



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Forschungsprogramm Quantensysteme

Spitzentechnologie entwickeln. Zukunft gestalten.



Titelbild: Künstlerische Visualisierung mehrerer eindimensionaler Ketten wechselwirkender Teilchen, wie sie zum Beispiel in ionenfallenbasierten Ansätzen zur Realisierung von Qubits für Quantencomputer zu finden sind.

Inhaltsverzeichnis

1. Die Mission des Forschungsprogramms Quantensysteme	3
2. Zusammenfassung	4
3. Einleitung: Deutschland in den Quantensystemen an die Weltspitze bringen	6
4. Ausgangslage – Chancen nutzen und Stärken ausbauen	10
5. Mission, Ziele und Handlungsfelder	14
6. Handlungsfeld I: Technologische Grenzen verschieben – Quantensysteme erforschen und weiterentwickeln	18
6.1 Quantencomputing und Quantensimulation entwickeln.....	19
6.2 Quantenbasierte Messtechnik und Bildgebung erforschen.....	21
6.3 Enabling Technologies für Quantensysteme marktreif machen	22
6.4 Photonik auf kleinsten Größenskalen vorantreiben	23
7. Handlungsfeld II: Quantensysteme in Anwendung bringen – Lösungen für Wirtschaft und Gesellschaft vorantreiben	25
7.1 Mit Quantensystemen neue Lösungen für die vernetzte Welt schaffen.....	26
Exkurs: Quantenkommunikation.....	27
7.2 Mit digitaler Photonik Lösungen für die Produktion von morgen entwickeln.....	29
7.3 Mit Quantensystemen neue Lösungsansätze für Ressourceneffizienz, Klima- und Umweltschutz schaffen.....	30
7.4 Mit Quantensystemen Anwendungen für die Mobilität der Zukunft schaffen.....	32
7.5 Mit photonischen und quantenbasierten Lösungen Krankheiten erkennen, verstehen und therapieren ..	34

8. Handlungsfeld III: Ökosysteme gestalten – neue Innovationsketten schaffen, die besten Köpfe gewinnen, die Menschen mitnehmen	36
8.1 Neue Innovationsketten für erfolgreichen Technologietransfer schaffen	37
8.2 Die besten Köpfe für Quantensysteme gewinnen.....	38
8.3 Europäisch handeln und international kooperieren	39
8.4 Die Menschen mitnehmen	40
9. Maßnahmen: Erforschung und Nutzung von Quantensystemen zielgerichtet unterstützen	41
9.1 Forschungsergebnisse in Anwendung bringen	41
9.2 Unternehmensgründungen und Start-ups unterstützen.....	42
9.3 Neue Erkenntnisse und Entwicklungen frühzeitig aufgreifen	42
9.4 Kompetenzen in Netzwerken zusammenführen und Synergien schaffen.....	42
9.5 Standards vorbereiten.....	42
9.6 International kooperieren.....	43
9.7 Nachwuchs fördern	43
9.8 Wissenschaftskommunikation betreiben.....	43
10. Rahmenbedingungen des Programms	44
10.1 Entstehung.....	45
10.2 Einbindung.....	45
10.3 Lernendes Programm, Evaluation	45
Glossar	48
Impressum	53

1. Die Mission des Forschungsprogramms Quantensysteme

Das Forschungsprogramm Quantensysteme – Spitzentechnologie entwickeln. Zukunft gestalten. setzt den strategischen Rahmen für die Forschungsförderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) in den Zukunftstechnologien Photonik und Quantentechnologien in den nächsten zehn Jahren. Das Programm richtet sich stringent an einer Mission aus, die sich an ambitionierten Meilensteinen messen lassen wird.

Die Mission des Forschungsprogramms ist es, Deutschland in der nächsten Dekade im europäischen Verbund im Quantencomputing und in der Quantensensorik an die Weltspitze zu führen und die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in den Quantensystemen auszubauen.

Über die Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit hinaus gilt es außerdem, die technologische Souveränität Deutschlands und Europas in den Quantensystemen zu sichern, mit Quantensystemen die Chancen des technologischen Wandels für die Wirtschaft und Gesellschaft zu nutzen und deren Nachhaltigkeit zu fördern.

Meilensteine

Die Mission des Forschungsprogramms Quantensysteme und ihr Erfolg wird an Meilensteinen gemessen. Diese werden regelmäßig überprüft und bei Bedarf angepasst. Dadurch ist sichergestellt, dass die Meilensteine in diesem dynamischen, internationalen Forschungsfeld stets aktuell und als Maßstab für eine missionsorientierte Forschungspolitik geeignet sind. Folgende Meilensteine wurden dafür ausgewählt:

Quantencomputing:

- Bis 2026: international wettbewerbsfähiger Quantenrechner mit mindestens 100 individuell ansteuerbaren Qubits, skalierbar auf 500 Qubits

- Bis 2026: Vervielfachung der Start-ups in Deutschland auf ≥ 20 ; ≥ 60 Endanwender in Deutschland, unter anderem in Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft

- Bis 2032: Quantenvorteil in mindestens zwei praxisrelevanten Anwendungen in Deutschland demonstrieren

- Bis 2032: Weltspitze bei den Publikationen halten (Top 3) und bei Patenten¹ zu den Top 5 aufschließen

Quantensensorik:

- Bis 2026: fünf neue Produkte am Markt

- Bis 2032: ≥ 60 Unternehmen involviert, davon 10 Start-ups

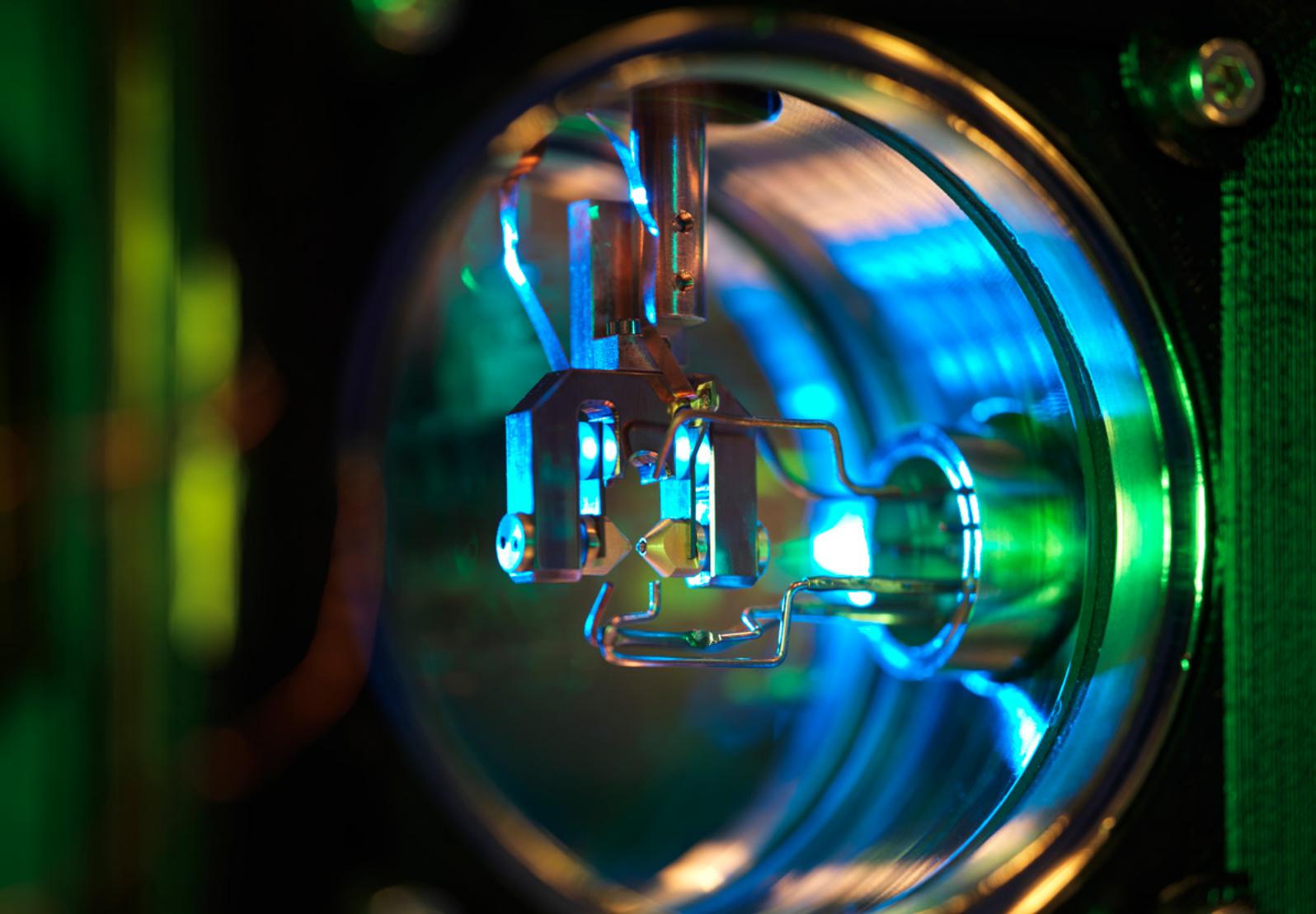
- Bis 2032: Weltspitze bei den Publikationen halten (Top 2) und bei Patenten¹ zu den Top 5 aufschließen

Photonik:

- Bis 2026: ≥ 30 Photonik-Unternehmen involviert in Quantentechnologien

- Bis 2032: \geq ein neuer, forschungsintensiver Leitmarkt erschlossen für die deutsche Photonik-Industrie

¹ Gemessen an Patentanmeldungen am European Patent Office, ermittelt auf Basis einer Datenbanksuche von logisch verknüpften Schlagwörtern



2. Zusammenfassung

Mit dem Forschungsprogramm Quantensysteme – Spitzentechnologie entwickeln. Zukunft gestalten. schafft das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) ein gemeinsames Dach für eine erfolgreiche Forschungsförderung in Photonik und Quantentechnologien in den nächsten zehn Jahren. Als Federführer innerhalb der Bundesregierung für die Forschungspolitik in den Quantensystemen beabsichtigt das BMBF, den Technologietransfer und den Ausbau der Ökosysteme in diesem Bereich strategisch und langfristig zu fördern. Die Förderung folgt dabei der Mission des Forschungsprogramms: Deutschland in der nächsten Dekade im europäischen Verbund im Quantencomputing und in der Quantensensorik an die Weltspitze führen und die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in den Quantensystemen ausbauen. Ziel ist zudem, die technologische Souveränität zu sichern und die Chancen der Quantensysteme für eine moderne und nachhaltige Wirtschaft und Gesellschaft zu nutzen (siehe Kapitel 1 und 5).

Die Forschungsfelder Photonik und Quantentechnologien sind zentral für die Positionierung innovativer deutscher Unternehmen auf Wachstumsmärkten. In der Photonik erwirtschafteten 2020 rund 1.000 Unternehmen in Deutschland einen Jahresumsatz von 40,1 Mrd. Euro und sind mit ca. 160.000 Beschäftigten wichtige Arbeitgeber. Ein geschätztes Wachstum von ca. sechs Prozent des ca. 750 Mrd. US-Dollar starken

Photonik-Weltmarkts schafft stetig Chancen für forschungsbasierte Innovationen, beispielsweise in der Produktion und der Mobilität. Der Markt für Quantentechnologien steht in seiner Entwicklung noch an einem deutlich früheren Punkt, bietet aber ein ähnlich großes Potenzial. Aktuelle Schätzungen prognostizieren allein für den Teilbereich Quantencomputing in den nächsten 15 bis 30 Jahren das Entstehen

eines Weltmarkts von 450 bis 850 Mrd. US-Dollar mit Segmenten wie Logistik und Finanzen (siehe Kapitel 4). Die anwendungsorientierte Forschung für diese wachsenden und neu entstehenden Märkte wird durch das Forschungsprogramm Quantensysteme gezielt unterstützt.

Photonik und Quantentechnologien haben außerdem große Bedeutung für die Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen. Einen Vorgeschmack darauf geben ausgereifte photonische Technologien wie Laser, Leuchtdioden (LED) und Photovoltaik, die das Leben und Arbeiten schon heute in vielen Bereichen prägen. Neue Lösungen aus Photonik und Quantentechnologien werden entscheidend dazu beitragen, neue Materialien und Wirkstoffe schneller zu entwickeln oder Krankheiten besser zu verstehen und zu heilen. Sie werden Kommunikation schneller und sicherer machen und dabei helfen, in Zukunft ressourceneffizienter zu leben, zu produzieren und sich fortzubewegen. Auch hier setzt das Forschungsprogramm Quantensysteme an und will diese neuen Technologien in Anwendung bringen (siehe Kapitel 7).

Photonik und Quantentechnologien haben sich beide aus der quantenphysikalischen Grundlagenforschung entwickelt und sind thematisch miteinander verzahnt. In vielen Fällen ermöglicht die moderne Photonik die Entwicklung quantentechnologischer Lösungen überhaupt erst. Die Vernetzung der Akteure, die gemeinsame Erforschung technologischer Komponenten, die Bündelung und effektive Nutzung von Ressourcen sind wichtige Faktoren für die erfolgreiche Entwicklung beider Bereiche. Um solche Synergien gezielt auszubauen, fördert das BMBF beide Themen mit dem Forschungsprogramm Quantensysteme erstmals gemeinsam.

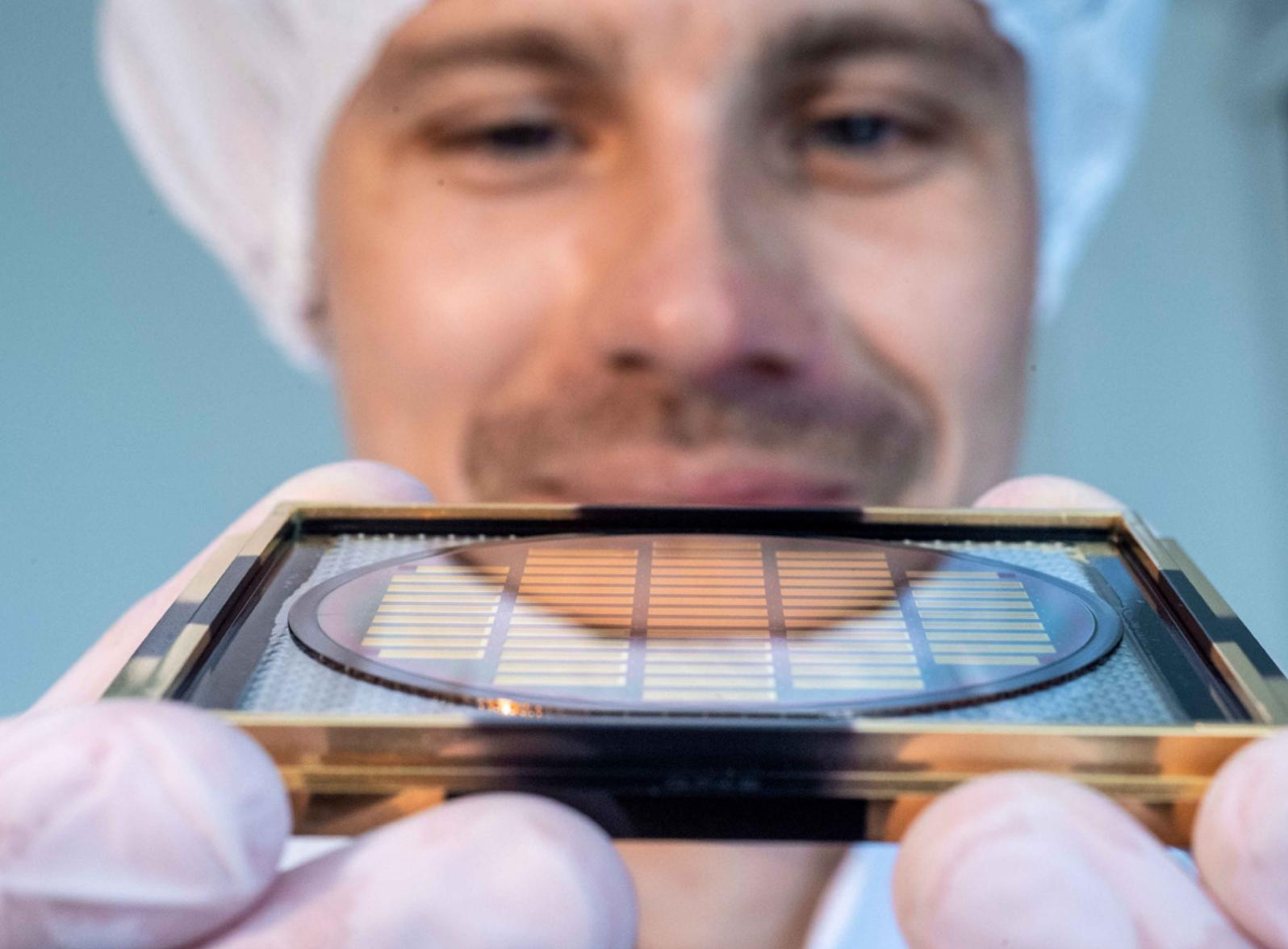
Um das hohe Innovationspotenzial der Quantensysteme zu heben, sind noch große Anstrengungen und eine ziel- und missionsorientierte Forschungspolitik nötig (siehe Kapitel 1). Die wissenschaftlich-technischen Herausforderungen sind komplex. Viele Lösungen machen gerade die ersten Schritte aus dem Labor in die technische Anwendung (siehe Kapitel 6). Ein erfolgreicher Technologietransfer setzt daher hohe und langfristig angelegte Investitionen aller Akteure voraus. Neue Anwendungsfelder beispielsweise in der Digitalwirtschaft, Produktion, Mobilität, Medizin, aufgrund der Energiewende und im Umweltschutz müssen außerdem erschlossen werden

(siehe Kapitel 7). Zudem braucht es den Schulterschluss zwischen Wirtschaft, Wissenschaft und Politik, die Sicherung qualifizierter Fachkräfte und eine informierte Öffentlichkeit mit Mut zur Veränderung (siehe Kapitel 8). Um all dies zu ermöglichen, unterstützt das BMBF mit dem vorliegenden Programm die Quantensystem-Fachwelt mit gezielter Förderung und begleitenden Maßnahmen (siehe Kapitel 9). Dabei wird das Programm insbesondere:

- Den Transfer von Innovationen von der Grundlagenforschung bis zur Anwendung beschleunigen
- Ausgründungen vorantreiben und Start-ups den Weg ebnen
- Mehr Forschung und Entwicklung in kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) ermöglichen
- Gewagten Forschungsideen Platz schaffen; auch durch regelmäßige Konsultierung disruptiver Perspektiven von „Musterbrechern“ sowie innovativen Expertinnen und Experten
- Die Vernetzung der Akteure und den Ausbau von Innovationsökosystemen fördern
- Deutschland als Wissenschaftsstandort in den Quantensystemen europäisch und international weiter vernetzen
- Die Aus- und Weiterbildung von Fachkräften für die Quantensysteme verbessern
- Mit Wissenschaftskommunikation den Austausch mit der Gesellschaft stärken

Bei der Entwicklung des Programms hat das BMBF die Erkenntnisse aus der *Agenda Quantensysteme 2030* genutzt. In dieser haben über 300 Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie die Forschungsbedarfe und Herausforderungen der nächsten Jahre zusammengetragen. Gemeinsam mit der Fachcommunity wird das BMBF die Maßnahmen laufend weiterentwickeln und den sich verändernden Anforderungen anpassen (siehe Kapitel 10).

Das Forschungsprogramm ermöglicht den Aufbruch in ein missionsgeleitetes Innovationsjahrzehnt für die Quantensysteme.



3. Einleitung: Deutschland in den Quantensystemen an die Weltspitze bringen

Photonik und Quantentechnologien werden immer mehr zu einem Innovations- und Wachstumsmotor für den Wirtschafts- und Wissenschaftsstandort Deutschland sowie für die moderne Gesellschaft. Als Anwendungstechnologien sind sie inhaltlich eng verknüpft. Dies ermöglicht Synergien, die das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gezielt nutzen möchte, um beide Technologien voranzubringen. Daher hat es beide Themen unter dem Begriff *Quantensysteme* vereint. Mit dem Forschungsprogramm Quantensysteme werden Photonik und Quantentechnologien nun erstmals unter einem Dach gemeinsam gefördert. Damit legt das BMBF die Basis für eine erfolgreiche Weiterentwicklung der Quantensysteme in den nächsten zehn Jahren. Es nimmt dabei die gesamte Wertschöpfungskette in den Blick, setzt auf die Stärke im deutschen produzierenden Mittelstand und der anwendungsorientierten Forschung und nutzt gezielt die Synergien der beiden Themen. Insbesondere durch seine Missionsorientierung soll das Programm damit zu einem Katalysator werden, damit sich Deutschland in den zwei Schwerpunkten der Quantensysteme – der Photonik und den Quantentechnologien – an der Weltspitze behaupten kann.

Abbildung 1:

Was sind Quantensysteme?

Unter dem Begriff Quantensysteme führt das BMBF die beiden inhaltlich eng verzahnten Forschungsfelder Photonik und Quantentechnologien zusammen, um so Synergien zu nutzen und Ressourcen zu bündeln.

Unsere Welt beruht heute an vielen Stellen auf digitalen Technologien. Doch sie besteht dabei nicht nur aus Nullen und Einsen, sondern auch

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 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 widersprechen.

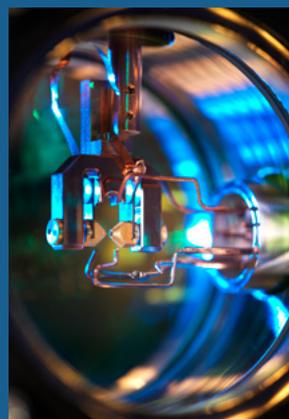
Quantensysteme

Photonik ist die technische Beherrschung von Licht in jeder Form. Im Blickpunkt der Photonik stehen Erzeugung, Kontrolle, Messung und vor allem die Nutzung von Licht in zahlreichen gesellschaftlich und ökonomisch wichtigen Anwendungsgebieten. Der Begriff „Photonik“ reflektiert dabei den Bezug zum Photon, dem Lichtteilchen oder Lichtquant, so wie der Begriff „Elektronik“ auf das Elektron verweist. Das Licht besitzt eine Reihe außergewöhnlicher Eigenschaften wie präziseste Fokussierbarkeit, höchste (Licht-) Geschwindigkeit, höchste Leistungen sowie ungestörte Überlagerungsfähigkeit. Die Schlüsseltechnologie Photonik macht diese Eigenschaften technologisch nutzbar für so unterschiedliche Bereiche wie Produktionstechnik, Energie- und Beleuchtungstechnik, Medizin- und Umwelttechnik sowie Informations- und Kommunikationstechnik.



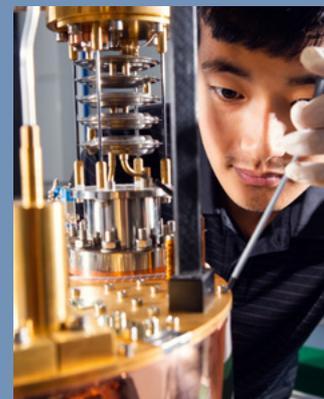
Photonische integrierte Schaltung (PIC) für biowissenschaftliche Anwendungen im sichtbaren Bereich. Quelle: TOPTICA Photonics AG

Photonik und Quantentechnologien sind technologisch eng miteinander verwandt. Erst seit wenigen Jahren sind die Kontrolle und Manipulation einzelner Quantenzustände außerhalb hochkomplexer Laboraufbauten überhaupt möglich. Photonische Technologien wie Quellen für einzelne Photonen, Detektoren oder hochintegrierte photonische Bauelemente wie photonisch integrierte Schaltkreise sind hier Wegbereiter. Die Photonik ist eine zentrale Basistechnologie für die Quantentechnologien. In Ansätzen wie der Quantenbildung oder beim photonischen Quantencomputing wird sie selbst zur Quantentechnologie.



Ionenfalle für eine Atomuhr höchster Genauigkeit, die mit einem Laser ausgelesen wird. Quelle: Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Quantentechnologien der neuesten Generation nutzen die gezielte Ansteuerung und Manipulation einzelner Quanten, was erst seit kurzem technisch möglich ist. Damit rücken auch quantenphysikalische Effekte wie Verschränkung und Überlagerung mit bzw. in den Bereich der technologischen Nutzbarkeit. Quantentechnologien bieten das Potenzial für völlig neue technische Lösungen. Sie werden die technologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklung der kommenden Jahrzehnte entscheidend prägen, zum Beispiel in der Informationsübertragung und -verarbeitung, in höchstpräzisen Mess- und Abbildungsverfahren oder bei der Simulation komplexer Systeme. Aktuell konzentriert sich die Forschung in den Quantentechnologien auf vier Felder: Quantencomputer und -simulation, Quantenkommunikation, quantenbasierte Messtechnik und Basistechnologien.



Experimenteller Aufbau für einen Quantencomputer. Quelle: Bayerische Akademie der Wissenschaften/Kai Neunert

Im ersten Schwerpunkt, der Photonik – das heißt der Nutzung von Licht in innovativen Anwendungen –, haben viele Technologien das tägliche Leben bereits erreicht. Smartphones oder Internet via Glasfaserkabel würden ohne Photonik nicht existieren. Auch in der modernen Chemie, Pharmazie und der medizinischen Diagnostik spielen photonische Technologien wie Laser oder bildgebende Verfahren eine entscheidende Rolle. In diesen Anwendungsbranchen der Photonik arbeiten allein in Deutschland über 500.000 Menschen. Doch die Möglichkeiten sind noch längst nicht ausgeschöpft. Neue Erkenntnisse aus der quantenphysikalischen Grundlagenforschung drängen in vielversprechende photonische Anwendungen. Ein Beispiel sind besonders kleine, neuartige Strahlquellen, die die Anwendung von Röntgen- oder Teilchenstrahlung in neuen Bereichen ermöglichen. Andere Beispiele sind die innovative Nutzung von photonischen Sensoren in Anwendungsdomänen wie der Mobilität, der Materialcharakterisierung, dem Umweltmonitoring und der Produktionstechnik. Es sind diese neuen Felder, auf die das Forschungsprogramm Quantensysteme abzielt.

Im zweiten Schwerpunkt, dem noch jungen Feld der Quantentechnologien, liegen die größten Erfolge und Potenziale noch in der Zukunft. Die Entwicklung durch anwendungsorientierte Forschung richtet sich beispielsweise auf hochgenaue Quantensensoren, die Menschen mit fehlenden Gliedmaßen eine präzise Bewegung von Prothesen ermöglichen könnten, oder auf Quantencomputer, die beispielsweise zur Entwicklung maßgeschneiderter, personalisierter Therapien gegen Krebs und gänzlich neuer Materialien etwa für kleine, leichte Energiespeicher mit hoher Leistung beitragen könnten. Derartige bahnbrechende Innovationen haben das Potenzial, das Leben im 21. Jahrhundert maßgeblich zu verbessern.

Um das oben beschriebene Potenzial der Quantensysteme in beiden Schwerpunkten für Wirtschaft und Gesellschaft zu heben, müssen in Deutschland und Europa Ökosysteme stark ausgebaut werden. Diese Ökosysteme aus Forschenden, Technologieanbietern und -anwendern unterschiedlichster Disziplinen werden es ermöglichen, technische Lösungen aus den Laboren zur Marktreife zu bringen. Auf dem Weg dorthin müssen Technologien kompakter, robuster und energieeffizienter werden und ihre Fertigungsprozesse zuverlässiger, kostengünstiger und

reproduzierbarer. Nötig ist auch eine gezielte Weiterentwicklung sogenannter Enabling Technologies (Basistechnologien), von denen viele im Bereich der Photonik angesiedelt sind. Gleichzeitig geht es darum, in Talente zu investieren, Nachwuchsforschende und Start-ups frühzeitig zu fördern. All diese Herausforderungen sind Teil des Forschungsprogramms Quantensysteme. Das Programm wird damit dazu beitragen, dass Deutschland im internationalen Wettbewerb besteht.

Um die genannten Herausforderungen zu adressieren, baut das Forschungsprogramm auf Erfahrungen und Erkenntnissen aus zwei Bereichen auf: Zum einen nutzt es die Lehren und Best Practices aus bereits bestehenden Programmen und Aktivitäten. Zu nennen sind hier besonders das seit 2012 bestehende Förderprogramm *Photonik Forschung Deutschland*, das seit 2018 bestehende Rahmenprogramm *Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt* der Bundesregierung und die seit 2020 laufenden Aktivitäten im Rahmen des Konjunktur- und Zukunftspakets der Bundesregierung. Insbesondere das Förderprogramm *Photonik Forschung Deutschland* hat einen wichtigen Beitrag dazu geleistet, dass die Photonik heute zu den wichtigsten Wachstums- und Zukunftsbranchen Deutschlands zählt. Zum anderen hat das BMBF 2020 einen Agendaprozess initiiert, in dem die *Agenda Quantensysteme* erstellt wurde. Zentrale Akteure aus Wissenschaft und Industrie, von der Grundlagen- über die angewandte Forschung bis zur Anwendung, entwickelten gemeinsam diese Forschungsagenda, auf die das BMBF bei der Erstellung des Forschungsprogramms Quantensysteme zurückgegriffen hat.

Insgesamt zielt das BMBF mit dem Forschungsprogramm Quantensysteme darauf ab, das Themenfeld mit einer missionsorientierten Forschungspolitik strategisch und langfristig zu fördern, Ökosysteme stark auszubauen und Deutschland einen Spitzenplatz im internationalen Wettbewerb zu sichern.

Leitlinien des Förderprogramms

Ziele setzen: Im Sinne einer missionsorientierten Forschungspolitik setzt sich das Forschungsprogramm messbare Ziele. Sie sollen als Katalysator für eine ambitionierte Forschungsförderung dienen. Aufgrund der Schnelllebigkeit des Forschungsfelds werden die Ziele regelmäßig überprüft und gegebenenfalls angepasst (siehe Kapitel 1).

Technologietransfer stärken: Besonders im jungen Feld der Quantentechnologien findet der Transfer von Technologien in die angewandte Forschung und Industrie noch zu wenig statt. Das Programm bindet daher Anwender bereits frühzeitig in die Planung der Fördermaßnahmen ein.

Neues wagen: Auch gewagte Forschungsideen, für die ein Proof-of-Concept für die technische Nutzbarkeit und damit für eine wirtschaftliche Verwertungsperspektive noch erbracht werden muss, finden im Programm Platz. Das soll auch für Unternehmen die Hürden senken, sich an Projekten mit sehr hohem Forschungsrisiko zu beteiligen (siehe Kapitel 9). Um neue Ideen frühzeitig aufzugreifen, werden regelmäßig Expertinnen und Experten mit disruptiven Perspektiven einbezogen.

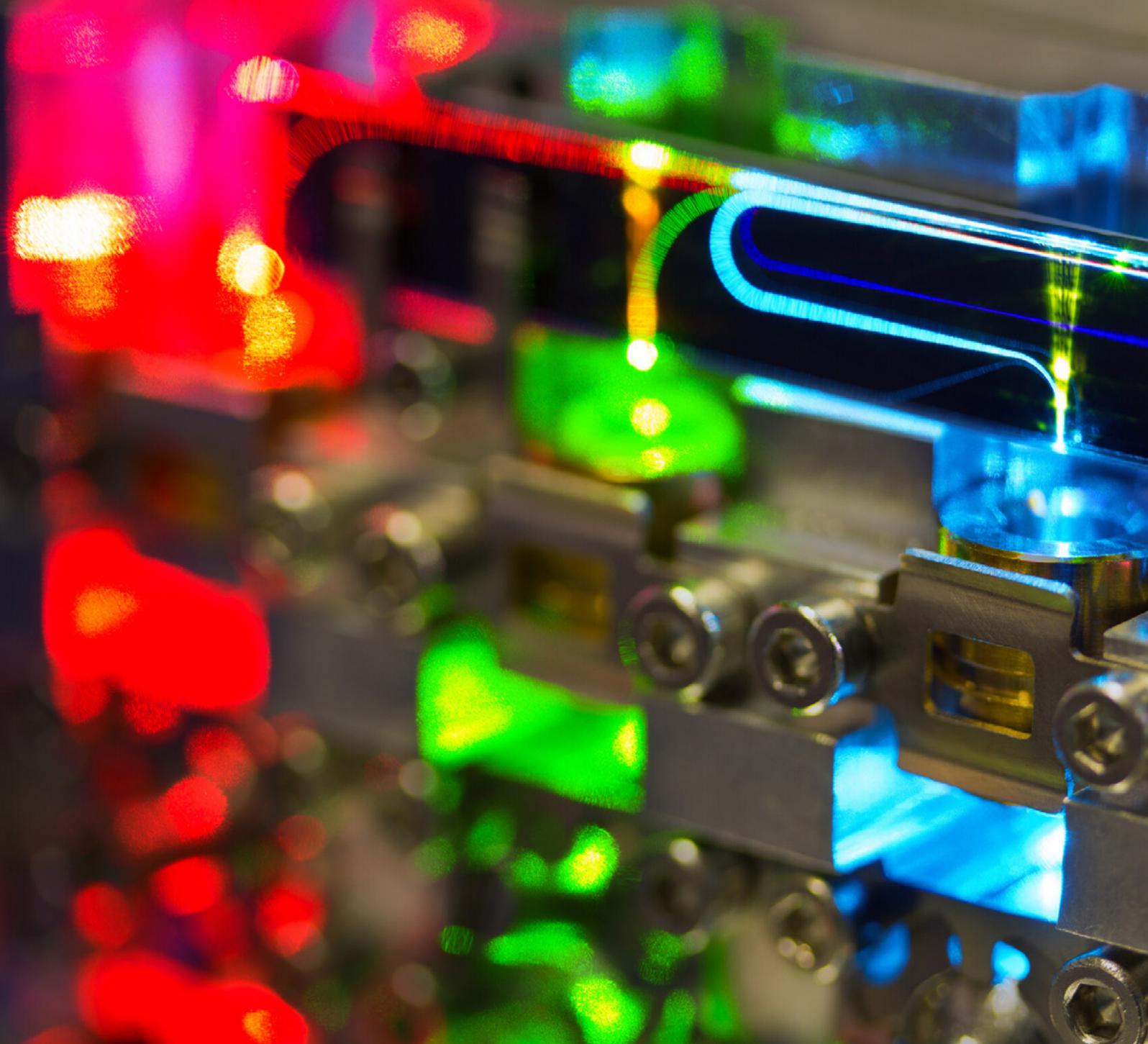
Stärken nutzen: In der Photonik ist Deutschland Weltspitze. Aus einer akademischen Fachcommunity ist hier eine Branche geworden. In den Quantentechnologien ist besonders der Bereich der Grundlagenforschung weltführend. Um dies zu nutzen und so noch schlagfertiger Innovationsökosysteme auszubauen, setzt das Programm auf erprobte Erfolgsfaktoren (siehe Kapitel 4).

Langfristig denken: Deutschland hat eine starke Ausgangsposition, die es auszubauen und langfristig zu erhalten gilt. Dies ist auch mit Blick auf die technologische Souveränität des Landes und Europas entscheidend. Dazu bedarf es eines langen Atems sowie Planungssicherheit für die Forschenden. Das Programm ist daher auf einen Zeitraum von zehn Jahren angelegt.

Auf Vernetzung setzen: Um in den Quantensystemen erfolgreich zu sein, braucht es Akteure aus Wirtschaft und Wissenschaft gleichermaßen. Das Programm setzt daher darauf, Quantentechnologien und Photonik in Wissenschaft und Industrie stärker zu vernetzen, Technologieanbieter sowie -anwender gleichermaßen einzubeziehen und so die gesamte Wertschöpfungskette in den Blick zu nehmen.

Talente aufbauen und Fachkräfte sichern: Entscheidend für die erfolgreiche Weiterentwicklung der Quantensysteme sind nicht zuletzt die Talente, die sie vorantreiben. Das Programm setzt daher auf Pilotmaßnahmen für maßgeschneiderte, interdisziplinäre Aus- und Weiterbildungsangebote, um qualifiziertes Fachpersonal zu sichern.

Die Menschen mitnehmen: Quantensysteme werden viele Bereiche der Gesellschaft durch disruptiv neue Lösungen verbessern und spürbar verändern. Ihre Prinzipien müssen transparent und verständlich vermittelt werden, um die Menschen beim Umgang mit diesen Veränderungen zu unterstützen und einen positiven Blick auf Quantensysteme zu fördern. Das Programm räumt daher begleitenden Outreach- und Kommunikationsmaßnahmen einen hohen Stellenwert ein.



4. Ausgangslage – Chancen nutzen und Stärken ausbauen

Deutschland ist ein starker Wirtschafts- und Industriestandort. Der Industriesektor trägt gut 30 Prozent zum Bruttoinlandsprodukt (BIP) bei. Damit belegt Deutschland im internationalen Vergleich unter den wichtigsten Industrie- und Schwellenländern (G20) den dritten Platz.² Dieser hohe Anteil produzierender Unternehmen ist eine wichtige Stärke, wenn es darum geht, neue Technologien erfolgreich in Anwendung zu bringen.

² Anteile der Wirtschaftssektoren am BIP in Industrie- und Schwellenländern. Statista, abgerufen am 10.11.2021.

Zugleich ist im immer schärfer werdenden Wettbewerb der globalisierten Welt die Technologieführerschaft vergänglich. Deutschland kann seine internationale Spitzenposition nur halten, wenn es weiterhin den Takt für innovative Technologien vorgibt. Dabei gerät Deutschland zunehmend unter Druck: „Gehörte Deutschland 2010 in 47 der 58 Technologien noch zu den drei Nationen mit den meisten Weltklassepatenten, hat sich dieser Anteil 2019 auf 22 Technologien mehr als halbiert.“³ Umso wichtiger ist es, dass sich Deutschland behauptet, indem es seine Stärken ausbaut und Chancen – zusammen mit seinen europäischen Partnern – gezielt nutzt. Neben der oben genannten starken produzierenden Wirtschaft gehören zu diesen Stärken die vielen herausragenden Forschungsstandorte sowie die vertrauensvolle Kooperation von Technologieanbietern und -anwendern. Die vielen starken Akteure in Wirtschaft und Wissenschaft ermöglichen es, dass Wissen und Bedarfe aus unterschiedlichen Anwendungsbereichen frühzeitig in die Entwicklung neuer Technologien einfließen. So können Innovationen zielgerichtet und passgenau erforscht und auf den Markt gebracht werden – als Gewinn für die Wirtschaft und zur Lösung gesellschaftlicher Herausforderungen.

Photonik: Paradebeispiel für erfolgreichen Technologietransfer und große Chancen

Die Photonik zeigt eindrücklich, wie sich diese Stärke Deutschlands nutzen lässt: Diese Technologie hat sich seit den 2000er-Jahren rasch von einem Nischenthema zu einer wirtschaftsstarke Branche entwickelt. Mit Lösungen wie Laser, LED oder Glasfaser-Internet hat die Photonik (oder sogenannte Quantentechnologien der ersten Generation) längst Einzug in den Alltag gehalten.

Mittlerweile ist die Photonik ein bedeutender Wirtschaftsfaktor. Rund 1.000 deutsche Photonik-Unternehmen mit ca. 160.000 Beschäftigten bedienen einen Photonik-Weltmarkt, der bis 2025 auf fast 900 Mrd. US-Dollar anwachsen soll (ca. sechs Prozent Wachstum pro Jahr).⁴ Zudem sind diese Unternehmen mit überdurchschnittlicher Forschungs- und Entwicklungs(FUE)-Quote von fast elf Prozent

Innovationstreiber für viele andere Branchen wie Chemie, Pharmazie und medizinische Diagnostik. In diesen Anwendungsbranchen der Photonik arbeiten allein in Deutschland über 500.000 Menschen.

Trotz der oben genannten Erfolge ist der Forschungsbedarf in der Photonik weiterhin hoch. Viele neue Technologien mit niedrigem Technologiereifegrad machen gerade die ersten Schritte aus dem Labor in Richtung einer technologischen Anwendung. Um diese Technologien in Zukunft zur Marktreife weiterzuentwickeln, können folgende Stärken genutzt werden:

1. Die enge Kooperation zwischen Wissenschaft, forschenden Unternehmen und Anwendern in der Photonik, die bereits vielfach in reiferen Technologiefeldern besteht. Diese kann jetzt auf neue Technologiefelder ausgeweitet werden.
2. Die internationale Spitzenposition in vielen Bereichen wie der Produktionstechnik, optischen Komponenten und Systemen, Bildverarbeitung und Messtechnik, der Medizintechnik und den Lebenswissenschaften.⁵ Durch diese existiert bereits eine herausragende Expertise in zahlreichen Anwendungsdomänen für neue photonische Technologien.
3. Eine gute Vernetzung auf europäischer Ebene, die Synergien ermöglicht. So vereint die Technologieplattform Photonics21 mit über 3.000 Mitgliedern die Mehrheit der relevanten FuE-Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette in Europa.

Mit den oben genannten Stärken kann der Aufbruch in neue Technologiebereiche der Photonik gelingen, in denen der Forschungsbedarf und das -risiko hoch sind. Dies gilt zum Beispiel für die photonische Mikrointegration und photonisch integrierte Schaltkreise (PICs), deren Ziel es ist – ähnlich wie in der Halbleitertechnik –, möglichst viele photonische Bauteile und Funktionen in einem einzigen Bauteil zu integrieren. Durch Leistungssteigerungen, Miniaturisierung und Kostenreduktion könnten hier neue Anwendungsfelder erschlossen werden. Auch die digitale Photonik – die Kombination photonischer Hardware mit modernen Methoden der Bild- und Datenverarbeitung – ist durch die rasanten Entwicklungen in der elektronischen

³ Weltklassepatente in Zukunftstechnologien. Die Innovationskraft Ostasiens, Nordamerikas und Europas. BertelsmannStiftung, 2020.

⁴ Trend Report Photonics 2020/2021. Industry Trends and Market Potentials. SPECTARIS, 2021.

⁵ Branchenreport 2014. Statista.

Datenverarbeitung, dem maschinellen Lernen und der künstlichen Intelligenz erst seit wenigen Jahren möglich. Neuartige Strahlquellen (sogenannte Sekundärstrahlquellen) sind ein weiterer entstehender photonischer Technologiezweig, der in Zukunft seinen Weg in die breite Nutzung beispielsweise in der Chipproduktion, der Batterietechnik oder der medizinischen Wirkstoffentwicklung finden kann. Insgesamt soll die deutsche Führungsposition im Bereich der Photonik ausgebaut werden, aufbauend auf den vorhandenen Stärken und durch die gezielte Förderung und Entwicklung neuer Technologien.

Quantentechnologien: Eine neue Erfolgsgeschichte beginnt

Trotz ihres frühen Entwicklungsstadiums gelten Quantentechnologien bereits heute als eine der wichtigsten Zukunftstechnologien mit großem wirtschaftlichem und gesellschaftlichem Potenzial. Laut aktuellen Marktschätzungen kann allein für den Bereich Quantencomputing in den nächsten 15 bis 30 Jahren ein Weltmarkt von 450 bis 850 Mrd. US-Dollar entstehen.⁶ Zugleich versprechen Quantentechnologien weitreichende Neuerungen beispielsweise in der Medizin, Kommunikation, Chemie und Logistik. Momentan sind die verschiedenen Teilbereiche unterschiedlich weit entwickelt: Während die Quantensensorik und Quantenbildgebung bereits erste Schritte in die breite wirtschaftliche Nutzung gehen, befindet sich beispielsweise das Quantencomputing noch in einer frühen Erprobungsphase (siehe Kapitel 6).

Zugleich erkennen schon heute erste Anwender das Potenzial der Quantentechnologien – insbesondere des Quantencomputings und der Quantensimulation. So investieren beispielsweise Automobilindustrie und Maschinenbau in die Entwicklung von Quantenalgorithmen für Prozessoptimierungen, und die Chemie- und die Pharmaindustrie setzen auf deutliche Fortschritte bei der Simulation von Materialien und komplexen Molekülen. Auch abseits des Quantencomputings verspricht die gezielte Nutzung quantenmechanischer Effekte vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Beispielsweise sind die Quantensensorik und -bildgebung aufgrund ihrer herausragenden Leistungsfähigkeit entscheidende Treiber für Entwicklungen etwa in der Navigation autonomer Fahrzeuge oder

für die Industrie 4.0, in der medizinischen Diagnostik und der molekularen Biologie oder in der Erdbeobachtung zur Früherkennung von Umweltveränderungen und Wetterextremen (siehe Kapitel 7).

Weltweit hat ein Wettrennen begonnen, die vielversprechenden Potenziale der Quantentechnologien zu heben. Deutschland bringt gute Voraussetzungen mit, um im internationalen Wettbewerb erfolgreich zu sein. Gleichzeitig ist aber dringender Handlungsbedarf erkennbar. Während Deutschland beispielsweise im akademischen Bereich an der Weltspitze rangiert, fehlt bei Hardware und Systemintegration im Bereich Quantencomputing im internationalen Vergleich noch der Anschluss. Hier definieren US-amerikanische Großkonzerne den Stand der Technik und geben das Tempo vor. In der vor allem mittelstandsgeprägten deutschen Unternehmenslandschaft gibt es bisher nur wenige Akteure, die dieses stark risikobehaftete Thema mit den dafür notwendigen Ressourcen vorantreiben. Beste Chancen, um aufzuholen, bieten in Deutschland und Europa innovative Start-ups, die in den letzten Jahren vielerorts entstanden sind. Sie sind zentraler Bestandteil der wachsenden Ökosysteme für Quantentechnologien. Gleichzeitig sind sie jedoch beispielsweise in den Bereichen Grundlagenforschung und Komponentenverfügbarkeit deutlich stärker auf Unterstützung und Kooperationen angewiesen als US-Großkonzerne. Dieses Beispiel zeigt: Um im weltweiten Rennen um die Quantentechnologien wettbewerbsfähig zu sein, braucht Deutschland einen Ansatz, der spezifisch auf die Bedingungen der deutschen Ökosysteme zugeschnitten ist.

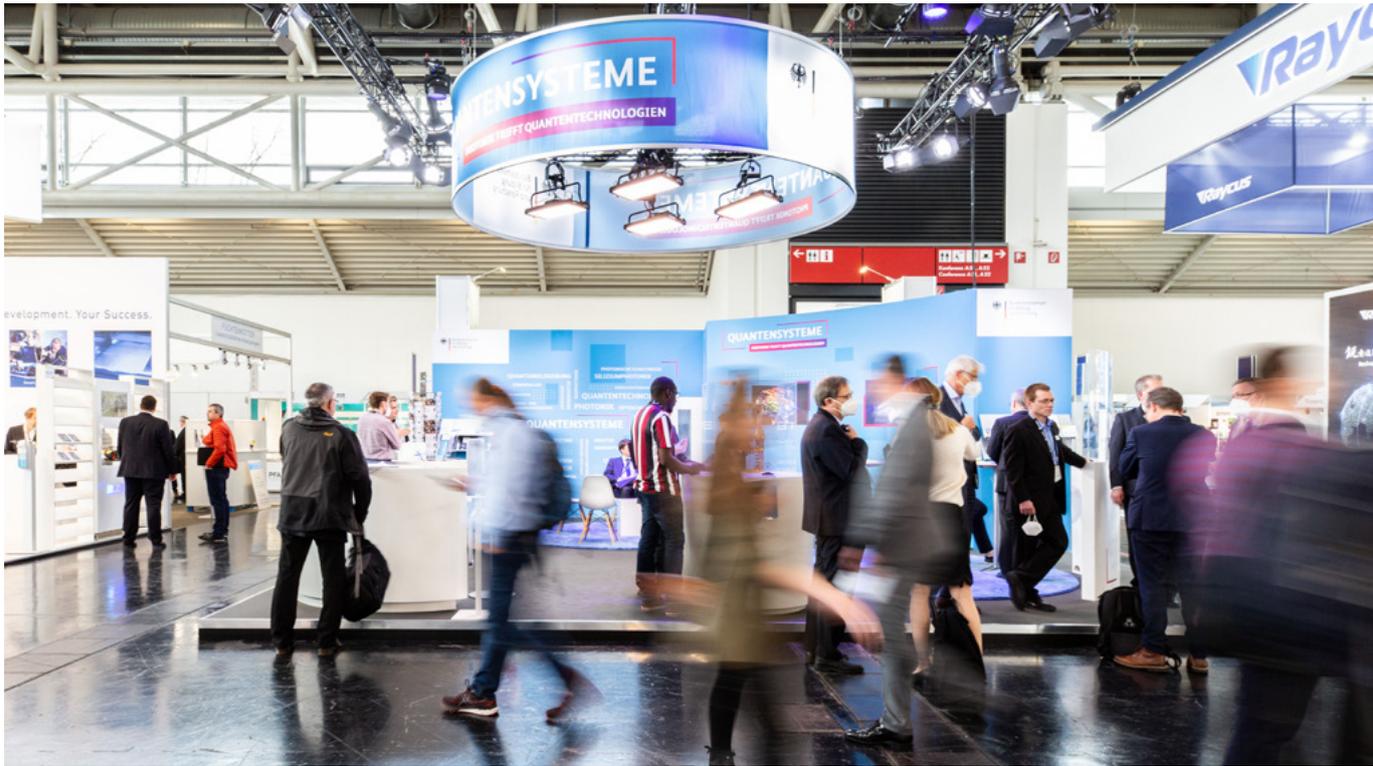
Zugleich kann Deutschland auf viele Stärken bauen, insbesondere auf:

1. Eine große Zahl potenzieller Anwender in Branchen wie Automobil, Chemie und Pharma, die zusammen einen Jahresumsatz von rund 570 Mrd. Euro erwirtschaften⁷ und mit FuE-Quoten zwischen drei und 14 Prozent zu den innovationsstärksten Branchen in Deutschland zählen.⁸ Ihnen versprechen Quantentechnologien wichtige Innovationssprünge.

⁶ What Happens When 'If' Turns to 'When' in Quantum Computing? Boston Consulting Group, 21.07.2021.

⁷ Branchenfokus Automobilindustrie. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, und Branchenfokus Chemie und Pharmazie, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, beide abgerufen am 17.02.2022.

⁸ Jahresgutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2021.



Zugleich sind diese Anwender attraktive Kooperationspartner für Anbieter von Quantentechnologien im In- und Ausland.⁹ Dies birgt die große Chance, die gesamte Wertschöpfungskette von den Basistechnologien bis zur Endanwendung in Deutschland und Europa abzubilden.

2. Eine hohe Qualität der grundlagen- und anwendungsorientierten Forschung in den Quantentechnologien in Deutschland mit international renommierten Hochschulen und außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Im Bereich Quantencomputing beispielsweise rangiert Deutschland bei den wissenschaftlichen Publikationen im weltweiten Vergleich unter den Top 3.¹⁰
3. Deutschlands internationale Stärke in der Photonik als zentraler Quanten-Schlüsseltechnologie sowie viele Schnittstellen zwischen beiden Bereichen – sowohl bezogen auf Technologien als auch auf Akteure. Die Unternehmen der Photonik-Branche haben ihre Aktivitäten bereits auf Quantentechnologien ausgerichtet.

⁹ Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation. Acatech, 2020.

¹⁰ Zusammen mit UK; Quantum Technologies Patents, Publications & Investments, Michel Kurek, Ecole Polytechnique Paris, 2020.

4. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Grundlagenforschung, anwendungsorientierter Forschung und Industrie unter Beteiligung vielfältiger großer Unternehmen, kleiner und mittlerer Unternehmen und Start-ups. Dies ermöglicht es, schon in Forschungsprojekten möglichst vollständige Innovationsketten für die Quantentechnologien in Deutschland und Europa abzubilden. Begünstigt wird dies durch vorwettbewerbliche Forschungsförderung in Verbundprojekten, wie sie international an vielen Stellen nicht möglich ist.
5. Eine gute Vernetzung und Zusammenarbeit auf europäischer Ebene. Im Rahmen der europäischen Quantum-Flagship-Initiative arbeiten bereits heute über 3.500 Expertinnen und Experten aus allen Bereichen der Quantentechnologien und den relevanten Unternehmen und Forschungseinrichtungen zusammen.

Insgesamt bringt Deutschland mit seinen starken Akteuren in Wirtschaft und Wissenschaft, seiner besonders vielseitigen FuE-Landschaft und seinen Erfahrungen mit technologischen Innovationen die besten Voraussetzungen mit, Quantensysteme mit den Schwerpunkten Photonik und Quantentechnologien zu einer Erfolgsgeschichte werden zu lassen.



5. Mission, Ziele und Handlungsfelder

Das Forschungsprogramm Quantensysteme greift den Handlungsbedarf auf, den die *Agenda Quantensysteme 2030* aufgezeigt hat. Über 300 Vertreterinnen und Vertreter aus Wissenschaft und Wirtschaft haben darin den Forschungsbedarf im Bereich der Quantensysteme zusammengetragen. Das Programm fokussiert dabei auf die für Deutschland relevantesten Forschungsfelder. Charakteristisch für diese Felder sind zum einen eine gute Umsetzungsperspektive der Ergebnisse durch Unternehmen in Deutschland und damit wichtige Beiträge zu Wertschöpfung und Wohlstand sowie andererseits wichtige Beiträge zu gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen. Um dabei dem Forschungsprogramm Quantensysteme und seiner Förderpolitik eine klare Zielorientierung zu geben, wurde insbesondere im Hinblick auf die Wettbewerbsfähigkeit folgende Mission entwickelt:

Deutschland in der nächsten Dekade im europäischen Verbund im Quantencomputing und in der Quantensensorik an die Weltspitze führen und die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in den

Quantensystemen ausbauen. Die Mission des Forschungsprogramms wurde mit konkreten Meilensteinen unterlegt, die regelmäßig überprüft werden (siehe Kapitel 1).



Neben der Stärkung der Wettbewerbsfähigkeit stehen Beiträge zu folgenden Zielen im Fokus des Forschungsprogramms:

- Die technologische Souveränität in den Quantensystemen sichern
- Die Chancen des technologischen Wandels für Wirtschaft und Gesellschaft nutzen
- Die Nachhaltigkeit in Wirtschaft und Gesellschaft mit Quantensystemen fördern

Aus der Mission und den Zielen leiten sich drei Handlungsfelder ab. Sie benennen die Gebiete, auf denen die strategisch relevantesten Herausforderungen für die Entwicklung der Quantensysteme in den nächsten Jahren liegen (siehe Abbildung 2):

I. Technologische Grenzen verschieben – Quantensysteme erforschen und weiterentwickeln (siehe Kapitel 6)
Um die vielfältigen Möglichkeiten der Quantensysteme für Wirtschaft und Gesellschaft zu nutzen, müssen zahlreiche wissenschaftliche und technologische Hürden überwunden werden. Es gilt,

sowohl die wichtigen Basistechnologien zu beherrschen als auch neue Methoden für die wirtschaftliche Realisierung praxistauglicher Quantensysteme zu schaffen.

II. Quantensysteme in Anwendung bringen – Lösungen für Wirtschaft und Gesellschaft vorantreiben (siehe Kapitel 7)

Quantensysteme bieten völlig neue Chancen für die Bewältigung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Herausforderungen. Diese reichen von Technologien für die vernetzte Welt über die

Technologische Souveränität

Technologische Souveränität ist die Fähigkeit, jederzeit Zugang zu denjenigen Schlüsseltechnologien garantieren zu können, die zur Umsetzung gesellschaftlicher Prioritäten und Bedürfnisse notwendig sind. Dies umfasst die Verwendung und Weiterentwicklung von Technologien und Produkten unter Berücksichtigung der verfügbaren Ressourcen und notwendigen Dienstleistungen sowie die Fähigkeit, Lücken sichtbar zu machen und wenn möglich zu schließen und Standards auf den globalen Märkten mitzubestimmen. Technologische Souveränität kann dabei auch erfordern, Schlüsseltechnologien und technologiebasierte Innovationen in Europa eigenständig zu entwickeln und eigene Produktionskapazitäten innerhalb der Wertschöpfungsnetze aufzubauen, wenn dies zum Erhalt der staatlichen Handlungsfähigkeit oder zur Vermeidung einseitiger Abhängigkeiten – unter Berücksichtigung sich verändernder geopolitischer Randbedingungen – notwendig ist. Das setzt die Fähigkeit voraus, alle relevanten technologischen Entwicklungs- und Herstellungsprozesse verstehen und bewerten zu können, und hat den Anspruch, gleichberechtigt mit strategisch wichtigen Partnern zusammenzuarbeiten.

Denn die Sicherung von Wohlstand, Arbeitsplätzen und gesellschaftlichen Werten führt zu Anforderungen an Technologien – beispielsweise hinsichtlich Sicherheit, Datenschutz und Nachhaltigkeit. Die EU

spricht auch von „strategischer Autonomie“, wobei sich technologische Souveränität und internationale Zusammenarbeit nicht ausschließen. Im Gegenteil: Technologische Souveränität setzt gezielte Kooperationen mit europäischen und außereuropäischen Partnern voraus. Ziel ist es, Schlüsseltechnologien international auf Augenhöhe und unter Berücksichtigung europäischer Normen und Werte mitzugestalten und somit die europäische Wertegemeinschaft zu stärken.

Quantensysteme sind aufgrund ihrer wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Bedeutung besonders wichtig für die technologische Souveränität Deutschlands und Europas. Insbesondere das Quantencomputing wird zu großen Innovationssprüngen führen (siehe Kapitel 7.1) und eine Schlüsseltechnologie sein, die Deutschland und Europa mitgestalten müssen. In der Photonik sind beispielsweise integrierte mikroptonische Systeme entscheidend für die zukünftige Datenverarbeitung und somit auch für die technologische Souveränität. Gleiches gilt für zentrale Basiskomponenten dieser Technologien. Schon heute unterliegen beispielsweise Einzelphotonenquellen und Infrarot-Detektoren strengen Ein- und Ausfuhrbeschränkungen. Der Aufbau von eigenem Know-how und – wo nötig – eigenen Produktionskapazitäten ist zentral, um in Zukunft handlungsfähig zu sein.

digitale Photonik für die Produktion von morgen oder die Erkennung und das Therapieren von Krankheiten bis zu Lösungen für einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen und Klimaschutz.

III. Ökosysteme gestalten – neue Innovationsketten schaffen, die besten Köpfe gewinnen, die Menschen mitnehmen (siehe Kapitel 8)

Quantensysteme brauchen Technologie-Landschaften, die alle Stufen der Innovations- und Wertschöpfungskette umfassen, um erfolgreich zu sein. Diese müssen auf den besonderen Stärken Deutschlands aufbauen. Es müssen Lücken in der Innovationskette geschlossen und Kooperationen entlang dieser Kette initiiert werden. Die besten Köpfe verschiedener Disziplinen müssen für Quantensysteme gewonnen und der Fachkräftenachwuchs muss auf breiter Basis gesichert werden. Und nicht zuletzt soll eine Technologie, die potenziell das Leben der Menschen tiefgreifend

verändert, auch in ihren Konsequenzen verstanden, öffentlich diskutiert und ausreichend akzeptiert werden.

Innerhalb der Handlungsfelder des Programms Quantensysteme orientiert sich das Bundesministerium für Bildung und Forschung bei der Ausgestaltung konkreter Fördermaßnahmen an den genannten strategischen Zielen. Richtschnur der Projektförderung ist, Innovationen aus der Forschung möglichst rasch den Weg in Anwendung zu ebnen. Zentral sind dafür der enge Austausch zwischen Wissenschaft und Wirtschaft sowie Forschungsk Kooperationen zwischen Anbietern und Anwendern. Die Sicherung der Fachkräftebasis und ein hohes Maß an Akzeptanz für neue quantentechnologische Lösungen sind weitere Schwerpunkte bei der Umsetzung des Programms. So schafft Forschungspolitik aus einem Guss die Basis für breit angelegte Innovationsökosysteme, getragen von Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft (siehe Kapitel 9).

Quantensysteme als Treiber für Nachhaltigkeit

Deutschland hat sich verpflichtet, die Agenda 2030 für eine weltweite nachhaltige Entwicklung mit ihren 17 Sustainable Development Goals (SDGs) der Vereinten Nationen umzusetzen. Eines der wichtigsten ist SDG 13: Maßnahmen zum Klimaschutz. Deutschland will bis 2045 klimaneutral sein. Um dies zu erreichen, müssen die aktuellen CO₂-Emissionen massiv sinken. Die nächsten zehn Jahre sind entscheidend dafür, ob dieses Ziel erreicht wird. Neue technologische Lösungen können einen wichtigen Beitrag dazu leisten, dass der Ausstieg aus fossilen Energieträgern in der Industrie, der Umstieg auf grünen Wasserstoff, die klimafreundliche Mobilität sowie eine nachhaltige Wald- und Landwirtschaft gelingen können.

Schlüsseltechnologien wie Quantensysteme ermöglichen an verschiedenen Stellen Durchbrüche, die Gesellschaften nachhaltiger und klimaneutraler machen (siehe Kapitel 7.3). Herausragende Beispiele dafür aus der Photonik sind Photovoltaik und LED.

Und es können schon bald weitere Lösungen folgen: Photonische Technologien reduzieren den Energieverbrauch elektronischer Datenverarbeitung. Photonische Lösungen für eine reversible Fertigung und die berührungslose Identifizierung von Werkstoffen ermöglichen eine Kreislaufwirtschaft mit hoher Recyclingquote. Neue, individualisierte Reparaturverfahren auf Basis laserbasierter additiver Verfahren können die Lebenszyklen von Produkten verlängern.

Quantentechnologische Lösungen der zweiten Generation werden erst mittelfristig zur Verfügung stehen, dann aber enorm zum Umwelt- und Klimaschutz beitragen können. Es ist absehbar, dass Quantencomputing beispielsweise Klimamodelle entscheidend verbessern und somit zielgenauere Maßnahmen und evidenzbasierte Nachjustierungen ermöglichen könnte. Zudem könnten Quantencomputer dabei helfen, Prozesse wie die Stickstofffixierung zu verstehen und industriell umzusetzen.



6. Handlungsfeld I: Technologische Grenzen verschieben – Quantensysteme erforschen und weiterentwickeln

Um die vielfältigen Möglichkeiten der Quantensysteme für Wirtschaft und Gesellschaft nutzen zu können, müssen zahlreiche wissenschaftliche und technologische Herausforderungen gemeistert werden. Es gilt, sowohl die wichtigen Basistechnologien zu beherrschen als auch neue Möglichkeiten für die wirtschaftliche Realisierung praxistauglicher Quantensysteme zu schaffen.

Kurz gesagt

1. Quantencomputing soll aufgrund seines großen Potenzials für gesellschaftliche Entwicklungen und den Innovationsstandort Deutschland in den kommenden Jahren intensiv erforscht werden.
 - Langfristiges Ziel: universelle fehlerkorrigierte Quantencomputer
 - In der Zwischenzeit Fokus auf Quantensimulatoren oder gatterbasierten NISQ-Systemen, die erste Anwendungen ermöglichen
 - Wichtig: parallele Forschung an Algorithmen und Software
2. Quantenbasierte Messtechnik und Bildgebung beinhalten Technologien mit einem breiten Spektrum an Wirkprinzipien, Technologiereifen und Anwendungsmöglichkeiten. Die wichtigsten Ziele sind:
 - Zunehmend Anwendungen erschließen
 - Die Technologien für einen Einsatz unter realen Nutzungsbedingungen vorbereiten
3. Enabling Technologies sind die technologische Grundlage für die Nutzung von Quantensystemen. Mit ihnen können:
 - Quantencomputer, -simulatoren und -sensorik stark verbessert werden
 - Insbesondere KMU und Start-ups als Anbieter auf dem Forschungsgerätemarkt schon heute Umsätze erzielen
4. Die Photonik kann auf kleinsten Größenskalen in vielfältigen Anwendungen wie der Messtechnik, in der Materialforschung oder im medizinischen Bereich Nutzen bringen. Dazu braucht es:
 - Plattformtechnologien zur skalierbaren Realisierung hochintegrierter elektro-optischer Komponenten und Systeme
 - Praxistaugliche lasergestützte Erzeugung von Strahlung mit extrem hoher Orts- und Zeitauflösung

6.1 Quantencomputing und Quantensimulation entwickeln

Die großen gesellschaftlichen und wirtschaftlichen Herausforderungen unserer Zeit werden immer komplexer. Um sie zu verstehen und zu lösen, müssen häufig umfangreiche Modellierungen und Berechnungen durchgeführt werden. Das gilt für die Entwicklung neuer Werkstoffe und Materialien, beispielsweise mit Blick auf das Design neuer Medikamente sowie die ressourceneffiziente Optimierung von Prozessen und Systemen etwa in der Produktion und Herstellung von grünem Wasserstoff, der Logistik, dem Verkehr oder in Energienetzwerken. In vielen Fällen sind diese Berechnungen so komplex, dass heute vorhandene Rechenarchitekturen sie überhaupt nicht bzw. nicht in akzeptablen Zeiträumen lösen können. Quantencomputer und -simulatoren sowie die entsprechende Software bieten hier einen revolutionären neuen Ansatz.

Quantencomputer funktionieren anders als herkömmliche Rechner und eröffnen damit völlig neue

Möglichkeiten. Im Unterschied zu den Bits von Digitalrechnern, die nur die Werte 0 und 1 annehmen können, sind ihre kleinsten Recheneinheiten, die Quantenbits (Qubits), in der Lage, beliebig viele Überlagerungen aus 0 und 1 einzunehmen. Die Qubits können sich außerdem untereinander quantenmechanisch verbinden und damit einen hochkomplexen Gesamtzustand annehmen. Man spricht dann von Verschränkung. Diese Verschränkung der Qubits zu einem Gesamtzustand ist bezogen auf Computertechnologien eine einzigartige Eigenschaft von Quantencomputern. Um mit ihnen Probleme zu lösen, gibt es unterschiedliche Rechenparadigmen. Universelle Quantencomputer basieren auf Gatteroperationen in Analogie zum klassischen Rechner. Sogenannte Quantensimulatoren ahmen hingegen die zu lösenden Probleme – beispielsweise die Simulation eines Moleküls – direkt auf einer speziell angepassten Quantenhardware nach. Solche Systeme sind zwar weniger flexibel und nur für bestimmte Probleme geeignet, könnten aber wesentlich früher für konkrete Anwendungen nutzbar sein.

Viele der Herausforderungen, die sich mit herkömmlichen Rechnern nicht befriedigend lösen lassen, haben eines gemeinsam: Es müssen zahlreiche Bedingungen berechnet werden, die noch dazu wechselseitig voneinander abhängen. Die Komplexität des Problems steigt exponentiell mit jedem zusätzlichen Parameter – sei es ein weiteres Atom im zu simulierenden Molekül oder ein weiteres Zwischenziel in der Routenplanung eines Paketdienstes. Bei klassischen Computern führt dies dazu, dass sich nur kleinere Modellsysteme berechnen lassen, reale Probleme aber schnell zu komplex werden. Funktionsbedingt ist der Quantencomputer bei der Lösung derart komplexer Probleme im Vorteil. Daraus ergeben sich große Möglichkeiten für eine wirtschaftliche Verwertung: Eine Studie der Boston Consulting Group geht langfristig von einem weltweiten Marktvolumen von mehreren 100 Mrd. Dollar für das Quantencomputing aus. Deutschland ist in der Forschung zum Quantencomputing sehr gut aufgestellt. Besonders bei grundlegenden Fragestellungen zu verschiedenen Technologieplattformen für die Realisierung von Qubits gehört Deutschland zu den führenden Nationen. Im sehr kapitalintensiven Bereich der Hardwareentwicklung und Systemintegration hingegen sind große Technologiekonzerne insbesondere aus den USA deutlich weiter. Hier gibt es in Deutschland Nachholbedarf (siehe Kapitel 4).

Langfristiges Ziel ist die Entwicklung eines universellen fehlerkorrigierten Quantencomputers. Hierfür gibt es mehrere vielversprechende technologische Ansätze, die parallel erforscht werden. Qubits sind wesentlich instabiler als klassische Bits. Ebenso sind Rechenoperationen heute noch stark fehlerbehaftet. Um diese beiden Eigenschaften auszugleichen, braucht ein universeller Quantencomputer voraussichtlich physikalisch ca. 1.000.000 Qubits. Die aktuell ausgereiftesten Systeme bewegen sich im Bereich von physikalischen 100 Qubits. Daher sind noch jahrzehntelange Forschung und hohe Investitionen erforderlich. Welcher der technologischen Ansätze den universellen, fehlerkorrigierten Quantencomputer liefern wird, ist heute noch nicht abzuschätzen.

Solange noch keine universell programmierbaren Quantencomputer zur Verfügung stehen, werden Quantensimulatoren und Quantencomputer ohne Fehlerkorrektur, sogenannte Noisy-Intermediate-Scale-Quantum-Computers (NISQ), in Spezialanwendungen zum Einsatz kommen. Sie können bei einer

mittelfristig erreichbaren moderaten Anzahl an Qubits bereits einen Quantenvorteil für die Lösung sehr spezifischer Probleme erreichen – beispielsweise in der Batterieforschung, der finanzmathematischen Portfoliooptimierung oder der chemischen und medizinischen Grundlagenforschung.

Ebenso wichtig wie leistungsfähigere Hardware sind Quantenalgorithmen und Quantensoftware. Derzeit existiert nur eine sehr begrenzte Anzahl von Quantenalgorithmen, die einen Vorteil gegenüber klassischen Algorithmen liefern. Die Identifikation und Operationalisierung von Anwendungsfällen sowie die Erforschung geeigneter Algorithmen spielen auch kurz- und mittelfristig schon eine wichtige Rolle, solange noch kein universeller Quantencomputer zur Verfügung steht. Nur auf diese Art und Weise lässt sich der tatsächliche Nutzwert eines Quantencomputers demonstrieren und können Anwender Nutzen daraus ziehen.

Besonderer Forschungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **Entwicklung eines universellen fehlertoleranten Quantencomputers, insbesondere:**
 - Erhöhung des Reifegrads und der Skalierbarkeit der Ansätze für die physikalische Realisierung von Qubits, unter anderem für supraleiterbasierte Ansätze, Ionenfallen-Qubits, Neutralatom-Qubits, spinbasierte Ansätze, photonische Systeme oder topologische Qubits
 - Aufgreifen vollständig neuer, disruptiver Ansätze für die Realisierung von Qubits
 - Weiterentwicklung von Prozess- und Herstellungstechniken für die Realisierung von Qubits
 - Erforschung und Implementierung von Fehlerkorrektur sowie Fehlervermeidung
- **Nutzung gatterbasierter Quantencomputer ohne Fehlerkorrektur (NISQ-Systeme) als Übergangslösung, insbesondere:**

- Systemintegration basierend auf den ausgereiftesten Technologieplattformen. Dabei muss die Anzahl nutzbarer Qubits von heute bis zu ca. 100 auf deutlich mehr erhöht und die Fehlerrate deutlich reduziert werden.
- Entwicklung hybrider Algorithmen zur Kontrolle und Optimierung von Quantenschaltkreisen
- Einbindung von Quantencomputern in High-Performance-Computer-Umgebungen
- **Erforschung von Quantensimulatoren, insbesondere:**
 - Erweiterung des Spektrums geeigneter und relevanter Anwendungsfälle
 - Identifikation neuer, robuster Simulationsmethoden, die den neuesten Stand der Quantencomputing-Hardware abbilden
 - Entwicklung neuer Ansätze zum Auslesen und zur Zertifizierung des Quantensimulators
 - Erhöhung der Kontrollierbarkeit und Programmierbarkeit sowie flexible Geometrien
- **Quantencomputing-Algorithmen und -Software, insbesondere:**
 - Demonstration praxisrelevanter Algorithmen mit einem Quantenvorteil gegenüber klassischen Algorithmen – entweder ein Geschwindigkeitsvorteil (Quantum-Speedup) oder ein Qualitätsvorteil (zum Beispiel bessere Trennschärfe mit weniger Parametern bei Klassifikationsalgorithmen)
 - Anpassung von Algorithmen und Software an die spezifischen Eigenschaften von Hardwaresystemen, um die verfügbare Hardware optimal zu nutzen
 - Entwicklung von Software und Algorithmen für das Zusammenspiel zwischen Quantencomputing und klassischem High-Performance-Computing

6.2 Quantenbasierte Messtechnik und Bildgebung erforschen

Autonome Fahrzeuge, vernetzte Produktionshallen, die präzise Beschreibung des Klimawandels und Präzisionsmedizin – Fortschritte bei diesen wichtigen Themen der Hightech-Gesellschaften hängen maßgeblich von hochgenauen Messungen und schneller Datenauswertung (in quasi Echtzeit bei autonomen Fahrzeugen) ab. Gleichzeitig werden diese (Mess-)Daten weltweit ein immer wichtigerer Teil der Wissenschaft sowie von Produkten und Geschäftsmodellen in der Wirtschaft. Neuartige Quantensensoren und -bildgebungssysteme bieten völlig neue Möglichkeiten der Datengewinnung und in der Folge für beispielsweise eine bessere Simulation komplexer Systeme.

Quantensensoren ermöglichen Messungen mit sonst kaum erreichbaren Genauigkeiten. Sie beruhen auf der gezielten Nutzung von Quanteneigenschaften, um physikalische Größen wie Druck, Temperatur, Gravitation oder die Stärke elektromagnetischer Felder zu messen. Dazu gibt es unterschiedliche technologische Ansätze. Es werden beispielsweise atomare Dampf Wolken, supraleitende Schaltkreise, künstlich erzeugte Fehlstellen in Diamant oder auch die Interferenz von Atomen für hochgenaue Messungen genutzt. Die Ansätze unterscheiden sich zum Teil deutlich in der Technologiereife und den möglichen Einsatzgebieten. Sogenannte Superconducting Quantum-Interference-Devices (SQUID) sind bereits seit Jahrzehnten auf dem Markt und werden beispielsweise zur Vermessung von Hirnströmen oder der Beobachtung des Erdmagnetfelds verwendet. Bei neuen Technologien wie dem hochgenauen Quantenradar ist noch viel Entwicklungsarbeit zu leisten.

Bei Ansätzen zur quantenbasierten Bildgebung sorgen Quanteneffekte zum einen für eine höhere Sensitivität. Zum anderen ermöglichen sie es, ein Objekt mit einer niederenergetischen Wellenlänge schädigungsarm zu untersuchen und das Messsignal auf eine für den eigentlichen Detektor optimierte Wellenlänge zu übertragen. Anwendungsgebiete sind beispielsweise die Qualitätskontrolle in einer Fabrik oder die Untersuchung biologischen Gewebes.

Damit Quantensensoren und -bildgebung die oben genannten Fortschritte liefern können, müssen die technologischen Grenzen weiter verschoben werden. Das beinhaltet beispielsweise eine verbesserte Genauigkeit,

Robustheit und Kompaktheit. Gemeinsam mit Anwendern müssen nutzbare Systeme und gegebenenfalls entsprechende Geschäftsmodelle entwickelt werden. Dabei spielen insbesondere Aspekte wie die Bedienbarkeit durch fachfremdes Personal oder die Wirtschaftlichkeit neuer Anwendungen eine wichtige Rolle.

Besonderer Forschungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **Technologische Verbesserung der quantenbasierten Messsysteme, insbesondere:**
 - Verbesserung technologischer Parameter aktueller Messsysteme wie Empfindlichkeit, Lebensdauer, Stromverbrauch, Dauer der Kalibrierungsintervalle oder Spezifität
 - Erschließung neuer Wirkprinzipien zur Nutzung von Messungen
 - Verbesserte Messprotokolle sowie das Zusammenwirken unterschiedlicher Messsysteme in Netzwerk
- **Verbesserung der Praxistauglichkeit von Systemen, insbesondere:**
 - Größe und Portabilität sowie (bei komplexen Messaufbauten) Integrierbarkeit in bestehende Gesamtsysteme
 - Niederschwellige Bedienkonzepte zur Nutzung durch ein breites Anwenderspektrum
 - Hohe Fehlertoleranz unter Alltagsbedingungen außerhalb des Labors
 - Erhöhte Robustheit mit geringem Wartungsaufwand
- **Erhöhung der Wirtschaftlichkeit etablierter Ansätze, insbesondere:**
 - Entwicklung besser skalierbarer Herstellungsverfahren, die Verwendung gut verfügbarer Materialien etc., um die Wirtschaftlichkeit späterer Anwendungen zu gewährleisten

- Frühzeitige Pilotierung von wirtschaftlich umsetzbaren Ansätzen unter direkter Einbindung von Anwendern
- **Die Einführung quantenbasierter Messprinzipien in neuen (Forschungs-) und Anwendungsfeldern, insbesondere:**
 - Erschließung des wissenschaftlichen Potenzials quantenbasierter Messtechniken für weitere Forschungsfelder wie Energie- und Klimaforschung, Medizin oder Geowissenschaften
 - Entwicklung von Best-Practice-Beispielen zur Sensibilisierung potenzieller Anwender für technologische Möglichkeiten in gänzlich neuen Anwendungsfeldern

6.3 Enabling Technologies für Quantensysteme marktreif machen

Extrem reine Materialien, hochspezialisierte Strahlquellen, Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt – Quantensysteme in Anwendung zu bringen stellt hohe Ansprüche an die verwendeten Basistechnologien. Je reifer die Quantensysteme sind, desto stärker treten Fragen nach der Integrierbarkeit in andere Technologien oder nach kosten- und ressourceneffizienten Herstellungsprozessen in den Vordergrund. Diese Aspekte adressiert das Themenfeld der Enabling Technologies (Basistechnologien). Man versteht darunter Technologien, die selbst nicht unbedingt auf Quanteneffekten beruhen, aber zwingend für funktionierende Quantensysteme erforderlich sind. Das Beispiel Quantencomputer zeigt, dass dies keineswegs trivial ist: Rechenoperationen sind hier überhaupt nur dann möglich, wenn die Einzelteile des Quantencomputers, die Enabling Technologies, so optimiert sind, dass die Qubits hinreichend lange, störungsfrei und fehlerarm arbeiten.

Der Bereich Enabling Technologies beinhaltet – unter anderem aufgrund der heterogenen Technologieplattformen für Quantencomputer und Quantensensorik – eine Vielzahl an Forschungsfeldern. Es geht um die Entwicklung neuer Materialien, Komponenten und Verfahren. Speziell entwickelte Strahlquellen ermöglichen die quantenbasierte Bildgebung ebenso,

wie Fortschritte in der Mikrowellentechnik effiziente Rechenoperationen mit Qubits ermöglichen. Mithilfe kompakter Kryotechnik lassen sich supraleitende Sensoren auch mobil nutzen. Ein hochreines Schichtwachstum ist wichtige Voraussetzung für festkörperbasiertes Quantencomputing. Ohne neue Entwicklungen in all diesen Enabling Technologies wären Quantentechnologien undenkbar.

Bereits heute sind deutsche Technologiezulieferer im wachsenden Wirtschaftszweig der Enabling Technologies international erfolgreich, insbesondere auf dem Forschungsgerätemarkt. Das hat viele Vorteile: Gerade Laboraufbauten in Forschungseinrichtungen, die zu großen Teilen aus eigenentwickelten Unikaten bestehen, werden einfacher, standardisierter und kostengünstiger. Außerdem sind professionelle Zulieferer Grundbedingung für eine erfolgreiche Quantencomputer- und Sensorikindustrie, die im industriellen Maßstab produziert. Kleine und mittlere Unternehmen (KMU) und Start-ups, die sich als Anbieter für Enabling Technologies positionieren, sind wichtige Bausteine für umfassende Quantenökosysteme in Deutschland und Europa (siehe Kapitel 8). Da auch der Forschungsgerätemarkt Zielsegment dieser Industrie ist, muss ihr Erfolg nicht auf den langfristigen kommerziellen Markteintritt von beispielsweise Quantencomputer-Herstellern warten.

Besonderer Forschungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **Entwicklung der wichtigsten Basistechnologien für Quantensysteme, insbesondere:**
 - Materialien, Komponenten und adaptierte Fertigungstechnologien als Basis für die Realisierung von Quantentechnologien
 - Module und Systeme für die Präparation, Detektion, Kontrolle, Manipulation und das Auslesen von Quantenzuständen
 - Systemkritische Basistechnologien für Design, Simulation, Fertigung und Charakterisierung spezieller Bauteile

Anwendbarkeit von Quantensystemen erhöhen, insbesondere:

- Erhöhung von Kompaktheit und Robustheit der Quantensysteme
- Bessere Energie- und Ressourceneffizienz

6.4 Photonik auf kleinsten Größenskalen vorantreiben

Die Photonik kann als Basistechnologie in vielen Technologiefeldern – von Telekommunikation über Sensorik, Konsumentenelektronik, Medizin- und Fahrzeugtechnik bis zum Quantencomputing – Innovationen ermöglichen. Um aber mit Produkten und Dienstleistungen am Markt erfolgreich zu sein, ist in vielen Fällen eine Miniaturisierung der photonischen Systeme nötig, die häufig zugleich mit einer Kostenreduktion einhergeht. Gleichzeitig bietet die Photonik Möglichkeiten, bestehende technische Lösungen durch neue, besonders kleine und praktikable photonische Anwendungen zu ersetzen. Beide Herangehensweisen versprechen in den kommenden Jahren anwendungsnahe Innovationen, die zur Marktreife entwickelt werden müssen. Dies gilt insbesondere für die Felder photonische integrierte Schaltkreise und laserbasierte neue Strahlquellen.

Ein wichtiges Anwendungsfeld für die Miniaturisierung photonischer Systeme sind sogenannte photonisch integrierte Schaltkreise (Photonic Integrated Circuits, PICs). Diese integrieren viele optische Funktionen in einem einzigen Bauteil – analog zu Mikrochips in der Elektronik. Im Vergleich zu elektronischen Halbleiterchips, die bereits seit Jahrzehnten Standard sind, befinden sich PICs noch am Beginn ihrer Entwicklung. Aber sie können die Mikroelektronik um entscheidende Funktionen ergänzen und so die Basis für innovative Produkte legen. Beispielsweise versprechen hochintegrierte photonische Systeme mit optischer Datenerfassung und -verarbeitung in Kombination mit elektronischen Systemen eine bessere Leistung bei gleichzeitiger Energieeinsparung. Um dieses Potenzial zu nutzen, müssen sowohl die integrierten mikrophotonischen Systeme selbst verbessert werden als auch ihre Integration in mikroelektronische Halbleiterchips.

Ein zweites neues Anwendungsfeld für photonische Technologien, die durch ihre Kompaktheit besonders praxis- und industrierelevant sind, ergibt sich aus der Entwicklung neuer laserbasierter Hochenergie-Strahlquellen (sogenannte Sekundärstrahlquellen). Durch die Interaktion von hochintensiver Laserstrahlung mit bestimmten Materialien wird es möglich, Strahlung in bisher nur mit großem Aufwand zugänglichen Spektralbereichen zu erzeugen. Diese neuen Strahlquellen haben vielfältige Anwendungsmöglichkeiten. Sie sind aufgrund der Preisreduktion bei Halbleiterlasern und der Fortschritte bei vielen anderen Laserkomponenten erst seit Kurzem denkbar. Und sie reduzieren den technischen Aufwand für die Erzeugung hochenergetischer (Teilchen-)Strahlung massiv. Ihre geringe Größe und der Spektralbereich, den sie abdecken, erlaubt es, perspektivisch zahlreiche Großgeräte (beispielsweise Synchrotrons) als Strahlquelle für Industrieanwendungen zu ersetzen. Darüber hinaus könnten die praktikable Größe und die geringen Kosten viele neue Industrieanwendungen erschließen. Darauf angepasste und maßgeschneiderte digitale Bildgebungsmethoden schlagen synergetisch die Brücke zu industriellen Anwendungen und Märkten beispielsweise in der Medizin, der Messtechnik, der Materialforschung oder der Chipproduktion.

Besonderer Forschungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **Erforschung hochintegrierter elektro-optischer Komponenten, insbesondere:**
 - Optische Materialien für elektro-optische Plattformlösungen
 - Neue Aufbautechniken wie die Hybridintegration bzw. die Integration neuer Materialsysteme in photonisch integrierten Schaltungen (PICs) auf einer skalierbaren Technologieplattform
 - Aufbau- und Verbindungstechnik inklusive der Standardisierung von Schnittstellen für integrierte Systeme aus Photonik und umgebenden Technologien

- Fertigungstechnologien und Werkzeuge, beispielsweise Strukturierungstechnologien inkl. Prozessüberwachung
- Systems-Engineering – Modellierung, Simulation und holistisches Design integrierter Systeme
- **Erforschung photonischer Verfahren für die Erzeugung von Hochenergie-Strahlung, insbesondere:**
 - Industrietaugliche Konzepte zur Strahlungserzeugung entlang der Technologiekette Laserquellen, Targetmaterialien und Detektoren
 - Lasergestützte Erzeugung von Strahlung mit extrem hoher Orts- und Zeitauflösung



7. Handlungsfeld II: Quantensysteme in Anwendung bringen – Lösungen für Wirtschaft und Gesellschaft vorantreiben

Die Erforschung von Quantensystemen eröffnet völlig neue Perspektiven für die Lösung wirtschaftlicher und gesellschaftlicher Herausforderungen. Das Spektrum reicht von leistungsfähigeren Komponenten für die vernetzte Welt über innovative Werkzeuge für die Produktion oder die Bekämpfung von Krankheiten bis hin zu Lösungen für die nachhaltige Energieerzeugung, einen nachhaltigen Umgang mit Ressourcen sowie den Klimaschutz.

Kurz gesagt

1. Quantensysteme können neue Möglichkeiten für die vernetzte Welt schaffen, beispielsweise:
 - Gewinnung und Nutzung von Informationen für Smart X (Smart City, Smart Factory, Smart Home etc.) durch photonische Lösungen
 - Die Überwindung der Grenzen mikroelektronischer Systeme durch Mikro- und Nanophotonik
 - Dezentrale Quantencomputing-Strukturen zur sicheren Vernetzung und bedarfsgerechten Erweiterung von Rechenkapazitäten
 - Effektive Synchronisation von Datennetzwerken und Rechenzentren durch hochpräzise optische Uhren
2. Fortschritte in der digitalen Photonik können moderne Produktionsverfahren ermöglichen, beispielsweise:
 - Automatisierte Produktionssysteme auf Basis photonischer Technologien
 - Photonische Sensorik sowie eine Visualisierung in der Augmented und der Mixed Reality für Smart Products
3. Quantensysteme können perspektivisch zum Umweltschutz und der Einsparung von Ressourcen beitragen, mögliche Anwendungsbeispiele sind:
 - Effiziente Herstellung chemischer Erzeugnisse und die Optimierung komplexer Prozesse durch Quantencomputer
 - Ressourcensparende Herstellungsverfahren und effizientere Nutzung von Gütern durch neue photonische Werkzeuge
 - Verbessertes Umweltmonitoring mittels neuartiger hochpräziser Quantensensoren
 - Herstellung moderner Materialien zur effizienten Erzeugung von grünem Wasserstoff
4. Quantensysteme tragen zu einer modernen Mobilität bei, beispielsweise durch:
 - Ressourceneffiziente Fertigung von Verkehrsmitteln durch photonische Werkzeuge
 - Autonome Fortbewegungsmittel durch photonische Sensoren sowie Quantensensoren
 - Optimierte Verkehrssimulationen mit Quantencomputern
5. Quantensysteme helfen dabei, Krankheiten zu erkennen und zu bekämpfen, beispielsweise durch:
 - Erkennung und Bekämpfung von Krankheitserregern mithilfe photonischer Technologien
 - Innovative photonische und quantenbasierte Diagnose- und Therapieverfahren
 - Verbesserte Prothetik durch innovative Verfahren zur Vermessung und Beeinflussung von Nervensignalen

7.1 Mit Quantensystemen neue Lösungen für die vernetzte Welt schaffen

Die Digitalisierung treibt die Vernetzung von Menschen, Maschinen und Infrastrukturen voran. Bereits für das Jahr 2023 wird erwartet, dass neben 5,3 Mrd. Menschen (etwa 66 Prozent der Weltbevölkerung) rund 29,3 Mrd. Geräte auf das Internet zugreifen werden.¹¹ Das bringt große Chancen mit sich, bedeutet aber auch Herausforderungen für Wirtschaft und Gesellschaft. Quantensysteme helfen dabei, die Chancen der vernetzten Welt zu nutzen und den Herausforderungen zu begegnen, insbesondere

in den Bereichen Smart X, vernetzte Energiesysteme, Datenverarbeitung und -übertragung sowie vernetztes Rechnen.

Smart X-Szenarien wie Smart City, Smart Factory, Smart Home oder smarte Energiesysteme können die Lebensqualität und Sicherheit der Menschen erhöhen und den Verkehr effizienter gestalten. Vernetzte Sensoren können Notsituationen wie Verkehrsunfälle, Hausbrände oder Herzinfarkte erkennen und Hilfe rufen. Eine aktive Verkehrssteuerung auf Basis von Simulationen und vernetzten Sensoren kann für eine gleichmäßige Auslastung von Verkehrswegen sorgen. Vernetzte Energiesysteme können dabei helfen, Energie einzusparen und Deutschland damit unabhängiger von Energieimporten zu machen. Voraussetzung

¹¹ Cisco Annual Internet Report (2018 – 2023) White Paper. Cisco, 2020.

Exkurs: Quantenkommunikation

Expertinnen und Experten rechnen damit, dass bereits in zehn Jahren leistungsfähige Quantencomputer verfügbar sein könnten, die in der Lage sind, gängige, heute eingesetzte Verfahren zur Verschlüsselung, zum Schlüsselaustausch und zum sicheren Austausch von Informationen aufzubrechen. Vor dem Hintergrund der fortschreitenden Digitalisierung ist jedoch der sichere und integre Austausch von Daten das Rückgrat der freien demokratischen Gesellschaft.

Quantenkommunikation leistet einen entscheidenden Beitrag zur IT-Sicherheit im Quantenzeitalter: Fundamentale physikalische Prinzipien garantieren, dass der Schlüsselaustausch (Quantum-Key-Distribution, QKD) nicht abgehört werden kann und jeder Versuch bemerkt wird. Dabei werden Quantenzustände zwischen Sender und Empfänger ausgetauscht, deren Eigenschaft, nicht unbemerkt abgefangen oder kopiert werden zu können, für die IT-Sicherheit ausgenutzt wird.

Neben QKD können Verfahren der Post-Quanten-Kryptografie (PQK) eingesetzt werden, um die Datenübertragung vor Angriffen mit Quantencomputern zu schützen. Dabei werden sowohl die Schlüssel als auch Daten zwischen Sender und Empfänger mittels solcher Verfahren ausgetauscht, bei denen – nach heutigem Stand der Forschung – selbst zukünftige leistungsfähige Quantencomputer Angreifern keinen entscheidenden Vorteil bringen. PQK-Verfahren können auf klassischen Computern und klassischer IT-Sicherheitsinfrastruktur implementiert werden.

Quantenkommunikation leistet noch mehr: Sie stellt die Basis für ein zukünftiges Quanteninternet dar, mit dem durch den Austausch von (verschränkten) Quantenzuständen in einem Netzwerk nicht nur eine abhörsichere Kommunikation, sondern auch ein sicheres und vernetztes Rechnen mit Quantencomputern möglich wird.

Bei der Erforschung der Quantenkommunikation, der Überführung in Anwendungen und der Kombination mit und Integration in klassische Kommunikationsnetze und IT-Sicherheitssysteme gilt es, mannigfaltige Herausforderungen aktiv anzugehen. Beispielsweise sind bislang Übertragungsraten und überbrückbare Distanzen für Quantenzustände noch zu gering, um in der breiten Anwendung genutzt werden zu können. Die technologischen Grundlagen für sichere und skalierbare Netzwerke mit beliebig vielen Teilnehmenden müssen geschaffen werden, wodurch der abhörsichere Austausch von Informationen zwischen Personen, Behörden oder Unternehmen sowie Geräten und perspektivisch auch Quantencomputern möglich wird. Quantenkommunikation wird bei der Erforschung und Entwicklung des künftigen Mobilfunkstandards 6G eine zentrale Rolle bei der Verbesserung der Sicherheit und Resilienz einnehmen. Ein entscheidender Erfolgsfaktor ist, inwieweit sich Quantenkommunikation in bestehende Kommunikationsinfrastrukturen integrieren lässt und bestehende Netze für die Quantenkommunikation mitgenutzt werden können. Leistungsfähige Verfahren zum zeitgleichen Übertragen von Quantenzuständen und klassischer Information in Glasfasern werden benötigt wie auch Quantenkommunikationskomponenten und -systeme, die an den Stellen, an denen sich heutige Netzwerkknoten befinden, integriert werden können. Forschung für einen sicheren Einsatz von QKD- in Kombination mit PQK-Verfahren ist erforderlich, wobei die Kompatibilität mit und Integrationsmöglichkeit in klassische Systeme zur IT-Sicherheit eine zentrale Rolle spielen.

Bei allen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten zur Quantenkommunikation ist der ganzheitliche Blick auf alle Aspekte der IT-Sicherheit bei allen praxistauglichen Anwendungen der entscheidende Erfolgsfaktor für die künftige sichere Vernetzung der digitalen Gesellschaft. Die Quantenkommunikation ist daher ein Schwerpunkt des Forschungsrahmens der Bundesregierung zur IT-Sicherheit *Digital. Sicher. Souverän.*

für solche Szenarien sind zum einen die Erhebung vielfältiger Daten und zum anderen eine gute Vernetzung. Dabei tragen Quantensysteme zur Datenerhebung und zur Vernetzung bei. Insbesondere optische Sensoren erfassen Daten wie Bilder oder Abstände. Die Vernetzung wird durch photonische Schlüsselkomponenten in Glasfasernetzen und mobilen Netzen möglich gemacht. Bei all dem müssen Datenschutz und Persönlichkeitsrechte der Bürgerinnen und Bürger gewahrt bleiben. Dafür lassen sich intelligente photonische Lösungen im Sinne eines „Datenschutzes by Design“ realisieren. Das bedeutet beispielsweise, dass mit einer bewusst niedrigen Bildauflösung nur die absolut notwendigen Daten erfasst werden.

Konzepte zur Datenminimierung (Datensparsamkeit) sind zugleich ein Beitrag dazu, die Datenmengen der vernetzten Welt beherrschbar zu halten. Trotzdem kommt die elektronische Datenverarbeitung zunehmend an ihre Grenzen. Zum einen erreicht ihr Energieverbrauch eine Größe, die die klimapolitischen Anstrengungen für Energie- und CO₂-Einsparung konterkariert.¹² Zum anderen existieren fundamentale, naturwissenschaftliche Grenzen für die Verkleinerung von Chip-Strukturen – und damit die rein elektronische Datenverarbeitung. Ein vielversprechender Ansatz zur Überwindung dieser Grenzen sind disruptive Lösungen für eine Konvergenz von Elektronik und Photonik. Die Mikro- und Nanophotonik sowie die intelligente Integration von Elektronik und Photonik haben hier großes Potenzial. Sie könnten Größen wie Datenrate, Reichweite, Energieeffizienz und Kompaktheit entscheidend verbessern. All dies bedeutet für deutsche Unternehmen auch neue wirtschaftliche Perspektiven.

Auch für die Vernetzung dezentraler Rechenstrukturen eröffnen Quantensysteme völlig neue Möglichkeiten. Die Daten unterschiedlicher Parteien müssen hierbei an keinem bestimmten Ort zentral zusammengeführt oder verarbeitet – und daher auch nicht preisgegeben – werden. Anders als in konventionellen Rechnernetzwerken können komplette Rechnungen dezentral durchgeführt werden. Es entsteht ein quantenphysikalischer „Gesamtzustand“, der von keiner der Parteien komplett eingesehen oder kopiert werden kann. Auf diese Weise lassen sich vorhandene eigene

Rechenkapazitäten mit fremden Systemen kurzfristig, bedarfsgerecht und sicher verknüpfen.

Die schnellere Datenübertragung in immer komplexeren Netzwerken stellt hohe Anforderungen an ein latenzarmes Zusammenwirken aller Netzwerkkomponenten. Zwingende Voraussetzung dafür ist eine hochgenaue Zeitmessung. Ultrakompakte und hochpräzise optische Uhren ermöglichen es, Hochgeschwindigkeitsnetzwerke und Rechenzentren zu synchronisieren. Insbesondere der Aufbau des auf Time-Domain-Multiplexing beruhenden 5G-Mobilfunknetzes stellt hohe Anforderungen an die Synchronisation und wird den Bedarf an Atomuhren vervielfachen.

Besonderer Forschungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **Entwicklung quantensystembasierter Lösungen zur Gewinnung und Nutzung von Informationen beispielsweise für SmartX-Anwendungen, insbesondere:**
 - Systemische Lösungen, die Hardware und Software einbeziehen, um eine leistungsfähige und datensparsame Informationserfassung zu ermöglichen
 - Fusion unterschiedlicher (Quanten-) Sensormodalitäten, um möglichst passgenaue Informationen verfügbar zu machen
- **Überwindung der Grenzen mikroelektronischer Systeme durch Mikro- und Nanophotonik sowie Konvergenz von Photonik und Elektronik, insbesondere:**
 - Neue System-on-Chip- und System-in-Package-Lösungen mit bislang ungekannter Integrationsdichte
 - Photonisch-elektronische Integration mit neuen Freiheitsgraden beim Design von Systemen
 - Ganzheitliche Ansätze für die photonisch-elektronische Integration

¹² Streaming ist eine der größten CO₂-Schleudern – doch es gibt Lösungsansätze für das Problem. Spiegel Online, 28.12.2019.

- Lösungen für die optischen Netze der nächsten Generation, die neben hoher Performanz einen hohen Grad an Parallelität ermöglichen
- Mikrowellenphotonik beispielsweise für Mobilfunknetze der fünften und sechsten Generation (5G, 6G) oder für die Radarsensoren
- **Verteilte Rechnungen in Quantennetzwerken für mehr Leistung und höhere Datensicherheit, insbesondere:**
 - Photonische Systeme für das Quantencomputing
 - Informationstheorie für verteiltes Quantencomputing
 - Transfer von Quantenzuständen zwischen den Netzwerkknoten
- **Synchronisation von Hochgeschwindigkeitsdatennetzwerken und Rechenzentren, insbesondere:**
 - Robuste und kompakte Systeme für hochpräzise optische Uhren

7.2 Mit digitaler Photonik Lösungen für die Produktion von morgen entwickeln

Der deutsche Maschinen- und Anlagenbau gehört zu den tragenden Säulen der Wertschöpfung in Deutschland. Innovative Fertigungsprozesse und hohe Qualitätsstandards sind wichtige Erfolgsgaranten deutscher Unternehmen. Die zunehmende Digitalisierung führt aber auch hier zu erheblichen Veränderungen in den Wertschöpfungsketten. Nur mit eigenen Innovationen können deutsche Unternehmen auch langfristig im internationalen Wettbewerb bestehen. Automatisierte Produktionsprozesse, individualisierte Produkte sowie die Kopplung an zusätzliche digitale Dienstleistungen bieten neue Chancen, den Wandel aktiv zu gestalten.

In der digitalisierten, automatisierten Produktion wird die 100-Prozent-Qualitätskontrolle ein unverzichtbarer

Bestandteil sein. Photonische Sensoren sind schon heute die „Sinnesorgane“ der Produktion, da sie berührungslos und flexibel Produktionsdaten in sehr kurzer Zeit aufnehmen. Die Verarbeitung des immensen Datenvolumens und die Gewinnung der produktionsrelevanten Informationen werden jedoch zunehmend zum Problem. Photonische Sensoren müssen daher nicht nur kleiner werden, sondern zukünftig auch in der Lage sein, Daten auszuwerten, zu reduzieren, daraus Informationen zu gewinnen und diese einem Produktionsnetzwerk in kompakter Form zur Verfügung zu stellen. Fortschritte beim photonischen, maschinellen Sehen und Verstehen bieten immer neue Möglichkeiten für die Automatisierung.

Für die Fertigung maßgeschneiderter, individualisierter Produkte ist die Photonik ein wichtiger „Enabler“, denn sie schafft Flexibilität in den Produktionssystemen. So sind Laserbearbeitungsverfahren bereits heute die flexibelsten Fertigungsverfahren für die industrielle Produktion. Diese umfassen subtraktive Verfahren wie Trennen und Bohren, Fügeverfahren wie Schweißen und Löten sowie additive Verfahren wie den 3-D-Druck. Zusätzliche Flexibilität entsteht durch Sensor- und Bildverarbeitungstechniken. Dafür sind Anpassungs- und Rückkopplungsschleifen mit besonders kurzen Reaktionszeiten erforderlich. Diese können durch innovative Lösungen für eine sensornahe Verarbeitung und Auswertung optischer Daten ermöglicht werden.

Smart Products – die Kombination von Hardware mit digitalen Lösungen und Dienstleistungen – versprechen neuartige und hochgradig individualisierbare Services für Verbraucherinnen und Verbraucher. Smart Products sind somit ein weiterer wichtiger Zukunftsmarkt für deutsche Unternehmen. Teil dieses Marktes sind beispielsweise Services im Kontext des Industrial Internet of Things, das durch den hohen Vernetzungsgrad von Produktionsprozessen entsteht. Hier könnte die optische Sensorik in Kombination mit anderen Sensormodalitäten in Zukunft eine Fernsteuerung von Produktionsprozessen überall auf der Welt erlauben und gleichzeitig den Zugang zu einem riesigen Datenschatz sichern. Das kann neue Geschäftsmodelle ermöglichen: Anlagenhersteller verkaufen nicht mehr zwingend eine Maschine, sondern den Service eines optimierten Produktionsprozesses. Augmented-Reality-Lösungen können diesen Trend unterstützen. Eine Umfelderkfassung mittels Sensorik und die kontextabhängige

Visualisierung von Informationen kann es zukünftig ermöglichen, Fachwissen weltweit und ortsunabhängig zu nutzen.

Besonderer Forschungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **Technologien für neue automatisierte Fertigungsprozesse, insbesondere:**
 - Maschinelles Sehen und Verstehen
 - Fusion unterschiedlicher (Quanten-)Sensormodalitäten, um möglichst passgenaue Informationen verfügbar zu machen
 - Entwicklung von 3-D-Kameras und 3-D-Sensoren zur schnellen Erfassung geometrischer und topologischer Daten sowie zur Objektklassifizierung
 - Entwicklung von Auswertungsverfahren, Algorithmen und KI-Systemen zur schnellen Auswertung von Daten, die mit photonischen Systemen generiert wurden
- **Technologien, die eine flexible Produktion im Hinblick auf eine ganzheitliche Prozesskette ermöglichen, insbesondere:**
 - Systemische Ansätze aus Hard- und Software für eine leistungsfähige, latenzarme photonische Informationserfassung
 - Entwicklung photonischer Systeme zur stabilen und zertifizierbaren Produktion mit additiven Fertigungsverfahren
- **Technologien, die Smart Products ermöglichen, insbesondere:**
 - Photonische Sensoren und Quantensensoren für eine kostengünstige Erhebung der relevantesten Daten für eine zielgerichtete Optimierung von Produktionsprozessen
 - Ansätze zur Visualisierung wie Augmented oder Mixed Reality

7.3 Mit Quantensystemen neue Lösungsansätze für Ressourceneffizienz, Klima- und Umweltschutz schaffen

Deutschland hat das Ziel, bis 2045 klimaneutral zu sein¹³ und Rohstoffe nachhaltiger zu nutzen¹⁴. Dies ist eine große Herausforderung für Gesellschaft und Wirtschaft, bietet aber auch Chancen für Innovationen. Quantensysteme könnten in Zukunft wichtige Beiträge zu diesen Zielen leisten. Quantencomputer könnten beispielsweise neue Lösungen für chemische Verfahren finden und Simulationen verbessern. Photonische Fertigungsverfahren haben großes Potenzial, Ressourcen einzusparen. Innovative Sensoren und Sensorsysteme können einen Beitrag zu einem verbesserten Umweltmonitoring leisten.

Die besonders gute Eignung von Quantencomputern für die Simulationen von neuen Materialklassen, chemischen Verbindungen, Reaktion und Verfahren sowie für das Lösen hochkomplexer Modellier- und Optimierungsaufgaben eröffnet ihnen zahlreiche mögliche Anwendungsgebiete, um Wirtschaft und Gesellschaft nachhaltiger zu machen. Die Optimierung chemischer Verfahren könnte zukünftig beispielsweise zu einem effektiveren Einsatz von Ressourcen führen. Anwendungsbeispiele sind elektrochemische Vorgänge für leistungsfähigere Batterien und Katalysatoren für die effiziente Erzeugung grünen Wasserstoffs. Ein weiterer möglicher Anwendungsfall wäre die Entwicklung eines effizienteren Verfahrens zur Ammoniaksynthese, was die Stickstoff-Düngemittelproduktion energieeffizienter gestalten würde. Diese benötigt beim aktuellen Stand der Technik (Haber-Bosch-Verfahren) etwa ein Prozent des weltweiten jährlichen Energieverbrauchs und ist für zwei Prozent der jährlichen CO₂-Emissionen verantwortlich. Ein weiteres Einsatzgebiet sind perspektivisch die Materialwissenschaften insbesondere bei der Entwicklung komplexer Materialkombinationen. Aktuelle Forschungsthemen sind nanostrukturierte Oberflächen, die beispielsweise bei Elektroden und Katalysatoren im Bereich der Wasserstofftechnologien eingesetzt werden, sowie die Simulation von Reaktionswegen. Auch jenseits chemischer Verfahren könnten Quantencomputer Ressourceneinsparungen ermöglichen. Potenziale liegen

¹³ Klimaschutzgesetz 2021: Generationenvertrag für das Klima. Die Bundesregierung, abgerufen am 06.06.2022.

¹⁴ Die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Die Bundesregierung, abgerufen am 06.06.2022.

beispielsweise in energieeffizienteren Logistikprozessen auf Basis einer optimierten Planung oder in der Steuerung der Stromnetze, sodass der mit Windrädern und Solarparks erzeugte Strom optimal in die Netze eingespeist wird. Auch beim Umgang mit den Folgen der bereits eingetretenen Klimaveränderungen könnten Quantencomputer helfen, indem sie hochkomplexe und multifaktorielle Klimamodelle verbessern.

Für den effizienten und nachhaltigen Einsatz von Ressourcen liefern photonische Werkzeuge vielfältige Lösungen, zum Beispiel für das Recycling von Abfällen durch laserbasierte Erkennungs- und Sortierverfahren oder eine zielgerichtete Zerlegung in Einzelteile etwa durch das Entlöten elektronischer Bauteile. Neue Geschäftsmodelle könnten zukünftig auf Quantensystemen basierende Sensorik nutzen, um maximale Wirkung bei minimalem Ressourceneinsatz zu erreichen. In diesen Geschäftsmodellen wird nicht mehr das Produkt selbst – zum Beispiel Reinigungs- oder Pflanzenschutzmittel –, sondern dessen Ergebnis – zum Beispiel optimale Sauberkeit oder optimaler Pflanzenertrag – verkauft. Der Anreiz, möglichst viel von einer Ressource zu verkaufen, kehrt sich ins Gegenteil um. Solche Geschäftsmodelle sind „ressourcenschonend by Design“. Beim Photonic Smart Farming kann die hochaufgelöste Bedarfserfassung der Pflanzen zur exakten lokalen Dosierung von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln beitragen. Teilweise lassen sich bereits Pflanzenschutzmittel durch automatisierte mechanische oder laserbasierte Verfahren zur Unkrautbeseitigung ersetzen. Solche Ansätze können in Zukunft durch leistungsfähigere Sensorik und Datenverarbeitung eine immer wichtigere Rolle in der Landwirtschaft spielen.

Autonom und energieeffizient oder -autark arbeitende Sensorsysteme können im Umweltmonitoring zum Einsatz kommen, um frühzeitig umweltschädliche Ereignisse zu erkennen. Dazu gehört beispielsweise die Detektion von Methanemissionen oder die Entdeckung von Waldbränden. Mittelfristig bieten hochpräzise und energieautarke Quantensensoren zudem neue Möglichkeiten zur Erdbeobachtung. Das Abschmelzen von Eis, die Veränderungen des Meeresspiegels oder des Grundwassers lassen sich mithilfe von Atominterferometern und neuen Verfahren zur präzisen Zeitmessung mit bisher unerreichter Präzision vermessen. Quantenbasierte Gravimeter könnten beispielsweise die Magmaverteilung und -bewegung in aktiven Vulkanen messen und frühzeitig vor Ausbrüchen warnen.

Besonderer Forschungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **Quantenalgorithmen für die Optimierung und Modellierung praxisrelevanter Problemlösungen, insbesondere:**
 - Simulation chemischer Prozesse beispielsweise für eine effizientere Erzeugung von grünem Wasserstoff oder Ammoniak
 - Präziseres Verständnis der Ladungsträgerverteilung in Festkörpern, beispielsweise für effizientere Batterien oder Solarmodule höchster Effizienz
 - Optimierung komplexer logistischer Prozesse, beispielsweise für eine effizientere Wegeplanung
 - Simulation von Klimamodellen für eine vorausschauende Planung
- **Photonische Werkzeuge für ressourcenschonendes und umweltschonendes Wirtschaften, insbesondere:**
 - Ressourcenschonende additive Fertigungsverfahren
 - Neue Nutzungskonzepte von Gütern durch innovative Sensorimplementierung
 - Optimierte Sensor- und Kameradatenverarbeitung, zum Beispiel für Smart Farming
- **Sensorsysteme für Umweltmonitoring und Erdbeobachtung, insbesondere:**
 - Systemische Konzepte zur Energieautarkie dezentraler und mobiler Sensorsysteme
 - Robuste, kompakte und für den Langzeitbetrieb geeignete Quantensensorkonzepte und -aufbauten
 - Optische Verfahren zur hochempfindlichen Umweltanalytik



7.4 Mit Quantensystemen Anwendungen für die Mobilität der Zukunft schaffen

Mobilität ist ein Grundbedürfnis der heutigen Gesellschaft. Allein der Weg zur Arbeit pro Erwerbstätigen betrug in Deutschland im Jahr 2018 durchschnittlich knapp 17 km.¹⁵ Selbst durch die Covid-19-Pandemie hat die Mobilität der Menschen nicht dauerhaft abgenommen.¹⁶ Die Automobilbranche spielt deshalb mit ihren rund 800.000 Beschäftigten eine wichtige volkswirtschaftliche Rolle. Sie ist zudem ein wichtiger Innovationstreiber:¹⁷ Jährlich investieren deutsche Automobilhersteller mittlere zweistellige Milliardenbeträge in Forschung und Entwicklung.¹⁸ Zugleich werden alternative Mobilitätskonzepte immer wichtiger,

¹⁵ In Deutschland gibt es immer mehr Pendler. Spiegel online, 06.02.2020.

¹⁶ Veränderung der Mobilität während der Corona-Krise in Deutschland. Statista, abgerufen am 10.11.2021.

¹⁷ Branchenfokus Automobilindustrie. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz, abgerufen am 17.02.2022.

¹⁸ Weltweite Ausgaben der deutschen Automobilindustrie für Forschung und Entwicklung von 2013 bis 2018. Statista, abgerufen am 10.11.2021.

die über das Automobil hinausgehen und Mobilität im System verschiedener Verkehrsmittel denken – für den Umwelt- und Klimaschutz, aber auch vor dem Hintergrund des wachsenden Wunsches nach flexibler und zur individuellen Lebenssituation passenden Mobilität. Fast ein Drittel der Erwerbstätigen in Deutschland nutzte 2020 für den Weg zur Arbeit andere Verkehrsmittel als den PKW.¹⁹ Bedarfsorientierter ÖPNV auch außerhalb von Großstädten, fußgänger- und fahrradfreundliche Stadtplanung oder eine für alle Verkehrsteilnehmenden optimierte Steuerung von Verkehrsflüssen sind wichtige Zukunftsthemen, die zugleich Raum für zahllose technologische Innovationen bieten. Auch für die Quantensysteme ist die Mobilität eines der wichtigsten und vielfältigsten Entwicklungsfelder, beispielsweise in Form von photonischer Produktionstechnik, sensorbasiertem autonomem Fahren und perspektivisch quantencomputerbasierter Optimierung von Verkehrsströmen.

¹⁹ Erwerbstätige nach Stellung im Beruf, Entfernung, Zeitaufwand und benutztem Verkehrsmittel für den Hinweg zur Arbeitsstätte 2020 in %. Statistisches Bundesamt, 31.01.2022.

Auf dem Weg zu möglichst ressourceneffizienten Verkehrsmitteln basieren viele Innovationen auf photonischen Technologien. Während die Lasermaterialbearbeitung im Bereich des Karosseriebaus an vielen Stellen bereits etabliert ist, sorgt aktuell der Einsatz von Photonik in der Batteriefertigung für große Entwicklungssprünge. Von der Beschichtung der hauchdünnen Elektrodenfolien bis zur Konfektionierung der Batterie-Packages mit dem Laser macht die Photonik an vielen Stellen Fortschritte in diesem Bereich überhaupt erst möglich. Die laserbasierte additive Fertigung von automobilen Bauteilen verspricht große Vorteile hinsichtlich Materialeinsatz und Leichtbau und macht aktuell den Schritt von einem Verfahren für das Rapid Prototyping in die Serienproduktion. Hierbei spielen neben Verbesserungen der additiven Verfahren selbst vor allem Fragen zur Steuerung und Optimierung der gesamten Prozessketten einschließlich Vor- und Nachbearbeitung eine entscheidende Rolle. Photonische Sensoren in Kombination mit modernen Methoden der Sensorfusion und industriellen Bildverarbeitung sind ein zentraler Schlüssel zum Erfolg.

Für die autonome Fortbewegung sind Lösungen aus dem Bereich der Quantensysteme von großer Bedeutung. Hier versprechen Lösungen aus der Kameratechnologie, der photonischen Sensorik, der Datenfusion, der Bildverarbeitung und des verteilten Rechnens große Fortschritte. Voraussetzung für sicheres autonomes Fahren sind Redundanzen in Sensorik und Steuerung. Besonders herausfordernd ist das für die Navigation. Ziel ist, schnell und möglichst energieeffizient aus vielen Daten die relevanten Informationen herauszufiltern. Miniaturisierte Drehratensensoren (Gyroskope) auf Basis von Quanteneffekten könnten hier beispielsweise Alternativen und Ergänzungen zur GPS-Navigation sein.

Der stetig steigende Bedarf an Mobilität bringt die hierfür notwendige Infrastruktur bereits heute an ihre Grenzen. Gerade in Kombination mit Lösungen des autonomen Fahrens und kommunizierenden Fahrzeugen (Car2X-Kommunikation) ist die Optimierung von Verkehrsströmen entscheidend für die effiziente Nutzung vorhandener Infrastruktur. Dies gilt auch mit Blick auf Mobilität allgemein: Das Zusammenspiel aller Verkehrsteilnehmenden von Fußgängerinnen und Fußgängern über Rad- und Autofahrende bis zu den verschiedenen Verkehrsmitteln des ÖPNV für alle Beteiligten optimal zu steuern, ist eine

riesige Optimierungsaufgabe. Was mit klassischen Rechnern nicht in akzeptabler Zeit lösbar ist, könnte durch Quantencomputer zukünftig lösbar werden.

Besonderer Forschungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **Innovative Verfahren für die Fertigung und das Prozessmonitoring im Automobilbau, insbesondere:**
 - Neue laserbasierte Fertigungsverfahren und deren Implementierung in Pilotlinien
 - Prozessmonitoring durch hochintegrierte Sensoren
 - Innovative Sensor- und Datenfusion für die Prozesssteuerung
- **Innovative Technologien für autonome Fortbewegung und Umfelderkennung, insbesondere:**
 - Kamerasysteme und Optiken beispielsweise für anspruchsvolle Lichtverhältnisse
 - Hochintegrierte photonische Sensorik, zum Beispiel LIDAR
 - Neuartige Sensoren für die GPS-freie Navigation, zum Beispiel auf Basis von Gaszellen- oder diamantbasierter Quantensensorik
- **Technologien für eine Optimierung der Mobilität, insbesondere:**
 - Quantenalgorithmen für eine optimierte Infrastrukturplanung und Verkehrssteuerung
 - Integrierte Lichtquellen und Sensorik für die Car2X-Kommunikation

7.5 Mit photonischen und quantenbasierten Lösungen Krankheiten erkennen, verstehen und therapieren

Ein Mädchen, das 2020 in Deutschland auf die Welt gekommen ist, wird statistisch gesehen ca. 84 Jahre alt. Die Lebenserwartung ist damit seit 1950 um etwa 15 Jahre gestiegen.²⁰ Diese gesellschaftliche und medizinische Errungenschaft bringt allerdings auch Herausforderungen mit sich. Altersbedingte Krankheiten wie Osteoporose, Makuladegeneration oder auch Typ-2-Diabetes nehmen zu.²¹ Gleichzeitig können durch innovative Verfahren immer schonendere Operationen an immer älteren Patientinnen und Patienten durchgeführt werden. Neue wie bekannte Krankheitsbilder verlangen nach verbesserten Konzepten für Prävention, Diagnostik und Therapie. Aufgrund dieser gesellschaftlichen Entwicklungen ist die Medizintechnik eine der Branchen mit dem höchsten Innovationsbedarf. Forschende Medizintechnikunternehmen investieren derzeit rund neun Prozent ihres Umsatzes in Forschung und Entwicklung.²² Die Gesundheitstechnologien sind höchst interdisziplinär mit einer breiten wissenschaftlichen Basis aus nahezu allen Medizin-, Natur- und Ingenieurwissenschaften. Quantensysteme können in vielen Bereichen Lösungen anbieten und mit neuen Produkten und Dienstleistungen Trends setzen. Dies schließt sowohl unterschiedliche Facetten des Infektionsschutzes als auch hochspezialisierte Diagnose- und Therapieverfahren ein. Zudem entstehen durch Quantensysteme völlig neue Lösungsansätze an der Schnittstelle zwischen Photonik und Biologie, wie zum Beispiel im Bereich Prothetik und der Optogenetik.

Photonische Technologien sind wichtige Werkzeuge für die Erkennung und Bekämpfung von Infektionskrankheiten. Sie ermöglichen beispielsweise ein schnelleres Screening von Keimen oder eine effektivere Reinigung von Gewässern, Raumluft und Oberflächen. Zukünftig verspricht außerdem der Quantencomputer enorme Vorteile für die Entwicklung

neuer Medikamente und Wirkstoffe. Er ermöglicht die schnelle und exakte Simulation von Molekülen und chemischen Prozessen und somit deutlich kürze Entwicklungszeiten als beim reinen Hochdurchsatz-Screening.

Im Bereich Diagnose- und Therapieverfahren gehört Deutschland mit einem flächendeckenden Netz gut ausgestatteter Kliniken zu den international führenden Nationen. Die photonischen Gesundheitstechnologien waren dafür ein wichtiger Wegbereiter und werden auch zukünftig Innovationstreiber sein. Die Einsatzgebiete reichen von intelligenter Bildgebung über optische Systeme für minimalinvasive Eingriffe bis hin zu kombinierten diagnostischen und therapeutischen, sogenannten theragnostischen, Verfahren. Zukünftig können die Superresolutionsmikroskopie oder die Quantenbildgebung entscheidend dazu beitragen, Wirkmechanismen auf Zellniveau besser zu verstehen und daraus abgeleitete maßgeschneiderte Therapiekonzepte zu entwickeln.

Das Feld der Prothetik befasst sich mit Möglichkeiten, von Geburt an fehlende oder durch Unfall bzw. Krankheit verloren gegangene Körperfunktionen zu ersetzen. So ermöglicht beispielsweise die Neuroprothetik, gestörte Funktionen des zentralen Nervensystems wiederherzustellen. In diesem Feld könnten Quantenmagnetometer zukünftig genutzt werden, um Hirnströme zu vermessen – insbesondere dort, wo Anforderungen an Sensorgröße, Mobilität und Kosten bisher den Einsatz konventioneller Magnetoenzephalografie verhindert haben. Neue quantenbasierte Lösungen für eine bessere Steuerung von Prothesen erscheinen damit perspektivisch möglich.

Weiteres Potenzial für die Therapie von Nervenerkrankungen liegt in der auf lichtbasierten (photonischen) Ansätzen beruhenden Optogenetik. Diese nutzt Methoden der Genetik, um mithilfe lichtaktivierbarer Proteine Abläufe in Nervenzellen zu kontrollieren und zu steuern. Mit der Optogenetik können Therapien weiterentwickelt werden, die bislang auf elektrischer Nervenstimulation basieren. Der Vorteil lichtbasierter Stimulation ist, dass sie zielgenauer funktioniert und das umliegende Gewebe schont. Erste Einsatzmöglichkeiten werden bereits erforscht: mikroskopisch kleine LED in der Hörmuschel (Cochlea) für Gehörlose oder feine Lichtnetze auf dem Herzmuskel als Herzschrittmacher.

²⁰ Entwicklung der Lebenserwartung bei Geburt in Deutschland nach Geschlecht in den Jahren von 1950 bis 2060. Statista, abgerufen am 10.11.2021.

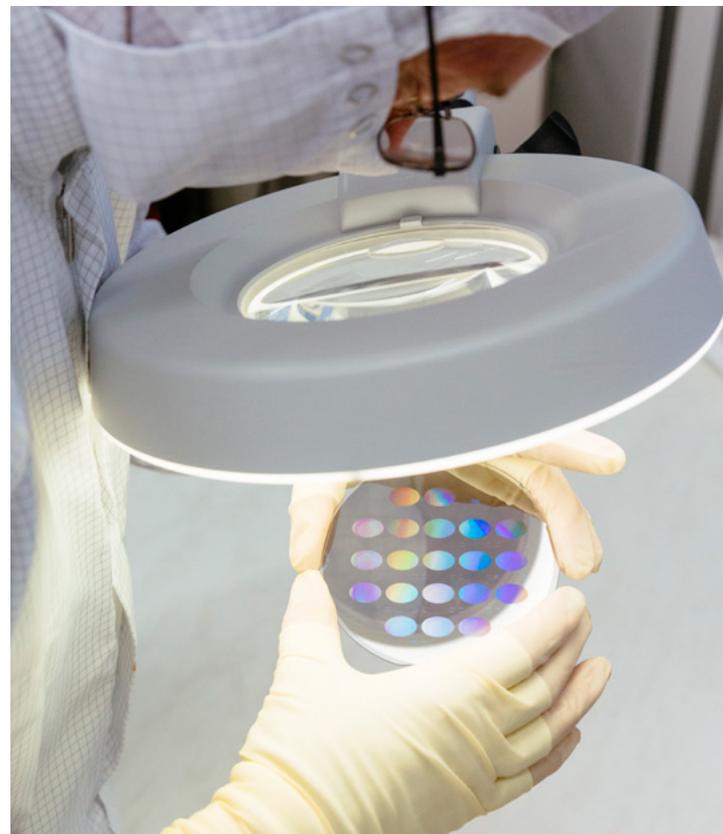
²¹ Gesund altern: Fünf chronische Krankheiten, die es zu besiegen gilt. National Geographic, 03.05.2019.

²² Die deutsche Medizintechnik-Industrie. SPECTARIS Jahrbuch 2019/2020.

Besonderer Forschungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **Photonik und Quantentechnologien zu Erkennung und Bekämpfung von Erregern von Infektionen, insbesondere:**
 - Schnelle, hochauflösende Mikroskopie sowie schnelle, automatisierte Mikroskopie für die Pharmaforschung, zum Beispiel High-Content-Systeme
 - Optische Verfahren für die schnelle Vor-Ort-Diagnostik (inkl. robuster, mobiler Systeme)
 - Entwicklung kompakter Hyperspektralsensoren und Hybridsensoren
 - Quantencomputer für die Simulation komplexer biologischer Prozesse sowie die Wirkstoffforschung
- **Photonische und quantenbasierte innovative Diagnose- und Therapieverfahren, insbesondere:**
 - Multimodale optische Systeme, intelligente medizinische Bildgebungsverfahren und hochsensitive Sensorik für Diagnostik und Therapiesteuerung
 - Optische Systeme für die minimalinvasive Therapie
 - Theragnostische Systeme
 - Optische Bildgebung mit verschränkten Photonen
- **Photonische und quantenbasierte Lösungen für eine verbesserte Vermessung und Beeinflussung von Nervensignalen, insbesondere:**
 - Hochsensible Sensoren zur Detektion der elektromagnetischen Signale in Nerven (und Muskeln)

- Kompakte Magnetoenzephalografie, beispielsweise auf Basis diamantbasierter Quantensensorik
- Verbesserung der Optogenetik, beispielsweise durch stabilere, längere optogenetische Aktivierung und Erweiterung des Absorptionsspektrums für tieferes Eindringen in Gewebe und dadurch zielgerichteter Anregungen von Proteinen am Wirkort
- Überführung der Optogenetik in medizinische Anwendungsfelder durch klinische Evaluierung von Systemen
- Nutzung der Optogenetik zum besseren Verständnis von Netzwerken im Gehirn und Quantensensorik zum besseren Verständnis von Krankheiten wie Depression, Sucht, Demenz





8. Handlungsfeld III: Ökosysteme gestalten – neue Innovationsketten schaffen, die besten Köpfe gewinnen, die Menschen mitnehmen

Das Potenzial der Quantensysteme ergibt sich aus der Überführung der grundlegenden Quantenphysik in neue industrielle oder gesellschaftliche Anwendungen. Dafür müssen zahlreiche Forschungsfelder wie Physik, Mathematik, Informatik, Chemie, Medizin und Ingenieurwissenschaften zusammenarbeiten. Ebenso müssen sich Unternehmen mit Hochschulen bzw. Forschungseinrichtungen vernetzen.

Kurz gesagt

1. Die erfolgreiche Nutzung von Quantensystemen braucht funktionierende Innovationsketten. Diese werden möglich durch:
 - Neue Kooperationen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft sowie zwischen Anbietern und Anwendern neuer Lösungen
 - Eine langfristig angelegte anwendungsorientierte Forschung
 - Eine breit aufgestellte Zulieferindustrie sowie neue Technologie- und Systemanbieter
2. Für technische Innovationen sind exzellente Fachkräfte essenziell. Um diese auch langfristig zu sichern, braucht es:
 - Die Entwicklung neuer Formate zur Ausbildung, Sicherung und Gewinnung von qualifiziertem Personal
 - Maßnahmen zur Begeisterung exzellenter wissenschaftlich-technischer Nachwuchskräfte
3. Deutschland braucht internationale Partner, um in den Quantensystemen erfolgreich zu sein. Dies gelingt durch:
 - Den Auf- und Ausbau strategischer europäischer und internationaler Kooperationen
 - Die gezielte Förderung von internationalen Kooperationen zur Komplementierung von bisher fehlendem Know-how in Deutschland
4. Damit eine neue Technologie erfolgreich den Weg in Anwendung findet, braucht sie breite gesellschaftliche Akzeptanz. Hierfür gilt es:
 - Die Gesellschaft zielgruppengerecht mitzunehmen und zu informieren
 - Mit Open-Innovation-Ansätzen Akteure jenseits der typischen Zielgruppen anzusprechen und einzubinden

Um auf Augenhöhe im internationalen Wettbewerb zu bestehen, müssen Deutschland und Europa Anwendungskompetenz und Umsetzungsgeschwindigkeit verbinden. Denn nur, wer wissenschaftliche Exzellenz auf herausragenden Technologieplattformen abbildet und mit hoher Geschwindigkeit Anwendungen und Produkte auf dem Markt etabliert, kann den Nutzen der Quantensysteme für die eigene Wirtschaft und Gesellschaft maximieren.

Hierzu braucht es Ökosysteme, die alle Stufen der Innovations- und Wertschöpfungskette umfassen. Sie müssen auf den besonderen Stärken Deutschlands aufbauen: exzellenten Hochschulen und Forschungseinrichtungen sowie einem sehr breiten Spektrum innovativer Unternehmen, die sowohl als Technologieanbieter als auch als -anwender agieren. Die Entwicklung der Photonik von einer Nischentechnologie hin zu einer der wichtigsten Zukunftsbranchen Deutschlands ist dafür ein gutes Vorbild.

8.1 Neue Innovationsketten für erfolgreichen Technologietransfer schaffen

Kooperationen entlang der Innovationskette sind zentral für einen wirksamen Transfer neuer Lösungen und neuen Wissens aus dem Labor in die breite Anwendung. Innovationsketten umfassen dabei den Bereich der wissenschaftlichen Forschung ebenso wie die wirtschaftliche Umsetzung durch Anbieter und Anwender. Für Photonik und Quantentechnologien ergeben sich dabei folgende Herausforderungen:

In der Photonik bestehen bereits etablierte Innovationsketten, die Wissenschaft und Wirtschaft gut miteinander verbinden. Hier bedarf es vor allem der Erweiterung funktionierender Ökosysteme um neue Kooperationen und Partner. Dadurch sollen Kompetenzen für systemische Lösungsansätze und Domänenwissen (zum Beispiel aus Medizin, Produktion, Logistik und Mobilität) für die Erschließung neuer Anwendungen einbezogen werden.

Um die neuen Quantentechnologien aus dem Labor in die breite Anwendung zu bringen, müssen

Forschungsaktivitäten Hand in Hand gehen mit dem Aufbau entsprechender Innovationsketten. Da der technologische Reifegrad teilweise sehr gering ist, fehlt es vielfach noch an geeigneten Partnern. Um diese Lücken zu schließen, spielen insbesondere Start-ups sowie kleine und mittlere Unternehmen als Anbieter von Komponenten und Produkten eine wichtige Rolle. Mit der Photonik als wichtiger Basistechnologie für viele Quantenanwendungen kann dabei auf eine etablierte Branche aufgebaut werden.

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung engagiert sich mit seiner Forschungsförderung dafür, dass sich in Deutschland und Europa eine Quantenforschungs- und -industriellandschaft mit einer kritischen Masse bildet, die sich perspektivisch aus eigener Kraft weiterentwickelt. Auf diese Weise wird das Anwendungspotenzial zunehmend deutlicher, die Sichtbarkeit für die neuen (wirtschaftlichen) Möglichkeiten der Quantensysteme wird erhöht und Unternehmen werden zunehmend an das Themenfeld herangeführt.

Besonderer Handlungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **Ausbau der Photonik-Innovationskette, insbesondere:**
 - Neue Kooperationen zwischen Hardware- und Software-Anbietern sowie -Anwendern aus den Bereichen Gesundheit, Produktion, Logistik und Mobilität bis hin zu autonom agierenden Systemen
 - Aufbau von Fertigungskompetenzen und -kapazitäten für hochintegrierte mikrophotonische Systeme wie (Quantum-) Photonics Integrated Circuits (PICs)
- **Schaffung von Quantentechnologie-Innovationsketten, insbesondere:**
 - Vernetzung von Akteuren aus Wissenschaft und Wirtschaft sowie von Anbietern und Anwendern durch Verbundprojekte sowie gezielter Ausbau einer Quantentechnologie-Fachcommunity

- Verknüpfung von Photonik- und Quantentechnologie-Innovationsketten, um Synergien zu heben
- Aufzeigen von Anwendungsmöglichkeiten und wirtschaftlichen Potenzialen der Quantentechnologien, zum Beispiel durch Leuchtturmprojekte, Veröffentlichungen und Messen, um zum Einstieg in das Technologiefeld zu motivieren
- Förderung des Ausbaus der Zulieferindustrie für die Quantensysteme mit einer langfristig angelegten Förderstrategie
- Gezielte Förderung im Hinblick auf kritische Abhängigkeiten bei wichtigen Komponenten und Basistechnologien
- Förderung von Gesamtsystemanbietern, die als Katalysator für die gesamte Innovationskette dienen können, indem um sie herum eine Zuliefer- und Anwenderindustrie entsteht.

8.2 Die besten Köpfe für Quantensysteme gewinnen

Photonik und Quantentechnologien sind stark interdisziplinäre Themenfelder. Vor diesem Hintergrund ist für die Arbeit in diesen Feldern Know-how aus der Physik, Mathematik, Chemie, Informatik und dem Ingenieurwesen gefordert. Gleichzeitig sind die unterschiedlichen Herangehensweisen von Wissenschaft und Wirtschaft wichtig. Die Fähigkeit, Produkte ausgehend vom Proof-of-Concept über Technologiedemonstratoren und Prototypen bis zur Marktreife zu entwickeln, gilt es effektiv zu kombinieren mit dem akademischen Wissen über quantenphysikalische Phänomene und Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung.

Es braucht daher Bildungspfade, die beide Perspektiven zusammenführen: Der akademische Bereich sollte anwendungsorientierte Aspekte in der Forschung stärker einbeziehen und dabei eine entsprechend wertschätzende Einstellung gegenüber der Anwenderperspektive pflegen. Unternehmen sollten Möglichkeiten schaffen, um das für die Nutzung und Kommerzialisierung von

Quantensystemen notwendige Basiswissen aufzubauen. Ziel ist es, langfristig Ökosysteme aus gut ausgebildeten „Quantum Natives“ zu schaffen. Hierzu ist auch eine gezielte Nachwuchsansprache nötig. Dazu ist es erforderlich, alle Ziel- und Altersgruppen von Schülerinnen und Schülern über Studierende bis hin zu exzellenten Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern mit spezifischen Maßnahmen für das Themenfeld Quantensysteme zu begeistern.

Besonderer Handlungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **Aus- und Weiterbildung sowie Interdisziplinarität in Fördermaßnahmen, insbesondere:**
 - Spezielle Maßnahmen zur Entwicklung und Initiierung von Quantensystemmodulen in natur- und ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen, frühe Einbeziehung entsprechender Partner, Förderung temporärer Austauschprogramme zwischen Forschung und Industrie
 - Förderung maßnahmenübergreifender Vernetzungs- und Begleitforschungsprojekte, die Fragestellungen der Aus- und Weiterbildung erfassen und adressieren. Ziel kann beispielsweise die Entwicklung gemeinsamer Konzepte und standardisierter Inhalte für Ausbildung und Training sein
- **Wecken des Interesses und Aufzeigen von Perspektiven für die Forschenden von morgen, insbesondere:**
 - Eine professionelle und kontinuierliche Kommunikation und Öffentlichkeitsarbeit für die Quantensysteme, die zum einen die wissenschaftlich-technische Attraktivität des Themenfelds darstellen, zum anderen Karrierechancen aufzeigen
 - Fördermaßnahmen für Kinder und Jugendliche, Studierende und Absolvierende sowie Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern

8.3 Europäisch handeln und international kooperieren

Die Quantensysteme stehen aufgrund der großen Chancen, die sie bieten, international im Fokus. In nahezu allen führenden Ländern und Regionen wie der Europäischen Union, dem Vereinigten Königreich, den USA oder China finden sich entsprechende private Investitionen sowie gut ausgestattete nationale Fördermaßnahmen und -programme. Das Rennen um die Technologieführerschaft ist dabei noch offen. Deutschland ist daran beteiligt und hat eine gute Ausgangsposition (siehe Kapitel 4).

Make or buy? Diese Frage stellt sich für Quantensysteme in besonderem Maße. Auf der einen Seite haben in Deutschland entwickelte und kommerzialisierte Anwendungen großes disruptives Potenzial mit entsprechend vielversprechenden Zukunftsmärkten. Für den Forschungs- und Wirtschaftsstandort Deutschland wird es daher von zentraler Bedeutung sein, das entsprechende Know-how auszubauen und an der Weltspitze mitzuspielen. Zudem sollte Deutschland bei bestimmten Technologien und Komponenten nicht in kritische Abhängigkeiten geraten. Auf der anderen Seite ist es weder realistisch noch sinnvoll, alle Teilbereiche komplett mit eigenem Know-how oder gar Fertigungskapazitäten abzudecken, denn das Themenfeld und die wissenschaftlich-technischen Herausforderungen sind dafür schlicht zu groß. Sie müssen daher mit europäischen und internationalen Partnern, insbesondere der Europäischen Kommission und den EU-Mitgliedstaaten, gemeinsam bearbeitet werden.

Aufgabe wird es sein, Märkte und Wissenschaft kontinuierlich im Hinblick auf mögliche technologische Chancen, Lücken und Abhängigkeiten zu beobachten und daraufhin gegebenenfalls strategisch nachzusteuern. Für bestimmte Themen wird es sinnvoll sein, eigenes Know-how aufzubauen, an anderen Stellen wird es zielführender sein, europäische oder internationale Kooperationen mit Wertepartnern Deutschlands einzugehen. Die europäische und internationale Vernetzung – beispielsweise die Beteiligung an entsprechenden Fördermaßnahmen – ist besonders im Kontext der Grundlagenforschung und der Förderung gänzlich neuer Ideen auch ein Wert an sich, der fortlaufend unterstützt werden sollte.

Besonderer Handlungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **Die Förderung der europäischen und internationalen Vernetzung im Bereich der Quantensysteme, beispielsweise die Beteiligung an Fördermaßnahmen der Europäischen Kommission**
- **Die Sicherung und der Ausbau der internationalen und europäischen Spitzenposition im Bereich der Quantensysteme, insbesondere durch:**
 - Projekt- und bekanntmachungsübergreifende Begleitforschung zur Identifikation von technologischen Lücken und kritischen Abhängigkeiten bei Know-how und Komponenten
 - Neue strategische Fördermaßnahmen und Kooperationsmodelle zum thematisch fokussierten Aufbau von Know-how sowie anwendungsorientierteren Forschungsaktivitäten und Vernetzung
 - Den strategischen Aufbau und die Förderung von europäischen sowie bi- und multilateralen internationalen Kooperationen, unter anderem durch Beteiligungen an europäischen Koordinierungsmaßnahmen wie der europäischen Technologieplattform Photonics²³ oder der Coordination and Support Action des europäischen Quantum Flagship²⁴

8.4 Die Menschen mitnehmen

Neue Technologien faszinieren Menschen von jeher. Durchbrüche wie die Glühbirne, das Automobil, das Fliegen oder die Raumfahrt, der Transistor oder das Internet haben das Leben der Menschen und ihr Bild von der Welt grundlegend verändert. Zugleich können neue Technologien auch intensive öffentliche Diskussionen entzünden – insbesondere wenn es darum geht, deren Risiken zu bewerten. Die Beispiele Atomenergie, künstliche Intelligenz oder Gentechnik zeigen das eindrücklich. Gut informierte

²³ photonics21.org

²⁴ qt.eu

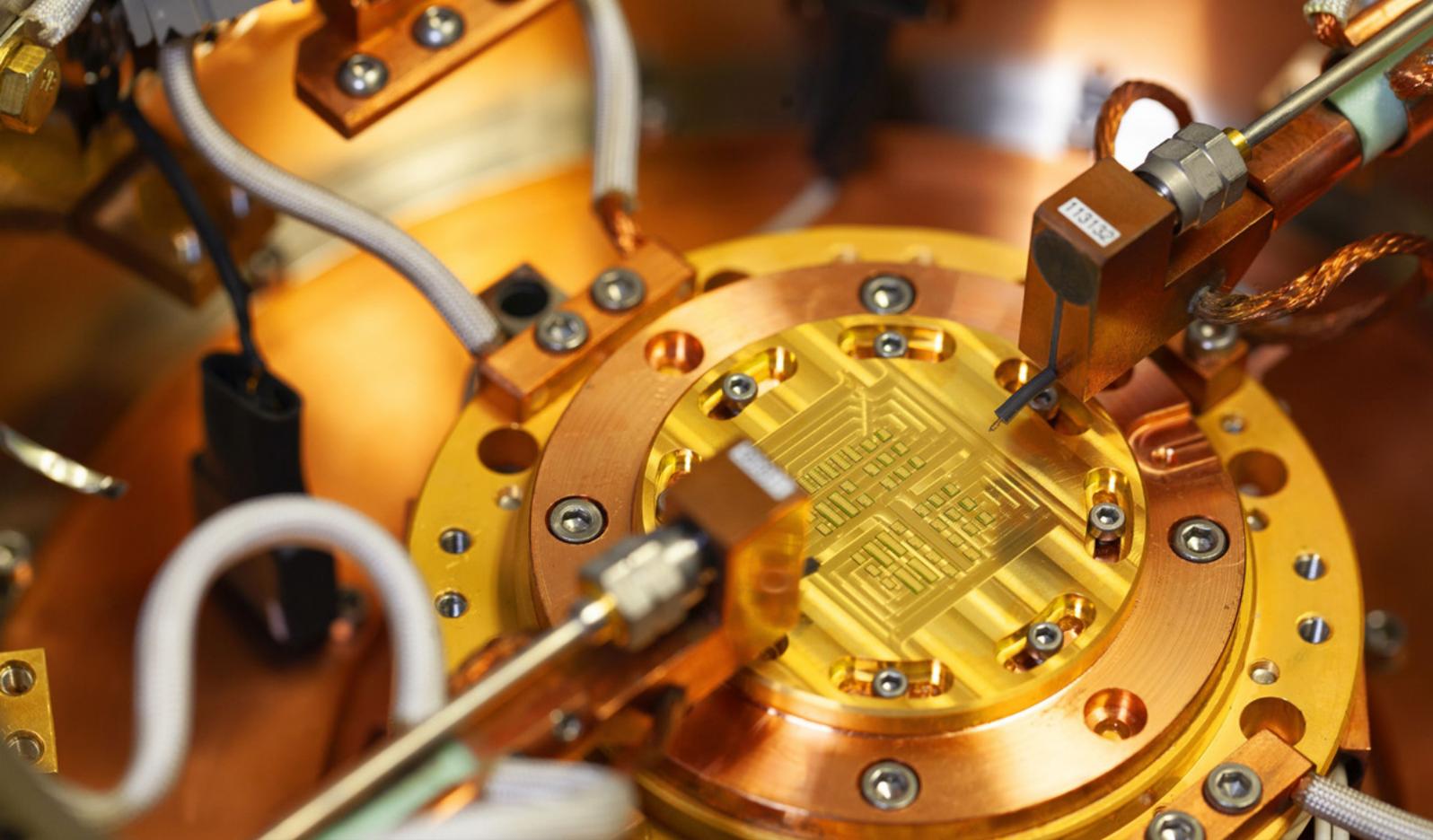
gesellschaftliche Debatten rund um neue Technologien sind wichtig, damit Risiken erkannt werden, bevor sie sich im praktischen Einsatz manifestieren.

Gerade im Bereich der Quantentechnologien ist dies besonders herausfordernd, denn viele Phänomene wie Verschränkung oder Superposition sind wenig anschaulich und erscheinen zunächst paradox. Ein tiefergehendes Fachwissen fehlt nicht nur in der breiten Öffentlichkeit, sondern häufig auch in wissenschaftlichen Fachbereichen außerhalb der Physik. Ziel ist es daher, verständlich aufbereitete Informationen einem breiteren Publikum zu vermitteln. Dadurch sollen die Menschen die Potenziale und Chancen der Quantensysteme verstehen und gleichzeitig mögliche Risiken sachlich diskutieren und für sich abwägen können.

Die Quantensysteme im Allgemeinen und Quantencomputing im Speziellen sind aufgrund der disruptiven Möglichkeiten, die sie bieten, mit großen Erwartungen verknüpft. Dies hilft bei der Kommunikation, macht es aber gleichzeitig umso wichtiger, fachlich fundiertes Erwartungsmanagement zu betreiben und neutral einzuordnen, welche Hoffnungen und Zeithorizonte realistisch sind.

Besonderer Handlungsbedarf besteht in folgenden Feldern:

- **In der Öffentlichkeit die Informationsbasis schaffen, insbesondere durch:**
 - Gezielte Begleitmaßnahmen, Kommunikation, Öffentlichkeitsarbeit und Veranstaltungen, die zentrale Themen und Inhalte der Quantensysteme zielgruppenspezifisch aufbereiten
 - Maßgeschneiderte Initiativen zur Förderung neuer Outreachkonzepte und -maßnahmen für die Quantensysteme
 - Förderung von Open-Innovation-Ansätzen wie Open Source, Open Hardware, Citizen-Science oder die Einbindung von beispielsweise offenen Werkstätten, Fablabs oder Makerspaces, um Quantensystem-Ökosysteme auch über die klassischen Akteure und Fachdisziplinen hinaus zu erweitern



9. Maßnahmen: Erforschung und Nutzung von Quantensystemen zielgerichtet unterstützen

In den drei Handlungsfeldern wurden die wichtigsten Forschungsfragen und Handlungsansätze benannt, die das Forschungsprogramm Quantensysteme adressiert. Diese werden mit folgenden Maßnahmen durch Forschungsförderung umgesetzt:

9.1 Forschungsergebnisse in Anwendung bringen

Die Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen und Unternehmen in Verbundprojekten ist zentral, wenn es darum geht, Forschungsergebnisse in Anwendung zu überführen. Ziel der Projektförderung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) ist es, durch die Förderung von Verbundprojekten im vorwettbewerblichen Bereich eine enge Kooperation zu ermöglichen. Für einen transparenten Wettbewerb der besten Ideen werden dazu in regelmäßigem Abstand Förderrichtlinien mit

spezifischen inhaltlichen Schwerpunkten bekannt gegeben. Die Anforderungen sowie Bewertungskriterien variieren je nach Thema. So orientiert sich beispielsweise die maximale Verbundförderquote, also der erforderliche finanzielle Eigenanteil der beteiligten Unternehmen, an der Technologiereife des Themas. Das BMBF sieht sich dabei als Wegbereiter, um private Investitionen in ein Forschungsthema zu ermöglichen. Dafür finden sich perspektivische Wertschöpfungsketten vielfach auch schon in der konkreten Zusammensetzung der Konsortien wieder. Dieser Weg soll für die innovativen Technologien im Bereich der Quantensysteme fortgesetzt werden.

9.2 Unternehmensgründungen und Start-ups unterstützen

Aufgrund der starken Grundlagenorientierung ist die Unternehmenslandschaft im Bereich der Quantensysteme in vielen Teilbereichen noch jung und teilweise fragmentiert. Das stellt die Überführung wissenschaftlicher Erkenntnisse und neuartiger Technologien in praktische Anwendungen vor Herausforderungen. Um diese Lücken im Technologietransfer zu schließen, kommt vor allem Start-ups eine besondere Bedeutung zu. Es braucht Fördermaßnahmen, die junge Unternehmen in der Startphase entlasten und einen Zugang zur Projektförderung schaffen. Das BMBF unterstützt im Rahmen der Maßnahme *Enabling Start-up – Unternehmensgründungen in den Quantentechnologien und der Photonik* bereits Gründerinnen und Gründer. Start-ups können dabei eng mit einer Forschungseinrichtung zusammenarbeiten und so von der wissenschaftlichen Expertise ebenso profitieren wie von vorhandenen Laborflächen. Die Maßnahme ist langfristig angelegt. Wichtiges Kennzeichen der Aktivitäten ist die Anschlussfähigkeit an bestehende Ansätze für Unternehmensgründungen und Wagniskapitalbeteiligung an jungen Unternehmen sowie die Anschlussfähigkeit an die *Zukunftsstrategie Forschung und Innovation* der Bundesregierung. So wird zum Beispiel darauf geachtet, dass die Förderung gut zu einer gleichzeitigen Finanzierung durch private Kapitalgeber und -geberinnen passt.

9.3 Neue Erkenntnisse und Entwicklungen frühzeitig aufgreifen

Das Programm fördert vorwettbewerbliche anwendungsorientierte Forschungsarbeiten. Im Vergleich zur rein erkenntnisorientierten Grundlagenforschung setzen diese dann ein, wenn naturwissenschaftliche Phänomene bereits beschrieben sind und sich hieraus ein Potenzial für eine technische Nutzung ableiten lässt. Aber nicht jedes Thema eignet sich in diesem Stadium schon für größere Verbundprojekte mit Unternehmensbeteiligung. Daher unterstützt das BMBF auch anwendungsrelevante Proof-of-Concept-Nachweise im Labormaßstab. Dies ermöglicht die erste Potenzialabschätzung einer Technologie. Die kontinuierliche Maßnahme *Wissenschaftliche Vorprojekte* bietet Forschungseinrichtungen und Hochschulen die Möglichkeit, fokussierte Funktionsnachweise zu

erbringen und somit die Brücke zu einem umfassenderen Forschungs- und Förderthema zu schlagen. Im Erfolgsfall erleichtert dies Unternehmen die Entscheidung, auch nach Projektabschluss in Themen mit höherem Forschungsrisiko entsprechende Forschungs- und Entwicklungs (FuE)-Ressourcen zu investieren.

9.4 Kompetenzen in Netzwerken zusammenführen und Synergien schaffen

Forschungsthemen, die international kompetitiv sind und eine besonders hohe Interdisziplinarität oder aufwendige Aufbauten erfordern, benötigen Netzwerke. Denn international wettbewerbsfähige Innovationsökosysteme sind mehr als die Summe der einzelnen Akteure und Projekte. Der wissenschaftliche Diskurs über Fachgrenzen hinaus, eine möglichst breite Nutzung aufwendiger Infrastruktur oder der flexible Austausch von Komponenten – all dies erfordert funktionierende Netzwerke. Das BMBF unterstützt deren Entstehung in vielfacher Hinsicht. Große Veranstaltungen und kleine Workshops bieten Gelegenheiten zur Vernetzung. Bereits heute gibt es einen Community-Bereich auf der Fachwebseite des BMBF für Quantentechnologien, dessen Funktionsumfang sich bedarfsorientiert erweitern lässt. Zudem werden anlassbezogen begleitende Projekte gefördert, die aktiv zur Vernetzung beitragen und so Synergien schaffen.

9.5 Standards vorbereiten

Standards sind für den erfolgreichen Transfer von Technologie in Anwendung besonders wichtig. Die breite Akzeptanz und wirtschaftliche Nutzung einer Technologie brauchen einheitliche Schnittstellen, Protokolle und Komponenten mit einer oder wenigen Varianten. Ein organisches Anwachsen diverser paralleler Einzellösungen wäre ein großes Hemmnis für eine breite technologische Entwicklung und die industrielle Realisierung. Für eine bessere Vergleichbarkeit von Produkten und Komponenten sind auch gemeinsame Bezugsgrößen (Benchmarks) wichtig.

Gerade im Bereich der Enabling Technologies sind gemeinsame Standards zu Spezifikationen, Schnittstellen und Protokollen von zentraler Bedeutung, damit Systemintegratoren die Komponenten planbar und wirtschaftlich in ihren Produkten nutzen können.

Das Programm unterstützt mit seinen Fördermaßnahmen auch solche FuE-Arbeiten, die der Vorbereitung von Standards dienen. Anlassbezogen sind auch maßnahmenübergreifende Begleitforschungsprojekte möglich, die aus dem Feld der geförderten Projekte solche Themen identifizieren, die für eine Standardisierung relevant sind, wie beispielsweise Standardprobleme der Quanteninformatik oder abgestimmte Schnittstellen und Benchmarks bei Strahlquellen.

9.6 International kooperieren

Die nationale Förderstrategie ist eingebettet in ein europäisches Wirtschafts- und Wissenschaftssystem. Es gilt, insbesondere im Rahmen des Programms *Horizont Europa*²⁵ ein starker und verlässlicher Partner zu sein. Dazu gehören die enge Abstimmung mit den Partnerländern und der europäischen Kommission sowie die aktive Mitwirkung an europäischen Maßnahmen.

Auch über die Grenzen Europas hinaus ist angestrebt, in bi- oder multinationalen Maßnahmen zu kooperieren. Voraussetzung dafür ist, dass sowohl auf wissenschaftlicher als auch auf wirtschaftlicher Ebene eine Zusammenarbeit auf Augenhöhe stattfindet, sodass alle Parteien von der Kooperation profitieren.

9.7 Nachwuchs fördern

Ein wissenschaftlich und technologisch komplexes Feld wie die Quantensysteme besitzt einen hohen Bedarf an gut ausgebildetem Personal, sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie. Nicht nur die Erforschung, sondern auch die Nutzung der neuen Technologien erfordert spezifische Kompetenzen. Aus diesem Grund müssen Absolvierende der relevanten Disziplinen wie Physik, Mathematik, Informatik und Ingenieurwissenschaften schon in ihren Ausbildungsgängen an Quantensysteme herangeführt werden. Dies gilt umso mehr, je weniger die naturwissenschaftlichen Grundlagen ohnehin Teil des fachlichen Curriculums sind.

Das BMBF fördert Pilotprojekte, die Formate und Angebote initiieren, die bestehende Bildungsangebote

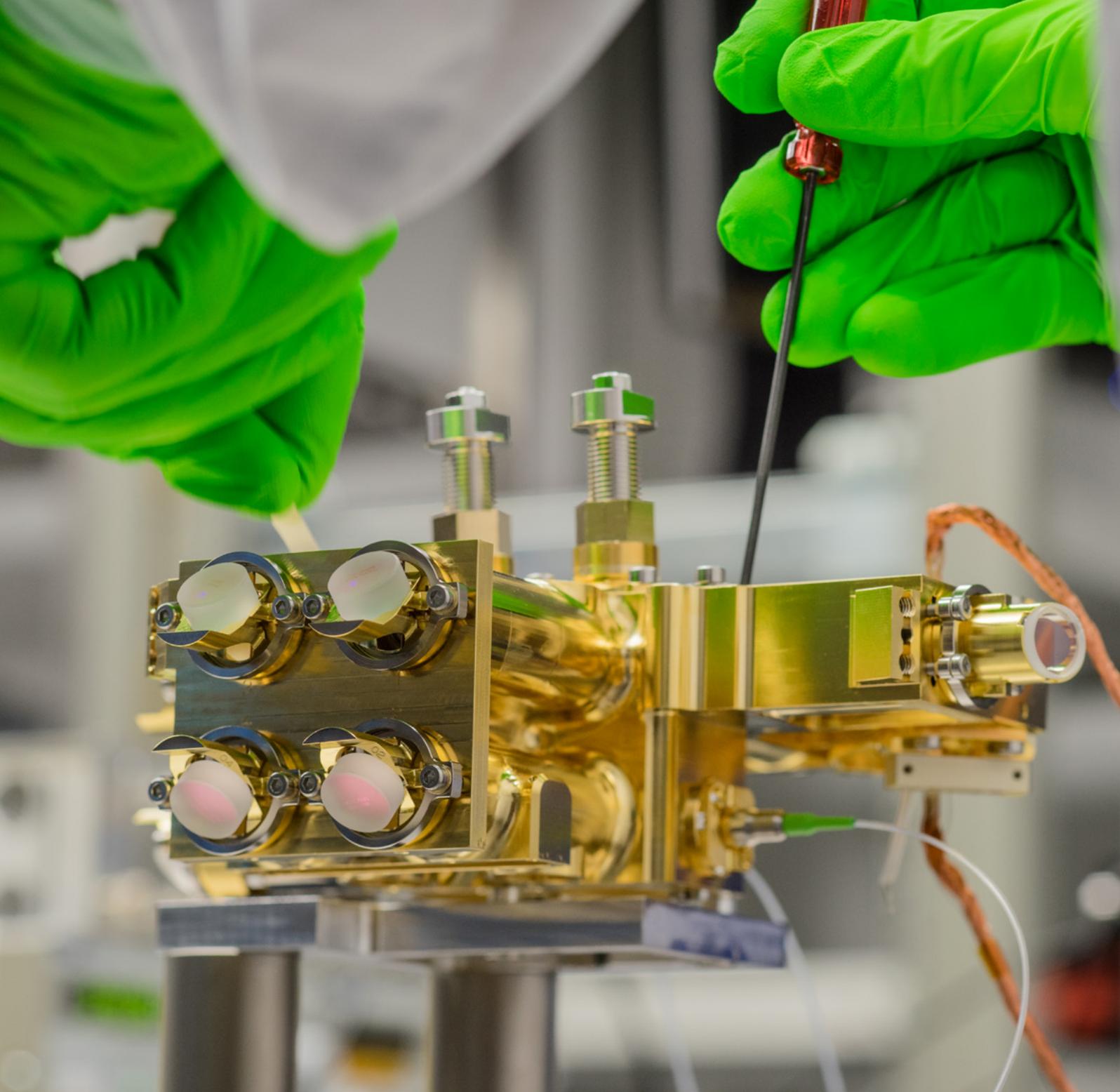
ergänzen. Ziel ist es, in Deutschland exzellente Kompetenzen für Quantensysteme zu schaffen – immer dann, wenn enge Kooperationen zwischen Unternehmen und Ausbildungsstätten einen Mehrwert erzeugen oder sich Bildungsfragen über die Ländergrenzen hinweg ergeben. Zu diesem Zweck hat das BMBF die Initiative *Quantum Futur* ins Leben gerufen. Ein umfassendes Maßnahmenbündel adressiert darin verschiedene Zielgruppen – vom Schüler bis zur Nachwuchsgruppenleiterin. Die Maßnahmen reichen von Förderinitiativen mit unterschiedlichem Schwerpunkt über die jährlich stattfindende *Quantum Futur Akademie* bis hin zur Verleihung des *Quantum Futur Award*. Die Initiative wird weitergeführt und flexibel am Bedarf ausgerichtet.

9.8 Wissenschaftskommunikation betreiben

Quantensysteme sind ein wissenschaftlich komplexes Zukunftsthema, dessen allgemeinverständliche Kommunikation mit Herausforderungen verbunden ist. Eine breite Beteiligung der interessierten Öffentlichkeit und Interessengruppen begünstigen die erfolgreiche Umsetzung und Nutzung dieser Technologie in Deutschland.

Wissenschaftskommunikation ist integraler Bestandteil der Forschungsförderung. Auf themenspezifischen Websites und Social-Media-Kanälen informiert das BMBF ausführlich und allgemeinverständlich über aktuelle Förderthemen. Redaktionelle Formate wie *Ein Quäntchen Wissen* oder *Fünf Fragen an ...* vermitteln komplexe Themen anschaulich. Dies soll weitergeführt und um innovative Formate erweitert werden. Beispielsweise können Ausstellungen oder Exponate in Museen physikalische Hintergründe und technologische Prinzipien erklären. Dialogformate mit Bürgerinnen und Bürgern können den Einfluss neuer Technologien auf unser Leben und Arbeiten aufgreifen – insbesondere in den sensiblen Bereichen Information und Kommunikation. Mit *Quantum Aktiv* hat das BMBF dem Thema Outreach eine eigene Förderrichtlinie gewidmet. Solche und ähnliche Aktivitäten werden verstärkt aufgegriffen werden, je reifer und damit erlebbarer Quantensysteme werden.

²⁵ horizont-europa.de



10. Rahmenbedingungen des Programms

Damit die in Kapitel 9 genannten Maßnahmen die angestrebte Wirkung entfalten und ihre Ziele erreichen können, ist langfristiges Handeln erforderlich. Daher ist das Forschungsprogramm Quantensysteme als offener, lernender Handlungsrahmen über eine Laufzeit von zehn Jahren bis inklusive 2031 angelegt.

10.1 Entstehung

Um den konkreten Handlungsbedarf auf dem Gebiet der Quantensysteme zu erfassen, wurde anstelle einer Ex-ante-Evaluation als strategisches Audit ein Agendaprozess durchgeführt. Über 300 Beteiligte aus Wissenschaft und Wirtschaft haben den Forschungsbedarf im Bereich Quantensysteme in der *Agenda Quantensysteme 2030* zusammengefasst. Die Ergebnisse dieses Prozesses sind in die Programmerstellung eingeflossen, ebenso wie die Ergebnisse der (Zwischen-)Evaluation des 2012 veröffentlichten Programms *Photonik Forschung Deutschland* des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF).

Diese Form des Dialogs mit der Fachcommunity besteht in der Photonik schon lange, wurde mit der *Agenda Quantensysteme 2030* intensiviert und um das Themenfeld Quantentechnologien erweitert. Das BMBF wird ihn zur Qualitätssicherung, Fortschreibung und strategischen Weiterentwicklung des Programms fortführen, um auf technologische, wirtschaftliche und gesellschaftliche Entwicklungen abgestimmt und zeitnah reagieren zu können. Hierzu dienen auch regelmäßige große Kongresse, bei denen das BMBF mit den wichtigsten Akteuren der Fachcommunity in den Austausch kommt.

Etwa für die Mitte der Programmlaufzeit ist ein weiterer Agendaprozess geplant, in dem der in der *Agenda Quantensysteme 2030* genannte Forschungsbedarf noch einmal geprüft sowie gegebenenfalls aktualisiert und ergänzt wird.

10.2 Einbindung

Die politischen Ziele des Forschungsprogramm Quantensysteme sind eingebettet in übergeordnete Strategien der Bundesregierung. Dies sind insbesondere die *Zukunftsstrategie Forschung und Innovation*²⁶ und die *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie*²⁷.

Weiterhin hat das Programm Berührungspunkte mit zahlreichen weiteren laufenden oder geplanten

²⁶ [bundesregierung.de/breg-de/suche/fortschritt-durch-forschung-1986628](https://www.bundesregierung.de/breg-de/suche/fortschritt-durch-forschung-1986628)

²⁷ [bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/eine-strategie-begleitet-uns](https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/nachhaltigkeitspolitik/eine-strategie-begleitet-uns)

Strategien und Programmen der Bundesregierung und ihren Ressorts. Besonders starke Bezüge bestehen zum *Forschungsrahmenprogramm der Bundesregierung zur IT-Sicherheit*²⁸, zum *Forschungsprogramm Kommunikationssysteme*²⁹, zum *Rahmenprogramm der Bundesregierung für Forschung und Innovation im Bereich der Mikroelektronik*³⁰ und zum *Fachprogramm Medizintechnik: Patientenversorgung verbessern – Innovationskraft stärken*³¹.

10.3 Lernendes Programm, Evaluation

Die Mission des Forschungsprogramms Quantensysteme (siehe Kapitel 1), die dynamische Entwicklung des Themenfelds sowie zu erwartende Veränderungen der ökonomischen und technisch-wissenschaftlichen Rahmenbedingungen machen ein stetiges Monitoring sowie eine Fortentwicklung des Programms nötig. Eine regelmäßige Überprüfung der Meilensteine der Programm-Mission, eine schnelle Anpassung an die wissenschaftlich-technischen Entwicklungen und eine Orientierung an den Leitmärkten tragen dieser Dynamik Rechnung. Wenn nötig, kann die Förderung des Forschungsprogramms so im Hinblick auf die Erreichung der Meilensteine ausgerichtet werden. Bei veränderten Rahmenbedingungen oder neuen technisch-wissenschaftlichen Dynamiken sind neue Ziel-, Aufgaben- und Prioritätensetzungen ebenso möglich.

In der operativen Forschungsförderung werden vor der Bekanntmachung neuer Förderrichtlinien die maßgeblichen Fachbereiche und -partner aus dem wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Umfeld einbezogen. Dies geschieht beispielsweise in Form von Technologieanalysen, Foresight-Prozessen sowie Expertengesprächen. Dabei werden auch disruptive Meinungen und Perspektiven mit einbezogen (über sogenannte Musterbrecher). So werden die Fördermaßnahmen dem tatsächlichen Entwicklungsstand angepasst und neuen Ideen wird frühzeitig Raum gegeben.

²⁸ [forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/digital_sicher_souveraen](https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/digital_sicher_souveraen)

²⁹ [forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/souveraen_digital_vernetzt](https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/souveraen_digital_vernetzt)

³⁰ [bmbf.de/bmbf/de/forschung/digitale-wirtschaft-und-gesellschaft/mikroelektronik/mikroelektronik.html](https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/digitale-wirtschaft-und-gesellschaft/mikroelektronik/mikroelektronik.html)

³¹ [gesundheitsforschung-bmbf.de/files/BMBF_Fachprogramm-Medizintechnik_2020_barrierefrei.pdf](https://www.gesundheitsforschung-bmbf.de/files/BMBF_Fachprogramm-Medizintechnik_2020_barrierefrei.pdf)

Tabelle 1: Meilensteine der Mission des Forschungsprogramms Quantensysteme.

Technologiefeld	Meilensteine
Quantencomputing	<ul style="list-style-type: none"> · Bis 2026: international wettbewerbsfähiger Quantenrechner mit mindestens 100 individuell ansteuerbaren Qubits, skalierbar auf 500 Qubits · Bis 2026: Vervielfachung der Start-ups in Deutschland auf ≥ 20; ≥ 60 Endanwender in Deutschland, unter anderem in Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft · Bis 2032: Quantenvorteil in mindestens zwei praxisrelevanten Anwendungen in Deutschland demonstrieren · Bis 2032: Weltspitze in Publikationen halten (Top 3) und bei Patenten ausbauen (in Top 5)
Quantensensorik	<ul style="list-style-type: none"> · Bis 2026: 5 neue Produkte am Markt · Bis 2032: ≥ 60 Unternehmen involviert, davon 10 Start-ups · Bis 2032: Weltspitze in Publikationen halten (Top 2) und bei Patenten ausbauen (in Top 5)
Photonik	<ul style="list-style-type: none"> · Bis 2026: ≥ 30 Photonik-Unternehmen in Quantentechnologien involviert · Bis 2032: ≥ 1 ein neuer, forschungsintensiver Leitmarkt für die deutsche Photonik-Industrie erschlossen

Im Hinblick auf die Zielerreichung der Mission des Forschungsprogramms wurden folgende Meilensteine (siehe Tabelle 1) in den drei Technologiefeldern Quantencomputing, Quantensensorik und Photonik festgelegt, die regelmäßig überprüft und bei Bedarf aktualisiert werden können. Die Meilensteine orientieren sich zeitlich mit 2026 am Ende der 20. Legislaturperiode und 2032 an der Laufzeit des Forschungsprogramms.

Die genannten Meilensteine der Mission des Forschungsprogramms bilden die forschungspolitische Ebene der Zielerreichungskontrolle. Gleichzeitig erzielt ein zehn Jahre laufendes Förderprogramm zahlreiche weitere Wirkungen auf verschiedenen Wirkungsebenen. Mit Blick auf diese Wirkungsebenen (Output, Outcome, Impact) wurden aus der

Mission (Wettbewerbsfähigkeit in den Quantensystemen) und den weiteren Zielen des Programms (siehe Kapitel 5) erste übergreifende sowie themenspezifische Indikatoren abgeleitet, welche einen Ansatz für die erweiterte Erfolgskontrolle des Programms (siehe Tabellen 2 und 3) darstellt. Diese Indikatoren bilden die Basis für die Konzeption einer professionellen externen Evaluation (begleitend nach fünf Jahren und ex post). Die Expertise der externen Evaluatoren wird für die finale Definition der Indikatoren ausschlaggebend sein. Insgesamt soll in der Programmevaluation ein Methoden-Mix aus quantitativen und qualitativen Untersuchungsmethoden angestrebt werden unter Nutzung von beispielsweise ökonomischen Ansätzen, randomisierten Kontrollgruppen, strukturierten/repräsentativen Befragungen sowie Experteninterviews.

Tabelle 2: Zusätzliche Indikatoren für die Evaluation der Mission des Programms.

Mission	Zusätzliche Indikatoren für die Erfolgskontrolle durch Evaluationen (nicht abschließend)
Deutschland in der nächsten Dekade im europäischen Verbund im Quantencomputing und in der Quantensensorik an die Weltspitze führen und die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands in den Quantensystemen ausbauen	Anzahl Forschungsk Kooperationen, Kennzahlen Fachkräfteausbildung, Anzahl Transfers neuer technologischer Lösungen und Produktinnovationen, Performance deutscher Unternehmen im weltweiten Vergleich

Tabelle 3: Zusätzliche Indikatoren für die Evaluation des Programms.

Zusätzliche Ziele und übergreifende Indikatoren	Zusätzliche Indikatoren für die Erfolgskontrolle durch Evaluationen (nicht abschließend)
Technologische Souveränität in den Quantensystemen sichern	Anzahl im Themenfeld aktiver Unternehmen, Abdeckungsgrad von Wertschöpfungsketten, Indikatoren zur Fachkräftebasis, Produktionsvolumen und Exportanteil am Weltmarkt
Die Chancen des technologischen Wandels für Wirtschaft und Gesellschaft nutzen (mit Quantensystemen)	Breite des Spektrums neuer Lösungen, Grad der wirtschaftlichen/ gesellschaftlichen Nutzung, Umfang Bürgerbeteiligung, Breite des Spektrums von Anwendungen, für die Quantensysteme Lösungen bieten
Nachhaltigkeit in Wirtschaft und Gesellschaft mit Quantensystemen fördern	Anzahl Kontakte zu Anwendern nachhaltiger Lösungen, Anzahl der Lösungen zu SDGs 3, 9, 11, 12 und 13, Einsparung/Vermeidung klimaschädlicher Emissionen, Ressourceneinsparungen, Effekte auf die Gesundheitsversorgung
Übergreifende Wirkungsindikatoren	Umfang FuE-Aktivitäten und Aufwendungen (privat/öffentlich), Anzahl erfolgreich durchgeführter FuE-Projekte, Grad der Nutzung in Schlüsselbranchen, Anzahl neuer Kooperationen, Volumen privater Investitionen

Glossar

CCS: Carbon Capture oder Carbon Dioxide Capture and Storage

Ein Verfahren zur Bindung und dauerhaften Einlagerung von Kohlendioxid aus der Atmosphäre.

Fehlstellen in Diamant oder NV-Zentren:

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

FuE: Forschung und Entwicklung

Bezeichnet vor allem vorwettbewerbliche Arbeiten in einem Unternehmen oder einer Forschungseinrichtung mit einem signifikanten technischen Risiko. Im Gegensatz zur wettbewerblichen oder experimentellen Entwicklung sowie Produktentwicklung.

Gaszellen:

Kleinräumiges (typischerweise wenige Kubikzentimeter fassendes) Gerät zur hochgenauen Messung von Magnetfeldern und Magnetfeldänderungen. Dazu wird die Zelle zumeist mit einem Gemisch aus Edelgasen und Metallatomen gefüllt. Durch das Anlegen von Magnetfeldern und Laseranregung lässt sich die Präzession der Kernspins der Edelgase und deren Änderung präzise messen. Das ermöglicht unter anderem auch die Realisierung eines Kernspin-Gyroskops.

GPS: Global Positioning System

Globales Navigationssatellitensystem zur Positionsbestimmung. Das System hat sich zum weltweit wichtigsten Ortungsverfahren etabliert und wird in Navigationssystemen genutzt.

Gyroskop:

Messinstrument, das die achs stabile Lage von Kreiseln zur Richtungs- oder Drehratenbestimmung ausnutzt. Früher vor allem Nutzung in Form eines

Kreiselkompasses in See- und Luftfahrt. Ein vergleichbarer Effekt lässt sich bei atomaren Kernspins beobachten. Daraus lassen sich extrem kompakte Kernspin-Gyroskope ohne makroskopische bewegliche Teile konstruieren, die in der Raumfahrt oder beim autonomen Fahren Einsatz finden können.

Haber-Bosch-Verfahren:

Standardverfahren zur Herstellung von Ammoniak aus Bestandteilen der Atmosphäre.

Hyperspektralsensoren:

Sensoren für das gleichzeitige Aufnehmen von Spektren in einer Vielzahl von Wellenlängen auf einem Sensorchip. Es können dabei teilweise Dutzende Wellenlängen in einem typischen Bereich vom sichtbaren bis ins nahe Infrarot abgebildet werden. Anwendung in der Industrie und in der Landwirtschaft (Smart Farming).

IIoT: Industrial Internet of Things

Vernetzung und (oft KI-basierte) Auswertung von Produktionsprozessen, Sensorinformationen, Produkt- und Kundeninformationen sowie von Energie- und Zeitmanagementprozessen in der industriellen Produktion. Ziele können zum Beispiel Energie- und Kosteneinsparungen in der Produktion oder die Individualisierung von Produkten sein.

IoT: Internet of Things

Vernetzung von Alltagsgegenständen untereinander und mit dem Internet, zum Beispiel zur Steuerung von Heizungsanlagen oder der Raumbeleuchtung über das Smartphone.

KMU: kleine und mittlere Unternehmen

Entsprechend der EU-Definition Unternehmen mit weniger als 250 Mitarbeitern und einem Jahresumsatz von höchstens 50 Mio. Euro oder einer Bilanzsumme von höchstens 43 Mio. Euro.

LED: Light-Emitting Diode

Halbleiterbauelement, das Licht ausstrahlt, wenn elektrischer Strom in Durchlassrichtung fließt.

LED-Leuchtmittel haben aufgrund ihrer guten Lichtausbeute viele andere Leuchtmittel im Alltag ersetzt.

LIDAR: Light Detection and Ranging

Entfernungsbestimmung und Detektion von Gegenständen bzw. Hindernissen mithilfe von Laserlicht; analog zu Radar.

MEG: Magnetoenzephalografie

Magnetische Hirnstrommessung, analog zu der elektrischen Hirnstrommessung Elektroenzephalografie (EEG) ein nichtinvasives Verfahren zur Messung der Gehirnaktivität. Die Methode wird in der Gehirnforschung eingesetzt und soll zukünftig auch therapeutisch, zum Beispiel für die Steuerung von Prothesen, genutzt werden können.

NISQ: Noisy-Intermediate-Scale-Quantum-Computer

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

Optische Uhr:

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

Optogenetik:

Genetisches Verfahren zur Lichtsensibilisierung von lebenden Zellen. Durch die Einbringung von speziellen Proteinen in tierische oder menschliche Zellen können diese zu einer elektrischen Reaktion auf Lichtreize befähigt werden. Dies funktioniert zum Beispiel auch in Hör-, Gehirn-, oder Muskelzellen.

PIC: Photonic Integrated Circuit (Photonische integrierte Schaltung)

In Analogie zu elektronischen integrierten Schaltungen ein monolithisch aufgebauter Chip (zum Beispiel auf Basis von Indiumphosphid) mit mehreren optischen Funktionalitäten gleichzeitig. Einfache

Beispiele sind durchstimmbare Laser mit Cavity und Braggspiegel auf demselben Chip.

PQK: Post-Quanten-Kryptografie

Bezeichnung für das Erfordernis, aktuelle Verschlüsselungsverfahren weiterentwickeln oder ersetzen zu müssen, wenn diese auf Basis der neuen Rechenmöglichkeiten von Quantencomputern als nicht mehr sicher erachtet werden können.

QKD: Quantum-Key-Distribution

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

Qubits: Quantum Bits

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

Rapid Prototyping:

Oberbegriff für die schnelle Herstellung prototypischer Bauteile im Rahmen von Designprozessen oder FuE-Arbeiten in der Industrie, aber auch in Architektur und Kunst. Ein Beispiel ist der 3-D-Druck von Bauteilen aus Kunststoff oder Metall.

SDGs: Sustainable Development Goals

17 Ziele der Vereinten Nationen für eine ökonomische, soziale sowie ökologische Entwicklung der Staatengemeinschaft. sdgs.un.org/goals.

Sekundärstrahlquellen:

Laser mit extrem hoher Leistung ermöglichen die Generation von Röntgenstrahlung oder die Beschleunigung von Teilchen auf nahezu Lichtgeschwindigkeit, durch die wiederum Strahlung oder Neutronen erzeugt werden können. Diese Sekundärstrahlung lässt sich zu Forschungszwecken zum Beispiel bei einem Synchrotron oder einer Spallationsquelle verwenden, jedoch mit drastisch reduziertem finanziellem Aufwand und Formfaktor („Table-Top-Synchrotron“).

Sensorfusion:

Verknüpfung und intelligente Auswertung mehrerer Sensorinformationen und -modalitäten auf einem Chip oder in einem System. Nutzbar zum Beispiel für die Automatisierung in der Industrie oder im Smart Home.

SiP: System-in-Package

Im Gegensatz zu System-on-a-Chip werden Systemfunktionen auf unterschiedlichen Chips realisiert und im Folgenden auf möglichst kleinem Raum (dem Package) verbunden, gestapelt oder geklebt.

Smart Farming:

Sammelbegriff für verschiedene Technologien zur Optimierung, Digitalisierung und Automatisierung in der Landwirtschaft. Ziele sind Ertragserhöhungen, Reduktion von Personaleinsatz und insbesondere die Reduktion von Düngemitteln und Pestiziden zur Schonung des Bodens und der Fauna. Hierfür werden Daten von Satelliten, Drohnen und Bodensensoren oder hyperspektraler Bildgebung herangezogen.

SmartX:

Überbegriff für „smarte“ Produkte und Anwendungen durch die Kombination mit Methoden der Digitalisierung wie maschinellem Lernen oder künstlicher Intelligenz, zum Beispiel Smart Home, Smart City etc.

SoC: System-on-Chip oder System-on-a-Chip

Integrierte Realisierung mehrerer Systemfunktionen auf einem Chip-/Halbleitersubstrat. Zum Beispiel Sensorik und Auswerteelektronik.

SQUID: Superconducting Quantum-Interference-Device

Messgerät zur Detektion kleinster Magnetfeldänderungen, basierend auf einem stromdurchflossenen, supraleitenden Ring. Erstmalig beschrieben durch Brian Josephson 1962.

Superresolutionsmikroskopie:

Oberbegriff für die optische Mikroskopie unterhalb des eigentlich physikalisch möglichen optischen Auflösungslimits (Beugungslimits). Hierfür nutzt man verschiedene Verfahren und Effekte. Bei der Stimulated Emission Depletion (STED)-Mikroskopie verwendet man ein geschicktes An- und Abregungsmuster der Fluoreszenz auf der Probe, um die tatsächlich abgebildete Fläche zu reduzieren.

Theragnostik:

Verzahnung von Therapie und Diagnostik in der Medizin durch neuartige technologische Möglichkeiten, zum Beispiel Früherkennung von Krankheiten durch neue Nachweismethoden und dadurch mögliche proaktive Therapieansätze oder laufende Diagnosen während einer Therapie zur Verbesserung und Individualisierung von Therapieansätzen.

Time-Domain-Multiplexing:

Methode zur Übertragung von Datenströmen verschiedener Sender mithilfe eines einzigen Signals. Dafür werden die Daten senderseitig durch einen sogenannten Multiplexer in kurze Sequenzen aufgeteilt und in einem Signal periodisch zusammengefügt. Auf der Empfängerseite wird dann zur Interpretation ein sogenannter Demultiplexer benötigt.

Impressum

Herausgeber

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

Bestellungen

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

Stand

Juni 2022

Text

BMBF

Gestaltung

familie redlich AG – Agentur für Marken und Kommunikation
KOMPAKTMEDIEN – Agentur für Kommunikation GmbH

Druck

BMBF

Bildnachweise

Titel: Adobe Stock/Maksim Kabakou
S.4: Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB
S.6: TRUMPF Group
S.7: TOPTICA Photonics AG
S.7: Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB
S.7: Bayerische Akademie der Wissenschaften BADW/
Kai Neunert
S. 10: TOPTICA Photonics AG
S. 13: bundesfoto/Kurc
S. 14: Laser Zentrum Hannover e.V.
S. 18: Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB
S. 25: IQM Quantum Computers
S. 32: Adobe Stock/KK imaging
S. 35: Leibniz-IPHT/Sven Döring
S. 36: Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und
Feinmechanik IOF
S. 41: Fraunhofer-Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF
S. 44: Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und
Feinmechanik IOF

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.

