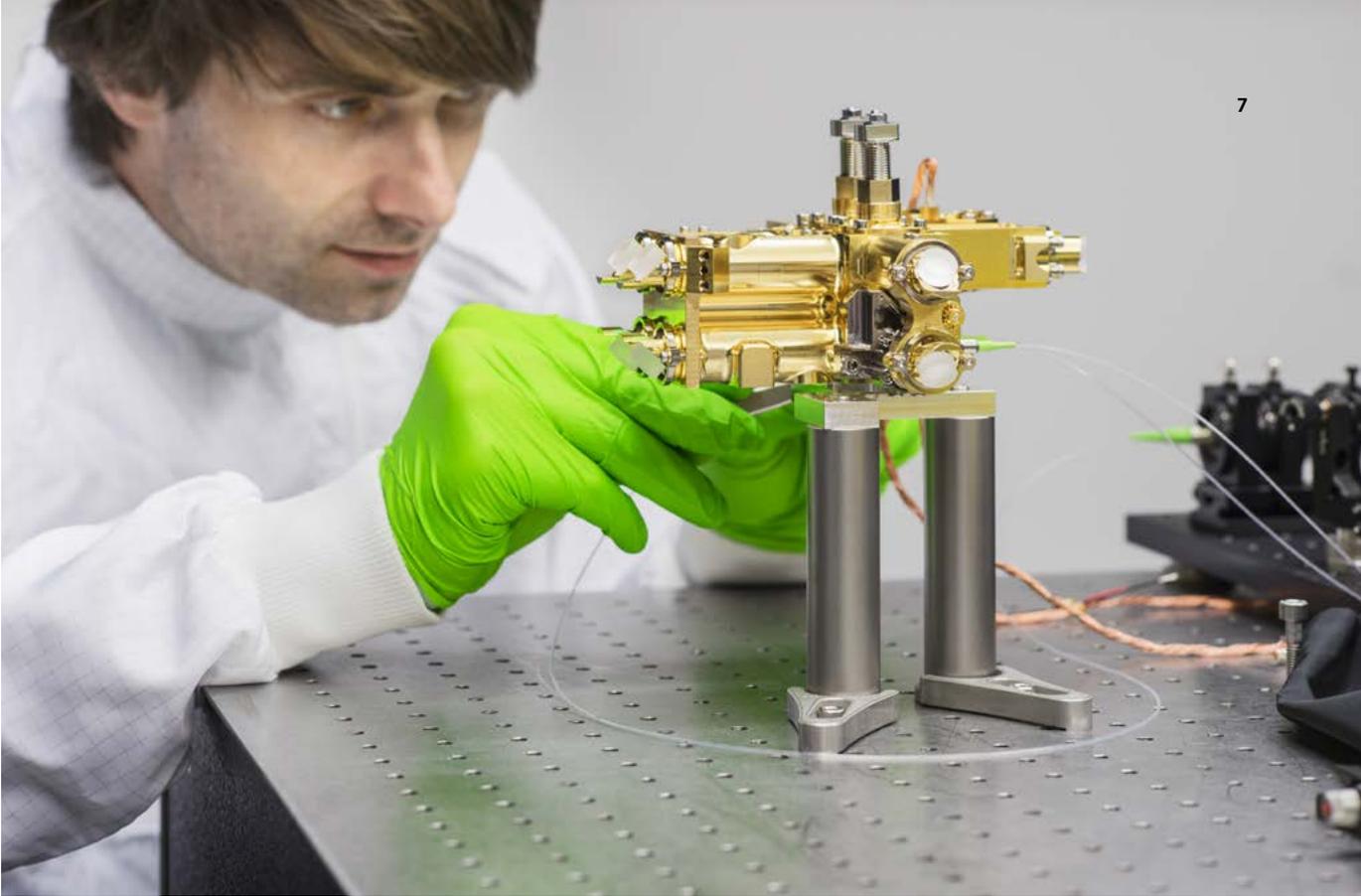
- Institute und Unternehmen in den USA treiben derzeit mit erheblichen Mitteln die Entwicklung von Quantencomputern voran. Dabei sind die Aktivitäten dort von wirtschaftlichen Zielen, aber auch stark von militärstrategischen Gesichtspunkten geprägt.
- Japan, Singapur und Kanada haben seit einigen Jahren eigene Programme sowohl für die Erforschung als auch für Weltraumanwendungen der Quantentechnologien aufgelegt.
- Die Regierung des Vereinigten Königreiches fördert in ihrem nationalen Programm, dem „UK National Quantum Technologies Programme“<sup>2</sup>, Forschung, akademische Ausbildung und industrielle Innovation in den Quantentechnologien.
- Unter Bezugnahme auf das „Quantum Manifesto“<sup>3</sup> europäischer Wissenschaftler kündigte die Europäische Kommission 2016 an, ein Flaggschiffprojekt („FET Flagship“) zu den Quantentechnologien mit den vier Säulen Quantenkommunikation, -sensorik, -computer und -simulationsrechner einzurichten. Sie setzte eine Fachkommission (High Level Steering Committee) unter deutscher Leitung ein, die dazu konkrete Vorschläge entwickeln sollte. Diese Kommission legte Ende 2017 ihren öffentlichen Abschlussbericht vor.<sup>4</sup>

---

<sup>2</sup> <http://uknqt.epsrc.ac.uk/>

<sup>3</sup> Quantum Manifesto: A New Era of Technology, Mai 2016; <http://www.qutega.de/links/>

<sup>4</sup> Quantum Technologies Flagship Final Report; <http://ec.europa.eu/transparency/regexpert/index.cfm?do=groupDetail.groupDetailDoc&id=34809&no=1>



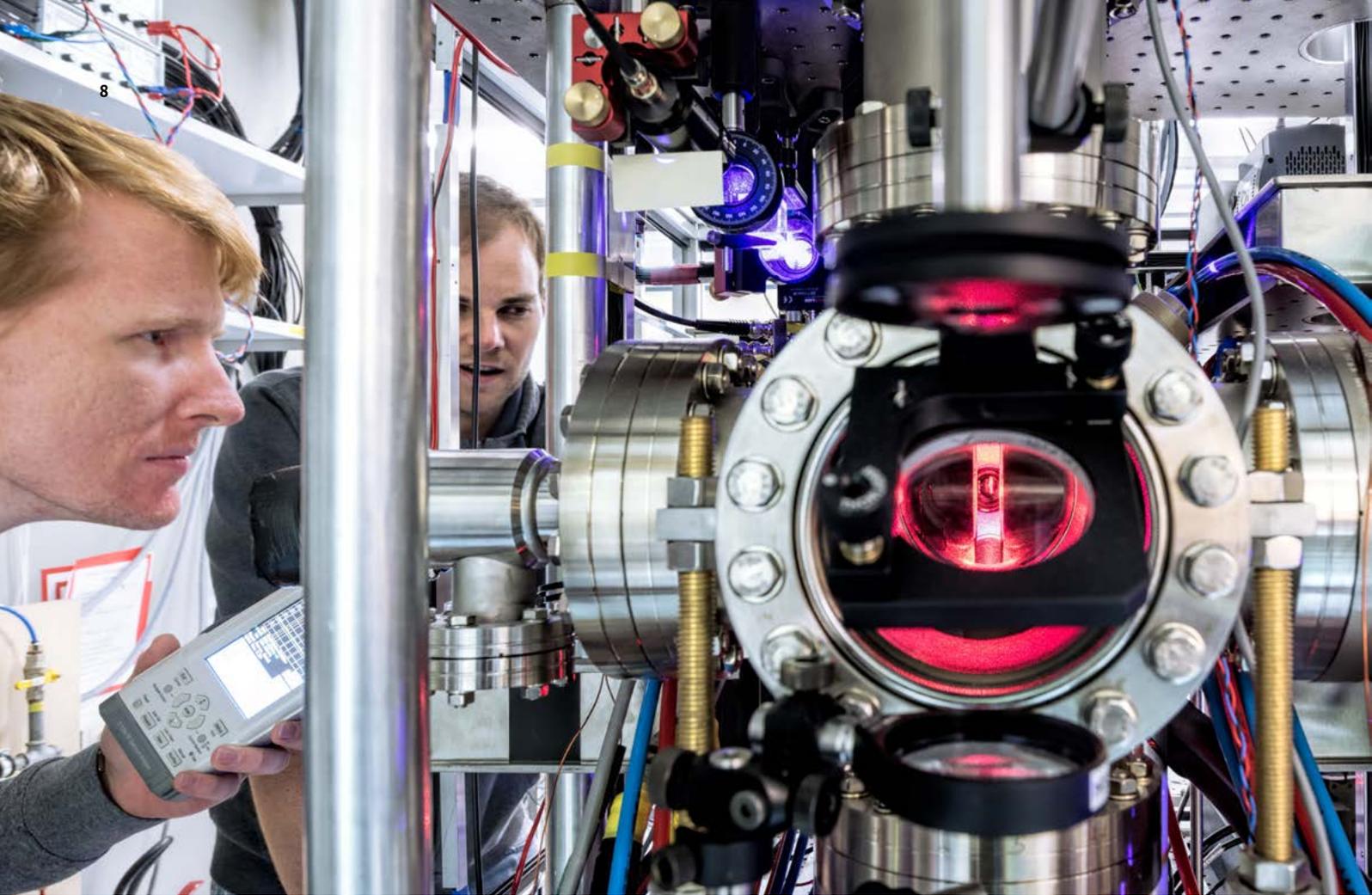
Die Möglichkeiten der Quantentechnologien sind so groß, dass sie erhebliche Auswirkungen auf die Wirtschaft und Gesellschaft haben können und auch sicherheitspolitisch von hoher Relevanz sind. Ein Beispiel hierfür zeigt das Bild: eine Einzelphotonenquelle für inhärent sichere Datenübertragung. Der Wettlauf um die industrielle Realisierung solcher Technologien hat international bereits begonnen.

Deutschland und die EU besitzen für die Entwicklung von Quantentechnologien eine gute Ausgangsbasis. Europa ist weltweit führend in der Quantenphysik – mit rund 50 % aller wissenschaftlichen Publikationen und fast 40 % der Forscher in diesem Bereich.<sup>5</sup> Deutschland selbst verfügt über eine starke Expertise in der Quantenphysik und damit über gute Voraussetzungen, um auch die Entwicklung von Quantentechnologien der zweiten Generation frühzeitig in Anwendungen nutzbar zu machen und ihre Entwicklung international mitzugestalten. Dies ist auch das Resultat der gemeinsamen Forschungs- und Wissenschaftspolitik in Bund und Ländern, getragen durch die Förder- und Trägerorganisationen der Forschung

sowie die Ressortforschungseinrichtungen in Deutschland. In der physikalischen Grundlagenforschung wie auch im Vorfeld der technischen Nutzung von quantenphysikalischen Effekten und Systemen sind die Trägerorganisationen der Forschung – Deutsche Forschungsgemeinschaft, Max-Planck-Gesellschaft, Helmholtz-Gemeinschaft, Fraunhofer-Gesellschaft und Leibniz-Gemeinschaft – seit vielen Jahren erfolgreich tätig. Dies gilt sowohl im nationalen Bereich wie in der weltweiten wissenschaftlichen Zusammenarbeit. Die Einrichtungen der Ressortforschung unterstützen die Forschung insbesondere dort, wo öffentliche Aufgaben berührt sind. Die für die Quantentechnologien relevanten Tätigkeitsbereiche der deutschen Trägerorganisationen von Wissenschaft und Forschung sowie die Beiträge der Ressortforschungseinrichtungen stellt dieses Programm im Anhang ausführlich vor. Auch bei weiteren wichtigen Technologien zur Realisierung quantentechnologischer Anwendungen wie Mikroelektronik, Nanotechnologie und Supraleitung sind Forschung und Industrie in Deutschland gut aufgestellt. Die exzellente deutsche Forschungs- und Technologieinfrastruktur und deren enge Vernetzung mit großen, mittelgroßen und kleinen Unternehmen ist ein starker Wettbewerbsvorteil.

Die Bundesregierung wird den Übergang von einer weitgehend wissenschaftlich getriebenen Erforschung der Quantenphysik hin zu Anwendungen neuer Quantentechnologien politisch begleiten und gestalten. Ziele der Bundesregierung mit dem vorliegenden Regierungsprogramm sind:

<sup>5</sup> Nach einer von der Europäischen Kommission in Auftrag gegebenen Studie stammten 2.455 Autoren quantenphysikalischer Veröffentlichungen im Zeitraum 2013 bis 2015 aus der EU, während es aus China 1.913 und aus Nordamerika 1.564 Autoren waren. Quantum Technologies Flagship Final Report, S.3; Quelle: s. Fußnote 4



- die starke Position Deutschlands in der Forschung auf dem Gebiet der Quantenphysik auszubauen und den Weg zu quantentechnologischen Anwendungen zu öffnen,
- die richtigen Rahmenbedingungen zu schaffen, um neue wirtschaftliche Chancen und Märkte vorzubereiten,
- das Fundament für eine industrielle Führungsrolle in den Quantentechnologien zu schaffen,
- zusammen mit unseren internationalen Partnern die Sicherheit und Autonomie Deutschlands und Europas auf diesem wichtigen Zukunftsfeld sicherzustellen und
- die Menschen in Deutschland zu informieren und auf dem Weg zu einer neuen Schlüsseltechnologie mitzunehmen.

Das Programm der Bundesregierung beschreibt den Ausgangsstand und benennt Ziele und konkrete Maßnahmen bis 2022. Dazu gehören die Stärkung der deutschen Forschungsinstitute, die bessere Vernetzung mit Unternehmen und die Entwicklung neuer Technologien für Regierungsaufgaben, aber auch die Information und Beteiligung der Bürgerinnen und Bürger bei Fragen der Quantentechnologien. Die Bundesregierung wird dafür sorgen, dass mehr Menschen verstehen können, was mit Quantentechnologien möglich ist. Und dass sie diskutieren und entscheiden können,

Deutschland ist bei den Quantentechnologien gut aufgestellt. Die Forschungscommunity verfügt insbesondere im Bereich der Quantenphysik über eine starke Expertise. Auch bei den wichtigen Basistechnologien zur Realisierung quantentechnologischer Anwendungen wie Mikroelektronik, Nanotechnologie und Supraleitung bestehen Forschung und Industrie in Deutschland im internationalen Wettbewerb.

was das für sie bedeutet – für ihre Ausbildung, für ihre Arbeit, für ihre Ziele.

Insgesamt stellt die Bundesregierung in dieser Legislaturperiode 650 Mio. Euro für die Erforschung der Quantentechnologien bereit. Die Bundesregierung wird die Entwicklung in den Quantentechnologien kontinuierlich verfolgen, ihre Maßnahmen überprüfen und entsprechend weiterentwickeln.

## 2 Schwerpunkte der Forschung in Deutschland

Zur Vorbereitung des vorliegenden Programms hat die Bundesregierung einen umfangreichen Agendaprozess mit Wissenschaft und Wirtschaft durchgeführt, in dem der Forschungsstand dokumentiert, Aufgaben in Forschung und Entwicklung (F&E) identifiziert und mögliche Entwicklungen abgeschätzt wurden. Als Ergebnis entstanden Expertenpapiere aus der Wissenschaft<sup>6</sup> wie auch aus der Industrie<sup>7</sup>. Folgende Entwicklungsbereiche für die Quantentechnologien wurden dabei identifiziert.

### 2.1 Quantencomputer

Quantencomputer funktionieren prinzipiell anders als herkömmliche digitale Rechner. Im Unterschied zu den Bits von Digitalrechnern sind ihre kleinsten Recheneinheiten, die „Quantum Bits“ (Qubits), in der Lage, sich untereinander nach speziellen Gesetzmäßigkeiten der Quantenmechanik zu verbinden und damit einen wesentlich komplexeren Gesamtzustand anzunehmen. Man spricht dann von „Verschränkung“. Diese Verschränkung der Qubits eines Quantencomputers zu einem Gesamtzustand ist eine einzigartige Eigenschaft von Quantencomputern. Viele Aufgaben, die sich mit herkömmlichen Digitalrechnern nicht befriedigend lösen lassen, sind dadurch gekennzeichnet, dass zahlreiche Bedingungen in einem komplexen wechselseitigen Zusammenspiel berechnet werden müssen. Beispiele

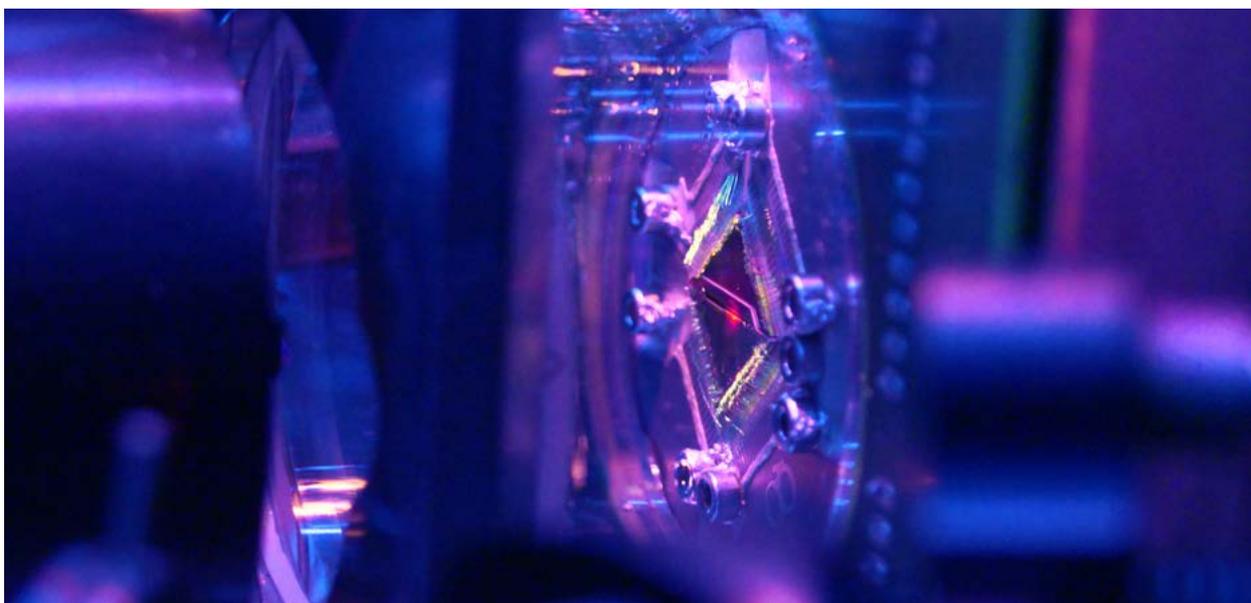
sind die schnelle Suche in riesigen Datenmengen oder die Optimierung großer logistischer Systeme wie Verkehrsnetze oder Stundenpläne. Wenn es gelingt, die Verschränkungs Zustände in Quantencomputern so einzustellen, dass sie diesen Aufgaben entsprechen, dann könnten sie solche Aufgaben viel schneller lösen als herkömmliche Digitalcomputer. Neben universell programmierbaren Computern werden auch Quantensimulatoren für praxisrelevante Quantenphänomene, beispielsweise in der Chemie oder der Pharmazie, möglich. Sie sind zwar weniger flexibel einsetzbar und nur für bestimmte Problemklassen geeignet, dafür könnten sie aber wesentlich früher einen Nutzen für konkrete Anwendungen liefern.

Die Realisierung von Quantenrechnern und -simulatoren ist mit außerordentlichen Herausforderungen verbunden. So ist die quantenphysikalische Verschränkung von Qubits z. B. ein Phänomen, das äußerst empfindlich auf Umgebungseinflüsse reagiert und daher meist schon nach kurzer Zeit wieder verschwindet. Um

Der Quantencomputer kann als die weitreichendste Innovation der quantentechnologischen Anwendungen angesehen werden. Aufgrund des spezifischen Funktionsprinzips haben Quantencomputer das Potenzial, Aufgaben zu lösen, für die klassische Computer zu ineffizient arbeiten. Um die sogenannten Quantenbits herzustellen, gibt es verschiedene Möglichkeiten, unter anderem die im Bild dargestellte Lösung von einzelnen Atomen in Teilchenfallen.

6 Konzeptpapier der Nationalen Initiative zur Förderung der Quantentechnologien von Grundlagen bis Anwendungen (QUTEQA); <http://www.qutega.de/en/home/>

7 Förderung von Quantentechnologien – Positionspapier der Deutschen Industrie; [http://www.photonikforschung.de/media/quantentechnologien/pdf/Quantentechnologie\\_bf.pdf](http://www.photonikforschung.de/media/quantentechnologien/pdf/Quantentechnologie_bf.pdf)



das oftmals als Anwendung genannte Brechen heutiger Public-Key-Kryptografieverfahren durchführen zu können, wären Quantencomputer mit mindestens vielen Tausend Qubits erforderlich. Zunächst stehen deshalb vor allem solche Anwendungen im Blickpunkt, die sich schon mit wenigen Hundert Qubits bearbeiten lassen.

Auf dem Weg zu Quantenrechnern ist die Entwicklung spezieller Algorithmen mindestens ebenso wichtig wie die Hardwareentwicklung. Für die Erforschung von Quantenalgorithmen ist es dabei nicht zwingend erforderlich, dass bereits Quantencomputer existieren, da man diese bis zu einem gewissen Grad (und einer bestimmten Größe) auch mit herkömmlichen Digitalrechnern simulieren kann. Entsprechende Arbeiten sind auch deshalb wichtig, weil derzeit noch sehr unterschiedliche Hardwareplattformen und Architekturen für Quantencomputer diskutiert werden und deren Vor- und Nachteile mit Quantenalgorithmen auf klassischen Rechnern überprüft und verglichen werden müssen.

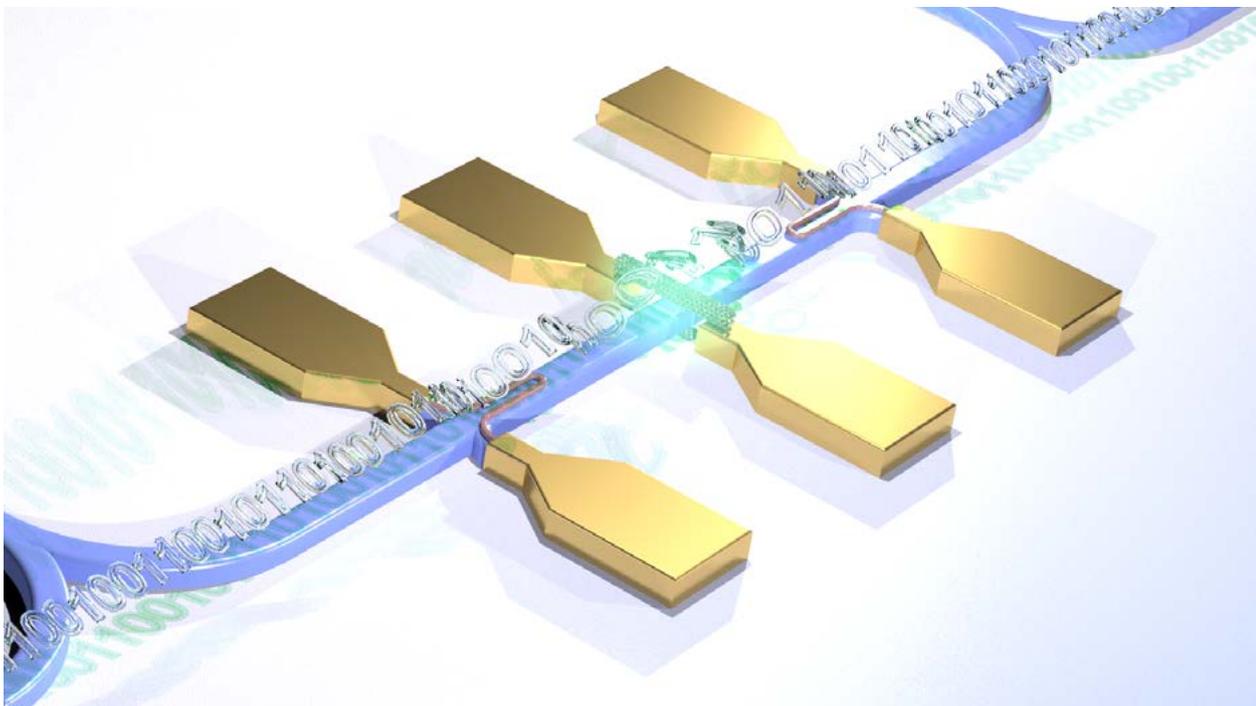
## 2.2 Quantenkommunikation

Die Quantenkommunikation nutzt verschränkte Quantenzustände zum Schlüsselaustausch in der Datenübertragung. Verschränkte Quantenobjekte, z. B. Photonen, werden an zwei weit voneinander entfernte Orte gesendet. Wenn man dann an beiden Orten

bestimmte Eigenschaften der beiden Photonen misst, lässt sich mit Sicherheit feststellen, ob eines der beiden Photonen bereits einmal gemessen wurde. Wenn ja, dann bedeutet das: Die Verbindung wurde abgehört. Der Grund: Unbekannte Quantenzustände lassen sich nicht kopieren oder störungsfrei vermessen. Störungen der Quantenzustände werden unweigerlich als Fehler in der Übertragung festgestellt und decken den Lausangriff auf.

Diese Technik wird in der Kommunikationspraxis für den Austausch von Verschlüsselungen genutzt. Bei der Quantenkryptografie oder Quantenschlüsselverteilung (QKD – Quantum Key Distribution) erzeugt man den Schlüssel zu einer geheimen Information auf Basis von einzelnen Quantenzuständen. Im Unterschied zu gebräuchlichen kryptografischen Verfahren beruht die Sicherheit hier auf einem physikalischen Naturgesetz

Die Quantenkommunikation beschäftigt sich mit dem Austausch von Quantenzuständen über sehr kurze Distanzen innerhalb eines einzelnen Chips, wie beispielhaft in der Abbildung dargestellt, bis hin zu großen Kommunikationsstrecken über Hunderte von Kilometern. Im Unterschied zu klassischen kryptografischen Verfahren beruht die Sicherheit der Datenübertragung auf einem physikalischen Naturgesetz und nicht auf einem mathematischen Prinzip.



und nicht auf mathematischen Annahmen. Damit werden erstmals Kommunikationsverbindungen möglich, deren Sicherheit physikalisch basiert – und nicht lediglich mathematisch berechnet – ist. Die Quantenzustände sind allerdings sehr fragil, sodass eine Übertragung beträchtliche technische Herausforderungen mit sich bringt.

QKD-Geräte sind schon seit längerer Zeit kommerziell für spezifische Nischenmärkte verfügbar. Typische Kunden sind aktuell Banken oder Regierungen. Die große Mehrheit der Ansätze zum Quantenschlüssel-austausch beruht dabei auf dem Austausch von Photonen mittels Glasfasern. Anwendungen lassen sich jedoch bei dem heutigen Stand der Technik lediglich als Punkt-zu-Punkt-Verbindungen über Distanzen von weniger als 100 Kilometer realisieren. In der Freiraum-Laserkommunikation wurden bereits entscheidende Fortschritte bei der Überwindung atmosphärischer Störeinflüsse in Tests unter Realbedingungen erreicht.<sup>8</sup> Laserbasierte Kommunikationstechnologien mit Quantenkryptografie wurden bereits 2015 unter atmosphärischen Bedingungen erfolgreich mit einem fliegenden Objekt getestet.<sup>9</sup> Für deutlich größere Distanzen und für konkrete Anwendungen sind noch technologische Fragen offen, weil die schwachen Lichtsignale der Quantenkommunikation nicht mit normalen Verstärkern bearbeitet werden können. Die Einbindung raumfahrtbasierter Quantenschlüsselverteilung könnte sich jedoch für die Realisierung interkontinentaler Verbindungen als nützlich erweisen.

Sobald ein Quantencomputer existieren würde, hätte dies massive Auswirkungen auch auf die Datensicherheit. Das gilt nicht nur für (dann) aktuelle Kommunikationsbeziehungen, sondern auch für vor dieser Zeit aufgezeichnete Kommunikationen, die nachträglich entschlüsselt werden könnten. Wenn man bedenkt, dass kryptografische Sicherungen häufig – wie z. B. auf Satelliten – für eine längere Lebenszeit ausgelegt sind, wird klar, dass bereits heute auch Verschlüsselungsverfahren entwickelt werden müssen, die gegen Angriffe mit Quantencomputern sicher sind. Dafür gibt es

neben der Quantenkommunikation auch schon erste Lösungsansätze zu einer „Postquantenkryptografie“.<sup>10</sup>

## 2.3 Quantenbasierte Messtechnik

Während die Fragilität von Quantenzuständen und -systemen die Entwicklung praxistauglicher Quantencomputer und Quantenkommunikationstechnik sehr erschwert, eröffnet sie in der Messtechnik enorme Möglichkeiten. Denn Fragilität gegenüber Umwelteinflüssen ist nichts anderes als hohe technische Messempfindlichkeit. Mit gekonnt konstruierten Quantensystemen lassen sich daher physikalische Größen wie Druck, Temperatur, Position, Zeit, Geschwindigkeit, Beschleunigung, elektrische und magnetische Felder oder die Gravitation extrem präzise messen.

Atomuhren auf der Basis atomarer Quantenzustände dienen bereits seit Jahrzehnten als Zeitreferenz für Präzisionsmessungen, wie beispielsweise im Rahmen des europäischen Galileo-Navigationssystems oder des Global Positioning Systems (GPS) zur Navigation. Mit Quanten-Gravimetern auf Basis der Interferometrie kalter Atome kann man selbst kleinste Variationen im Schwerfeld der Erde feststellen, wie sie durch unterschiedliche Materialzusammensetzungen der Erdkruste verursacht werden. Solche ultrapräzisen Gravimeter ließen sich daher u. a. zum Auffinden von Bodenschätzen einsetzen. Neue Quantensensoren, die ihren Quantenzustand auch bei Raumtemperatur einnehmen und erhalten, können den Weg für eine Miniaturisierung und eine deutliche Kostenreduzierung frei machen.

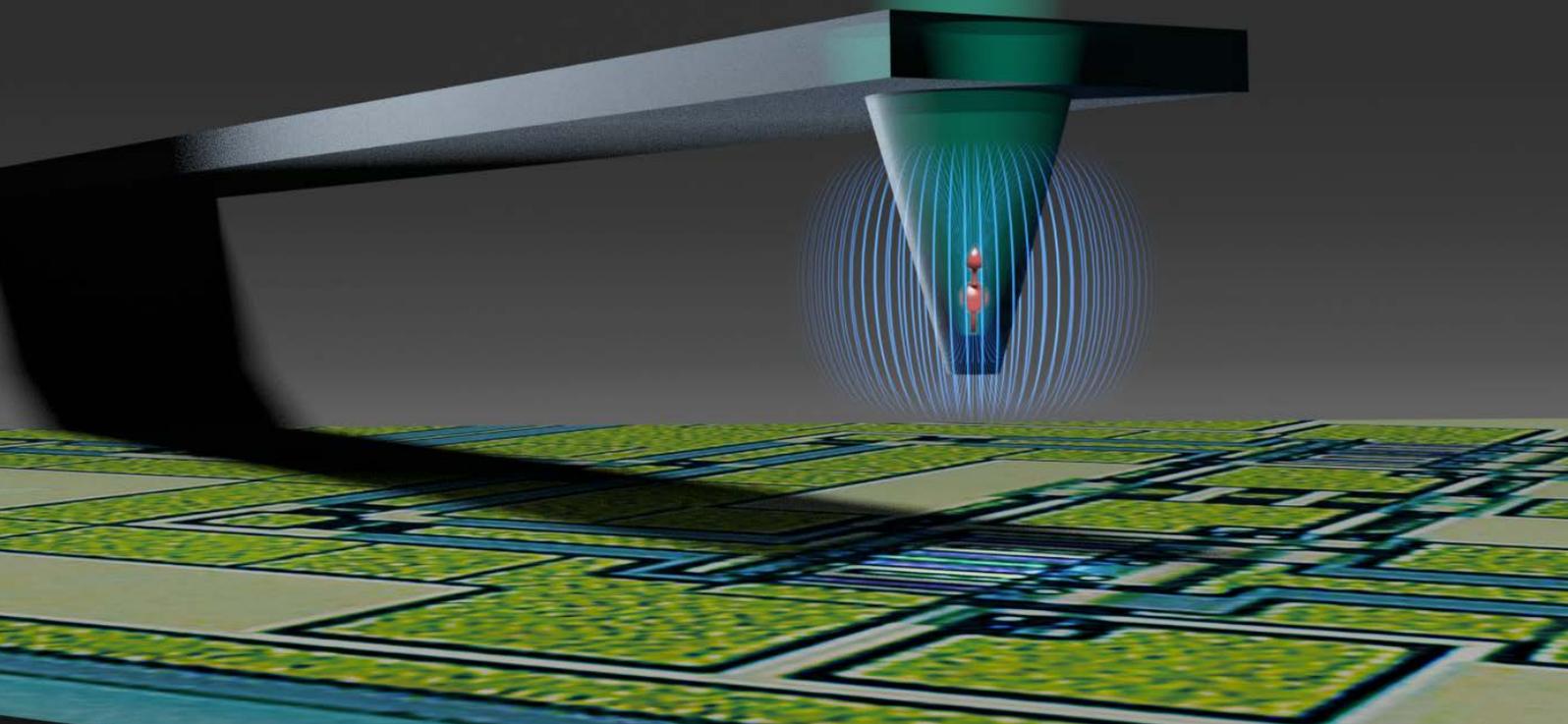
Ein weiterer Einsatzbereich von Quantenphänomenen findet sich bei der optischen Abbildung (quantum enhanced imaging). So lassen sich mit quantenmechanischen Verfahren beispielsweise höhere optische Auflösungen erzielen als mit klassischen Verfahren. Dasselbe Prinzip lässt sich auch in der Quantenlithografie zur Erzeugung kleinerer Strukturen anwenden.

Das wirtschaftliche Potenzial der quantenbasierten Messtechnik findet sich nach aktueller Einschätzung in

8 [https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151\\_read-19914/#/gallery/24870](https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10081/151_read-19914/#/gallery/24870)

9 [https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10122/333\\_read-15527/year-2015/#/gallery/20972](https://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10122/333_read-15527/year-2015/#/gallery/20972)

10 Im Zuge des Forschungsrahmenprogramms für IT-Sicherheit „Selbstbestimmt und sicher in der digitalen Welt“ adressiert das BMBF den Forschungsbereich Postquantenkryptografie; <https://www.bmbf.de/de/sicher-in-der-digitalen-welt-849.html>



der Verteidigungstechnik, der industriellen Präzisionsmesstechnik, der medizinischen Diagnostik, der Erdbeobachtung, der Geologie bzw. Lagerstättenerkundung und in der Navigation (insbesondere bei der Satellitennavigation für Luft-, See-, Schienen- und Straßenverkehr im Zusammenhang mit z. B. dem automatisierten Fahren sowie mit GPS-/Galileo-basierten Apps).

Langfristig kann man erwarten, dass mit einer höheren Integration und Miniaturisierung quantenbasierter Messtechnik auch eine große Zahl von anspruchsvollen Anwendungen für andere professionelle Bereiche und für Konsumenten erschlossen werden kann.

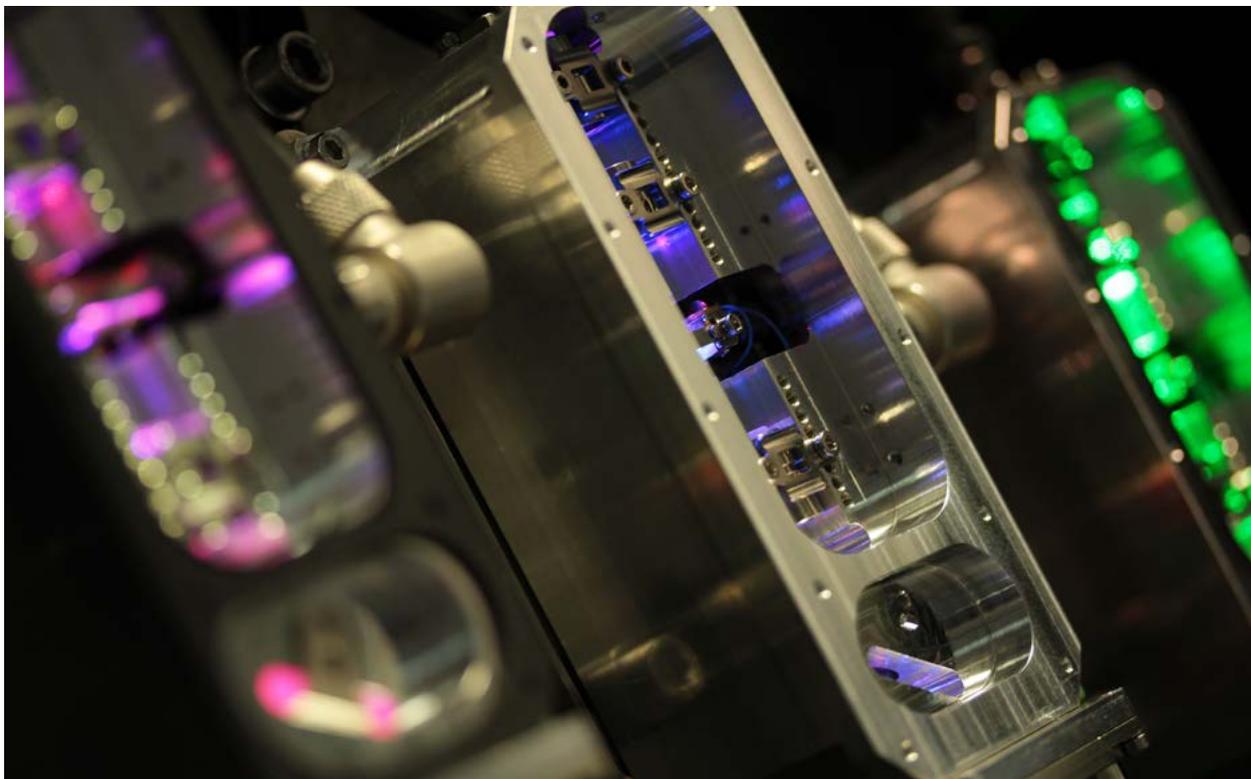
## 2.4 Basistechnologien für Quantensysteme

Nicht erst voll überzeugende Quantencomputer und quantentechnische Kommunikations- und Messtechnik haben ein großes technisches und wirtschaftliches Potenzial. Auch der Weg dahin ist mit Investitionen in entsprechende Forschungslabors und Forschungsprojekte bereits ein interessanter Hochtechnologiemarkt.

Mit gekonnt konstruierten Quantensystemen lassen sich physikalische Größen wie Druck, Temperatur, Position, Zeit, Geschwindigkeit, Beschleunigung, elektrische und magnetische Felder oder die Gravitation mit einer nie da gewesenen Präzision messen. Dabei wird die besondere Empfindlichkeit der quantenmechanischen Zustände gezielt ausgenutzt. Die im Bild dargestellte Sonde dient zur Magnetfeldmessung mit einem Diamantsensor.

Aktuell werden in Deutschland Investitionen in einem Umfang von ca. 100 bis 150 Mio. Euro im Jahr für Laborausstattung im Bereich der Quantentechnologien getätigt.<sup>11</sup> In den letzten Jahren entstand in Deutschland überwiegend aus der universitären Grundlagenforschung bereits eine Anzahl kleiner und mittlerer Unternehmen, die in diesem speziellen, meist auf hoch spezialisierte Kleinserien ausgerichteten internationa-

<sup>11</sup> Förderung von Quantentechnologien – Positionspapier der Deutschen Industrie, S. 5, 7, 17; Quelle: s. Fußnote 7



Ein wesentlicher Schritt zur tatsächlichen Nutzung der Quantentechnologien ist der Übergang von Laboraufbauten hin zu robusten und zuverlässigen Geräten. So ersetzt das im Bild gezeigte Lasermodul viele einzelne optische Komponenten. Das industrielle Engineering der technischen Systeme – kleiner, effizienter und kompakter und damit auch robuster und betriebssicherer – liefert erst die Voraussetzungen, die Komplexität einer Quantenmesstechnik oder eines Quantencomputers zu beherrschen.

Geräten kommt dabei eine wichtige Bedeutung zu. Erste Schritte auf diesem Weg stehen jetzt an. Dazu ist ein industrielles Engineering der technischen Systeme – kleiner, effizienter und kompakter und damit auch robuster und betriebssicherer – notwendig. Der Bereich dieser sogenannten „Enabling Technologies“ stellt damit das technologische Rückgrat bei der Erforschung und Entwicklung der einzelnen Quantentechnologien dar. Es ist – wie in anderen neu entstehenden Technologiemärkten zuvor – auch damit zu rechnen, dass Standards und Normen für die Quantentechnologien vielfach zuerst in diesem Bereich entstehen werden.

len Markt erfolgreich tätig sind. Mit dem vorliegenden Programm und dem starken Anwachsen der internationalen Forschungsaufwendungen im Bereich Quantentechnologien sowie dem absehbaren Einsatz von Quantentechnologien in Satelliten ist ein deutliches Anwachsen der Nachfrage nach geeigneter Geräte- und Anlagentechnik zu erwarten.

Dem Übergang von Laboraufbauten hin zu robusten, zuverlässigen und kostengünstig herzustellenden

Die vorstehende Beschreibung der aktuellen Entwicklungen in verschiedenen Bereichen der Quantentechnologien macht deutlich: Durchbrüche in den Quantentechnologien haben eine mögliche Bedeutung für viele Bereiche unseres Lebens, ähnlich wie dies etwa bei der Satellitentechnik in den späten 1960er-Jahren oder bei der Digitalisierung in den 1990er-Jahren der Fall war. Die Förderung der Quantentechnologien hat deshalb forschungs-, wirtschafts- und sicherheitspolitische Bedeutung.

## 3 Die Maßnahmen der Bundesregierung

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), das Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (BMI) sowie das Bundesministerium der Verteidigung (BMVg) tragen im Rahmen ihrer jeweiligen Aufgaben zur Entwicklung der Quantentechnologien in Deutschland bei. Die Bundesregierung bündelt diese Beiträge in dem vorliegenden Programm zu einer ganzheitlichen Strategie. Durch regelmäßige Ressortrunden werden die einzelnen Maßnahmen koordiniert und die Strategie weiterentwickelt. Zugleich wird eine Verzahnung mit der Transferinitiative des BMWi angestrebt, die den Technologietransfer mit etablierten und neuen Instrumenten unterstützen soll.

### 3.1 Die Forschungslandschaft für die Quantentechnologien ausbauen

In der Grundlagenforschung der Quantenphysik besitzt Deutschland eine exzellente Ausgangsposition. Die breite Forschung auf diesem Gebiet – bestehend aus föderal strukturierter Hochschullandschaft, außeruniversitären Forschungseinrichtungen, Ressortforschung und am Markt ausgerichteter Forschung der Unternehmen – bildet für die Quantentechnologien eine gute Ausgangsbasis. Die Forschungseinrichtungen und Trägerorganisationen stellen im Anhang dieses Programms den aktuellen Stand ihrer Forschungsarbeiten und -strategien für die Quantentechnologien im Einzelnen dar.

Für die Weiterentwicklung der Quantentechnologien und die dafür erforderlichen strukturellen Voraussetzungen haben Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft Handlungsbedarf identifiziert:

„An vielen verschiedenen Orten in ganz Deutschland wird Forschung zu Quantentechnologien auf international sichtbarem Niveau betrieben. Diese geografische Diversität ist durchaus als Stärke der deutschen Forschungslandschaft zu betrachten. [...] Gleichzeitig besteht jedoch teilweise ein deutliches Defizit in der Koordination: Oftmals werden Synergieeffekte nicht ausreichend genutzt. Mithilfe einer Verbesserung der Strukturen sollte eine engere Vernetzung und eine Bündelung von Kompetenzen angestrebt werden.“<sup>12</sup>

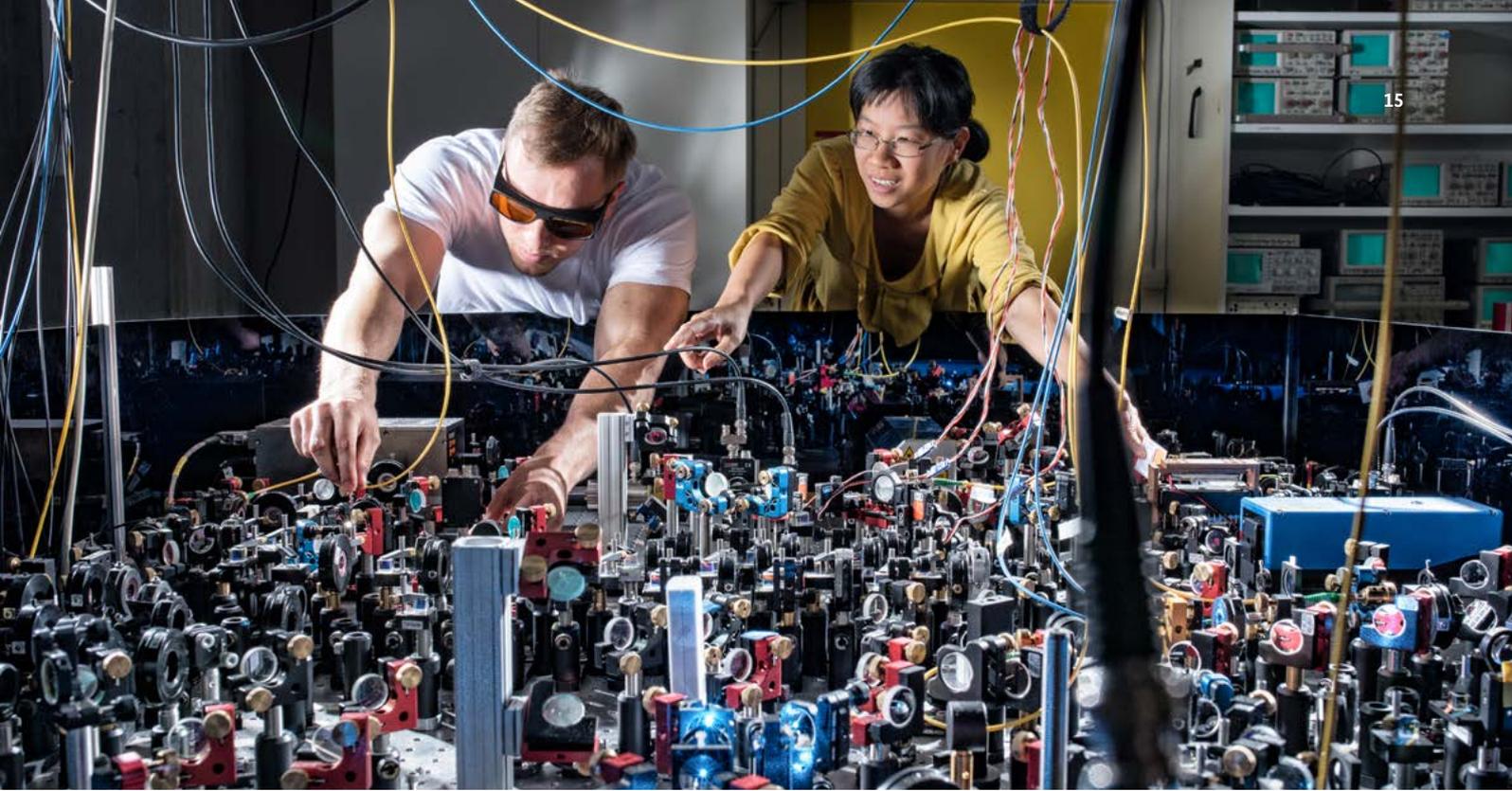
In Deutschland sind daher größere, international und stärker auf Anwendungen ausgerichtete Forschungskapazitäten notwendig. Der Rechtsrahmen des Grundgesetzes mit den Grundsätzen der Wissenschaftsfreiheit sowie der föderalen Ordnung gibt dabei vor, dass die notwendigen Entscheidungen im Wettbewerb und auf der Grundlage fachlicher Kriterien erfolgen.

Die Bundesregierung wird die relevanten Trägerorganisationen der Forschung beauftragen, ihrerseits Vorschläge zu einer Neuausrichtung im Hinblick auf eine stärker anwendungsbezogene quantentechnologische Forschung zu entwickeln. Ziel ist es, in der öffentlich grundfinanzierten Forschung verstärkt Themen der Quantenphysik mit hoher Anwendungsrelevanz in F&E-Verbundprojekten zu fördern. Die Voraussetzung dafür sind überdurchschnittliche Perspektiven für eine technische Verwendung, ganz besonders dann, wenn der Schritt von der Forschung in die Anwendung erstmalig vollzogen wird. Dies muss über die prinzipielle Demonstration der technischen Machbarkeit deutlich hinausgehen. In Forschungsprojekten sind dazu konkrete Anwendungen sowie Anwender bereits früh einzubeziehen, etwa in F&E-Verbundprojekte zwischen Wissenschaft und Wirtschaft oder öffentlichen Anwendern. Auch müssen im Hinblick auf mögliche kommerzielle oder industrielle Verwertungen die rechtlichen Voraussetzungen (Patentrechte o. Ä.) gewährleistet werden. Die bislang diskutierten Forschungsthemen der neuen Quantentechnologien<sup>13</sup> sind dabei nicht als abschließende Themenliste zu verstehen, sondern werden kontinuierlich ergänzt.

Erfolge in der Forschung und in der Einwerbung von Drittmitteln sowie wettbewerbliche Kriterien wie Nachwuchsgewinnung, internationale Kooperationen, Unternehmenskooperationen und Ausgründungen

<sup>12</sup> Konzeptpapier der Nationalen Initiative zur Förderung der Quantentechnologie von Grundlagen bis Anwendungen (QUTEGA), S. 35; Quelle: s. Fußnote 6

<sup>13</sup> s. Abschnitt 2 dieses Programms



Die Forschungslandschaft in Deutschland ist in der quantentechnologischen Grundlagenforschung heute international stark sichtbar. Jetzt gilt es, den Fokus auf die Anwendung und Vermarktung zu legen. Dies betrifft insbesondere die Vernetzung zwischen grundlegender akademischer und industrieller Forschung, damit umsetzungsreife Resultate nicht in einem Stadium wie dem gezeigten Laboraufbau stehen bleiben. Die Forschungscommunity muss sich strukturell weiterentwickeln, dabei aber für unerwartete wissenschaftliche Entwicklungen offen bleiben.

werden für die in den kommenden Jahren notwendigen Strukturentscheidungen bei den Trägerorganisationen und Instituten ein entscheidender Maßstab sein. Unbeschadet dieser Strukturentwicklung im Wettbewerb werden die Einrichtungen der Ressortforschung auch künftig ihre besonderen Aufgaben der Forschung für Ressortaufgaben wahrnehmen.

### 3.2 Forschungsnetzwerke für neue Anwendungen schaffen

Quantentechnologien sind einerseits ein sehr wissenschaftsnahes Forschungsgebiet. Gleichwohl kann es direkte Übergänge von der Grundlagenforschung in industrielle Anwendungen geben, etwa im Bereich der hochgenauen Bestimmung von Ort und Zeit. Aufgrund der hohen industriellen Relevanz wird die Bundesregierung daher auch die anwendungsorientierte For-

schung bis hin zu ingenieurwissenschaftlichen Fragen vorantreiben. Die Bundesregierung will daran mitwirken, dass in der Forschung zu Quantentechnologien wissenschaftliche Ansätze verstärkt mit unternehmerischen Strategien hinterlegt werden. Die Bundesregierung wird dazu folgende Maßnahmen durchführen:

#### Forschungsportal zu Quantentechnologien

Immer mehr Unternehmen verschiedener Branchen beginnen, sich mit dem Thema Quantentechnologien zu befassen, gezielt Informationen zu sammeln und diese im Hinblick auf eigene Strategien und Chancen auszuwerten. Darüber hinaus beschäftigt sich die Wirtschaft teilweise bereits heute mit quantentechnologischen Anwendungen. Auf der anderen Seite besteht in der deutschen Wissenschaft die Kompetenz, auf Basis des internationalen Forschungsstandes unterschiedliche Ansätze, Produkte und Verfahren in den Quantentechnologien systematisch zu prüfen, zu vergleichen und daraus neutrale Beratungsdienstleistungen für interessierte Unternehmen abzuleiten. Diese Kompetenz muss jedoch erschlossen und für die Wirtschaft sichtbar und zugänglich gemacht werden. Dabei geht es zum einen um die wissenschaftliche Expertise, zum anderen um die Entwicklung von spezifischem Wissen zu bestimmten Anwendungsfragen einzelner Branchen.

Hierzu wird die Bundesregierung eine Übersicht („Who's who“) der deutschen Wissenschaft zu den Quantentechnologien erstellen lassen und als Online-Portal für die Kontaktsuche und einen Erstkontakt zur Verfügung stellen. Konkrete Beratungsdienstleistungen sind zwischen den so gefundenen Partnern separat zu vereinbaren.

### Unternehmensgeführte F&E-Verbundprojekte in bereits absehbaren Anwendungsfeldern

Die Bereiche Metrologie und Kommunikation sowie bestimmte Schlüsseltechnologien als Basis für quantentechnologische Anwendungen sind in Deutschland bereits heute besonders gut vertreten. Diese Bereiche wird die Bundesregierung weiter vorantreiben, hier sind erste Anwendungen relativ kurzfristig möglich.

Im Bereich der Quantenkommunikation unterstützt das BMBF seit 2011 umfangreiche F&E-Verbundvorhaben.<sup>14</sup> Insgesamt hat das BMBF hier Verbundprojekte mit mehr als 70 Teilvorhaben bewilligt. Im Jahr 2017 konnte auf diesem Gebiet erstmalig ein absehbares Anwen-

<sup>14</sup> U. a. das Verbundprojekt Q.com: <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/q.com>

Die Chancen der Quantentechnologien für die deutsche Wirtschaft müssen effektiv und schnell genutzt werden. Deshalb werden in enger Zusammenarbeit mit Wissenschaft und Wirtschaft passende Maßnahmen initiiert, um die Barrieren in den spezifischen Sichtweisen zu überwinden. Ein Beispiel ist das Pilotprojekt „BrainQSens“: Vereinfachte hochempfindliche Magnetsensoren erlauben eine verbesserte medizinische Diagnostik in der Hirnforschung und langfristig auch neue, einfache Formen der Steuerung von Prothesen und sogar technischer Geräte im Alltag.

dungsszenario mit Unternehmensbeteiligung in den Förderaufruf<sup>15</sup> integriert werden. Ziel ist die Entwicklung von Systemen, die künftig einen abhörsicheren Austausch von Informationen in Glasfasern über große Distanzen ermöglichen. Im 2018 gestarteten Projekt „Quanten-Link-Erweiterung“ (Q.Link.X)<sup>16</sup> sollen dazu erstmalig quantenphysikalische Signalprozessoren, sogenannte Quantenrepeater, entwickelt werden, welche die Übertragung von Quantensignalen über mehr als 100 Kilometer in herkömmlichen Glasfasern ermöglichen sollen.

Mit drei Pilotprojekten und drei weiteren Förderaufrufen hat das BMBF im Jahr 2017 die neue Förderphase mit Verbundprojekten zwischen Wissenschaft und Wirtschaft in den Bereichen Quantenmetrologie und -kommunikation sowie Schlüsseltechnologien begonnen:

- Pilotprojekt „BrainQSens“<sup>17</sup>: In diesem Verbund mit Industriebeteiligung fördert das BMBF seit 2017 die Entwicklung des Demonstrators eines Quantensensors auf Diamantbasis. Dieser Sensor wird neuronale Magnetfelder präzise messen können – in der Funktion einem MEG ähnlich, jedoch viel kompakter und genauer.

<sup>15</sup> <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/foerderung/bekanntmachungen/quantenkommunikation>

<sup>16</sup> <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/q-link.x>

<sup>17</sup> <https://www.photonikforschung.de/projekte/quantentechnologien/projekt/brainqsens.html>



- Pilotprojekt „opticlock“<sup>18</sup>: Im Rahmen des Pilotprojekts „Optische Einzelionen-Uhr für Anwender“ wird seit 2017 an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und unter Beteiligung von Industrieunternehmen der Demonstrator einer kompakten und robusten optischen Uhr zur Synchronisation großer Kommunikationsnetze erforscht und entwickelt.
- Pilotprojekt „QUBE“<sup>19</sup>: Der Verbund „Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sat“ (QUBE) verfolgt seit 2017 das Ziel, Hardware für eine weltweite, abhörsichere Kommunikation zu entwickeln, indem QKD-Technologie in eine hochkompakte und kostengünstige Satellitenplattform, den Cube-Sat, integriert wird.
- Förderauftrag „QuantERA Call 2017“<sup>20</sup>: Das BMBF ist größter Konsortialpartner im ERA-NET Cofund „QuantERA“ zur Förderung einer europäisch vernetzten und anwendungsorientierten Erforschung aller grundlegenden Themen der Quantentechnologien und unterstützt deutsche Forscher in 18 der insgesamt 26 europäischen Projekte.
- Förderauftrag „Schlüsselkomponenten für Quantentechnologien“<sup>21</sup>: Quanteneffekte sind empfindlich und die Geräte zu ihrer technischen Nutzbarmachung sind in der Regel noch groß und teuer. In der BMBF-Maßnahme „Schlüsselkomponenten für Quantentechnologien“ werden mehrere Konsortien mit Industriebeteiligung gefördert, um die hohen Kompetenzen in der Geräteentwicklung zu verstärken. Damit sollen weitere Grundlagen zur effizienten Erforschung der Quantentechnologien geschaffen und die Nutzung von Quanteneffekten beschleunigt werden.
- Förderauftrag „Quantum Futur“<sup>22</sup>: Als zentraler Baustein für die zukünftige Erforschung und Entwicklung der Quantentechnologien in Deutschland unterstützt das BMBF ab 2018 mehrere Nachwuchsforschergruppen, welche sich auf anwendungsorientierte Themen der Quantentechnologien konzentrieren.

Weitere Förderaufträge sind in Vorbereitung. Die Förderung von Verbundprojekten stimuliert neben der inhaltlichen Entwicklung der Forschungsgebiete insbesondere den Aufbau von Netzwerken zwischen Wissenschaft und Wirtschaft. Solche Netzwerke sind eine wichtige Basis für die langfristige Entwicklung von Technologien zu Innovationen mit wirtschaftlicher Bedeutung. Dies betrifft keineswegs nur Unternehmen und Forschungsfragen der Industrie, sondern auch Themen aus anderen Branchen wie etwa der Finanzwirtschaft.

### Kompetenzzentrum Quantentechnologien an der PTB

Eine wichtige Basis für industrielle Entwicklungen soll mit einem Kompetenzzentrum Quantentechnologien an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) geschaffen werden. Die PTB vereint eine international anerkannte fachliche Kompetenz im Bereich der Quantenmetrologie und -sensorik mit dem gesetzlichen Auftrag, die deutsche Industrie im Bereich des Messwesens zu unterstützen. Damit bringt sie die Voraussetzungen mit, um wichtige Infrastrukturen bedarfsgerecht aufzubauen und zu betreiben sowie erforderliche Dienstleistungen anzubieten. Wichtiges Ziel des Kompetenzzentrums ist die Unterstützung der Wirtschaft – mit besonderem Fokus auf Start-ups sowie kleine und mittelständische Unternehmen (KMU) – beim anwendungsorientierten Transfer von Forschungsergebnissen. Das BMWi unterstützt den Auf- und Ausbau des Kompetenzzentrums und wird dies im Rahmen der Arbeiten an der Transferinitiative berücksichtigen. Die inhaltlichen Schwerpunkte des Zentrums sind:

- Komponenten und Technologie: Entwicklung und Aufbau von z. B. Einzelphotonenquellen und Oszillatoren sowie industrietauglicher Uhren, Messgeräte und Sensoren,
- Kalibrierung und Dienstleistung: Aufbau von Messplätzen zum Charakterisieren und Kalibrieren der o. g. Komponenten und Technologien als Dienstleistung z. B. für KMU,
- Anwenderplattformen (User-Facilities): Bereitstellung von Glasfasernetzwerken und Technologieplattformen zur Prototypenentwicklung und Kleinstserienfertigung,
- Gründerzentren, Ausbildung, Öffentlichkeitsarbeit, Unterstützung Technologietransfer: Bereitstellung und Betrieb eines Inkubatorlabors zur Überführung

18 <https://www.photonikforschung.de/projekte/quantentechnologien/projekt/opticlock.html>

19 <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/qube>

20 <https://www.quantera.eu/co-funded-call/call-2017>

21 <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1372.html>

22 <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1371.html>

von Quantentechnologien in die Anwendung sowie Ausbildungszentren für Ingenieure.

### Leitmarktinitiative in der Labor- und Ausrüstungstechnik

Wie das bei anderen Technologien in der Vergangenheit der Fall war, werden auch viele Anwendungen der Quantentechnologien ihre ersten Märkte voraussichtlich im direkten Umfeld der Forschung finden:

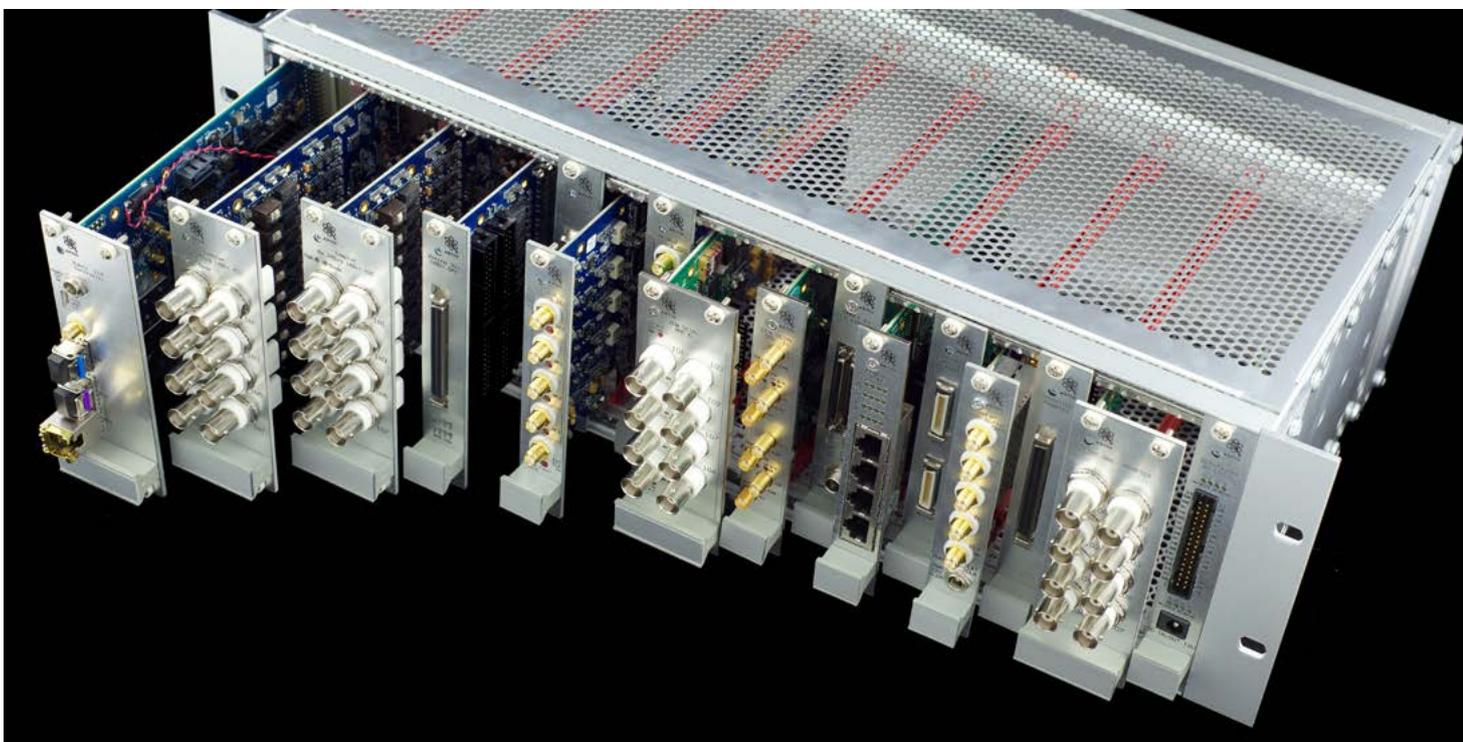
„Der zurzeit größte bekannte Markt für Quantentechnologien ist die universitäre öffentliche Forschung. Es ist auch zu erwarten, dass es einen signifikanten, nicht öffentlichen Markt im Sicherheitsbereich gibt, der aus unserer Wahrnehmung sich noch sehr stark im Forschungs- und Entwicklungsstadium befindet. Beide Märkte fragen heute die unterstützenden ‘Quantum-enabling Technologies’ in einer großen technologischen Breite ab und werden in Deutschland zumeist von KMU bedient. Wir gehen, basierend auf den Zahlen aus Großbritannien, heute weltweit von etwa 30.000 Personen und einem Forschungsetat von jährlich mehr als 1,5 Mrd. Euro aus. Deutschland hat davon einen geschätzten globalen Anteil von etwa 6 bis 10 %.“<sup>23</sup>

<sup>23</sup> Förderung von Quantentechnologien – Positionspapier der Deutschen Industrie; S. 4; Quelle: s. Fußnote 7

Beispiele sind etwa Laborausstattung, Lasersysteme, Vakuum- oder Kryoausrüstung, optische Bauteile, Spezialkameras, Detektoren zusammen mit entsprechender Ausleseelektronik, Radiofrequenzquellen und allgemeiner Messtechnik, integrierfähige Steuerelektronik sowie spezielle Software.

Die Forschungsvorhaben und andere Maßnahmen dieses Programms können vermehrt Beschaffungsprozesse für derartige Produkte auslösen. Die Bundesregierung strebt an, diese Entwicklungen so zu koordinieren und zu kommunizieren, dass Leitmärkte für Quan-

Die Quantengerätetechnik kann als ein eigenständiger Markt angesehen werden, da die weltweite Laborausstattung der Forschungsinstitute für sich genommen schon ein substantielles Marktvolumen darstellt. Für deutsche Unternehmen eröffnen sich daher auch für den Absatz solcher Hightech-Produkte, wie der dargestellten Steuerung einer optischen Einzelionen-Uhr, sehr gute Chancen im internationalen Wettbewerb – und dies umso mehr, als der Einsatz dieser Technik sich nicht auf die Quantentechnologien beschränkt, sondern sie darüber hinaus für vielfältige andere Arbeiten in der experimentellen Forschung von Nutzen ist.



tentechnologien entstehen, die insbesondere für KMU sowie für Aus- und Neugründungen erreichbar sind.

Leitmärkte bedingen auch Standards. Sofern erforderlich, wird die Bundesregierung deshalb die Entwicklung forschungsnaher Normen und Standards in den F&E-Förderprojekten unterstützen.

### Innovationen im Bereich Quantentechnologien stärken

Die Bundesregierung unterstützt die Innovationskraft von Unternehmen durch innovationsfreundliche Rahmenbedingungen sowie durch technologie- und branchenoffene, marktorientierte und branchenspezifische Förderprogramme. Das Spektrum an Fördermöglichkeiten ist breit. Unterschiedliche Aspekte der Gründungsförderung werden beispielsweise im Rahmen von „EXIST“<sup>24</sup>, dem „High-Tech Gründerfonds“<sup>25</sup> oder „INVEST – Zuschuss für Wagniskapital“<sup>26</sup> adressiert. In der späteren Wachstumsphase, in der es jungen Unternehmern häufig an Finanzierungsmöglichkeiten für die Weiterentwicklung der Innovationen fehlt, stehen verschiedene Wagniskapitalangebote des ERP-Sondervermögens (ERP: European Recovery Program) zur Verfügung, die gemeinsam mit der KfW oder dem Europäischen Investitionsfonds (EIF) und privaten Investoren aufgesetzt wurden. Förderprogramme zum Kompetenzaufbau und zur Vernetzung sind beispielsweise „go-Inno“<sup>27</sup> und „go-cluster“<sup>28</sup>. Mit „WIPANO“<sup>29</sup>, der „Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF)“<sup>30</sup> und „INNO-KOM“<sup>31</sup> stehen Fördermaßnahmen im Bereich der vorwettbewerblichen Forschung und Entwicklung zur Verfügung. Die Förderung von marktnaher Forschung und Entwicklung erfolgt im Rahmen des „Zentralen Innovationsprogramms Mittelstand“ (ZIM).<sup>32</sup> Finanzierungsförderung für Innovations- und Digitalisierungsvorhaben steht im Rahmen des „ERP-

Digitalisierungs- und Innovationsprogramms“ zur Verfügung.<sup>33</sup> Im „Nationalen Programm für Weltraum und Innovation“<sup>34</sup> werden gezielt Vorhaben zur Erschließung von Quantentechnologien für zukünftige Raumfahrtanwendungen gefördert.

Diese breite, technologie- und branchenoffene Förderlandschaft ist für den Innovationsstandort Deutschland von zentraler Bedeutung. In besonderer Weise profitieren davon junge Unternehmen sowie KMU.

Für die Entwicklungen von Anwendungen der Quantentechnologien, die in vielen Fällen durch Start-ups und KMU vorangetrieben werden, wird es entscheidend darauf ankommen, diese Förderlandschaft zu erschließen und effektiv nutzbar zu machen. Die Bundesregierung wird die Innovationsberatung entsprechend ausrichten. Neben dieser technologieoffenen Förderlandschaft sind darüber hinaus auch quantentechnologie-spezifische Unterstützungsmaßnahmen für Start-ups und KMU geplant, beispielsweise durch die Bereitstellung entsprechender Infrastrukturen (s. Kompetenzzentrum Quantentechnologien an der PTB). Mit dem Förderauftrag „KMU-innovativ: Photonik und Quantentechnologien“<sup>35</sup> steht seit Juli 2018 zweimal jährlich eine speziell auf KMU ausgerichtete Fördermöglichkeit zur Verfügung.

Der Technologietransfer von quantentechnologiebasierten Anwendungen in den Markt ist ein wichtiges Anliegen des Programms. Dies schließt die Weiterentwicklung der erforderlichen Qualitätsinfrastruktur mit ihren wesentlichen Elementen ein (Messwesen, Akkreditierung, Konformitätsbewertung, Normung und Eichung).

24 <https://www.exist.de>

25 <https://high-tech-gruenderfonds.de>

26 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/invest.html>

27 <https://www.innovation-beratung-foerderung.de/INNO/Navigation/DE/go-Inno/go-inno.html>

28 <http://www.go-cluster.de>; <https://www.clusterplattform.de>

29 <https://www.innovation-beratung-foerderung.de/INNO/Navigation/DE/WIPANO/Patentierung-Unternehmen/patentierung-unternehmen.html>

30 <https://www.aif.de/innovationsfoerderung/igf-industrielle-gemeinschaftsforschung.html>

31 <https://www.innovation-beratung-foerderung.de/INNO/Navigation/DE/INNO-KOM/inno-kom.html>

32 <https://www.zim.de>

33 [https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Innovation/F%c3%b6rderprodukte/ERP-Digitalisierungs-und-Innovationskredit-\(380-390-391\)/](https://www.kfw.de/inlandsfoerderung/Unternehmen/Innovation/F%c3%b6rderprodukte/ERP-Digitalisierungs-und-Innovationskredit-(380-390-391)/)

34 <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Dossier/luft-und-raumfahrt.html>

35 <https://www.photonikforschung.de/projekte/kmu-innovativ/foerdermassnahme/kmu-innovativ-photonik-und-qt.html>

### 3.3 Leuchtturmprojekte für industrielle Wettbewerbsfähigkeit etablieren

Noch existiert eine (unterschiedlich) große Lücke zwischen wissenschaftlichen Forschungsergebnissen und industriellen Umsetzungen. Aber die deutsche Wirtschaft – Großunternehmen, KMU und Start-ups – kann und soll sich vom Beobachter und Zulieferer zum strategischen Treiber der Entwicklung im Feld der Quantentechnologien entwickeln. Experten aus deutschen Unternehmen haben angeregt<sup>36</sup>, diesen Prozess u. a. mit Leuchtturmprojekten zu unterstützen, die für Interessenten in Öffentlichkeit, Politik und Unternehmen sichtbar machen, dass es sich bei Quantentechnologien nicht um abstrakte wissenschaftliche Konzepte handelt, sondern um neue Technologien und Verfahren mit Auswirkungen und großen Potenzialen für viele Wirtschaftsbereiche. Die Bundesregierung wird diesen Vorschlag aufgreifen und unter Federführung des BMBF zunächst zwei Leuchtturmprojekte anstoßen.

#### Wettbewerb zur Quantenkommunikation

In der Quantenkommunikationsforschung lassen sich gegenwärtig wichtige Ziele mit technischen Kennzah-

len formulieren. So ist z. B. die Verbesserung der Kohärenzzeiten von Quantenspeichern ein Schlüsselfaktor auf dem Weg zu einer nachhaltig abhörsicheren Kommunikation. Derartige Kennzahlen stellen auch einen essenziellen Schritt bei der sicheren Authentifizierung von Systembenutzern dar. Diese Authentifizierung wird heutzutage häufig mit Hardwarekomponenten, sogenannten Security-Token oder auch Chipschlüsseln, realisiert. Die Sicherheit solch klassischer Authentifizierungsverfahren kann jedoch beispielsweise durch leistungsfähige Quantencomputer gefährdet werden, sodass auch hier künftig Quanten-Token für Quantenkommunikation eine technische Alternative darstellen

Sichere Kommunikationsverfahren stellen für unsere Gesellschaft eine wichtige Grundlage des Wirtschaftssystems dar. Die Erforschung, Realisierung und Implementation von Komponenten und Systemen mit tatsächlichem Gebrauchswert ist daher mit großer Priorität erforderlich. Große Vorzeigeprojekte, wie z. B. die satellitengestützte Quantenkommunikation mit Bodenstationen wie im Bild zu erkennen, setzen ein starkes Signal für diesen Aufbruch in die Quantentechnologien und haben das Potenzial, die Wettbewerbsfähigkeit für Systemumsetzungen und Infrastrukturlösungen zu stärken.

<sup>36</sup> Förderung von Quantentechnologien – Positionspapier der Deutschen Industrie, S. 21; Quelle: s. Fußnote 7



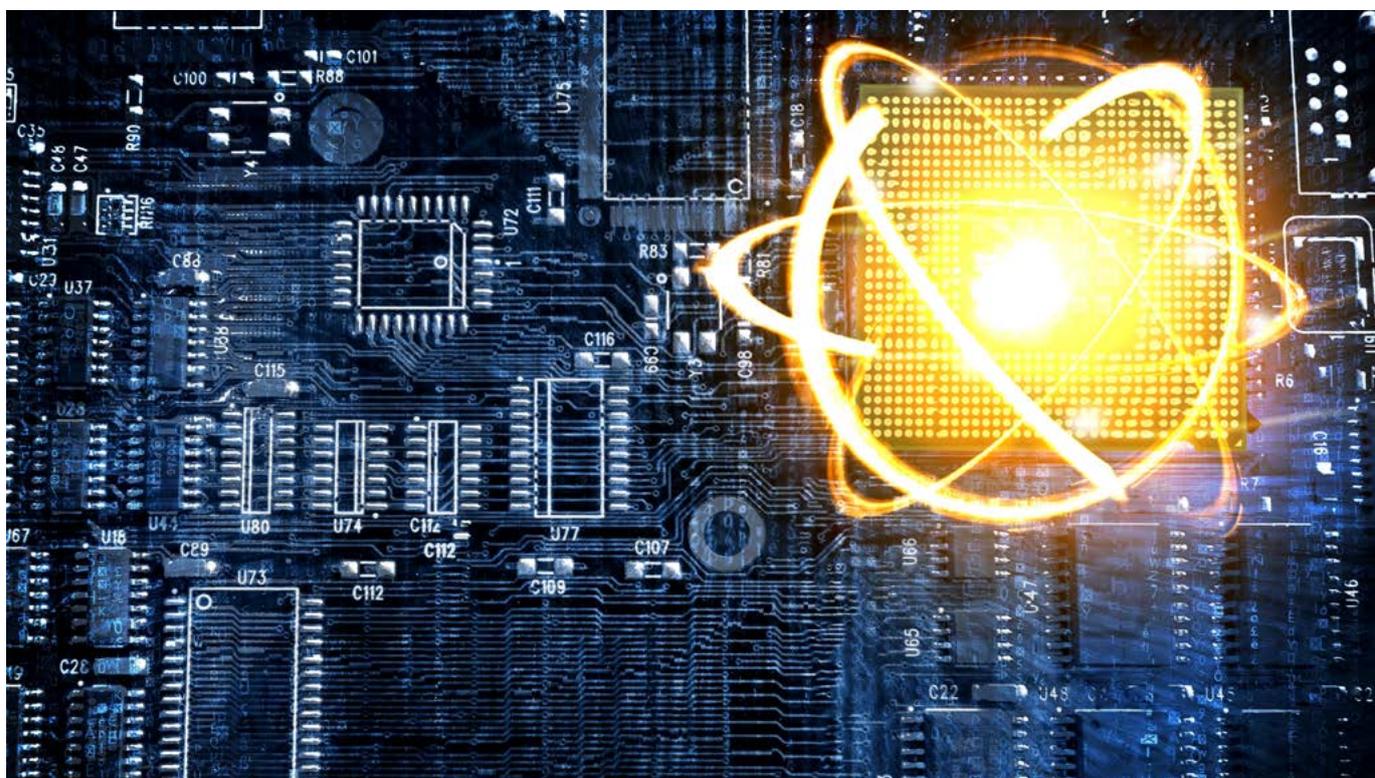
können. Die Verbesserung solcher Schlüsselkomponenten bringt einen breiten Mehrwert. Das BMBF wird daher gemeinsam mit Wissenschaft und Wirtschaft einen Prozess zur Identifikation einer „grand challenge“ in diesem Bereich starten, um neue Lösungskonzepte zur Verbesserung der technologischen Schlüsselfaktoren in der Quantenkommunikation in Form eines Wettbewerbs umzusetzen. Dieser Wettbewerb soll konkrete technologische Ziele verfolgen und zugleich strukturelle Synergieeffekte für akademische und industrielle Forschung bewirken.

### Europäische Mission zum Quantencomputing

Der Wettbewerb um die Realisierung der Idee vom Quantencomputing hat in den vergangenen Jahren sehr stark zugenommen. Beträchtliche Investitionen in den USA und in China belegen das. Gleichwohl befinden sich derzeit selbst die aussichtsreicheren der aktuell bekannten unterschiedlichen Konzepte in diesem Bereich noch in frühen Entwicklungsstadien. Die Frage, welche Konzepte sich durchsetzen werden, ist noch längst nicht entschieden. Der tatsächlich nutzbare Mehrwert gegenüber klassischen Mikroprozessoren ist noch nicht klar bestimmt. Aus diesem Grund hat Europa durchaus die Perspektive, sich mit eigenen Ansätzen zu beteiligen, wenn es gelingt, eine industrielle Rolle als Systemanbieter oder Zulieferer zu entwickeln. Dazu wird die Bundesregierung in Deutschland eine Initiative mit drei Elementen umsetzen:

- Definition eines Forschungsprogramms unter inhaltlicher Führung von Anwendern und Systementwicklern aus Wissenschaft, Industrie und öffentlichen Bedarfsträgern. Das Forschungsprogramm muss so organisiert sein, dass die beteiligten Partner als Träger von Rechten später auch als mögliche Anteilseigner von Ausgründungen fungieren können.
- Organisation und Förderung von bis zu drei Kompetenzclustern im Quantencomputing in Deutschland. Dabei wird die Einbindung von internationalen Partnern als Voraussetzung für die spätere Entwicklung zu europäischen wissenschaftlichen und vor allem industriellen Strukturen wichtig sein. Diese Cluster sollen unter substantzieller Beteiligung

Die Entwicklung eines universellen Quantencomputers ist von hohem Forschungsrisiko geprägt, besitzt aber ein riesiges Potenzial für die Anwendung. Während in den letzten Dekaden der aktuelle Stand der Quantencomputer fast ausschließlich an Forschungseinrichtungen erzielt wurde, wird hier zunehmend das Mitwirken potenzieller Anwender nötig. Auf diese Weise können in enger Kooperation Problemstellungen definiert werden, um zielgerichtet Algorithmen zu erforschen und die Limitationen der jeweiligen Hardware zu bewerten.



von Wirtschaftsunternehmen die vielversprechendsten Ansätze zum Quantencomputing erforschen, praxisrelevante Anwendungen identifizieren und mit den entwickelten Hardwareplattformen demonstrieren. Wichtige Entwicklungsleistungen in der technischen Peripherie und bei Subsystemen sollen nach IP-Sicherung unmittelbar verwertet und Forschern weltweit kommerziell verfügbar gemacht werden. Der Erfolg der Cluster wird am sukzessiven Aufbau von industriell relevanten Fähigkeiten in der Quanteninformationstechnologie, an der internationalen Vernetzung, dem wirtschaftlichen Vorgehen und an der Einbindung von Partnern aus der Wirtschaft zu messen sein.

- (Aus-)Gründung von Unternehmen auf dem Gebiet des Quantencomputings. Die Unternehmen sollen den Transfer von Forschungsergebnissen realisieren. Dieser Transfer kann schrittweise und in Teilbereichen erfolgen und soll auf einen internationalen Markt ausgerichtet sein. Die öffentliche Hand kann ein Beteiligungsrecht an geförderten Ausgründungen erhalten und sich dabei einer geeigneten Organisationsform mit Erfahrung im Gründungs- und Beteiligungsmanagement bedienen. Auch die Einbeziehung von strategischen Investoren gehört zu diesem Vorgehen.

### 3.4 Sicherheit und technologische Souveränität gewährleisten

#### Quantentechnologien für die Satellitentechnik

Zunehmend werden Quantentechnologien in der Erdbeobachtung, Satellitenkommunikation und -navigation Einsatz finden. Diese Bereiche berühren wichtige hoheitliche Sicherheitsinteressen und bilden maßgebliche Grundlagen für das Funktionieren einer hoch entwickelten Industriegesellschaft. Hier stehen die Quantentechnologien an der Schwelle zur Anwendung. Die USA und China arbeiten mit Hochdruck an einer Modernisierung ihrer Satelliteninfrastruktur auf Basis der Quantentechnologien. Es wird darauf ankommen, auch Europas Satelliteninfrastruktur rasch und konsequent zu modernisieren, um die technologische Souveränität Europas auf diesem Feld zu sichern und Abhängigkeiten zu vermeiden. Die deutsche Wissenschaft und Industrie sollen hier einen wesentlichen Beitrag leisten.

Erdbeobachtung dient sowohl der Umwelt-, Sicherheits- und Verteidigungspolitik als auch zahlreichen Wirtschaftsbereichen, z. B. der Industrie bei der Suche nach Rohstofflagerstätten, der Raum-, Städte- und Verkehrsplanung oder der Land- und Forstwirtschaft. Abhörsichere Satellitenkommunikation ist sowohl für den zivilen als auch den militärischen Sektor essenziell. Satellitennavigation kommt bei exakten Positionsbestimmungen (z. B. Luft-, Straßen-, Schienen- und Seeverkehr), in internationalen Kommunikations-, Energieversorgungs- und Bankentransfersystemen, dem elektronischen Börsenhandel sowie zukünftig beim Aufbau universeller Zeitstandards zum Einsatz. Mit dem Aufbau des Galileo-Systems steht ein ergänzendes Navigationssystem zum amerikanischen GPS zur Verfügung, das für Europas Souveränität sowohl im Bereich der zivilen als auch der militärischen Anwendungen von strategischer Bedeutung ist. Mit der bisherigen Entwicklung der Quantentechnologien lässt sich in der Satellitentechnologie ein Sprung in der Messgenauigkeit von Abständen, Positionen und Zeiten um mehr als das Zehnfache realisieren und damit eine enorme Steigerung der Leistungsfähigkeit der auf Satelliten basierenden Anwendungen erwarten.

Die beachtliche Steigerung der Leistungsfähigkeit in der Satellitennavigation basiert im Wesentlichen auf neuen quantenbasierten Methoden der Zeit- und Frequenzmessung sowie der optischen Signalübertragung. Hochpräzise sogenannte optische Ionenuhren befinden sich heute bereits in der Prototypenentwicklung. Es kommt jetzt entscheidend darauf an, diese neuen Technologien gezielt weiterzuentwickeln und auch für Satelliteneinsätze mit den enormen Belastungen beim Raketenstart und beim Betrieb im Orbit mit extremen Temperaturen und harter Strahlung zu qualifizieren. Dies wird Voraussetzung dafür sein, dass Deutschland und Europa über zukünftige Satellitensysteme mit der neuesten und besten Technologie verfügen können.

Das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) besitzt in der Satellitenentwicklung jahrzehntelange Erfahrung und Kompetenz. Um den jetzt notwendigen Durchbruch für Quantentechnologien im Orbit zu erreichen und Deutschlands Rolle als Technologietreiber in diesem Sektor sicherzustellen, prüft die Bundesregierung den Ausbau der institutionellen Forschungsaktivitäten beim DLR und bei seinen Kooperationspartnern, insbesondere bei der PTB als strategische



Der Einsatz von quantentechnologischen Systemen auf Satelliten bietet eine Vielzahl von Möglichkeiten. Die zu erreichende Messgenauigkeit durch die Verwendung von Quantenzuständen erlaubt dabei beispielsweise die Vermessung von Umweltparametern in bisher nicht gekannter Präzision. Die Weltraumumgebung stellt allerdings an die zu verwendenden Komponenten erhebliche Anforderungen bezüglich ihrer Robustheit.

Entwicklungspartnerin mit Alleinstellungsmerkmalen im Bereich der Quantenmetrologie und -sensorik sowie hoheitlichen Aufgaben in der Zeit- und Frequenzübertragung. Die möglichen Arbeiten erstrecken sich vor allem auf die Felder der Geodäsie, Metrologie und Sensorik und auf die Entwicklung quantentechnischer, weltraumgeeigneter Präzisionsinstrumente sowie die Entwicklung künftiger Galileo-Satelliten. Beim DLR könnten zu diesem Zweck zwei neue Institute und ein Galileo-Kompetenzzentrum eingerichtet werden. Durch qualifizierte Auftragsvergabe des DLR an die Industrie würde zugleich der Aufbau einer industriellen Basis im Bereich der satellitenrelevanten Quantentechnologien unterstützt.

Die Förderaktivitäten im Rahmen des „Nationalen Programms für Weltraum und Innovation“ haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass Deutschland seine internationale Spitzenposition im Bereich Quantenoptik nicht nur behaupten, sondern in Teilbereichen auch weiter ausbauen konnte. Durch das Verbundvorhaben „QUANTUS“ wurde dabei ein Netzwerk von Einrichtungen geschaffen, das in der zurückliegenden Dekade nicht nur nach außen hin sichtbare Meilensteine auf dem Weg hin zu raumfahrtbezogenen Quantentechnologien erreicht hat, sondern sich zum Ziel gesetzt hat, neben grundlagenphysikalischen Fragestellungen zunehmend auch den Anwendungsaspekt von Quantentechnologien in den Vordergrund zu stellen. Neben der schrittweisen Technologiereifung wird die Langzeiterprobung der neu entwickelten Technologien im erdnahen Orbit (auf Satellitenplattformen und der Internationalen Raumstation) angegangen. Daneben stehen erste konkrete Raumfahrtanwendungen beispielsweise zur Entwicklung optischer Uhren für die Präzisionsnavigation oder eines Quantengravimeters zur präzisen Vermessung der zeitlichen Veränderungen des Erdschwerefeldes an.

### Sicherheit von Kommunikation und Daten

Angesichts vielfältiger Herausforderungen für die Innere und Äußere Sicherheit Deutschlands benötigen die Sicherheitsbehörden des Bundes und die Bundeswehr bestmögliche Fähigkeiten und Technologien, um ihre gesetz- und verfassungsgemäßen Aufgaben erfolgreich zu erfüllen sowie Deutschland als führenden Sicherheitsstandort für die Gewährleistung der Vertraulichkeit und der Integrität informationstechnischer Systeme und der digitalen Kommunikation zu festigen.

Der effektive Schutz vor Cyberangriffen und ein hohes Qualitätsniveau im Bereich der Cybersicherheit verlangen dabei die stärkere Teilhabe an den dynamisch verlaufenden Innovationssprüngen in Technologiefeldern der Cybersicherheit sowie bei relevanten Schlüsseltechnologien. Ein hohes Innovations- und Anwendungspotenzial bieten aus Perspektive des Bundesministeriums des Innern, für Bau und Heimat (BMI) sowie des Bundesministeriums der Verteidigung (BMVg) insbesondere Quantentechnologien, da sie für die zunehmende Rolle der Digitalisierung, der Verschlüsselung digitaler Kommunikation und des maschinengestützten Agierens insgesamt eine herausragende Bedeutung haben. Die aktive und bedarfsgerechte Förderung von Forschungs-, Innovations- und

Entwicklungsvorhaben im Bereich der Quantentechnologien ist daher aus Sicht von Sicherheitsbehörden des Bundes und der Bundeswehr von herausgehobener Bedeutung. Zudem können durch gezielte Förderaktivitäten konkrete Dual-Use-Anwendungen und Spillover-Effekte systematisch erschlossen werden.

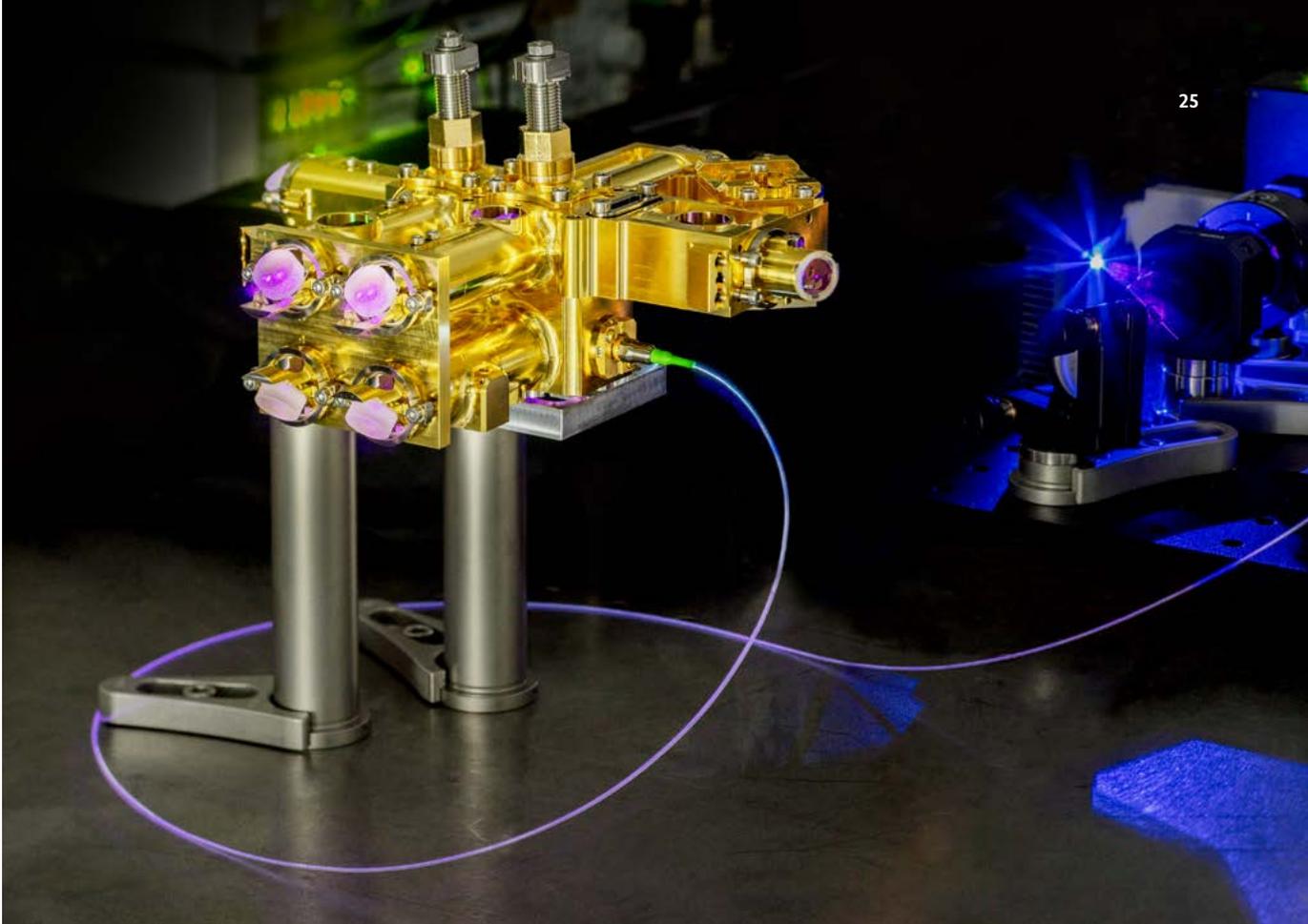
Aus Sicht der Bundesregierung ist es insbesondere zwingend notwendig, quantenresistente kryptografische Systeme zu entwickeln, die sowohl gegen Quanten- als auch klassische Computer sicher sind und mit den bestehenden Kommunikationsprotokollen und -netzen zusammenarbeiten können. Die Bundesregierung will in diesem Bereich aktiv werden, um Deutschland weiterhin als Verschlüsselungsstandort Nr. 1 zu erhalten. Hier entstehen die Herausforderung, auf neue kryptografische Infrastrukturen umzusteigen, und die Notwendigkeit, sich auf eine gewisse Krypto-Agilität zu konzentrieren.

Die Quantenkommunikation, einschließlich des Quantenschlüsselaustauschs, gilt als sicher, da Abhörversuche in Form von Datenverlusten auffallen würden. Um Quantenkommunikation zu realisieren, muss nach geeigneten technischen Lösungen, wie z. B. einer geeigneten Glasfaserkommunikation, gesucht werden. Diese Forschungen will die Bundesregierung begleiten.

Gleichwohl bietet das Brechen herkömmlicher Kryptoverfahren auch Chancen für die Strafverfolgungsbehörden. Durch die neu entstehenden technischen Möglichkeiten können noch nicht verjährte Straftaten, in denen verschlüsselte digitale Asservate vorliegen, die aufgrund der kryptografischen Komponente nicht untersucht werden konnten, eventuell nachbearbeitet und ausgewertet werden. Daher muss das Problemfeld



Technologische Errungenschaften der Quantentechnologien haben enorme Auswirkungen, insbesondere auf die Datensicherheit. Zum einen werden Fortschritte insbesondere im Bereich der Quantenkryptografie genutzt, um abhörsichere Kommunikationsnetzwerke einzurichten. Zum anderen müssen wichtige Kommunikationskanäle auch sicher bleiben, wenn zukünftig Dritte mittels Quantencomputer Algorithmen entschlüsseln können.



Technologische Ansätze zum Quantenschlüssel-austausch beruhen überwiegend auf der Photonik. Dies liegt darin begründet, dass sich Photonen (Lichtteilchen) zum einen mit vergleichsweise geringem technologischem Aufwand erzeugen und geeignet präparieren lassen, hängt zum anderen aber auch damit zusammen, dass sie sich über größere Distanzen transportieren lassen, ohne die Quanteneigenschaften zu verlieren. Um solche speziell präparierten Photonen zu erzeugen, verwendet man z. B. die im Bild dargestellte Einzelphotonenquelle.

insbesondere aus dem Blickwinkel der Strafverfolgungsbehörden begleitet werden. Die Zuständigkeit für die Erforschung und Entwicklung technischer Lösungen für Sicherheitsbehörden im Geschäftsbereich des BMI liegt bei der ZITiS (Zentrale Stelle für Informationstechnik im Sicherheitsbereich). Diese beschäftigt sich vorrangig mit den Bereichen Telekommunikationsüberwachung, Digitale Forensik, Kryptoanalyse und Big-Data-Analyse, welche von der Entwicklung von Quantencomputern betroffen sein werden. Die ZITiS plant in diesem Zusammenhang an ihrem zukünftigen Standort an der Universität der Bundeswehr München gemeinsam mit dem Forschungsinstitut CODE die Nutzung eines Quantencomputers. Diese Schnittstelle bietet die Möglichkeit zum kontinuierlichen Austausch

mit dem BMVg, da die Entschlüsselung bestehender IT-Sicherungssysteme in beiden Ressorts große Bedeutung besitzt.

Für das BMVg steht im bundeswehreigenen Aufgabebereich „Cyber- und Informationstechnologien“ der wehrtechnischen Forschung und Technologie in den nächsten Jahren insgesamt die Erschließung möglicher militärischer Anwendungsfelder von Quantentechnologien im strategischen Fokus. Dabei sollen nicht nur die fähigkeitsbezogenen Bedarfe der Bundeswehr über angewandte Grundlagenforschung aus der Perspektive der Informatik bzw. aus der Perspektive der Informationssicherheit in enger Kooperation mit verschiedenen Einrichtungen der Bundeswehr systematisch aufbereitet werden, sondern es wird generell darum gehen, konkrete Technologiefelder wie die Quantentechnologien, die für den geplanten Bedarf und die Einsatzfähigkeit der Bundeswehr als sinnvoll erachtet werden, mit eigenen Forschungsmitteln weiterzuentwickeln und auch schneller verfügbar zu machen. Diese Vorhaben werden künftig mit dem Aufbau und der Einrichtung eigener Forschungs-, Kompetenz- und Innovationszentren institutionell gestärkt. Dabei sollen insbesondere mit dem Aufbau einer neuen – mit dem BMI gemeinsam betriebenen – Agentur für Innovation in der Cybersicherheit auch wagnisbehaftete Vorhaben mit hohem Innovationspotenzial Förderung erfahren.

Von besonderer Relevanz sind für die Bundeswehr beispielhaft anwendungsorientierte wissenschaftliche Untersuchungen zu sicheren Datenübertragungswegen über die systematische Erschließung quantenkryptografisch abgesicherter Kommunikationswege. Im Handlungsfeld „Quantencomputing und -simulation“ hat die Ver- und Entschlüsselung der heute genutzten Sicherungssysteme in der Computer- und Informationstechnik eine strategische Bedeutung. In einem ersten Schritt hat die Universität der Bundeswehr München einen Kooperationsvertrag mit der Firma IBM zur Gründung eines IBM Quanten-Hub am Forschungsinstitut Cyber Defence CODE in München unterzeichnet. Zudem sind Anwendungsfelder von Interesse, die komplexe militärische Simulationen für Einsatzplanung, Übung und Ausbildung ermöglichen. Im Bereich der Positionsbestimmung, der Navigation und der Zeitfestlegung sind wissenschaftliche Untersuchungen und anwendungsbereite Lösungen zu Verfahren und Technologien der Quantensensorik und -metrologie bedeutsam, die notwendige Anwendungsreife auch unter militärischen Rahmenbedingungen erreichen können.

Eine Teststrecke zur Quantenverschlüsselung über Glasfaserkommunikation soll u. a. in dem aufzubauenden Kompetenzzentrum Quantentechnologien der PTB realisiert werden. Sie dient insbesondere auch dafür, eine anerkannte Prüfinfrastruktur aufzubauen und entsprechende Standards zu entwickeln. Kürzlich wurde durch die PTB die weltweit genaueste Frequenzübertragung über Glasfasern zwischen Paris und Braunschweig demonstriert. Diese Verbindung, die etwa alle Hundert Kilometer zugänglich ist, kann als Testumgebung für die Quantenverschlüsselung über lange Distanzen ausgebaut werden. Die Verbindung wurde kürzlich um einen Knoten in London erweitert und soll in naher Zukunft nach Norditalien ausgebaut werden. Europäische Metrologieinstitute haben den Vorschlag gemacht, auf dieser Basis ein europäisches Faserbackbone zur Frequenzverteilung zu realisieren, das gleichzeitig zur Quantenverschlüsselung genutzt werden soll. Zur Überwindung größerer Distanzen kann sich die raumfahrtbasierte Technologie der Quantenschlüsselverteilung aufgrund der signifikant geringeren Signalabschwächung als ideale Ergänzung zu terrestrischen Entwicklungen erweisen.

Quantenschlüsselaustausch mittels Satelliten ist ein interessanter komplementärer Ansatz. Die Raumfahrttechnologie besitzt gegenüber der Glasfaserkommunikation den Vorteil, längere Distanzen von deutlich mehr als 100 bis 200 Kilometer überbrücken zu können. Der Fokus auf die satellitenbasierte Quantenkommunikation wird in der Forschungsförderung des DLR-Raumfahrtmanagements intensiviert werden.

### 3.5 Die internationale Zusammenarbeit gestalten

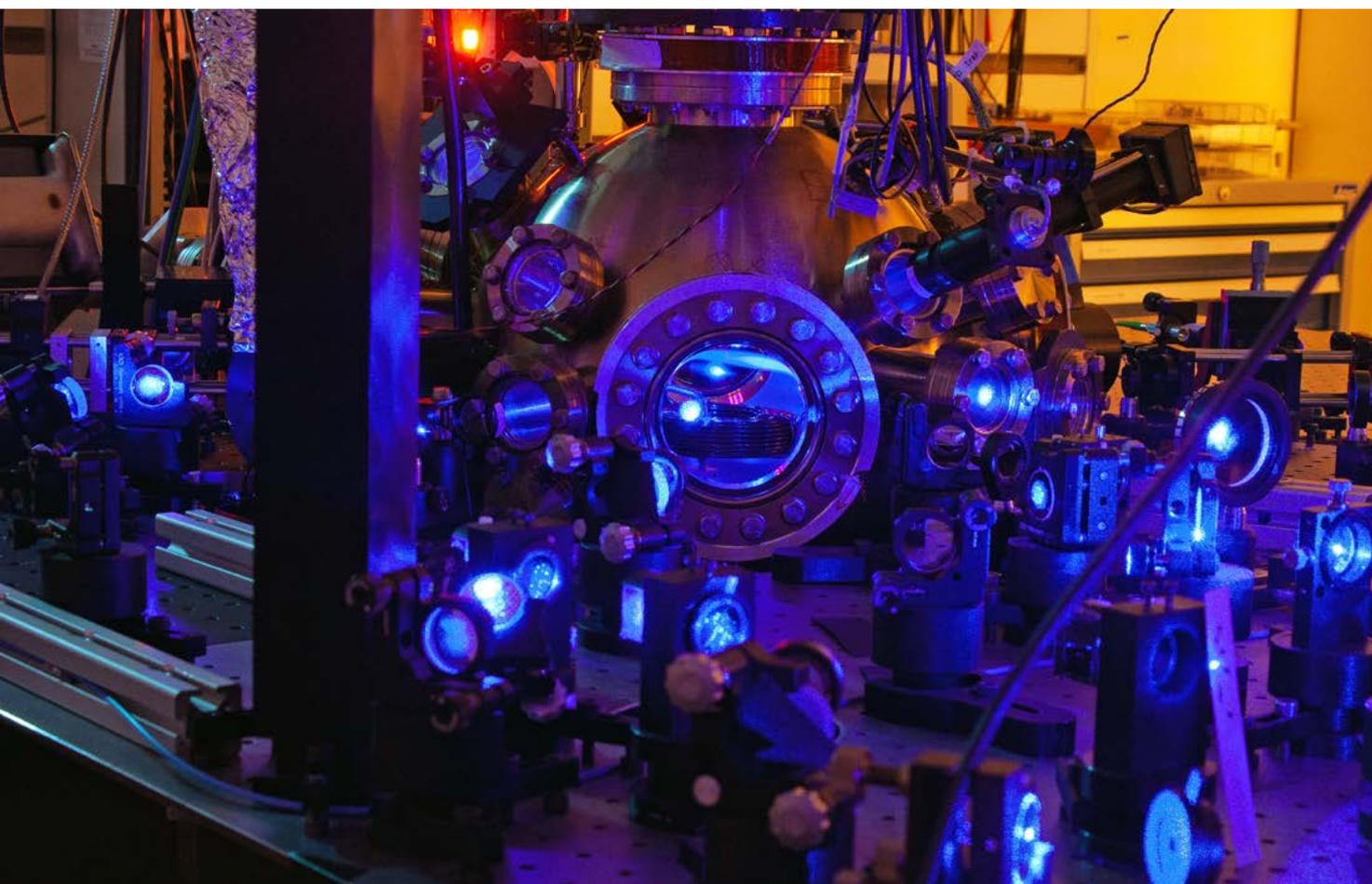
#### Metrologie und Standards

Auch bei zunehmender wissenschaftlicher, wirtschaftlicher und sicherheitspolitischer Konkurrenz soll die Forschung in den Quantentechnologien für Kooperationen offenbleiben. Daher wird die Bundesregierung

Die Definition von Standards stellt extrem hohe Anforderungen an Messungen, die dann als Referenz für andere Geräte dienen. Die weltweit verwendeten Zeitnormale basieren bereits seit Jahrzehnten auf der Kontrolle atomarer Quantenzustände, wobei die Genauigkeitsanforderungen beständig anwachsen. Auf Quantensystemen basierende Atomuhren, wie in der Abbildung zu erkennen, dienen als Zeitreferenz für Präzisionsmessungen, wie beispielsweise für das Global Positioning System (GPS), oder als Taktfrequenz für ein leistungsfähigeres Internet.

gerade im Vorfeld von Anwendungen, bei der Standardisierung und bei öffentlichen Aufgaben die Zusammenarbeit bei den Quantentechnologien in Europa und darüber hinaus stärken.

Die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) arbeitet als nationales Metrologieinstitut in Deutschland im Bereich der Quantenmetrologie und -sensorik intensiv mit den führenden Metrologieinstituten weltweit zusammen. Zu den Kooperationspartnern zählen das National Institute of Standards and Technology (NIST) in den USA, das National Metrology Institute of Japan (NMIJ) und das Nationale Institut für physikalische und chemische Forschung (RIKEN) in Japan, das Laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) und Systèmes de Référence Temps Espace (SYRTE) in Frankreich, das Istituto Nazionale di Ricerca Metrologica (INRIM) in Italien und das National Physics Laboratory (NPL) in Großbritannien. Die Arbeiten adressieren insbesondere die Entwicklung der nächsten Generation optischer Uhren und optischer Resonatoren. Kürzlich wurde die weltweit genaueste Frequenzübertragung über Glasfasern zwischen Paris und Braunschweig demonstriert, womit es erstmals möglich ist,



optische Uhren schnell und präzise zu vergleichen. Diese Zusammenarbeit soll in den kommenden Jahren weiter intensiviert werden.

Die internationale Zusammenarbeit unter Berücksichtigung quantentheoretischer Effekte ist eine wichtige Voraussetzung für die Revision des Internationalen Systems der Einheiten (SI) mit der anstehenden Neudefinition der Einheiten auf Quantenbasis für die Masse (Kilogramm), für die Stoffmenge (Mol), für die Temperatur (Kelvin) sowie bei der Realisierung der elektrischen Einheiten. Die PTB treibt diese Arbeiten international führend mit voran.

### Die Forschung in Europa ausbauen

Im Wettbewerb um Köpfe und Investitionen müssen Deutschland und Europa sich mit hochklassigen zivilen Forschungsinfrastrukturen profilieren. Dazu wird Deutschland mit dem Ziel auf wichtige Partnerländer zugehen, durch gemeinsame Projekte die Sichtbarkeit und Attraktivität Europas für Forschung auf den Gebieten der Quantentechnologien zu stärken. Deutschland und Europa müssen für herausragende Persönlichkeiten mit besonderen Kenntnissen und Interessen in der Forschung und Entwicklung der Quantentechnologien – unabhängig von Herkunft oder Geschlecht – attraktiv sein.

In der europäischen Forschungszusammenarbeit beteiligt sich Deutschland an dem ERA-NET-Programm „QuantERA“<sup>37</sup>. In diesem Rahmen fördert das BMBF zusammen mit 31 weiteren Partnern aus der EU sowie aus Israel, der Türkei und der Schweiz seit Frühjahr 2018 gemeinsame Forschungsprojekte zwischen Instituten und Unternehmen aus den beteiligten Ländern. Deutschland stellt unter den Beteiligten der „QuantERA“-Projekte den mit Abstand größten Anteil.

Das Forschungsprojekt der EU zu den Quantentechnologien („EU Quantum Flagship“) hat zum Ziel, Europa zur führenden Region bei der wirtschaftlichen Umsetzung von Quantentechnologien zu machen. Deutschland hat dieses gemeinsame europäische Großprojekt von Beginn an intensiv begleitet und mitgestaltet, u. a. durch die personelle und finanzielle Unterstützung

des High Level Steering Committee, das Ende 2017 ein umfangreiches Positionspapier mit Empfehlungen vorgelegt hat.<sup>38</sup> Das Arbeitsprogramm und der Förderaufruf für die erste Phase des europäischen Flaggschiffprojekts sind Ende 2017 veröffentlicht worden. Zahlreiche deutsche Bewerber haben sich erfolgreich daran beteiligt. Der Beginn der Projekte wird ab Herbst 2018 erfolgen. Der Start der Hauptphase ist derzeit für 2020 geplant. Angestrebt wird auch eine enge Verbindung über gemeinsame Projekte mit dem erfolgreichen „European Metrology Programme for Innovation and Research“ (EMPIR) bzw. dessen Nachfolgeprogramm.

## 3.6 Die Menschen in unserem Land mitnehmen

---

### Die Grundlagen zum Verständnis von Quantentechnologien entwickeln

Neue Technologien werfen stets auch Fragen auf, die sich auf ihre ethischen Grundlagen und auf ökologische, ökonomische, politische und soziale Folgen ihrer Anwendung beziehen. Solche Fragen werden in der gesellschaftlichen Öffentlichkeit diskutiert. Entscheidungen dazu fallen im Parlament. Die Bundesregierung wird im Rahmen dieses Programms dazu beitragen, dass die notwendigen fachlichen Grundlagen dafür bereitstehen.

Eine ganz wesentliche Voraussetzung dafür ist ein möglichst allgemein verständlicher Zugang zum Thema Quantentechnologien. Navigationssysteme basieren heute auf Satellitentechnik. Trotzdem muss nicht jeder, der Navigationssysteme nutzt, Satellitentechnik beherrschen. Ebenso wenig ist es erforderlich, dass jeder Anwender von Quantentechnologien Physik studiert. Deshalb sind künftig allgemein verständlichere Zugänge und spezifisches Wissen zu Anwendungen der Quantentechnologien auch in der Allgemein- und Schulbildung sowie in Studiengängen außerhalb der Physik nötig, etwa in der Ingenieurausbildung. Die Bundesregierung wird zudem daran mitwirken, dass die notwendigen Grundlagen für eine qualifizierte Ausbildung, eine informierte Diskussion und eine mündige Nutzung dieser Technologien gelegt werden.

<sup>37</sup> [https://cordis.europa.eu/project/rcn/207196\\_en.html](https://cordis.europa.eu/project/rcn/207196_en.html); bzw. <https://www.quantera.eu>

<sup>38</sup> Quantum Technologies Flagship Final Report; Quelle: s. Fußnote 4



Die physikalischen Grundprinzipien der Quantentechnologien sind stark erklärungsbedürftig – die Quanteneigenschaften wie Superposition und Verschränkung sind einer allgemeinen Anschauung nur schwer zugänglich. Daher ist ein Dialog mit der Bevölkerung von besonderer Bedeutung. Dieser kann im Schulunterricht beginnen: Die Abbildung zeigt ein im bundesweiten „INVENT a CHIP“ Wettbewerb ausgezeichnetes Modellexperiment zur Quantenkryptografie. Weiterhin können im Rahmen von Ausstellungen physikalische Hintergründe und die damit verbundenen Prinzipien erklärt und transportiert werden.

Im ersten Schritt hat die Bundesregierung im Agendaprozess seit 2016 die Experten auch dazu um Empfehlungen gebeten, die im Rahmen dieses Programms umgesetzt werden sollen:

- **Didaktik:** Die Quantenphysik wird heute weitestgehend theoretisch und somit fast ausschließlich mathematisch gelehrt. Daneben sind Konzepte für einen intuitiveren Zugang wichtig – durch Lehrmittel, die Quanteneffekte möglichst direkt zeigen und einen praktischen und zum Teil spielerischen Zugang zur Quantenphysik erlauben.
- **Zugang:** Technikmuseen oder -ausstellungen in Deutschland sollten sich künftig verstärkt mit Experimenten oder Anwendungen der Quantentechnologien befassen.
- **Beteiligung:** Selbermachen kann ebenfalls Zugänge zu neuen Technologien öffnen und einen mündigen Umgang damit fördern. Die Bundesregierung wird daher auch zu Quantentechnologien Maßnahmen in dieser Richtung entwickeln, etwa zu offenen

Technologieplattformen für Maker und KMU. Wettbewerbe haben auf anderen Technologiefeldern wie der Programmierung („Start Coding“) oder der Robotik („RoboCup“) bereits eine hohe Sichtbarkeit, ein breiteres Verständnis und eine gesteigerte Motivation beim akademischen und gewerblichen Nachwuchs bewirkt. Die Bundesregierung wird prüfen, wie solche Wettbewerbe im Bereich Quantentechnologien aussehen könnten.

### Den Nachwuchs für Quantentechnologien interessieren

Grundlage für ein Verständnis der Quantentechnologien sind die generell für unseren Wirtschaftsstandort sehr wichtigen Qualifikationen im Bereich Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik (MINT). Die Bundesregierung, die deutschen Forschungseinrichtungen wie die Wirtschaft engagieren sich gemeinsam, um den Erwerb von MINT-Wissen und -Fähigkeiten zu fördern, Perspektiven aufzuzeigen und einem drohenden Fachkräftemangel zu begegnen. Eine stärkere Aktivierung des inländischen Fachkräftepotenzials (z. B. durch eine frühe MINT-Berufsorientierung an Schulen) und die Zuwanderung von Fachkräften aus dem Ausland sind vielversprechende Wege zur Fachkräftesicherung. Internationale Fachkräfte leisten im MINT-Bereich schon jetzt einen wichtigen Beitrag. Laut OECD hat die Bundesrepublik Deutschland mit die liberalsten Einwanderungsbestimmungen für akademisch qualifizierte Fachkräfte aus Drittstaaten.<sup>39</sup> Das offizielle Informationsportal „Make it in Germany“<sup>40</sup> bietet interessierten Fachkräften und Unternehmen

39 OECD (2013), Recruiting Immigrant Workers: Germany, OECD Publishing, S. 15; <http://dx.doi.org/10.1787/9789264189034-en>  
40 <https://www.make-it-in-germany.com/en>

Orientierung und die dort angebotene Hotline „Arbeiten und Leben in Deutschland“ individuelle Beratung. Das Kompetenzzentrum Fachkräftesicherung<sup>41</sup> berät KMU dabei, ihre Attraktivität als Arbeitgeber zu steigern und mit qualifizierten Belegschaften wettbewerbsfähig zu bleiben.

Auch die Nachwuchsförderung im wissenschaftlichen Bereich ist für die Bundesregierung ein wichtiges

41 <https://www.kofa.de>

Ein komplexes Feld wie die Quantentechnologien besitzt einen hohen Bedarf an gut ausgebildeten Fachkräften, sowohl im Bereich der Wissenschaft als auch in der Wirtschaft. Ein hoher Ausbildungsgrad ist nicht nur für die Erforschung, sondern vielfach auch für die Nutzung der komplexen Technologien erforderlich. Aus diesem Grund müssen Studierende der angesprochenen technologischen Fächer schon in ihren Ausbildungsgängen an die Quantentechnologien herangeführt werden. Ein Beispiel dafür ist die Quantum Futur-Akademie des BMBF, eine Praxiswoche mit Seminaren, kreativen Innovationsworkshops und Einblicken in Forschungseinrichtungen und Unternehmen.

Anliegen. Deshalb finanziert sie direkt oder indirekt einen erheblichen Teil der Programme in Deutschland zur Unterstützung des wissenschaftlichen Nachwuchses. Dazu gehören die institutionelle Förderung der Wissenschafts- und Mittlerorganisationen und große Projekte wie das neue „Tenure-Track“-Programm zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses<sup>42</sup>, die Exzellenzinitiative sowie der „Pakt für Forschung und Innovation“. Im Koalitionsvertrag haben sich die Regierungsparteien darauf verständigt, planbare und verlässliche Karrierewege im Hochschulsystem zu schaffen und mit den Wissenschaftsorganisationen konkrete Ziele zur Nachwuchsförderung zu vereinbaren.

Eine erfolgreiche, breite Umsetzung von Quantentechnologien mit der Industrie sowie Anwendern im öffentlichen Bereich wird nur möglich sein, wenn es genug Spezialistinnen und Spezialisten mit Kenntnissen in den Quantentechnologien gibt. Die Quantentechnologien liegen an der Schnittstelle anspruchsvoller Teildisziplinen von Physik, Ingenieurwesen und Informatik, in denen Deutschland traditionell ein attraktiver Standort ist. Dies soll verbunden und entsprechende interdisziplinäre und internationale Forschungs- und Qualifizierungsmöglichkeiten geschaffen werden. Folgende konkrete Maßnahmen sind dazu geplant oder haben bereits begonnen:

42 <https://www.bmbf.de/de/wissenschaftlicher-nachwuchs-144.html>

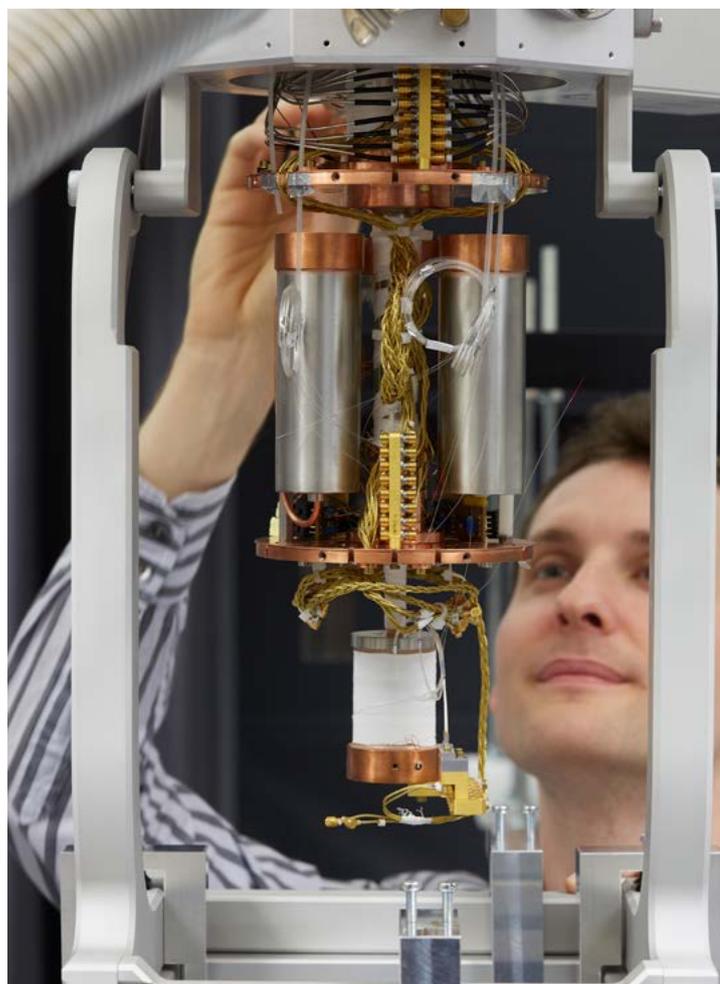


- Mit einem Aufruf zur Einrichtung von Nachwuchsgruppen<sup>43</sup> hat das BMBF im Jahr 2017 eine erste Fördermaßnahme veröffentlicht, die spezifisch auf die Ausbildung von künftigen Führungskräften in den Quantentechnologien ausgerichtet ist. Damit unterstützt das BMBF exzellente Nachwuchskräfte dabei, mit Forschungsprojekten den Übergang von der Grundlagenforschung in neuartige Anwendungen voranzutreiben. Die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sollen für Leitungsaufgaben in Wirtschaft und Wissenschaft qualifizieren. Ab 2018 werden für die ersten Gruppen zunächst ca. 25 Mio. Euro bereitgestellt. Die Nachwuchsgruppen werden regelmäßig gemeinsame Workshops durchführen, um sich auszutauschen und zu vernetzen. Eine zweite Auswahlrunde wird 2020 durchgeführt.
- Im März 2018 hat das BMBF gemeinsam mit Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft die erste „Quantum Futur“-Akademie durchgeführt. Dabei handelt es sich um eine einwöchige Veranstaltung für Studentinnen und Studenten in höheren Semestern, die in Vorlesungen, Praktika und Expertengesprächen auf Führungsebene Einblicke in aktuelle Entwicklungen und persönliche Entwicklungschancen in den Quantentechnologien erhalten. Die „Quantum Futur“-Akademie wird 2019 erneut durchgeführt. Das BMBF ist bestrebt, das Konzept mit dem Ziel weiter zu entwickeln, vergleichbare Maßnahmen ab 2020 auf europäischer Ebene durchzuführen und damit Europa als Standort für den Nachwuchs in den Quantentechnologien zu profilieren.
- Bereits heute leisten F&E-Förderprojekte zum Thema Quantentechnologien auch einen sichtbaren Beitrag zur Nachwuchsförderung in diesem Themengebiet. So wurden im Rahmen von Verbundvorhaben und Technologieentwicklungsprojekten des DLR-Raumfahrtmanagements mehrere Dutzend Bachelor-, Master- und Doktorarbeiten verfasst. Darüber hinaus haben sich die Jungwissenschaftler und -ingenieure aufgrund ihrer Doktoranden- und Post-Doktorandentätigkeit in den genannten Projekten neben den Voraussetzungen für eine weiterführende wissenschaftliche Laufbahn auch die Qualifikation für weiterführende Aufgaben im industriellen Umfeld angeeignet. Diese erfolg-

reiche Nachwuchsförderung aus dem nationalen Raumfahrtprogramm heraus soll in den kommenden Jahren fortgesetzt werden.

- Zur Integration der Quantentechnologien in Studiengänge außerhalb der Physik wird die Bundesregierung eine Bestandsaufnahme der besten Praxis machen und die Erprobung neuer Konzepte unterstützen, um Fachbereiche stärker zu vernetzen und Arbeitsprogramme als Ergänzung etwa für die Doktorandenausbildung zu entwickeln.

Schon die jetzt absehbaren anwendungsbezogenen Forschungsprojekte werden die personellen Ressourcen in der Community der Quantentechnologien stark auslasten. Innovative Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler, die eigene Arbeitsgruppen aufbauen können, tragen zur Erweiterung der Fachszene bei. Nachwuchsforschungsgruppen im Bereich der Quantentechnologie bieten damit eine thematische und personelle Ergänzung der bestehenden Forschungslandschaft.



43 <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1371.html>

## 4 Mittelplanung

Aufwendungen für Forschung, Entwicklung und Anwendung von Quantentechnologien werden bislang überwiegend im Rahmen der Grundfinanzierung von Forschungsorganisationen sowie auch im Rahmen einzelner Projektfördermaßnahmen finanziert. Aktuell stehen hier in Deutschland quantifizierbare Mittel in einem Umfang von ca. 100 Mio. Euro pro Jahr zur Verfügung. Zusammen mit den in diesem Programm dargestellten zusätzlichen Maßnahmen (s. Kapitel 3) werden von der Bundesregierung 2018 bis 2022 Mittel in Höhe von ca. 650 Mio. Euro eingeplant. Es ist angedacht, das Programm bis 2028 fortzuführen. Über Schwerpunkte, Zuständigkeiten und die finanzielle sowie die inhaltliche Ausgestaltung nach 2022 entscheiden Bundesregierung und Parlament in Abhängigkeit von der weiteren wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung auf dem Gebiet der Quantentechnologien und ihrer Nutzung.

Die Quantentechnologien bieten für die wirtschaftliche Entwicklung des Standorts Deutschland große Chancen. Um die Technologien frühzeitig zu erschließen und nutzbar zu machen, ist das Zusammenspiel von Wirtschaft und Wissenschaft, Politik und Gesellschaft erforderlich.



## 5 Anhang: Trägerorganisationen und Ressortforschung

### 5.1 Deutsche Forschungsgemeinschaft

Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) fördert bereits langjährig Forschung mit direktem Bezug zu Quantentechnologien. Hierbei ist zu beobachten, dass die Thematik in Anträgen mittlerweile öfter eine prominente Rolle einnimmt. Prognosen zu künftigen Entwicklungen sind kaum möglich, da die Antragstellenden die Thematik der Anträge und Initiativen frei wählen können und die DFG hier keine Vorgaben macht. Aus Sicht der zuständigen Abteilung gibt es keine Anzeichen dafür, dass mit einem Rückgang der zu dem Forschungsfeld insgesamt beantragten Mittel und damit auch der Fördervolumina zu rechnen ist.

Die DFG fördert 2018 Forschung mit direktem Bezug zu Quantentechnologien mit einer jahresbezogenen Bewilligungssumme von 52,9 Mio. Euro. Hiervon entfallen 35,6 Mio. Euro auf koordinierte Programme (Forschungsgruppen, Schwerpunktprogramme, Sonderforschungsbereiche, Graduiertenkollegs, Exzellenzcluster). Die anderen 17,3 Mio. Euro entfallen auf die Einzelförderung (Programme Sachbeihilfen, Forschungsstipendien, Emmy Noether-Programm, Heisenberg-Programm, Reinhart Koselleck-Projekte), Preise sowie das Programm „Internationale wissenschaftliche Kontakte“.

Basis waren Projekte, die sich am 30.04.2018 in der laufenden Förderung befanden.

### 5.2 Max-Planck-Gesellschaft

Die Max-Planck-Gesellschaft (MPG) hat frühzeitig begonnen, Grundlagenforschung zu Quantentechnologien im Sinne der zweiten Quantenrevolution zu fördern. 1981 wurde das Max-Planck-Institut (MPI) für Quantenoptik in Garching gegründet, 1993 das experimentelle Teilinstitut des MPI für Gravitationsphysik in Hannover, 1994 das MPI für die Physik komplexer Systeme in Dresden und 2009 das MPI für die Physik des Lichts in Erlangen. Darüber hinaus beschäftigen sich auch die Max-Planck-Institute für Festkörperforschung in Stuttgart, für die Chemische Physik fester Stoffe in

Dresden, für die Struktur und Dynamik der Materie in Hamburg, für Mikrostrukturphysik in Berlin sowie das Fritz-Haber-Institut in Berlin zum Teil mit Aspekten dieser Thematik. Mit der Grundlagenforschung zu Quantentechnologien an all diesen Instituten sieht sich die MPG als Wegbereiter und Unterstützer des aktuellen Fachprogramms Quantentechnologien.

Die MPG sieht die Quantentechnologien als strategisch wichtiges Thema an, nicht nur in Bezug auf die Grundlagenforschung, sondern auch im Hinblick auf den potenziellen volkswirtschaftlichen Nutzen. Deutschland ist im Bereich der Grundlagen exzellent positioniert und kann im weltweiten Wettbewerb um die Quantentechnologien eine führende Rolle übernehmen. Dazu bedarf es einer langfristigen Strategie. Mit dem Programm wird es möglich sein, diese Strategie umzusetzen. Die MPG bringt wichtiges Know-how in diesen Prozess ein, u. a. in den Bereichen:

- Quantencomputing und Quantensimulation (Berlin, Dresden, Garching, Halle, Hamburg und Stuttgart),
- Quantenkommunikation, inkl. Satellitenkommunikation (Garching und Erlangen), und
- Quantenmetrologie, insbesondere höchstempfindliche interferometrische Sensorik (Hannover und Erlangen).

Die MPG sieht ihren Beitrag zur nationalen Strategie vor allem in der Fortführung und dem Ausbau exzellenter Grundlagenforschung. Dazu gehören auch die Erschließung neuer Themenfelder, das Augenmerk auf die Patentierung neuer Ideen sowie das Mitwirken in nationalen und internationalen Forschungsnetzwerken. Die MPG ist bereit, einen Beitrag zur Überführung von grundlegenden Phänomenen der zweiten Quantenrevolution in anwendungsrelevante Technologien zu leisten. Dazu werden u. a. Instrumente wie die unabhängigen Max-Planck-Forschungsgruppen und die International Max Planck Research Schools genutzt.

Vertreter der MPG waren an der Erstellung des Konzeptpapiers der Wissenschaft (QUTEGA) maßgeblich beteiligt und unterstützen nachdrücklich die Verwendung der dort empfohlenen Forschungsförderinstrumente, u. a. die Einrichtung von Konsortien und akademischen Nachwuchsgruppen, über die bereits etablierten Programme hinaus. Die Konsortien in den verschiedenen Bereichen sollen dabei auf erwiesene Expertisen aufbauen, um so an verschiedenen Standorten oder auch standortübergreifend die höchstmögliche Innovation zu erreichen.

### 5.3 Fraunhofer-Gesellschaft

Die Quantentechnologien werden von der Fraunhofer-Gesellschaft als bedeutende Chance für die Zukunft des Hightech-Standorts Deutschland und Europa wahrgenommen. Im internationalen Wettbewerb zur Verwertung positioniert sich die Fraunhofer-Gesellschaft im Themenfeld mit einer Investition von ca. 20 Mio. Euro zur Förderung weitläufiger Forschungsaktivitäten innerhalb einer priorisierten strategischen Initiative der „Agenda Fraunhofer 2022“. Eine Transfer- und Verwertungsinfrastruktur für den deutschen und europäischen Wirtschaftsraum wird mit einer fachübergreifenden Bündelung der Kompetenzen von zwölf Fraunhofer-Instituten etabliert. Der digitale Wandel und die Souveränität der digitalen Gesellschaft in Deutschland und Europa stehen im Vordergrund dieser Förderstrategie.

Als zentrales Förderprojekt der priorisierten strategischen Initiative vereint das Leitprojekt „QUILT“ („Quantum Methods for Advanced Imaging Solutions“) unter der Koordination des Fraunhofer IOF und Fraunhofer IPM vier weitere Fraunhofer-Institute (ILT, IMS, IOSB, ITWM). Gemeinsam mit dem Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der österreichischen Akademie der Wissenschaften und dem Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts (MPG-MPL) werden international führende Kompetenzen der Quantenoptik in die Entwicklung von Anwendungsszenarien und Demonstratoren im Bereich des Quantenimaging eingebunden. Ghost-Imaging für die biomedizinische Bildgebung und die optische Fernerkundung zusammen mit quantenoptischen Produktionsverfahren im Bereich der hochauflösenden Lithografie stehen im Zentrum der Arbeiten. Der Beirat

des Leitprojekts bindet zudem zentrale Akteure der deutschen Industrie im Bereich der Optik und Photonik in die Entwicklungen ein.

In einer gemeinsamen Finanzierung mit dem Land Baden-Württemberg wird das in 2018 anlaufende Fokusprojekt der drei Freiburger Institute IAF, IPM und IWM die zentrale Initiative zur Verwertung von Quantensensoren bilden. Es wird in eine für den deutschen und europäischen Forschungsraum führende Region der Quantensorik eingebettet und auf die Kompetenzzentren der Universität Stuttgart und Ulm ausgerichtet. Hierbei wird eine der vielversprechendsten Richtungen des Quantensensing aufgegriffen, weiterentwickelt und in Anwendungen überführt. Die Forschungsschwerpunkte liegen in Produktionsverfahren für maßgeschneiderte NV-Defektzentren in Diamantmatrix als auch für optische Magnetometer, welche auf präparierten Spin-Zuständen in Gaszellen aufbauen. Es werden hochauflösende Messungen kleinster Ströme und Magnetfelder mit räumlicher Auflösung auf der untersten Nanoskala zugänglich. Ein breites Spektrum an Verwertungsszenarien wird in der Mikroelektronik und Medizintechnologie, der Geodäsie sowie der chemischen und biomedizinischen Analytik anvisiert. Mit einem Schwerpunkt in der Analyse und Entwicklung mikro- und nanoelektronischer Bauelemente stellt das Projekt seine Ziele in Einklang mit der „Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland“.

Fraunhofer-/Max-Planck-Kooperationsprojekte spielen eine weitere wesentliche Rolle für gemeinsame Forschungsarbeiten mit Exzellenzpartnern im Bereich der Quantensorik und -metrologie. In einer Zusammenarbeit des Fraunhofer IAF mit dem MPI für Festkörperforschung (MPG-FKF) und der Universität Stuttgart wird hochauflösende Magnetfeldsensorik zur Kernspinresonanzspektroskopie auf der Nanoskala adressiert. In Arbeiten des Fraunhofer IPM mit dem MPI für Quantenoptik (MPG-MPQ) stehen ultrapräzise Frequenzkamm-messungen für die Quantenmetrologie im Vordergrund. Mit den Partnern am MPQ werden die Grundlagen für diverse Anwendungen der Quantensorik in hochpräzisen Synchronisationstechnologien zusammen mit hochauflösenden Beschleunigungs- und Gravitationsmessungen realisiert.

Das „Attract“-Programm bietet Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern aus der Spitzen-

forschung die Möglichkeit, ihre Kompetenzen in die Fraunhofer-Gesellschaft einzubringen, um ausgewiesene Forschungsschwerpunkte gezielt zu verwirklichen. Mit der Gründung einer Forschungsgruppe (Quantum Technology Laboratories GmbH) aus dem IQOQI werden die quantenoptischen Aktivitäten aus dem Leitprojekt am Fraunhofer IOF durch einen Schwerpunkt in der Quantenkommunikation erweitert. Ziel der Forschungsgruppe ist die Verschränkung von Photonenpaaren in mehreren Eigenschaften zur Steigerung der Übertragungseffizienz in satellitenbasierten und faseroptischen Quantenkommunikationsnetzwerken. Hierdurch wird die Zusammenarbeit des Fraunhofer IOF mit dem IQOQI als international ausgewiesenes Zentrum der Quanteninformationstheorie weiter vertieft. Ein gemeinsam betriebenes Joint Lab zwischen beiden Einrichtungen ist derzeit im Aufbau.

### Basistechnologien als modulare Quantentools

Viele quantentechnologische Applikationen können durch ein modulares Zusammenwirken von unterschiedlichen Basistechnologien entwickelt werden. Universell einsetzbare Quantentools werden durch die Kompetenzbereiche und Portfolios von Fraunhofer-Instituten der priorisierten strategischen Initiative aus den Materialwissenschaften, der Photonik und Mikroelektronik sowie den Informations- und Kommunikationstechnologien in voller technologischer Breite adressiert. Im Vordergrund derzeitiger Entwicklungsarbeiten stehen:

- Einzelphotonentechnologien mit Quellen für deterministische Photonen, verschränkte Photonenpaare und Plattformen für integrierte parametrische Frequenzkonversion (Fraunhofer CAP-UK, HHI, IAF, ILT, IMM, IOF, IOSB, IPM, ITWM),
- Photonische Schnittstellen sowie integrierte Wellenleitertechnologien und Mikrooptik (Fraunhofer CAP-UK, HHI, IAF, ILT, IOF),
- Materialengineering und hochpräzise Herstellungsverfahren für Quantenmedien in der Form von isolierten Quantendots und erweiterten Anordnungen von Quantenpunkten mit maßgeschneiderten Eigenschaften in definierten Trägern und Matrizen (Fraunhofer IAF, IMM, IWM).

Diese Elemente bieten modulare Technologieplattformen für eine systematische und weitläufige Systemintegration in diversen Applikationsbereichen. Anvisierte Basistechnologien beinhalten:

- Spektral abstimmbare Einzelphotonenquellen,
- Photonische Plattformen und photonische integrierte Schaltungen für das Ansteuern und Auslesen isolierter Quantenzentren und Quantenarrays in der Quanteninformationsverarbeitung und Quantensensorik,
- Detektoren und mikroelektronische Umgebungsarchitekturen zur Erfassung, Verstärkung und Digitalisierung kleinster Signale.

Die Entwicklung der Basistechnologien wird durch den Beitrag der Fraunhofer-Institute aus der Informatik, Mathematik und Materialmodellierung weitergetragen. Hierbei stehen die Virtualisierung quantenphysikalischer Prozesse für die Optimierung modularer Anwendungen und die Sicherung klassischer Kommunikationsnetzwerke in bestehende Sicherheitsarchitekturen im Vordergrund. Schwerpunkte werden in beiden Themenfeldern gesetzt:

- Modellierung von komplexen Quantensystemen bezüglich Kohärenzzerfall und Energieniveaustuktur sowie theoretische Analysen zu Quantenübertragungsmechanismen und Quanteninformationstransport (Fraunhofer ITWM, IWM, SCAI),
- Einbindung von KI und Machine-Learning-Methoden zur Analyse des komplexen Zusammenwirkens einzelner Komponenten in modularen Quantentechnologien für Systemoptimierung und Prüfszenarien (Fraunhofer ITWM, SCAI),
- Einbettung von Quantenschlüsselverteilung in klassische kryptografische Protokolle sowie Anbindung von Quantenkommunikationsnetzwerken an klassische Sicherheitsarchitekturen (Fraunhofer AISEC, SIT),
- Post-Quantenkryptografie (Fraunhofer AISEC, SIT).

Diese modularen Technologien sind der Ausgangspunkt für die allgemeine Verwertungsstrategie der Fraunhofer-Gesellschaft. Durch die Koordination der Forschungsaktivitäten kann der Pool an Basistechnologien synergetisch entwickelt und für spezielle Applikationsszenarien zielgerecht platziert werden. Diese Entwicklungsstrategie ist die Grundlage für eine breite Transfer- und Verwertungsinfrastruktur.

### Transfer- und Verwertungsinfrastruktur

Mit einer Bündelung quantentechnologischer Kompetenzen innerhalb der priorisierten strategischen Initiative wird die Organisationsstruktur für eine weitläufige Transfer- und Verwertungsinfrastruktur etabliert. Fachübergreifende Forschungsarbeiten der Institute in unterschiedlichen Anwendungsbereichen werden miteinander vernetzt. Diese Ausrichtung steht im Einklang mit der FET Flagship-Initiative der Europäischen Kommission und eine aktive Unterstützung der europäischen Ziele wird mit einer Verwertungsinfrastruktur seitens der Fraunhofer-Gesellschaft anvisiert.

### Forschungsfeld Quantenimaging

Das Leitprojekt „QUILT“ wird im Umfeld eines der führenden Zentren der deutschen Optik- und Photonikindustrie vom Fraunhofer IOF in Jena koordiniert. Die Forschungsarbeiten der beteiligten Institute (ILT, IMS, IOF, IOSB, IPM, ITWM) sind auf das hohe Anwendungspotenzial verschränkter Photonenpaare in der optischen Bildgebung, Spektroskopie und Lithografie fokussiert. Zentrales Ziel des Projekts ist die Identifikation und Demonstration des Mehrwerts quantenoptischer Verfahren versus neuste Entwicklungen in kompetitiven klassischen Technologien. Hierbei wird ein maßgebliches Hindernis in der Anwendung klassischer Bildgebungsverfahren bei extrem kurz- und langwelligen Lichtquellen oder anspruchsvollen inhomogenen Medien adressiert. Die Möglichkeit der Informationsübertragung zwischen räumlich und spektral getrennten Photonenpaaren mittels Verschränkung ist der Ausgangspunkt für den Mehrwert des quantenoptischen Ansatzes. Im Rahmen des Ghost-Imaging und der hyperspektralen Bildgebung können anspruchsvolle Spektralbereiche und verzerrende Medien für etablierte optische Verfahren mit ausgereifter Detektortechnologie und gängiger Optik zugänglich gemacht werden. Im Bereich der optischen Mikroskopie und Fernerkundung können Auflösungsvermögen, materialspezifische Nachweise und Phototoxizität sowie Abbildungsqualität, Eindringtiefe und Reichweite in streuendem Gewebe und in atmosphärischen Verzerrungen adressiert werden. Dieser Ansatz bietet eine maßgebliche Erneuerung in etablierten Anwendungsbereichen der biomedizinischen Bildgebung und medizinischen Diagnostik, der Materialprüfung sowie Prozess- und Umweltanalytik, der Sicherheitstechnik und der autonomen Mobilität.

### Forschungsfeld Quantensensorik

Sensoren spielen eine zentrale Rolle in der digitalen Wirtschaft Deutschlands und Europas. Forschungsschwerpunkte des Fraunhofer IAF in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IPM, IWM, IMM und CAP-UK sind Festkörpertechnologien, die den breiten Einsatz von maßgeschneiderten Quantensensoren bei Raumtemperatur und in variabler Umgebung ermöglichen. Hierbei wird ein bedeutendes Verwertungshindernis von Quantensensoren adressiert. Aufgrund der hohen Empfindlichkeit gegenüber Umgebungsbedingungen benötigen Quantensensoren oft aufwendige Plattformen. Die notwendige kryogene Kühlung und Vakuumumgebung schränken das Anwendungsspektrum von vielen Sensoren unabhängig von den vorteilhaften Leistungsmerkmalen signifikant ein. Mit einer Verfahrenstechnik zur Synthese von NV-Defektzentren in Diamantmatrix ist eine Herstellung von nanoskalierbaren Sensoren möglich, deren Eigenschaften maßgeschneidert an unterschiedlichste Applikation angepasst werden können. Komplementär hierzu sollen gaszellenbasierte optische Magnetometer reif für den industriellen Einsatz gemacht werden. Hochaufgelöste Messungen kleinster Ströme und Magnetfelder bei Raumtemperatur und variabler Umgebung mit einer räumlichen Auflösung auf der untersten Nanoskala werden hierdurch ermöglicht. Anwendungen liegen in der Entwicklung und Analyse hochdichter Speichermedien und niederdimensionaler Halbleiterbauelemente. Mit der räumlichen Auflösung von kleinsten Strömen, z. B. von Gateleckströmen, wird zudem ein fundamental neues Werkzeug für die Qualitätssicherung von mikro- und nanoelektronischen Schaltungen realisiert. Somit wird eine enge Verbindung zur Mission der Forschungsfabrik Mikroelektronik Deutschland hergestellt. Mit einer Empfindlichkeit im Bereich von Hunderten bis wenigen Kernspins eröffnet die NMR-Spektroskopie auf der Nanoskala neue Möglichkeiten für die chemische und biomedizinische Analytik. Die Struktur und Funktion von chemischen und biologischen Systemen können durch die Detektion von Kern- und Elektronenspins auf bildgebende Weise zugänglich gemacht werden. Die Empfindlichkeit bietet derzeit für größere Strukturen wie Proteinsysteme den Zugang in den Einzelmolekülbereich. Kontaktfreie Messungen von Nervenleitungen und Gehirnströmen bieten die Basis für Innovationen mit hoher Tragweite in der Medizintechnologie. Die Entwicklung einer nicht invasiven Aufnahme und Mustererkennung von

Gehirnströmen eröffnet einen fundamentalen Zugang zur Interaktion von Mensch und Maschine. Die Geodäsie und GPS-freie Navigation wird mit dem Vermessen kleinster Änderungen im Erdmagnetfeld erreicht. Breite Einsatzmöglichkeiten der oben aufgeführten Entwicklungen liegen in den Bereichen der Halbleiterindustrie, Rohstoffressourcen, IT, Medizin- und Sicherheitstechnologie sowie chemische und biomedizinische Analytik.

### **Forschungsfeld Quantenkommunikation**

Durch den Einfluss hochleistungsfähiger Informationstechnologien in globalen Netzwerken gewinnen Datensicherheit und vertrauliche Kommunikationswege immer mehr an Bedeutung für die Souveränität der digitalen Gesellschaft in Deutschland und Europa. Sichere Kommunikationsnetzwerke nehmen in modernen Informationsgesellschaften den Stellenwert einer kritischen Infrastruktur ein. Um eine rigorose Vertraulichkeit in zukünftigen Kommunikationsnetzwerken zu gewährleisten, ist eine Erneuerung klassischer Sicherheitsarchitekturen von zentraler Bedeutung. Aktuelle Aktivitäten des Fraunhofer IOF und HHI folgen der Roadmap der ESA zu einer satellitenbasierten Quantenschlüsselverteilung (QKD) für den Aufbau eines Quantenkommunikationsnetzwerks im europäischen Raum (ARTES und ScyLight). Der Forschungsschwerpunkt liegt auf standardisierten Technologien für optische Satellitenverbindungen zwischen primären geografischen Kommunikationspunkten und faseroptischen Netzwerken. Diese Entwicklungen werden durch die grundsätzliche Sicherheit in Datenübertragungen mit verschränkten Lichtteilchen als Informationsträger motiviert. Die quantenphysikalische Sicherheitsgarantie unterscheidet sich grundsätzlich von mathematischen Strategien für kryptografische Algorithmen in gegenwärtigen Technologien. Klassische Sicherheitsstrategien sind von der Entwicklung neuer Angriffsmethoden und den Ressourcen des Angreifers abhängig. Durch den Wechsel zu einer quantenphysikalischen Sicherheit bietet die Quantenkommunikation einen fundamentalen Beitrag zur Vertraulichkeit bei digitalen Informationen und Übertragungen mit einem maßgeblichen Standard für eine nachhaltige Sicherheitsstrategie. Mit den Kompetenzen des Fraunhofer AISEC und SIT wird die Kopplung von Quantenkommunikationstechnologien an klassische Sicherheitsarchitekturen erarbeitet. Diese Entwicklungen werden durch begleitende Studien zur

Wechselwirkung quantenbasierter und klassischer Informationstechnologien unterstützt.

### **Forschungsfeld Quantencomputing**

Im europäischen Forschungsraum sind die Entwicklungen im Bereich des Quantencomputings von der Bildung größerer Forschungskonsortien zur Bewältigung dieser bedeutenden Aufgabe gekennzeichnet. Hierdurch wird die notwendige Kompetenzbündelung im Wettbewerb mit internationalen Konzernen und intensiver nationaler Forschungsförderung im außereuropäischen Raum erreicht. Mit dem „JARA“-Konsortium (Jülich Aachen Research Alliance) leisten die RWTH Aachen und das Forschungszentrum Jülich in Kooperation mit dem QuTech-Institut und der Technischen Universität Delft fundamentale Forschungsarbeiten innerhalb der internationalen Bemühungen zu Realisierung dieser Schlüsseltechnologie. Angebunden an diese Aktivitäten verfolgt das Fraunhofer ILT in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer CAP-UK die Entwicklung von Quantentransportmechanismen für verteiltes Quantencomputing. Das komplexe Zusammenspiel von spektralangepassten Einzelphotonenquellen, integrierten Wellenleitern und Mikrooptiken sowie parametrischen Frequenzkonvertern und die Einbettung von Quantenemittern in geeigneten Medien und Umgebungen sind die Schwerpunkte der Forschungsarbeiten. Mit diesen Aktivitäten werden wichtige Erkenntnisse gewonnen und technologische Grundlagen in der Quanteninformationsverarbeitung etabliert. Diese Forschungsarbeiten sind geeignete Anknüpfungspunkte zu den anderen Entwicklungsfeldern. Die Quantenkommunikation und das Quantensensing bieten wichtige Erkenntnisse im Bereich der photonischen Technologien und Plattformen für den Austausch mit den Forschungsarbeiten zum Quantencomputing.

## 5.4 Helmholtz-Gemeinschaft

### Aktuelle Aktivitäten und Kompetenzen

In der Helmholtz-Gemeinschaft wird ein breites Spektrum an Fragestellungen im Bereich der Quantentechnologien von grundlegenden quantenphysikalischen Phänomenen über Materialforschung und Bauteilentwicklung bis hin zur Realisierung funktionaler technischer Systeme adressiert. Derzeit arbeiten vorrangig das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), das Forschungszentrum Jülich (FZJ), das Helmholtz-Zentrum Berlin (HZB), das Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR) und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) an Themen mit Bezug zu Quantentechnologien. Innerhalb unterschiedlicher Forschungsbereiche und in forschungsbereichübergreifenden Kooperationen nutzen die fünf Forschungszentren vorhandene Synergien zur gemeinsamen Beantwortung der aktuellen Forschungsfragen.

Sowohl im Programm „Future Information Technology“ (FIT) als auch im Programm „Supercomputing and Big Data“ forschen FZJ, HZB und KIT gemeinsam an system- und infrastrukturorientierten Konzepten der Quanteninformationsverarbeitung, die längerfristig die Entwicklung von Technologien des Quantencomputings von den Grundlagen bis zur Anwendung voranbringen. Ziel ist es, skalierbare Architekturen und Quantenalgorithmen zur Abbildung realer Problemstellungen zu entwickeln. Ein Leuchtturmprojekt hierzu ist das derzeit mit Mitteln aus dem Impuls- und Vernetzungsfonds der Helmholtz-Gemeinschaft geförderte Zukunftsthema zu skalierbaren, festkörperbasierten Quantencomputern (FZJ, RWTH Aachen, KIT). Die Karlsruhe Nano Micro Facility (KNMF) am KIT und die Helmholtz Nano Facility (HNF) des FZJ bieten hierfür wichtige Infrastrukturen. Das DLR arbeitet zudem mit dem FZJ im Bereich der Anwendung von Quantencomputern in der Luft- und Raumfahrt zusammen.

Neben den Aktivitäten im Bereich des Quantencomputings liegen die Schwerpunkte der Forschungsaktivitäten beim FZJ und KIT im Bereich der Quantenmaterialien, zu denen auch grundlegende Untersuchungen vom HZB im Rahmen des Programms „FIT“ durchgeführt werden. Beispiele reichen von topologischen Materialien für Majorana-Qubits über die Synthese von molekularen Quantenbausteinen oder das Wachstum von hochreinen Halbleiterstrukturen für Spin-Qubits

zu neuen oder verbesserten Supraleitern für Qubit-Anwendungen. Die Helmholtz-Zentren (z. B. KIT) erarbeiten darauf aufbauend weit fortgeschrittene Architekturen und physikalische Plattformen – sogenannte Quantensimulatoren –, die langfristig auf das universelle Quantencomputing abzielen. Mit Experimenten an komplexen Materialien liefert auch das HZDR im Programm „From Matter to Materials and Life“ (MML) des Forschungsbereichs Materie einen Beitrag für die Erforschung von Quantenzuständen wie Spinflüssigkeiten oder die kohärente Kontrolle von Quantensystemen auf der Nanometerskala.

Ein weiteres wichtiges Forschungsthema ist die Quantenkommunikation sowie die Quantenschlüsselverteilung (QKD), deren Ziel es ist, die langreichweitige Übertragung von Zuständen in Quantenprozessoren über optische Netzwerke („Flying Qubits“) zu ermöglichen und das Potenzial kleinerer Quantenprozessoren, die im Rahmen der Quantencomputingaktivitäten entwickelt werden, als Knoten in Quantenkommunikationsnetzwerken zu nutzen. Neben der Verortung des Themas Quantenkommunikation im Forschungsbereich Schlüsseltechnologien ist dieses mit Fokus auf satellitengestützte Quantenkommunikation Bestandteil der Raumfahrtforschungsaktivitäten des DLR im Forschungsbereich Luftfahrt, Raumfahrt und Verkehr. Das DLR forscht außerdem zum Thema Quantenmetrologie, das für kommerzielle Anwendungen wie Erdbeobachtung, Navigation (z. B. hochgenaue Zeitbestimmung für die zukünftigen Generationen von Navigationsatelliten) und Kommunikation, aber auch für sicherheitskritische Anwendungen von großer Relevanz ist. Ein weiteres Forschungsthema ist die Quantensensorik mit kalten Atomen und Bose-Einstein-Kondensaten mittels Atominterferometrie, z. B. für inertielle Messungen von Beschleunigung und Drehraten im Weltraum.

### Auswahl der laufenden Forschungsaktivitäten

Die Forschungsaktivitäten innerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft sind komplementär aufgestellt. Im Rahmen der aktuellen Förderperiode wird vor allem in folgenden Programmen zu Quantentechnologien geforscht (s. Tabelle S. 39).

Übersicht der relevanten Forschungsaktivitäten innerhalb der Helmholtz-Gemeinschaft		
Forschungsbereich	Programm / Thema	Beteiligt
Energie und Schlüsseltechnologien	Future Information Technology (FIT): Themen: Controlling Spin-Based Phenomena, Controlling Collective States	FZJ, HZB
Schlüsseltechnologien	Supercomputing and Big Data (SCBD): Themen: Computational Science and Mathematical Methods, Data-Intensive Science and Federated Computing, Supercomputer Facility, Science and Technology of Nanosystems (STN): Themen: Condensed Matter; Molecular Spin Qubits, Quantum Optics, Quantum Theory, Quantum Simulation	FZJ, KIT
Luftfahrt, Raumfahrt und Verkehr	Space: Themen: Communication and Navigation, Space System Technology	DLR
Materie	From Matter to Materials and Life (MML): Themen: Quantum Condensed Matter: Magnetism, Superconductivity and beyond, Nanoscience and Materials for Information Technology	HZDR, DESY, FZJ, HZB, HZG

Für die Programmaktivitäten mit Relevanz für Quantentechnologien werden rund 60 Mio. Euro der Grundfinanzierung durch das BMBF und die Länder sowie aus Mitteln des Impuls- und Vernetzungsfonds aufgewendet.

### Zukünftige Aufstellung des Themas Quantentechnologien in der Helmholtz-Gemeinschaft

Um die Forschung im Bereich Quantentechnologien in der Helmholtz-Gemeinschaft auch längerfristig abzusichern und eine führende Rolle im internationalen Forschungsfeld zu spielen, unterstützen alle beteiligten Forschungszentren eine weiterführende institutionelle Förderung von Forschungsaktivitäten, die von der reinen Grundlagenforschung in das Vorfeld erster industrieller Anwendungen reicht. Dabei wird ungeachtet der programmatischen Verortung der Forschungsthemen innerhalb der verschiedenen Forschungsbereiche weiterhin eine inhaltliche Verschränkung angestrebt.

Im Forschungsbereich Schlüsseltechnologien (zukünftig: Information) wird der Fokus in der kommenden Förderperiode noch stärker auf informationstechnologischen Themen, insbesondere Quantencomputing, liegen. Neben der Untersuchung der Anwendbarkeit steht dabei auch die Forschung zu Quantenmaterialien für hoch performante Quanteninformationshardware im Vordergrund. Aufbauend auf den vorhandenen Forschungsinfrastrukturen sind hierzu komplementäre Erweiterungen an den Standorten in Jülich und Karlsruhe geplant. So strebt das FZJ für die Qubit-Forschung einen spezifischen Ausbau der Helmholtz Nano Facility

(HNF) und den Aufbau einer Nutzerinfrastruktur für Quantencomputing (JuNIQ) an. Das KIT plant die Gründung eines Instituts für Quantentechnologien mit dem Aufbau einer Quantum Hardware Foundry, um Materialkonzepte und Bauteilumgebungen zu entwickeln. Auch im Forschungsbereich Materie werden die Forschungsaktivitäten zu Quantenmaterialien weiter fokussiert, um die fundamentalen Wechselwirkungen und Prozesse in z. B. topologischen Materialien und Spinflüssigkeiten zu verstehen und anzuwenden. Des Weiteren werden atomistische Qubits in Halbleitermaterialien mit Nanometerpräzision hergestellt, beispielsweise für Anwendungen in der Quantensensorik. Wesentlich sind hierbei die Forschungsinfrastrukturen, die im HZDR gezielt weiter ausgebaut werden.

Für die Weiterentwicklung von Quantentechnologien für Raumfahrtanwendungen hat das DLR zudem drei Konzepte entwickelt:

1. Das DLR-Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik in Hannover soll zukünftig anwendungsorientierte Quantensensorik für leistungsfähigere Erdbeobachtungsmissionen entwickeln – mit dem Ziel, Präzisionsgeodäsie im Weltraum zu etablieren und optische Verfahren des Quantenengineerings für Weltraumanwendungen zu erschließen.
2. Das Institut für Quantentechnologien soll Themen wie Quantenmetrologie, -sensorik, -informationstechnik und Materiewellenoptik mit Blick auf Weltraumanwendungen erforschen.
3. Komplementär dazu soll das Galileo-Kompetenzzentrum quantentechnologische Ansätze für die

nächste Generation von Satellitennavigationssystemen entwickeln.

Die Programmaufstellung ist Teil des Dialogs zwischen der Helmholtz-Gemeinschaft und den Zuwendungsgebern in Vorbereitung auf die vierte Programmperiode. In den 2017 formulierten Strategien haben Gemeinschaft und Forschungsbereiche bereits die Stärkung der Forschungsaktivitäten im Bereich Quantentechnologien adressiert; sie sollte in den forschungspolitischen Leitlinien entsprechend verankert werden. Die auf dieser Basis konzipierten Programme werden in der strategischen Bewertung 2019 durch eine externe Gutachtergruppe evaluiert.

### Einbindung innerhalb der deutschen und internationalen Forschungslandschaft

Ziel der involvierten Helmholtz-Forschungszentren ist eine komplementäre Aufstellung der außeruniversitären Forschungseinrichtungen, wobei die jeweiligen Forschungsaktivitäten über gemeinsame Projekte wie beispielsweise im Rahmen der nationalen Initiative QUTEGA oder des europäischen FET Flagship on Quantum Technologies mit Universitäten und anderen außeruniversitären Forschungseinrichtungen verknüpft werden. Partnerschaften mit Universitäten und die Einbindung in Forschungsnetzwerke werden nicht zuletzt im Rahmen der Exzellenzinitiative der Bundesregierung weiter vorangetrieben.

Das FZJ hat beispielsweise mit der RWTH Aachen im Rahmen der Jülich Aachen Research Alliance (JARA) u. a. das JARA-Institut Quantum Information gegründet. Mit weiteren Partnern, z. B. dem CEA in Grenoble, ist auch eine Beteiligung am EU Flagship-Projekt beantragt. Auch das DLR-Institut in Hannover knüpft an das Exzellenzcluster Quantum Engineering and Space-Time Research (QUEST) mit Beteiligung des Zentrums für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM), der PTB, der TU Braunschweig, des Hannover Institute of Technology (HITec) und des Laboratoriums für Nano- und Quantenengineering (LNQE) der Leibniz Universität Hannover, das im regionalen Netzwerk darüber hinaus mit dem Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik und der Universität Bremen verbunden ist, an. Das DLR-Institut für Quantentechnologien in Ulm soll zudem die Aktivitäten des Centers for Integrated Quantum Science and Technology (IQ<sup>ST</sup>) der Universitäten Ulm und Stuttgart sowie

des Max-Planck-Instituts für Festkörperforschung in Stuttgart ergänzen. Ebenso kooperiert das HZDR mit der TU Dresden und der Universität Würzburg im Rahmen des beantragten Exzellenzclusters Komplexität und Topologie in Quantenmaterialien (ct.qmat), um fundamental neue Zustände von Quantenmaterie zu verstehen, zu steuern und anzuwenden. Zudem hat das HZDR Anträge im europäischen FET Flagship on Quantum Technologies gestellt. Zur Bündelung der interdisziplinären Kompetenzen auf dem Gebiet der Quantentechnologien hat das KIT mit den Universitäten in Basel, Freiburg und Straßburg den Europäischen Campus Eucor gegründet und mit der CNRS Grenoble das Labor GREKIT mit einem Spezialfokus auf den Feldern der Supraleitung und Quantentechnologien geschaffen. Mit diesem Konsortium wurden auch Anträge im EU Flagship ermöglicht.

Die Helmholtz-Zentren kooperieren darüber hinaus bereits mit einer Reihe von internationalen Forschungseinrichtungen wie dem QuTech-Institut der TU Delft, der ETH Zürich, dem Interuniversity Microelectronics Centre (IMEC), der Skolkovo Foundation, dem Russian Quantum Center, dem National Institute for Quantum and Radiological Science and Technology in Japan, dem Weizmann-Institut in Rehovot und insbesondere dem DLR und dem NASA Ames Research Center.

Da die deutschen und europäischen Forschungsaktivitäten zu Quantentechnologien im internationalen Wettbewerb stehen, müssen einerseits internationale Kooperationen mit einschlägigen Institutionen gestärkt und andererseits internationale Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aktiv rekrutiert werden. Die Helmholtz-Gemeinschaft setzt sich daher für eine gemeinsame Talentinitiative ein, die langfristig die Spitzenposition der nationalen und europäischen Forschungsaktivitäten fördert.

### Kooperationen mit Industriepartnern und mögliche Anwendungsbeispiele

Wenngleich die Forschung zu Quantentechnologien in den letzten Jahren signifikante Fortschritte in umsetzungsrelevanten Technologien erzielen konnte, werden zukünftige Anwendungen auch weiterhin von einer starken Grundlagenforschung profitieren, die wissenschaftliche Ergebnisse in die anwendungsorientierte Forschung einbringt. Gleichmaßen können projekt-

orientierte Forschungsprogramme Partnern aus der Industrie eine exzellente Möglichkeit bieten, zukünftige Anwendungen quantentechnischer Systeme gemeinsam mit Forschungseinrichtungen zu entwickeln.

Anwendungsbeispiele, die bereits ein starkes Interesse der Industrie erkennen lassen, kommen u. a. aus der Raumfahrt oder der Sicherheitsforschung. Genutzt werden die Quantenkommunikation für eine sichere Informationsübertragung durch Quantenschlüsselverteilung und die Quantensensorik für satellitengestützte Erdbeobachtung, Exploration und Navigation mit Gravimetern und Atomuhren (Airbus, OHB, SpaceTech usw.). Industrieunternehmen wie Bosch, Siemens, TRUMPF, Volkswagen etc. sind vor allem an der Optimierung von Prozessen über Quanten-Annealing interessiert. Der Einsatz von Quanteninformationssystemen z. B. in der Luftfahrt birgt enormes Potenzial für die Optimierung der Flugrouten im stark ausgelasteten transatlantischen Luftraum unter Berücksichtigung windoptimierter Trajektorien.

Für ein dynamisches Forschungsökosystem von der Grundlagenforschung bis zur Markteinführung von Anwendungen müssen Forschungsergebnisse zukünftig noch stärker in die ingenieurwissenschaftliche Forschung und die entsprechenden technischen Ausbildungsberufe überführt werden.

## 5.5 Leibniz-Gemeinschaft

In der Leibniz-Gemeinschaft führt eine Reihe von Instituten ihrer Sektion D – Mathematik, Natur- und Ingenieurwissenschaften – vielfältige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten auf dem Gebiet der Quantentechnologien durch. Diese Institute sind:

- Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik im Forschungsverbund Berlin e.V. (FBH), Berlin
- Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e.V. (IFW), Dresden
- IHP GmbH – Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik, Frankfurt/Oder
- Leibniz-Institut für Kristallzüchtung im Forschungsverbund Berlin e.V. (IKZ), Berlin
- Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V. (IPHT), Jena

- Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie im Forschungsverbund Berlin e.V. (MBI), Berlin
- Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik im Forschungsverbund Berlin e.V. (PDI), Berlin
- Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik, Leibniz-Institut im Forschungsverbund Berlin e.V. (WIAS), Berlin

Die Forschungsthemen dieser Institute in den Quantentechnologien beruhen meist auf photonischen Technologien; sie reichen von grundlegenden Fragestellungen, z. B. zur Quantenkohärenz, über vielfältige Themen im Bereich der „Enabling Technologies“ – Materialien, Komponenten, Module –, bis zu systemischen Problemstellungen in den Bereichen der Quantensensorik, -metrologie oder -kommunikation. Die Institute mit den meisten Themen im Bereich der Quantentechnologien sind FBH, IHP und IPHT, die in allen ihren Themenfeldern eng mit industriellen Partnern kooperieren und auch in den Quantentechnologien anwendungs- und industrietaugliche Lösungen anbieten werden.

Die Institute sind gegenwärtig mit ihren Forschungsarbeiten vor allem noch in ihren eigenen Netzwerken und lokalen Bezügen erfolgreich tätig, insbesondere auch in enger Zusammenarbeit mit den ansässigen Hochschulen. Auf der Ebene der Leibniz-Gemeinschaft hat vor einiger Zeit ein Strategieprozess begonnen, dessen erstes Ergebnis die Beantragung eines Leibniz-WissenschaftsCampus „Photonic Quantum Technologies Berlin“ (QuantecB) im Berliner Raum ist. Dort liegt der räumliche Fokus der Forschungsarbeiten zu Quantentechnologien in der Leibniz-Gemeinschaft; zudem forschen alle Berliner Universitäten im Gebiet der photonischen Quantentechnologien. Im Laufe der Entwicklung des WissenschaftsCampus werden die anderen relevanten Leibniz-Institute, die alle in der Nähe von Berlin liegen, mittelfristig intensiv eingebunden werden.

Im Einzelnen bearbeiten die acht Institute der Sektion D der Leibniz-Gemeinschaft die folgenden Themenfelder in den Quantentechnologien:

Das Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik (FBH) erforscht elektronische und optische Komponenten, Module und Systeme auf

der Basis von Verbindungshalbleitern, insbesondere für Höchstfrequenzsender und Lichtquellen vom Infraroten bis zum UV-Bereich. Es ist ein international anerkanntes Zentrum für III/V-Verbindungshalbleiter mit allen Kompetenzen entlang der Wertschöpfungskette – vom Entwurf bis hin zur Charakterisierung von Halbleiterbauelementen, -modulen und -systemen.

Ziel der Arbeiten in den Quantentechnologien am FBH ist es, diese über die Realisierung von mobilen und energieeffizienten elektrooptischen Modulen in verschiedenen gesellschaftsrelevanten Anwendungsbereichen auch im Feldeinsatz nutzbar zu machen. Dies setzt voraus, dass miniaturisierte elektrooptische Module mit der gewünschten Funktionalität zuverlässig verfügbar gemacht und bezüglich Formfaktor, Gewicht, Leistungsaufnahme und Kosten (SWAP-C) optimiert werden. Das FBH beherrscht mit seiner Lasertechnik, seiner III/V-Halbleitertechnologie und seiner Mikrointegrationstechnologie die dafür zentralen Technologien und entwickelt sie stetig weiter.

Dafür hat das FBH in einem wettbewerblichen Verfahren innerhalb der Leibniz-Gemeinschaft eine dauerhafte Erhöhung seiner Grundfinanzierung um ein Drittel (ca. 4 Mio. Euro) ab 2019 eingeworben. Das FBH wird damit einen neuen Forschungsbereich „Integrierte Quantentechnologie“ aufbauen. Dies wird in sehr enger Kooperation mit dem Institut für Physik der Humboldt-Universität erfolgen, in dem drei Lehrstühle und zwei Nachwuchsforschungsgruppen zu Quantentechnologien forschen und heute schon sehr eng mit dem FBH zusammenarbeiten. Die Bündelung der Systemkompetenz der HU Berlin mit den technologischen und Transferkompetenzen des FBH insbesondere bei Halbleiterlichtquellen lässt die rasche Realisierung von industrie- und raumfahrttauglichen Modulen und Systemen für die photonischen Quantentechnologien erwarten.

Im Juni 2018 hat das FBH federführend und in enger Kooperation mit dem MBI, dem Heinrich-Hertz-Institut, dem Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik und den drei Berliner Universitäten bei der Leibniz-Gemeinschaft den WissenschaftsCampus „Photonic Quantum Technologies Berlin“ (QuantecB) beantragt. In ihm sollen die Partner ihre Forschung und Ausbildung in den photonischen Quantentechnologien mit Schwerpunkten in der Quantenkommunikation

und -metrologie bündeln, wobei eine sehr relevante Breite von Fragestellungen von sehr grundlegenden Untersuchungen – z. B. zur Quantenkohärenz – über die Lösung einer Vielfalt von technologischen Fragestellungen in den „Enabling Technologies“ – z. B. zur Realisierung von photonischen Modulen auf mobilen Plattformen – bis zu systemischen Fragestellungen – wie z. B. der Realisierung und Applikation von Lichtquellen für verschränkte Photonen für die IR-Spektroskopie und -Mikroskopie – bearbeitet werden soll. Im Bereich der Quantenkommunikation soll ein voll operationelles Quantennetzwerk realisiert werden – mit sicheren Verbindungen zwischen den drei Berliner Partneruniversitäten und einem Testbed zur Untersuchung von Quantenbauelementen in faseroptischen Netzwerken unter realistischen Bedingungen. Das Forschungsprogramm wird durch ein akademisches Ausbildungsprogramm im Rahmen des existierenden Masterstudiengangs „Optical Sciences“ der Humboldt-Universität ergänzt werden.

Das Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW) betreibt moderne Werkstoffwissenschaft auf naturwissenschaftlicher Grundlage und spannt dabei einen Bogen vom Erkenntnisfortschritt auf den Gebieten Physik und Chemie bis zur technologischen Vorbereitung neuer Materialien und Produkte. Das IFW forscht zu Halbleitern, magnetischen Werkstoffen und Bauelementen, die perspektivisch in den Quantentechnologien genutzt werden können. Eine zentrale Fragestellung dabei ist, ob es Grenzen für die Größe von Halbleiterquantensystemen gibt. Dabei geht es nicht nur um die Miniaturisierung hin zu immer kleineren Maßstäben, sondern auch um die Skalierbarkeit von Quantenstrukturen nach oben, hin zu immer größeren Netzwerken. Dies ermöglicht die Untersuchung der technischen Grenzen im Bereich der Quanteninformationstechnologie.

Das Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik (IHP) konzentriert sich auf die Erforschung und Entwicklung von siliziumbasierten Systemen sowie Höchstfrequenzschaltungen und -technologien einschließlich der Erforschung zugehöriger neuer Materialien. Es verknüpft in einem vertikalen Ansatz in einer Innovationskette Material-, Technologie-, Schaltkreis- und Systemforschung. Diese Expertise kann auf verschiedenen Ebenen in die Erforschung und Entwicklung von Quantentechnologien eingebunden werden.

Hierbei stehen Hardwaresysteme als Träger, Speicher, Sender und Empfänger von Quanteninformationen im Vordergrund. Einzelne für die Quantentechnologien relevante Schwerpunkte der Forschungsarbeiten am IHP liegen bei der Entwicklung neuer Materialsysteme aus der Gruppe der IV-Halbleiter, (kryogener) SiGe/III-V-Mikrowellenschaltkreise zur Manipulation von Quantensystemen, elektronisch-photonisch integrierter Schaltungen auf SiGe- bzw. III-V-Basis zur Kontrolle und Manipulation von Licht sowie energieeffizienter drahtloser Sensorknoten auf Basis kryptografischer Datenprotokolle.

Das Leibniz-Institut für Kristallzüchtung (IKZ) erforscht die wissenschaftlich-technischen Grundlagen des Wachstums, der Züchtung, der Bearbeitung und der physikalisch-chemischen Charakterisierung von kristallinen anorganischen Festkörpern, insbesondere von Halbleiter-, Oxid- und Fluorid-Kristallen. Für die Quantentechnologien kann das IKZ einzigartige Materialien erforschen und zur Verfügung stellen. Über das am IKZ neu etablierte Zentrum für Lasermaterialien stehen neuartige Kristalle zur Erzeugung und Kontrolle von Licht zur Verfügung, ohne die photonische Quantentechnologien nicht realisierbar sein werden. Das IKZ kann zudem isopenreine Si-28-Kristalle höchster Reinheit züchten, eine denkbare Materialbasis („Halbleitervakuum“) für das Quantencomputing.

Das Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V. (IPHT) erforscht die wissenschaftlichen Grundlagen für photonische Verfahren und Systeme höchster Sensitivität, Effizienz und Auflösung. In seiner Abteilung Quantendetektion untersucht das IPHT nanometergenau die Verschiebung elektrischer Ladungen in Biomaterialien wie Zellen, Geweben oder Proteinen. Die Messungen dienen der Aufklärung grundlegender biologischer Fragestellungen und ermöglichen Rückschlüsse auf mögliche krankhafte Veränderungen. Weitere Forschungsarbeiten am IPHT in den Quantentechnologien erfolgen i) zur Quantenphotonik mit Licht-Confinement, ii) zu Einzelphotonenzählern mit Supraleitern, iii) zu supraleitenden Qubits in Digital-schaltungen, iv) zur Axionendetektion mit optischen Magnetometern und v) zu Supraleiter-Quantensensoren.

Das Max-Born-Institut für Nichtlineare Optik und Kurzzeitspektroskopie (MBI) betreibt Grundlagenfor-

schung auf dem Gebiet der nichtlinearen Optik und Kurzzeitdynamik bei der Wechselwirkung von Materie mit Laserlicht und Röntgenstrahlung und verfolgt daraus resultierende Anwendungen. Das MBI betreibt eine umfassende experimentelle Infrastruktur für die nichtlineare Spektroskopie und Strukturforchung im ultraschnellen Zeitbereich von Atto- bis Pikosekunden. In den Quantentechnologien sind die zweidimensionale THz-Spektroskopie, die Beobachtung des feldgetriebenen Transports durch die THz-Emission von Ladungsträgern und Photonen-Echoverfahren im infraroten Spektralbereich besonders relevant für eine detaillierte Abbildung der Dynamik und Kopplungen von kohärenten Elementaranregungen.

Das Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik (PDI) beschäftigt sich mit Grundlagenforschung in der Materialwissenschaft und Physik für mikro- und optoelektronische Komponenten auf der Basis von neuartigen Wirkprinzipien. Das besondere Augenmerk der Forschung liegt auf niedrigdimensionalen Systemen in nanostrukturierten Halbleitern. Die niedrigdimensionalen Systeme lassen sich perspektivisch in den Quantentechnologien nutzen. Beispielsweise realisiert und erforscht das PDI Polaritonengitter in Halbleitermikrokavitäten, die für Quantensimulationen geeignet sein könnten. Dabei werden einzelne Polaritonen in den Gitterstrukturen lokalisiert.

Das Weierstraß-Institut für Angewandte Analysis und Stochastik, Leibniz-Institut im Forschungsverbund Berlin e.V. (WIAS) betreibt Forschung in Angewandter Analysis und Angewandter Stochastik, um zur Lösung komplexer Problemkreise aus Wirtschaft, Wissenschaft und Technik beizutragen. Das WIAS ist ein führender Partner in der weltweit anerkannten Berliner Angewandten Mathematik. Die Partner des WIAS in Wissenschaft und Industrie nutzen dessen Modelle und numerischen Verfahren für vielfältige Anwendungen. Die Relevanz der mathematischen Methoden des WIAS als „Enabling Technology“ für die Quantentechnologien ist evident; z. B. erlauben sie statische und dynamische Simulationen von elektrooptischen Modulen für die Quantenmetrologie.

Die Forschungs- und Entwicklungsaufgaben der genannten Institute auf dem Gebiet der Quantentechnologien werden in den kommenden Jahren deutlich wachsen. Dazu werden die Institute den Strategiepro-

zess zum Themenfeld intensiv mit dem Ziel vorantreiben, die Quantentechnologien zu einem Schwerpunktthema in der Leibniz-Gemeinschaft zu machen. Die Institute können und wollen mit ihren vielfältigen Kompetenzen und ihren engen Kooperationen mit den Universitäten und Hochschulen wie auch Industrieunternehmen eine tragfähige Brücke zur Umsetzung der grundlegenden Forschungsergebnisse in praktischen Anwendungen sein, vor allem in den photonischen Quantentechnologien.

## 5.6 Physikalisch-Technische Bundesanstalt

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

Dieser entscheidende Kompetenzzuwachs in den Quantentechnologien an der PTB wurde auch durch den konsequenten Aufbau eines erfolgreichen Forschungsnetzwerks in Niedersachsen und international stark unterstützt. Dabei werden innovative Konzepte und die Überführung der Quantentechnologien in die Industrie meist im Rahmen von drittmittelfinanzierten Projekten (z. B. Sonderforschungsbereiche und ein Exzellenzcluster) durchgeführt. Die Verzahnung des Forschungsprogramms der PTB und anderer Partner (Leibniz Universität Hannover, Max-Planck-Institut für

Gravitationsphysik, Zentrum für angewandte Raumfahrt und Mikrogravitation, Laser Zentrum Hannover, Technische Universität Braunschweig) hat auch den Aufbau einer nachhaltigen F&E-Infrastruktur ermöglicht. So gibt es inzwischen zwei Forschungsgebäude an der Leibniz Universität Hannover und an der TU Braunschweig, das „Hannover Institute of Technology“ (HITec) und das LENA (Laboratory for Emerging Nanometrology). Hier bündeln Universitäten und die PTB ihre Expertise und arbeiten unter einem Dach an der Weiterentwicklung in der Metrologie und der Quantensensorik für Anwendungen auch außerhalb des Labors. Im Rahmen der gemeinsamen Berufungen soll durch Juniorprofessuren weitere Expertise im Bereich der Schlüsselkomponenten für Quantentechnologien aufgebaut und die Forschung zur Nutzung von Quanteneffekten in Nanostrukturen und optischen Nanomaterialien in der Metrologie und Sensorik gestärkt werden. Auf europäischer und weltweiter Ebene werden in zahlreichen Forschungsprojekten und Netzwerken u. a. mit den Max-Planck-Instituten MPQ in Garching und dem MPIK in Heidelberg die verschiedenen Aspekte der metrologischen Quantentechnologien und deren industrieller Anwendung bearbeitet (s. Kapitel 3.5).

Dieser langfristige strategische Aufbau ermöglicht eine vielfältige Unterstützung der Industrie und die Durchführung von Großprojekten mit anderen Forschungseinrichtungen. Einige dieser Aktivitäten und der Mehrwert für die externen Partner durch den Aufbau eines zukünftigen Kompetenzzentrums für Quantentechnologien an der PTB werden im Folgenden beschrieben. Sie umfassen die bereits im Kapitel 3 genannten Bereiche Komponenten und Technologie, Kalibrierung und Dienstleistung, Anwenderplattformen sowie Gründerzentren, Ausbildung, Öffentlichkeitsarbeit und Technologietransfer.

### Elektrische Quantenmetrologie

Die PTB verfügt als weltweit einziges nationales Metrologieinstitut über vollständige Fertigungslinien für Supraleiter- und Halbleiterquantennormale sowie für elektrische Quantennormale aus Graphenschichten. Auf dieser Basis konnte die PTB sich eine weltweit führende Stellung im Gebiet der elektrischen Quantennormale erarbeiten. Darauf basierend hat die PTB bereits erfolgreiche Technologietransferprojekte in Kooperation mit und zur Unterstützung von deutschen KMU

durchgeführt. Die heutige quantenbasierte elektrische Messtechnik deckt nur wenige elektrische Größen über enge Werte- und Frequenzbereiche ab und erfordert kostspielige Apparaturen, zu deren Bedienung ein tiefes Expertenwissen erforderlich ist. Die Industrie wird jedoch mittelfristig von den intrinsischen Vorteilen quantenbasierter elektrischer Messtechnik – hochgenaue Messungen rund um die Uhr ohne durch Rekalibrierung verursachte Ausfallzeiten – nur dann profitieren können, wenn die Betriebsbedingungen vereinfacht werden und die Bedienbarkeit durch Automatisierung erhöht wird. Das geplante Kompetenzzentrum versetzt die PTB in die Lage, den Einsatz neuer Materialien zur Vereinfachung der Betriebsbedingungen elektrischer Quantennormale systematisch zu untersuchen und zu entwickeln. Ferner würde ein dauerhaft finanziertes Kompetenzzentrum es ermöglichen, die Entwicklung hochintegrierter elektrischer Quantenschaltungen dynamisch voranzutreiben und damit deren Größen-, Werte- und Frequenzbereiche zu erweitern sowie in enger Kooperation mit Industriepartnern die Bedienungsfreundlichkeit und die Automatisierung quantenbasierter elektrischer Messtechnik zu verbessern.

Die ersten Aktivitäten zur Umsetzung des Quantentechnologie-Kompetenzzentrums stellen einen wichtigen Beitrag zum Ausbau der Fertigungstechnologie für Supraleiter- und Halbleiterquantennormale dar. Damit werden verstärkte Technologietransferaktivitäten in diesem Bereich ermöglicht und der Aufbau von Anwenderplattformen zur Kleinserienfertigung festkörperbasierter Quantensysteme vorbereitet.

#### **Quantenmetrologie für Zeit und Frequenz, Quantencomputer und Quantensimulation**

Die PTB arbeitet weltweit führend an der Entwicklung von optischen Atomuhren und der dazugehörigen Peripherie, wie z. B. mikrostrukturierten Atomfallen, ultrastabilen Lasern, Glasfaserstrecken für Frequenzübertragung und transportablen optischen Uhren. Darauf aufbauend wurden im Rahmen von Transferprojekten und dem BMBF-Quantentechnologien-Pilotprojekt „*opticklock* – Optische Einzelionen-Uhr für Anwender“<sup>44</sup> bereits einzelne Komponenten wie auch ganze transportable Uhrensysteme zusammen mit deutschen

KMU entwickelt. Erste Anwendungen von transportablen Uhren im Bereich der Geodäsie wurden im Rahmen von Drittmittelprojekten bereits demonstriert. Darüber hinaus werden an der PTB basierend auf Verfahren der Halbleiterindustrie mikrostrukturierte Ionenfallen für skalierbare optische Uhren und die Quanteninformationsverarbeitung entwickelt und hergestellt. Die deutsche Industrie ist aktuell insbesondere im Bereich der Schlüsselkomponenten für Quantentechnologien aktiv, wie beispielsweise in der Entwicklung von Lasern und speziellen aktiven und passiven optischen Komponenten. Hier gibt es signifikanten Bedarf an Transfer von Systemkompetenz sowie an messtechnischer Unterstützung, Validierung und Charakterisierung der Komponenten auf höchstem Niveau. Relevante Prozesse, u. a. im Bereich der Atomfallenentwicklung, sind komplex und erfordern neben Expertenwissen eine aufwendige apparative Infrastruktur, die von KMU daher nicht alleine umgesetzt werden können. Das Kompetenzzentrum versetzt die PTB in die Lage, zusammen mit der Industrie die Entwicklung von zeit- und frequenzbasierten Komponenten voranzutreiben und damit neue Anwendungen zu erschließen. Durch die Validierung der Schlüsselkomponenten, Prototypen und fertigen Geräte bei der PTB würde die internationale Wettbewerbsfähigkeit der deutschen Industrie in diesem Bereich signifikant gestärkt. Die Verfügbarkeit von Fertigungskapazitäten für Atomfallen in Deutschland und Europa und deren sukzessive Überführung in die Industrie ist ebenfalls für die Entwicklung von Quantencomputern, die auf gefangenen Atomen basieren, von wesentlicher Bedeutung.

Durch den Aufbau von strategischen Partnerschaften mit z. B. Instituten der Fraunhofer-Gesellschaft, die über eine entsprechende Material- und Optikkompetenz verfügen, könnten zentrale, aktive und passive optische Schlüsselkomponenten miniaturisiert und in Quantensensoren integriert werden. Wichtige Anknüpfungspunkte bestehen ebenfalls mit den geplanten Aktivitäten im DLR-Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik in Hannover sowie im Bereich der optischen Freistrahübertragung von Daten (DLR), Zeit und Frequenz (PTB).

Weiterhin werden Schlüsselkomponenten für Quantentechnologien im Hinblick auf Betriebsfestigkeit, Dauereinsatz und Nutzung durch unerfahrene Anwender weiterentwickelt sowie die bestehende Messin-

44 <http://www.opticklock.de>

Infrastruktur und Charakterisierungsmöglichkeiten dieser Komponenten in Abstimmung mit der Industrie ausgebaut.

### Messung kleinster Magnetfelder

Eine bereits in der Anwendung befindliche Quantentechnologie, die auf dem Prinzip supraleitender Quanteninterferometer (SQUID – Superconducting Quantum Interference Device) beruht, dient der ultrasensitiven Magnetfeldmessung und der empfindlichen Messung physikalischer Größen, die sich in magnetischen Fluss wandeln lassen, wie z. B. elektrischer Strom. So werden z. B. SQUID-Magnetometer schon seit Jahren dazu benutzt, die minimalen Magnetfelder zu messen, die von der neuronalen Aktivität des menschlichen Gehirns erzeugt werden (MEG – Magnetoenzephalografie). Weitere neue biomedizinische Analyse- und Diagnosemethoden werden unter Nutzung dieser Quantensensoren u. a. in der PTB vorangetrieben.

Neben SQUID-Magnetometern stellen inzwischen SQUID-Stromsensoren eine Basistechnologie dar, wie sie in der Quantenkommunikation für Einzelphotonendetektoren, aber auch für eine Vielzahl von Experimenten im Bereich der Grundlagenforschung benötigt werden.

Die PTB verfügt in diesem Bereich über eine weltweit einzigartige Infrastruktur, sowohl im Bereich der Supraleiter-Dünnschichttechnologie als auch in Bezug auf die zur Verfügung stehende spezielle Messtechnik. Sie betreibt ein von der DFG gefördertes Gerätezentrum, um die quantenbasierte Magnetfeldmesstechnik für ultraniedrige Magnetfelder externen Nutzern zugänglich zu machen.

Supraleitersensorentwicklungen wurden von der PTB bereits im Rahmen eines Technologietransfers in kleinem Umfang kommerzialisiert, um der Nachfrage nach entsprechenden Bauelementen und kompletten Systemen zu entsprechen. Mit dem im Bau befindlichen Walther-Meißner-Bau auf dem Campus Berlin wird diese Infrastruktur weiter ausgebaut.

Ein Kompetenzzentrum wird einen entscheidenden Beitrag dazu leisten, die Supraleitersensortechnologie konsequent einer breiteren, vor allem auch industriellen Nutzung zuzuführen und KMU, die in diesem

Bereich Produkte entwickeln, zu unterstützen. Eine Hürde ist dabei, dass hier, anders als bei der Halbleitersensorik, die Standardisierung von technologischen Prozessen, elektronischen Parametern, Messverfahren, Kalibriervorschriften etc. noch in den Kinderschuhen steckt. Ein Kompetenzzentrum kann genutzt werden, Anwendern und Firmen entsprechende Kenntnisse, Messvorschriften, das Handling der Sensorik etc. zu vermitteln. KMU, die in diesem Feld tätig sind oder werden wollen, können sich eine extrem aufwendige Infrastruktur mit Fertigungstechnik in Reinräumen, magnetisch oder hochfrequenzmäßig geschirmten Kabinen, Referenzsystemen sowie hochpräziser und sensitiver elektronischer Messtechnik zunächst nicht leisten. Für diese Firmen stellt ein Kompetenzzentrum einen wertvollen Anlaufpunkt dar.

Für die praktische Nutzung der Supraleitungssensorik ist es nicht entscheidend, einen Sensorchip mit Spitzenwerten, sondern ein komplettes, robustes und handhabbares Messsystem in die Hand zu bekommen. Deshalb müssen Kompetenzen aus den Bereichen Sensorelektronik, Kühltechnologien, elektromagnetische Schirmungen und periphere Messtechnik zusammengeführt werden. Diese Spezialkenntnisse können in einem Kompetenzzentrum effizient entwickelt, vorgehalten und vermittelt werden.

### Quantenkommunikation, Quantenkryptografie und Quantenradiometrie

Die PTB kalibriert Einzelphotonendetektoren, beispielsweise Silizium- und Indiumgalliumarsenid-Single-Photon-Avalanche-Dioden sowie supraleitende Nanodrahtdetektoren mit der weltweit kleinsten Messunsicherheit. Darüber hinaus entwickelt die PTB absolut charakterisierte Einzelphotonenquellen als neue Standardstrahlungsquellen für die Radiometrie und die Quantenkommunikation. Für die flächendeckende Implementierung der Quantenkommunikation und Quantenkryptografie ist die genaue Charakterisierung der verwendeten Quellen, Detektoren und Übertragungskanäle eine unabdingbare Voraussetzung. Für die Verbreitung von industriellen Produkten in diesem Bereich ist daher eine Rückführung auf nationale Standards erforderlich. Das Kompetenzzentrum versetzt die PTB in die Lage, rückgeführte und damit zuverlässige Messungen auf den Gebieten der Quantenkommunikation, Quantenkryptografie und Quantenradiometrie für Hersteller, Nutzerinnen und Nutzer anzubieten.

Darüber hinaus ermöglicht es Anwendern, Komponenten für die Quantenkryptografie zu testen und den Umgang mit ihnen in den Betriebsalltag einzuführen.

Damit wird das Kompetenzzentrum eine Weiterentwicklung der Metrologie in den Bereichen Quantenkommunikation, Quantenkryptografie und Quantenradiometrie ermöglichen, die zu einer besseren Charakterisierung der verwendeten Komponenten führen wird. Auch werden neue Einzelphotonenquellen als Standardquellen entwickelt werden, die die metrologischen Grundlagen für eine flächendeckende Implementierung der Quantenkommunikation ermöglichen werden.

## 5.7 Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik

---

### Grundsätzliche Aktivitäten des BSI

Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) beschäftigt sich seit längerem mit den Auswirkungen von potenziellen Quantencomputern auf heutige IT-Sicherheitsinfrastrukturen. Das BSI hat zur Schaffung einer deutschen Position in dieser Frage eine Studie zur Realisierbarkeit von kryptografisch relevanten Quantencomputern durchgeführt.<sup>45</sup>

Daneben erfolgte eine Studie zur gitterbasierten Kryptografie, um Auswahlentscheidungen für zukünftige, gegen Entschlüsselungsangriffe mithilfe von Quantencomputern resistente kryptografische Algorithmen vorzubereiten. Das BSI fördert die Weiterentwicklung von relevanten Standards für eine zukünftige Migration auf neue Algorithmen und zur Erreichung von kryptografischer Agilität. Daneben wurde die Standardisierung von hashbasierten Signaturen zum quantensicheren Softwaredownload aktiv begleitet.

Das BSI begleitet vor allem folgende Forschungsschritte aktiv:

**Quantencomputing und -simulation:** Die Sicherheit digitaler Infrastrukturen beruht heute wesentlich auf Public-Key-Kryptografie. Dabei werden hauptsächlich

Verfahren eingesetzt, die sich auf die angenommene Schwierigkeit bestimmter mathematischer Probleme stützen. Mit den heute verfügbaren Mitteln sind die (korrekt und mit der richtigen Schlüsselgröße) eingesetzten Public-Key-Verfahren nicht zu brechen. Es sind allerdings Algorithmen beschrieben, welche die genannten Verfahren mithilfe von Quantencomputern brechen können und damit der heutigen Public-Key-Kryptografie die Grundlage entziehen würden. Bei symmetrischen Verfahren würde sich die benötigte Schlüssellänge durch potenzielle Angriffe mit einem Quantencomputer grob verdoppeln („Grover’s Algorithmus“).

Um diesem Phänomen zu begegnen, wird Forschung im Bereich der sog. „Post-Quantum-Kryptografie“ vom BSI unterstützt. Diese beschäftigt sich mit der Entwicklung und Untersuchung von kryptografischen Verfahren auf „klassischen Computern“, die auch mit Quantencomputern nicht gebrochen werden können. Die Quantenkryptografie versucht hingegen, quantenmechanische Effekte für kryptografische Anwendungen zu nutzen.

Das BSI begleitet den Auswahlprozess weltweit nutzbarer Standards für die Post-Quantum-Kryptografie durch das US-amerikanische National Institute of Standards and Technology (NIST) intensiv und leitet schon heute Anforderungen an Implementierungen und Standards für zukünftige kryptoagile Produkte ab. Im Mittelpunkt steht dabei vor allem der Einsatz von „hybriden“ Verfahren, die klassische Verfahren mit geeigneten quantencomputerresistenten Lösungen kombinieren. Das BSI unterstützt die Standardisierung von Protokollen, die hybride Schlüsseleinigung und Signatur erlauben. Hierbei berät das BSI die Hersteller kryptografischer Produkte und leitet für den Hochsicherheitsbereich eine Migration ein.

Die eingangs erwähnte Studie wird in den kommenden Jahren an den aktuellen Stand der Forschung und Entwicklung von Quantencomputern angepasst werden. Das Hauptergebnis der Studie ist ein Bewertungsmodell, anhand dessen eine Einordnung von gegenwärtigen Technologien zur Realisierung eines Quantencomputers gemäß ihrer Entwicklungsstufe vorgenommen wird. Diese Studie bildet die Grundlage für die weitere Arbeit des BSI in diesem Bereich.

<sup>45</sup> <https://www.bsi.bund.de/qcstudie>

Mehrere internationale Forschergruppen beschäftigen sich zurzeit intensiv mit der Sicherheit und Praktikabilität von Post-Quantum-Kryptografie. Im Rahmen des Horizon 2020-Programms finanziert die EU zurzeit die europäischen Projekte „PQCrypto“, in dessen Advisory Board das BSI vertreten ist, und „SAFEcrypto“.

Im Auftrag des BSI hat die TU Darmstadt eine Studie zur „Bewertung gitterbasierter kryptografischer Verfahren“ erstellt. Ziel dieser Studie war es, eine Analyse der bisherigen Veröffentlichungen von gitterbasierten Public-Key-Verfahren (Schlüsselvereinbarung, Signatur und Verschlüsselung) zu erhalten.

Das BSI fördert die Implementierung quantencomputerresistenter kryptografischer Algorithmen in ausgewählten Kryptobibliotheken<sup>46</sup>. Es ist heute noch nicht absehbar, welche weiteren kryptografischen Angriffe mit Quantencomputern oder Quantensimulatoren möglich sein werden. Es zeichnen sich allerdings Anwendungen für Seitenkanalangriffe und die Möglichkeit, klassische kryptografische Attacken mit Quantenangriffen zu kombinieren, ab. Diese Entwicklung wird vom BSI weiter verfolgt, als Forschungsthema gefördert und in technischen Richtlinien des BSI berücksichtigt.

Quanteninformatik: Das Thema Quantencomputer ist aus kryptografischer Sicht hochinteressant. Dabei ist von besonderem Interesse, wie Entwicklungen bei Quantencomputern und Entwicklungen in der Algorithmik hinsichtlich der Entwicklung von quantencomputer-gestützten kryptografischen Angriffen zusammenwirken. Auch hier ist das BSI aktiv an Forschungsvorhaben beteiligt.

Quantenkommunikation: Quantenkommunikation, insbesondere die Verteilung kryptografischer Schlüssel mithilfe quantenmechanischer Effekte (QKD), ist eine Technologie, die eine sichere Datenübertragung auf Basis physikalischer Prinzipien anstelle mathematischer Vermutungen verspricht. QKD benötigt einen zusätzlichen klassischen, authentischen Kanal. Um die Sicherheit von Produkten zur Quantenkommunikation bewerten zu können, beteiligt sich das BSI

zusammen mit Herstellern, Prüfstellen, Wissenschaft, anderen Behörden wie der PTB sowie Anwendern an der Erstellung von Prüfkriterien. Dies umfasst die Entwicklung von Kriterien zur Bewertung der Sicherheit gegen Seitenkanalangriffe.

Zufallszahlenerzeugung: Im Umfeld von Quantenprojekten wird die Erzeugung von sicheren Zufallszahlen als ein wichtiges Forschungsgebiet genannt und die Verwendung von Pseudozufallszahlengeneratoren kritisiert. Das BSI stellt umfangreiche technologieneutrale Kriterien zur Bewertung von Zufallszahlengeneratoren zur Verfügung (AIS 20, AIS 31). Die AIS 20 und AIS 31 sind im deutschen Zertifizierungsschema (Common Criteria) verbindlich und grundsätzlich auch zur Bewertung von Quantenzufallsgeneratoren geeignet. Das BSI unterstützt die Entwicklung von Quantenzufallszahlengeneratoren, die den gegenwärtigen Anforderungen an physikalische Zufallszahlengeneratoren entsprechen, und schreibt in Zukunft ggf. spezifische Anforderungen an Quantenzufallszahlengeneratoren im Hinblick auf Zertifizierung und Zulassung fort.

Kooperation: Um den Auswirkungen von Quantentechnologien auf die IT-Sicherheit sachgerecht zu begegnen, ist das Zusammenwirken von vielen Akteuren aus den verschiedensten wissenschaftlichen Bereichen (wie Physik, Informatik, Mathematik), Wirtschaft und Behörden notwendig. Das BSI wird seine Kontakte in diesem Kooperationsnetzwerk weiter ausbauen und pflegen.

## 5.8 Agentur für Innovation in der Cybersicherheit

Am 29. August 2018 stimmte das Kabinett der von der Bundesministerin der Verteidigung und des Bundesministers des Innern, für Bau und Heimat vorgeschlagenen Gründung einer „Agentur für Innovation in der Cybersicherheit“ in Form einer GmbH zu. Gegenstand der Agentur ist die Finanzierung und Förderung von ambitionierten Forschungsvorhaben mit hohem Innovationspotenzial auf dem Gebiet der Cybersicherheit und diesbezüglicher Schlüsseltechnologien für die Bedarfsdeckung des Staates im Bereich der Inneren und Äußeren Sicherheit. Dabei wird die Agentur gerade die innovativen Vorhaben fördern, die sich durch eine radikale technologische Neuheit auszeichnen und dadurch eine marktverändernde Wirkung haben können.

<sup>46</sup> [https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Kryptografie\\_Kryptotechnologie/Kryptografie/Kryptobibliothek/kryptobibliothek\\_node.html](https://www.bsi.bund.de/DE/Themen/Kryptografie_Kryptotechnologie/Kryptografie/Kryptobibliothek/kryptobibliothek_node.html)

## Impressum

### Herausgeber

Bundesministerium  
für Bildung und Forschung (BMBF)  
Referat Quantentechnologien; Photonik  
53170 Bonn

### Bestellungen

schriftlich an  
Publikationsversand der Bundesregierung  
Postfach 48 10 09  
18132 Rostock  
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de  
Internet: www.bmbf.de  
oder per  
Tel.: 030 18 272 272 1  
Fax: 030 18 10 272 272 1

### Stand

September 2018

### Text

BMBF

### Gestaltung

ecosense – media & communication  
Köln

### Druck

BMBF

### Bildnachweis

Titel, S. 2, S. 3: © panthermedia.net/agsandrew  
S. 4: © BMBF  
S. 5: © IQ<sup>ST</sup> @ Universities of Stuttgart & Ulm  
S. 7: © Fraunhofer IOF  
S. 8: © IQ<sup>ST</sup> @ Universities of Stuttgart & Ulm  
S. 9: © Universität Siegen  
S. 10: © Universität Münster  
S. 12: © Fraunhofer IAF  
S. 13: © TOPTICA Photonics AG  
S. 15: © IQ<sup>ST</sup> @ Universities of Stuttgart & Ulm  
S. 16: © rocketclips/fotolia  
S. 18: © QUARTIQ GmbH  
S. 20: © Enno Kapitza für DLR  
S. 21: © zapp2photo/fotolia  
S. 23: Satellit: © SpaceTech GmbH/Erde: © PaulPaladin/Fotolia  
S. 24: © sdecoret/fotolia  
S. 25: © Fraunhofer IOF  
S. 27: © Physikalisch-Technische Bundesanstalt  
S. 29: © Leibniz-Gymnasium Dormagen  
S. 30: © VDI Technologiezentrum GmbH/Bert Willer  
S. 31: © Universität Paderborn  
S. 32: © Jacob Lund/fotolia

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

