

AGENDA
QUANTENSYSTEME
2030

Für die deutschen Photonik- und Quantentechnologien-Communitys

Der Programmausschuss „Quantensysteme“

Prof. Dr. Immanuel Bloch

Max-Planck-Institut für Quantenoptik
(MPQ) und Ludwig-Maximilians-Universität
München

Prof. Dr. Dagmar Bruß

Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf

Prof. Dr. Tommaso Calarco

Forschungszentrum Jülich
und Universität zu Köln

Prof. Dr. Jens Eisert

Freie Universität Berlin

Dipl.-Phys. Rainer Erdmann

PicoQuant GmbH

Prof. Dr. Stefan Filipp

Walther-Meißner-Institut der Bayerischen
Akademie der Wissenschaften und
Technische Universität München

Dr. Christoph Glingener

ADVA Optical Networking SE

Prof. Dr. Doris Heinrich

Fraunhofer-Institut für Silicatforschung ISC
und Technische Universität Ilmenau

Dr. Ronald Holzwarth

Menlo Systems GmbH

Dr. Andre Kretschmann

Robert Bosch GmbH

Dr.-Ing. E. h. Peter Leibinger

TRUMPF GmbH + Co. KG

Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien

Ludwig-Maximilians-Universität München

Dr. Sebastian Luber

Infineon Technologies AG

Dr. Christoph Marquardt

Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts
(MPL)

Prof. Dr. Dieter Meschede

Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität
Bonn

Dr. Sven Otte

Sicoya GmbH

Prof. Dr. Piet Schmidt

Physikalisch-Technische Bundesanstalt und
Leibniz Universität Hannover

Dr. Ulrich Simon

Carl Zeiss AG

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik
und Feinmechanik IOF und Friedrich-
Schiller-Universität Jena

Vorwort

Anfang des 20. Jahrhunderts begann mit der Entwicklung der Quantentheorie das, was man als die erste Quantenrevolution bezeichnen kann. Mit der neu entwickelten Theorie ließen sich physikalische Phänomene erklären und exakt berechnen, die mit der klassischen Physik nicht zu beschreiben waren. Ohne die Erkenntnisse der Quantenphysik sähe unser tägliches Leben völlig anders aus: Laser, Smartphone, Internet und GPS gäbe es nicht. Auch die moderne Chemie, Pharmazie und medizinische Diagnostik, wie wir sie heute kennen, wären ohne diese Erkenntnisse undenkbar.

Auf der Quantenphysik fußt auch die Photonik – die technische Nutzung von Licht. Hier ist eine starke Branche entstanden, in der Unternehmen aus Deutschland heute weltweit mit an der Spitze stehen.

Doch die technologischen Möglichkeiten der Quantenphysik sind noch längst nicht ausgeschöpft. Der zweite Schritt verspricht, ebenso revolutionär zu werden wie der erste. Die mit dem Begriff Quantentechnologien bezeichneten Entwicklungen werden das Leben der Menschen im 21. Jahrhundert maßgeblich beeinflussen und verändern.

Die Quantentechnologien stehen zwar noch am Anfang, aber sie besitzen enormes Potenzial: Ultrapräzise Quantensensorik für die Hirnforschung, absolut sichere Quantenkommunikation oder Quantencomputer für die Entwicklung von maßgeschneiderten Materialien oder chemischen Verbindungen – der weltweite Wettstreit um die besten Konzepte und Köpfe hat begonnen.

Für die langfristige wirtschaftliche Entwicklung Deutschlands und Europas werden die Quantentechnologien eine zentrale Bedeutung haben. Die Weichen für eine innovative Forschung mit einer anschließenden erfolgreichen Umsetzung dieser Forschungsergebnisse in marktfähige Produkte und Dienstleistungen werden heute gestellt.

International sind die Quantentechnologien stark umworben. Deutschland muss sich in diesem Innovationswettstreit behaupten. Wir sind davon überzeugt, dass wir erfolgreich sein können, wenn wir



Dr.-Ing. E. h. Peter Leibinger



Prof. Dr. Immanuel Bloch

auf unsere Stärken setzen: Wir haben in Deutschland und Europa Spitzenforschung, herausragende Köpfe und Ideen.

Es gilt nun, unsere Kräfte zu bündeln, die Quantentechnologien voranzutreiben und gleichzeitig die starke Position in der Photonik weiter auszubauen. Wir müssen die Community zusammenführen, Netzwerke schaffen, in enger Zusammenarbeit von Wissenschaft und Wirtschaft vorgehen, neue Anwendungsgebiete der Quantentechnologien erforschen und diese Forschungsthemen dann schnell in die Anwendung bringen. Dafür brauchen wir einen gemeinsamen Rahmen.

Um Handlungsempfehlungen für zukünftige Aktivitäten zu erarbeiten, solch einen Rahmen zu setzen und eine fundierte Grundlage für ein mögliches Förderprogramm „Quantensysteme“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung zu schaffen, haben wir gemeinsam mit vielen Beteiligten der Fachcommunity die vorliegende Agenda verfasst. Das große Engagement von Stakeholdern aus Forschung und Industrie aus den Bereichen der Photonik und der Quantentechnologien zeigt uns den Weg: Wir brauchen den Schulterschluss von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik.

Prof. Dr. Immanuel Bloch

Direktor des Max-Planck-Instituts für Quantenoptik (MPQ)
Professor für Experimentalphysik,
Ludwig-Maximilians-Universität München

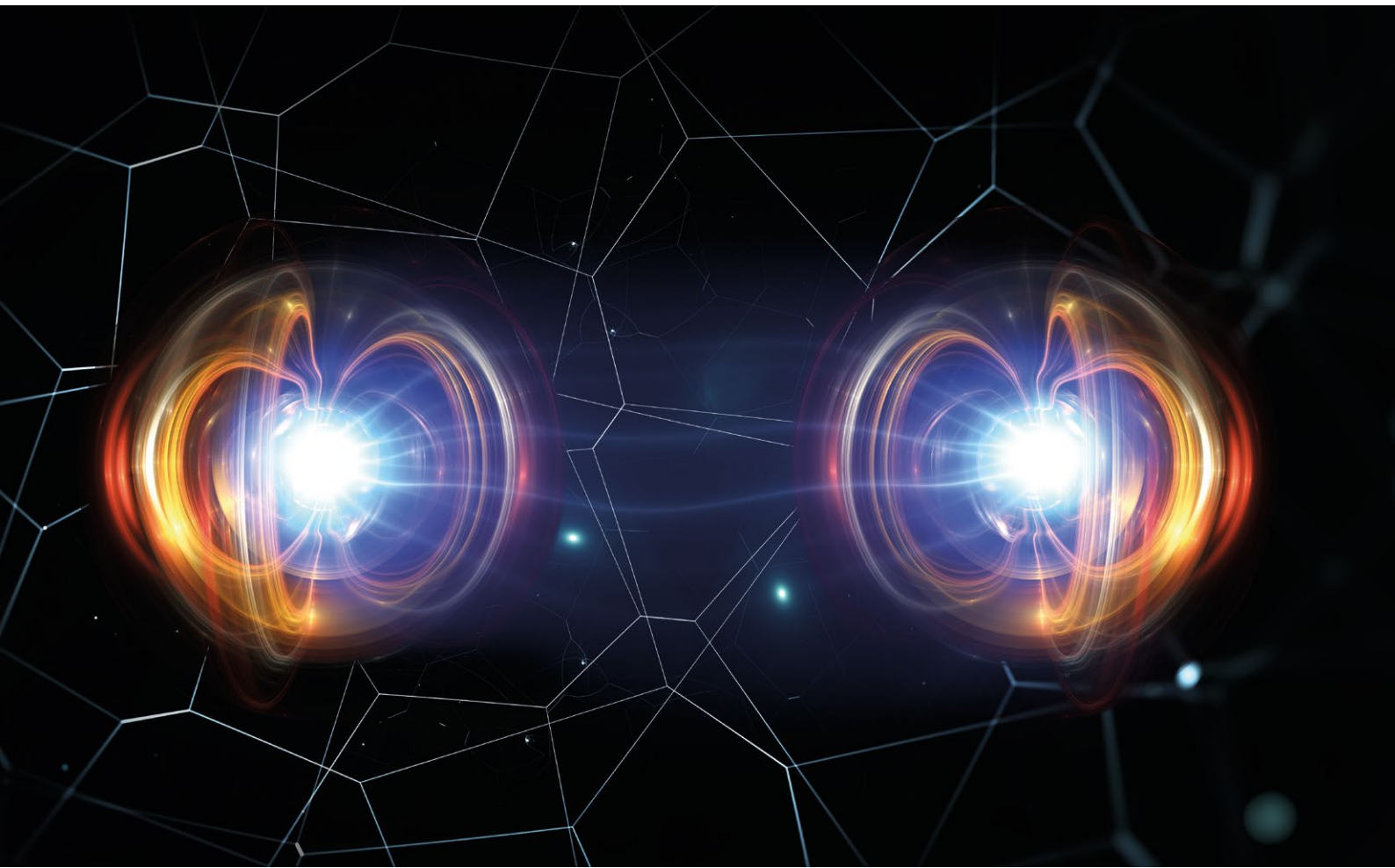
Dr.-Ing. E. h. Peter Leibinger

Geschäftsführender Gesellschafter
und Chief Technology Officer (CTO)
TRUMPF GmbH + Co. KG

INHALT

1. Executive Summary	3
2. Einführung	6
3. Themenfelder	10
3.1 Quantencomputing und Quantensimulation	11
3.2 Quantenkommunikation	19
3.3 Quantenmesstechnik und Sensorsysteme	28
3.4 Integrierte Quantenplattformen und Enabling Technologies	37
3.4.1 Materialien, Komponenten und adaptierte Fertigungstechnologien als Basis für die Realisierung von Quantenplattformen	41
3.4.2 Module und Systeme für die Präparation, Detektion, Kontrolle, Manipulation und das Auslesen von Quantenzuständen	50
3.4.3 Systemkritische Basistechnologien für Design, Simulation, Fertigung und Charakterisierung	56
3.5 Education, Training, Outreach, Kooperation und Vernetzung	60
3.5.1 Education, Training und Outreach	60
3.5.2 Kooperation und Vernetzung	70
Abkürzungsverzeichnis	74

**EXECUTIVE
SUMMARY**



Die wesentlichen Ergebnisse des Agenda-prozesses lauten zusammengefasst:

- Die Erforschung der Quantentechnologien steht in vielen Teilbereichen noch am Anfang. Deutschland hat dabei eine hervorragende Ausgangsposition: Die meisten notwendigen Kompetenzen sind vorhanden, die Wertschöpfungskette von potenziellen Anwendern bis zu den Herstellern zentraler Enabling Technologies lässt sich schließen. Um die wirtschaftlichen Chancen zu nutzen, ist eine Führungsposition im Bereich der Quantentechnologien auch im Hinblick auf die Technologiesouveränität entscheidend. Um dieses Ziel in Deutschland zu erreichen, ist eine langfristig angelegte Förderstrategie notwendig.
- Forschungsergebnisse aus der Quantentechnologien sollen in wirtschaftlich erfolgreiche Produkte und Dienstleistungen überführt werden. Dazu sind neben der staatlichen Förderung auch erhebliche private Investitionen notwendig. Die Fachbranche hat die Potenziale der Quantentechnologien erkannt und ist bereit, im Schulterschluss mit Wissenschaft und Politik entsprechende Investitionen zu tätigen. Um gewinnbringende Märkte zu erschließen, müssen potenziellen Anwendern die Chancen und Risiken der Quantentechnologien insbesondere in den Bereichen Quantencomputing und Quantenkommunikation aufgezeigt werden. In den Bereichen Sensorik und Bildgebung bestehen bereits heute gute Aussichten für eine erfolgreiche Umsetzung von Forschungsergebnissen. Bei der Planung und Umsetzung von Fördermaßnahmen müssen Technologieanwender und marktbeeinflussende übergeordnete Institutionen wie Netzbetreiber, Zertifizierungsstellen etc. eingebunden werden.
- In den Quantentechnologien ist die deutsche FuE-Landschaft in der Grundlagenforschung an vielen Stellen hervorragend aufgestellt und gehört in einigen Bereichen zur Weltspitze. Ein Ergebnis- und Technologietransfer in die Indus-

trie und die angewandte Forschung findet aber häufig nicht oder nur in sehr geringem Umfang statt. Unternehmen müssen von Beginn an in den FuE-Prozess eingebunden werden, um eine ausreichende Anwendungsorientierung zu gewährleisten. Hier gilt es, mit entsprechenden Belohnungsmodellen Anreize zu schaffen, um Projektpartner zu gewinnen, die Kooperation in anwendungsorientierten Forschungsprojekten zu stärken und den Know-how- und Technologietransfer zu sichern. So entsteht eine Grundlage für die wirtschaftliche Verwertung der Forschungsergebnisse.

- Hoher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht im Bereich der Enabling Technologies für die Quantentechnologien. Dies betrifft besonders die Photonik. Hier werden beispielsweise Einzelphotonenquellen, Detektoren für Einzelphotonen sowie Verfahren für die photonische Mikrointegration benötigt. Daneben sind Technologien für effiziente und kompakte Kühlung und miniaturisierte Hochvakuumtechnik zu entwickeln. Dies bietet große Chancen für die etablierte, von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) geprägte Photonikbranche, aber auch für quantentechnologiespezifische Ausgründungen und Start-ups. Eine gezielte Förderung der Enabling Technologies, attraktive Rahmenbedingungen und niedrige Einstiegshürden in die Förderung besonders für Start-ups und KMU sind daher notwendige Bedingungen für den Erfolg der Quantentechnologien.

- Deutschland hat eine gute Ausgangsposition, um im Bereich Quantentechnologien erfolgreich zu sein.

Branchen und Forschungslandschaft sind gut aufgestellt, aber es kommt auch darauf an, die Aktivitäten zu koordinieren und auf gemeinsame Ziele auszurichten. Unter anderem müssen die Bereiche Quantentechnologien

und Photonik auf den Ebenen Industrie und Wissenschaft sowie zwischen diesen Ebenen stärker miteinander vernetzt werden. Fördermaßnahmen müssen beispielsweise durch Verbundprojekte diese Vernetzung unterstützen und grundsätzlich die unbedingt notwendige interdisziplinäre Zusammenarbeit stärken.

- Der Fortschritt in den Quantentechnologien hängt entscheidend davon ab, ob auf allen Ebenen gut ausgebildetes Fachpersonal verfügbar ist. Um dies zu gewährleisten, müssen maßgeschneiderte Studiengänge sowie Aus- und Weiterbildungsangebote entwickelt und etabliert werden. Dabei besteht die Herausforderung darin, die unverzichtbaren Kenntnisse aus den verschiedenen Disziplinen wie der Physik, der Informationsverarbeitung und den Ingenieurwissenschaften in diese Studiengänge und Ausbildungen zu integrieren.
- Die Quantentechnologien werden alle Bereiche der Gesellschaft, der Wissenschaft und Techno-

logie und insbesondere der Wirtschaft disruptiv beeinflussen. Dementsprechend hoch ist der Stellenwert von Outreach-Maßnahmen, welche die Bedeutung des Themenfelds für die genannten Bereiche bei Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern sichtbar und das Wissen darüber zugänglich machen. Daneben ist es mindestens genauso wichtig, einer breiten Öffentlichkeit die Chancen und Risiken dieser

neuen Technologie zu vermitteln und dafür Sorge zu tragen, dass die Quantentechnologien als weitere positive Errungenschaft der Menschheit wahrgenommen werden.

Branchen und Forschungslandschaft in den Quantentechnologien sind gut aufgestellt, aber es kommt auch darauf an, die Aktivitäten zu koordinieren und auf gemeinsame Ziele auszurichten.



EINFÜHRUNG

Mit der Photonik und den Quantentechnologien hat das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) seit 2018 zwei wegweisende Zukunftstechnologien unter dem Begriff „Quantensysteme“ zusammengefasst. Diese Zusammenführung geschah keineswegs willkürlich: Thematisch sind die beiden Forschungsfelder eng verwandt, es gibt zahlreiche Schnittmengen und Synergien. Die Photonik ist an vielen Stellen zentrale Enabling Technology (Basistechnologie) für quantentechnologische Anwendungen. Gleichzeitig ist sie selbst Teil der Quantentechnologien, beispielsweise in den Bereichen Quantenimaging oder bei photonischen Ansätzen für das Quantencomputing.

Das seit 2012 bestehende BMBF-Förderprogramm „Photonik Forschung Deutschland“ wurde bewusst als lernender offener Handlungsrahmen angelegt und trug mit seinen Maßnahmen maßgeblich dazu bei, dass die Photonik heute zu den wichtigsten Wachstums- und Zukunftsbranchen der deutschen Wirtschaft zählt. In Deutschland erwirtschaften 142.500 Beschäftigte in 1.000 Photonikunternehmen einen Jahresumsatz von 37,5 Milliarden Euro (Datenbasis 2019).¹ Die deutsche Photonikbranche wirtschaftet mit einem hohen Exportanteil von über 72 Prozent, die Forschungs- und Entwicklungsquote (FuE-Quote) der Photonik liegt mit fast 10 Prozent weit über dem Durchschnitt der verarbeitenden Industrie (weniger als 5 Prozent).² Als Innovationstreiber und Basis für die Entwicklung und Herstellung der Produkte zahlreicher anderer Branchen beeinflusst sie zudem einen großen Anteil der über acht Millionen Arbeitsplätze des produzierenden Gewerbes. Bis 2022 wird für die Schlüsseltechnologie ein Weltmarkt von fast 800 Milliarden USD bei einem jährlichen Wachstum von etwa 6–8 Prozent vorhergesagt.³

Im Vergleich zur Photonik steht das Themenfeld Quantentechnologien noch am Anfang des Innovationszyklus: Einige Teilbereiche wie die Quantensensorik oder die Quantenbildgebung machen ak-

tuell erste Schritte in Richtung einer tatsächlichen Anwendung und wirtschaftlichen Verwertung, in anderen Teildisziplinen wie dem Quantencomputing ist noch viel Grundlagenforschung zu leisten, um dies zu erreichen. Aber auch hier sehen erste Anwender das enorme Potenzial und investieren Ressourcen: Automobilindustrie und Maschinenbau erkennen beispielsweise Chancen im Bereich der Prozessoptimierung, die chemische und die Pharmaindustrie erwarten deutliche Innovationssprünge im Bereich der Simulation komplexer Moleküle und Materialien.

Im Bereich der Quantentechnologien bündelt die Bundesregierung seit 2018 unter der Federführung des BMBF mit dem Rahmenprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ ihre Kräfte. Mit dem Programm werden bis 2022 in der aktuellen Legislaturperiode 650 Millionen Euro für die Erforschung der Quantentechnologien bereitgestellt.

Erste wichtige Maßnahmen zur Erforschung von Quantencomputern, Quantensensoren sowie zur Nachwuchsförderung wurden bereits auf den Weg gebracht. Daneben werden Aktivitäten unterstützt, mit denen den Menschen die neue Technologie und ihre Möglichkeiten und Folgen nahegebracht werden. Es zeigt sich jedoch, dass größere Anstrengungen notwendig sind, um Deutschland und Europa im Bereich Quantentechnologien zum Erfolg zu führen.

Als Auftakt hierfür hat die Fachcommunity mit Unterstützung des BMBF einen Agendaprozess initiiert mit dem Ziel, eine Forschungsagenda für die Entwicklung der Quantensysteme in Deutschland für die nächsten zehn Jahre zu erstellen. Der Programmausschuss Quantensysteme hat im Vorfeld fünf besonders relevante Themenfelder identifiziert und den Prozess entlang dieser strukturiert:

- Quantencomputing und -simulation
- Quantenkommunikation
- Quantenmesstechnik und Sensorsysteme
- Integrierte Quantenplattformen und Enabling Technologies
- Education, Training, Outreach, Kooperation und Vernetzung

1 spectaris.de/photonik/zahlen-fakten-und-publikationen/

2 Photonics21, Market Research Study Photonics 2017 und VDMA: Photonik in Deutschland, Branchenreport 2017

3 SPECTARIS, Trendreport Photonik 2019/2020 – Märkte, Entwicklungen, Potenziale

Im Rahmen verschiedener dezentraler Formate wie Editor Groups oder virtueller Workshops hat die Community die Technologiefelder sowie die zugehörigen Anwendungsszenarien und Forschungsfragenstellungen unter aktiver Beteiligung potenzieller Anwender diskutiert und ausgearbeitet. Anschließend wurden die Zwischenergebnisse auf dem BMBF-Branchenportal quantentechnologien.de noch einmal der gesamten Fachcommunity für Feedback und Ergänzungen zugänglich gemacht. Die folgenden Kapitel stellen das konsolidierte Ergebnis dieses Prozesses dar. Es zeigt sich, dass die Quantensysteme – die Quantentechnologien und die Photonik – ein erhebliches Potenzial und große Chancen für den Innovationsstandort Deutschland, seine Wirtschaft, Gesellschaft und Souveränität bergen. Gleichzeitig gehen diese einher mit einem erheblichen Forschungs- und Entwicklungsbedarf und den damit verbundenen Risiken. Die deutsche Community ist bereit, sich diesen Herausforderungen zu stellen, und startet dabei aus einer hervorragenden Ausgangsposition. Zentrale Kernkompetenzen hierfür sind bereits vorhanden – auch als Ergebnis der guten Zusammenarbeit von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik in den vergangenen Dekaden besonders im Rahmen der Programme „Photonik Forschung Deutschland“ und „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ sowie – im Bereich der Quantenkommunikation – dem Forschungsrahmenprogramm der Bundesregierung zur IT-Sicherheit „Selbstbestimmt und sicher in der digitalen Welt“.

Der Agendaprozess führte zusammengefasst zu folgenden Aussagen:

Quantencomputer werden in Zukunft Lösungen für Probleme liefern, die mit klassischer Computertechnik nicht mit sinnvollem Aufwand gelöst werden können. Die Entwicklung neuer Materialien beispielsweise für die Batterieproduktion, das Design neuer Pharmazeutika und die Optimierung von Prozessen in den Bereichen Produktion, Logistik, Verkehr, Energieversorgung etc. werden langfristig durch Quantencomputer große Fortschritte machen. Eine Art analoger Quantencomputer, die **Quantensimulatoren**, sind bereits heute für konkrete Problemlösungen insbesondere bei der Modellierung des chemischen Verhaltens von Pharmazeutika und Ma-

terialien einsetzbar und übertreffen die Möglichkeiten klassischer Berechnungsverfahren bei Weitem.

Die spezifischen Eigenschaften von Quantensystemen erlauben den Aufbau abhörsicherer Verbindungen, deren Sicherheit auf physikalischen Prinzipien beruht. Entsprechende Verfahren und Systeme werden unter dem Begriff **Quantenkommunikation** zusammengefasst. Die Sicherheit konventioneller Verfahren zur Verschlüsselung von Informationen beruht auf der Annahme, dass der nötige Rechenaufwand für die Entschlüsselung für verfügbare Rechner zu groß ist, um in vernünftigen Zeiträumen zu einem Ergebnis zu kommen. Für Quantencomputer gilt dies in der Regel nicht. Mit der Verfügbarkeit von Quantencomputern wird daher ein Großteil der derzeit verwendeten Verfahren zur Verschlüsselung von Informationen wertlos. Die Entwicklung von Verfahren zur Quantenkommunikation und der Aufbau entsprechender Kommunikationsnetze zählen daher zu den wichtigsten Aufgaben im Bereich Quantentechnologien, um künftig sensible Daten von Banken, Unternehmen, Behörden, Rechenzentren und Infrastruktureinrichtungen vor unerwünschten Zugriffen zu schützen.

Die intrinsischen Eigenschaften von Quantensystemen eröffnen auch der Messtechnik und Sensorik völlig neue Möglichkeiten hinsichtlich Empfindlichkeit, Präzision und Robustheit bei der Erfassung physikalischer Größen wie Druck, Temperatur, Position, Zeit, Geschwindigkeit, Gravitation sowie elektrischer und magnetischer Feldstärke. Die **Quantensensorik** wird die Grundlage für eine neue Generation von Mess- und Diagnosesystemen bilden. In der Medizin werden neue Bildgebungsverfahren die Untersuchung des Entstehens von Krankheiten möglich machen. Die Detektion kleinster Magnetfelder wird die hochaufgelöste Detektion von Nervenströmen erlauben und eine neue Form von Diagnostik und Therapie bei neurodegenerativen Erkrankungen ermöglichen. Hochsensible Gravimeter eröffnen neue Möglichkeiten in der Geologie, Archäologie, bei der Exploration von Bodenschätzen und im Bauwesen.

Quantensensoren für Inertialnavigationssysteme ermöglichen die GPS-freie, millimetergenaue autonome Navigation von Fahrzeugen und damit einen Entwicklungssprung auf dem Weg zum autonomen Fahren.

Um alle diese Möglichkeiten zu nutzen, müssen eine Reihe von Basis- oder **Enabling Techno-**
logien entwickelt werden.

Insbesondere müssen Materialien, Komponenten und Module für Quantensysteme miniaturisiert in großer Stückzahl hergestellt werden können. Integrierte photonisch-elektronische Systeme spielen hierbei eine entscheidende Rolle. Miniaturisierte und integrierbare Systeme für die Kühl- und Vakuumtechnik müssen entwickelt, Standards für Komponenten und Module konzipiert und etabliert werden. Neben der Hardwareentwicklung wird die Softwareentwicklung vom Betriebssystem über die Schnittstellenentwicklung bis zur Entwicklung von Hochsprachen für Quantencomputer und andere quantentechnologische Systeme eine herausragende Rolle spielen und einen erheblichen Teil zur Wertschöpfung beitragen.

Neue Entwicklungen im Bereich der Quantentechnologien erfordern die **interdisziplinäre Zusammenarbeit** zwischen zum Teil sehr unterschiedlichen Fachrichtungen wie Physik, Informatik und Materialwissenschaften.

In diesem Zusammenhang ist eine der wichtigsten Voraussetzungen für die erfolgreiche Umsetzung der Quantentechnologien die **Verfügbarkeit von Fachpersonal**. Um dies zu gewährleisten, braucht es auf allen Ebenen neue Ausbildungsangebote. Von der schulischen Ausbildung über die Ausbildung von Facharbeiterinnen und Facharbeitern sowie Technikerinnen und Technikern bis zur akademischen Ausbildung müssen neue Angebote gestaltet und umgesetzt werden. Hierbei spielt die interdisziplinäre Ausbildung eine entscheidende Rolle.

Die Verfügbarkeit von Quantentechnikerinnen, -ingenieuren und -wissenschaftlerinnen ist insbesondere hinsichtlich des Transfers von Ergebnissen der Grundlagenforschung in verwertbare Anwendungen und marktfähige Produkte eine notwendige Voraussetzung für den Erfolg der Quantentechnologien.

Die Quantentechnologien werden erheblichen Einfluss auf die gesellschaftliche Entwicklung in Deutschland und Europa haben.

Die Quantentechnologien werden erheblichen Einfluss auf die gesellschaftliche Entwicklung in Deutschland und Europa haben. Die breite Bevölkerung muss frühzeitig im Rahmen geeigneter **Outreach**-Aktivitäten über Entwicklungen und Möglichkeiten der Quantentechnologien sowie deren Auswirkungen informiert werden. Dabei kommt es entscheidend darauf an, die positiven Aspekte dieser disruptiven Technologieentwicklung in den Vordergrund zu stellen.

Die Entwicklung der Quantentechnologien erfordert ein gemeinsames Vorgehen in **Europa**. Vorhandene Kooperationen, die teilweise Auslöser der nationalen Aktivitäten im Bereich Quantentechnologien waren, müssen weiterentwickelt und ausgebaut werden. Fördermaßnahmen auf nationaler und europäischer Ebene sind notwendig, um die großen Herausforderungen bei der Forschung und Entwicklung für diesen Bereich meistern zu können, Deutschland und Europa an die Spitze der Entwicklung zu bringen und die Spitzenposition langfristig zu sichern.

The background is a dark, out-of-focus image of city lights at night, creating a bokeh effect with various colored light spots (blue, white, red, green). Overlaid on this are two solid-colored geometric shapes: a teal square in the upper left and a purple square in the lower right. A white rectangular box is centered in the upper half of the image, containing the text.

THEMENFELDER

3.1

Quantencomputing und Quantensimulation

Trotz der beeindruckenden Entwicklung der bisherigen Computertechnologie gibt es viele Probleme, für die auf klassischen Computern keine effiziente Lösung bekannt ist und die auch mit zukünftigen klassischen Computern nicht mit sinnvollem Aufwand gelöst werden können. Quantencomputer und -simulatoren versprechen mit ihrem disruptiven Ansatz effiziente oder zumindest in ihrem Rechenaufwand ökonomische Lösungen für manche dieser Probleme. Quantencomputer und -simulatoren gelten daher als wesentlicher Faktor für eine kompetitive Entwicklung des Hightechstandorts Deutschland und Europa.

Anwendungsszenarien

Das volle Potenzial hinsichtlich der Wertschöpfung von Quantencomputern und -simulatoren ist gegenwärtig noch nicht umfassend abzuschätzen. Langfristig werden hier wichtige Fortschritte bei der Entwicklung neuer Werkstoffe und der Batteriezellenentwicklung, dem Design neuer Pharmazeutika, der Optimierung von Prozessen und Systemen (etwa in Produktion, Logistik, Verkehr, Energienetzwerken), bei Finanz- und Wirtschaftsanalysen (bei Banken und Versicherungen), bei der digitalen Verbrechensbekämpfung sowie in Anwendungen der Grundlagenforschung erwartet. Neben den wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Möglichkeiten eröffnen sich potenziell auch Lösungen für relevante Zukunftsfragen unserer Gesellschaft. Die Wertschöpfung wird dabei nicht nur in der Hardwareentwicklung selbst, sondern auch in Softwarelösungen sowie in den beschriebenen Anwendungsgebieten generiert werden. Eine Studie der Boston Consulting Group geht langfristig von einem Marktwert von mehreren 100 Milliarden Dollar weltweit aus.⁴ Um die komplette Wertschöpfungskette zu nutzen, braucht es eigene Kompetenzen in der Herstellung von Hardware und der darauf abgestimmten Entwicklung von Software. Nur so kann

eine Dominanz der Wirtschaftsmächte USA und Asien vermieden werden, wie sie beispielsweise in der Halbleitertechnologie der Fall ist.

Um langfristig ein möglichst breites Anwendungsspektrum für praxisrelevante Probleme zu gewährleisten, scheint es nach gegenwärtigem Wissensstand unumgänglich, einen universellen, fehlertoleranten Quantencomputer zu bauen, für dessen Entwicklungszeit man deutlich mehr als zehn Jahre annimmt. Insofern sind erhebliche Investitionen notwendig, um diese Herausforderungen zu meistern und technologischen Fortschritt zu generieren.

In den nächsten Jahren ist zuerst mit Spezialanwendungen in Forschung und Industrie und daher mit einem kleineren Markt zu rechnen. Gerade dies bietet aber die Chance, in einer späteren umfassenden Marktreife eine sehr starke Position zu erzielen. Mittelfristig können hybride Ansätze aus klassischer Hard- und Software und sogenannten Noisy-Intermediate-Scale-Quantum-Computern (NISQ) einen Quantenvorteil bei der Lösung bestimmter Probleme erreichen – also eine ressourceneffizientere oder besser approximierende Lösung, als dies auf klassischen Superrechnern möglich ist. So kann auch auf kürzere Sicht ein für den deutschen Standort interessanter Markt entstehen. Auch analoge (das heißt nicht digitale) Ansätze wie kohärente Quanten-Annealer können hier eine Rolle spielen.

Aktuell spielen in der technologischen Hardwareentwicklung vor allem amerikanische Hightechunternehmen eine wichtige Rolle, aber auch Startups etablieren sich zunehmend in diesem Bereich. Bereits heute bieten einige amerikanische Firmen Quantencomputingsysteme in Form von Cloud-Diensten an.

Deutschland ist in der Forschung zu Quantentechnologien und -algorithmen gut positioniert und divers aufgestellt – insbesondere in Bereichen der Grundlagenforschung. Eine internationale Füh-

⁴ [bcg.com/de-de/publications/2019/quantum-computers-create-value-when](https://www.bcg.com/de-de/publications/2019/quantum-computers-create-value-when)

rungsrolle hat Deutschland vor allem dort, wo es auf vorhandene Stärken aufbauen konnte, beispielsweise in der Quanten- und Atomoptik und bei grundlegenden Fragen topologischer Systeme. In der Hardwareentwicklung, Systemintegration und Generierung von Intellectual Property (IP) liegen Deutschland und Europa im Vergleich zu den USA allerdings deutlich zurück. Dies liegt nicht zuletzt an fehlendem staatlichen Interesse im Vorfeld und der damit einhergehenden zu geringen finanziellen Unterstützung und zielgerichteten Entwicklungsarbeiten, dem Mangel von Eigeninvestitionen auch seitens führender Technologieunternehmen sowie schwierigen Gründungsbedingungen für Start-ups. Des Weiteren ist in einigen Branchen (zum Beispiel in der Finanzbranche) bisher ein nur verhaltenes Interesse am Quantencomputing für die Lösung spezifischer Anwendungsprobleme zu beobachten.

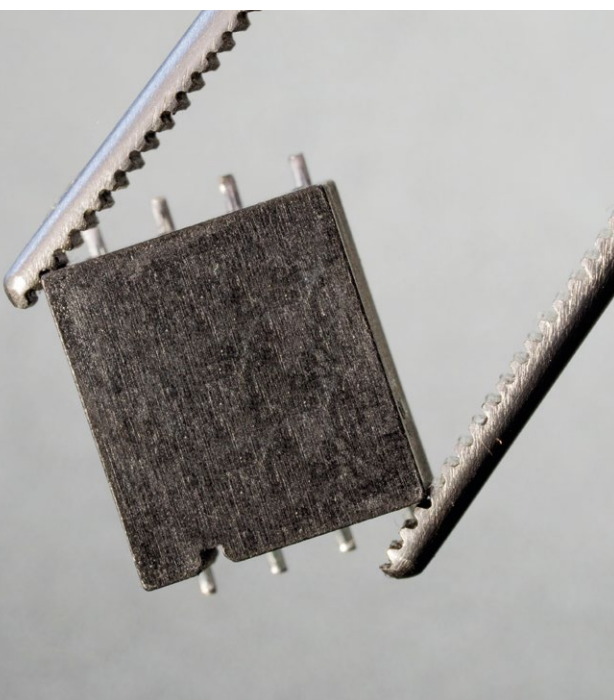
Das europäische Ökosystem bietet jedoch im Zusammenwirken von Grundlagenforschung, anwendungsorientierter Forschung und industrieller Entwicklung viele notwendigen Kompetenzen und Akteure, um eine unabhängige und international kompetitive europäische Rechenplattform zu realisieren, verbunden mit einer vollständigen Versorgungs- und Wertschöpfungskette der relevanten Technologien. Mit dem Quantum Flagship der EU haben sich be-

reits für deutsche Partner Möglichkeiten ergeben, ihr Know-how auch bei der Technologieentwicklung in europäische Kooperationen einzubringen. Diese Entwicklung eigener Quantencomputerplattformen ist strategisch wichtig, da eine Abhängigkeit der Industrie von außereuropäischen Rechenplattformen große Nachteile für die Wettbewerbsfähigkeit der deutschen und europäischen Wirtschaft hätte. Dies könnte die technologische Souveränität Deutschlands und Europas auch im Anwendungsbereich ernsthaft gefährden, wie es beispielsweise bei der Halbleiterindustrie der Fall ist.

Wichtige Kernbereiche der deutschen Wirtschaft wie die chemische und pharmazeutische sowie die Automobilindustrie gehören zu den Technologiebereichen, die am stärksten von Quantencomputern profitieren können. Außerdem ist aufgrund der Sicherheitsrelevanz von Quantencomputern die Abhängigkeit und potenziell eingeschränkte Verfügbarkeit von ausländischen Kernkomponenten problematisch. Cloud-Dienste mit außereuropäischen Servern erschweren außerdem den Schutz von geistigem Eigentum und personenbezogenen Daten. Darüber hinaus ginge mit einer derartigen Entwicklung eine nicht zu unterschätzende Abwanderung von Talenten in Richtung der führenden außereuropäischen Nationen einher, die den technologischen Abstand immer weiter vergrößern würde.

Anforderungen an die Technologie und Status quo

Grundsätzlich gibt es mehrere Ansätze für das Quantencomputing. Mittelfristig werden vor allem **gatterbasierte Quantencomputer ohne Fehlerkorrektur** (NISQ-Computer) eine besondere Rolle spielen. Diese Systeme weisen konzeptbedingt im Vergleich zu klassischen Rechnern eine größere Anfälligkeit für die Akkumulation von Fehlern auf, die bei klassischen Computern leichter korrigiert werden können. Daher lassen sich ohne Fehlerkorrektur nur Algorithmen einer bestimmten Länge und Komplexität bearbeiten. Ein mögliches Erprobungsfeld ist die Entwicklung hybrider Algorithmen, bei denen ein klassischer Kontrollalgorithmus variatorische Parameter in einem Quantenschaltkreis geeignet optimiert. Solche Ansätze sind etwa für die theoretische Chemie und Physik interessant, in elaborierteren Schemata aber auch für die approxi-



mative Lösung kombinatorischer Probleme und für das quantengestützte maschinelle Lernen. Dieser Ansatz wird wissenschaftlich bzw. als Prototyp für bestimmte industrielle Anwendungen bereits auf kleinen Quantenregistern von wenigen zehn Qubits verfolgt und lässt bei einer zu erwartenden Qubit-Anzahl von 100 in den nächsten Jahren wichtige Erkenntnisse zu Quantenvorteilen erwarten. Um in praktischen Anwendungen einen Vorteil gegenüber klassischen Architekturen zu realisieren, ist nach heutigem Kenntnisstand zum einen eine deutlich geringere Fehlerquote notwendig als derzeit erreichbar, zum anderen eine deutlich höhere Anzahl von Qubits. Bei den momentan leistungsfähigsten Quantencomputern ist insbesondere die Qualität der Qubits und der Gatter der beschränkende Faktor.

Langfristiges Ziel ist die Entwicklung eines **universellen fehlertoleranten Quantencomputers**, bei denen logische Qubits aus einer großen Anzahl physikalischer Qubits realisiert werden. Theoretische Ansätze zur Fehlerkorrektur existieren zwar bereits seit Langem; abhängig von der Güte der Gatter erfordert die Kodierung und Korrektur eines logischen Qubits je nach Schema allerdings bis zu 10.000 physikalische Qubits, sodass für einen universellen Quantencomputer voraussichtlich mehr als eine Million physikalische Qubits benötigt werden. Die Herstellung eines Quantencomputers dieser Größenordnung erfordert eine deutliche Verbesserung aufseiten der Prozessorhardware. Dies kann zum einen durch die kontinuierliche Weiterentwicklung derzeitiger verfügbarer Technologien und zum anderen durch zukünftige disruptive und skalierbare innovative Ansätze aus der Grundlagenforschung erfolgen. Darüber hinaus werden insbesondere Weiterentwicklungen im Bereich der Enabling Technologies – beispielsweise in der Kontroll- und

Messtechnik – benötigt (siehe auch 3.4). Als realistischer Zeithorizont gelten hier 20 bis 30 Jahre.

Im Bereich des sogenannten Quanten-Annealing stehen kommerzielle Systeme zur Verfügung, welche bisher jedoch nur eingeschränkt die Quanteneigenschaften der Schaltkreise verwenden. Dagegen

ist das Potenzial kohärenter Quanten-Annealer zum Beispiel für die approximative Lösung bestimmter Optimierungsprobleme ein aktives Forschungsfeld. Neue Softwareansätze versprechen hier eine entscheidende Beschleunigung der Problemlösungsfähigkeit, für die eine eingeschränkte Fehlervermeidung ausreichend sein könnte.

Analoge und teilweise programmierbare **Quantensimulatoren** erreichen gegenwärtig bereits Systemgrößen,

die die Möglichkeiten bekannter klassischer Algorithmen bei Weitem überschreiten. Solche analogen Quantensimulatoren haben erhebliches Potenzial, neue Einsichten zum Beispiel in der Simulation von Quantenmaterialien oder bei Optimierungsproblemen zu liefern. Die deutsche Forschungslandschaft nimmt hier eine führende Rolle ein. Zwischen Quantencomputern und Quantensimulatoren bestehen enge Verbindungen, und viele Technologieplattformen erlauben den Betrieb in digitalen und analogen Varianten.

Gegenwärtiger Stand von Technologieplattformen

Die Entwicklung eines Quantencomputers bzw. eines Quantensimulators ist interdisziplinär (Physik, Elektrotechnik, Informatik, Mathematik, Prozess- und Herstellungstechniken) und in all diesen Bereichen als besonders anspruchsvoll anzusehen. Sowohl bei den Quantencomputern als auch bei den

Wichtige Kernbereiche der deutschen Wirtschaft wie die chemische und pharmazeutische sowie die Automobilindustrie gehören zu den Technologiebereichen, die am stärksten von Quantencomputern profitieren könnten.

Quantensimulatoren gibt es derzeit viele konkurrierende Ansätze auf unterschiedlichem Entwicklungsstand. Neben der Anzahl der Qubits sind Größen wie die Konnektivität der Qubits, die Güte von Gattern, die Güte bei der Präparation und die Güte bei der Auslese relevant. Da es zum Teil erhebliche Unterschiede beim Entwicklungsstand der verschiedenen Systeme gibt, ist aktuell nicht abzuschätzen, welches System langfristig überlegen sein wird. Unterschiedliche Problemstellungen können dabei auch langfristig von den Fähigkeiten verschiedener Systemplattformen profitieren. Die Grenze vom digitalen zum analogen Quantenrechner bzw. -simulator ist fließend. Ein Unterscheidungsmerkmal ist die Möglichkeit einer Quantenfehlerkorrektur im digitalen Quantenrechnen.

Digitale Quantencomputer

Supraleiterbasierte Ansätze zählen aktuell zu den am weitesten entwickelten Systemen. Vor allem transmonbasierte Systeme mit etwa 50 Qubits nehmen eine Schlüsselposition ein und zeichnen sich durch eine hohe Gattergüte und schnell schaltbare Quantengatter aus. Google konnte 2019 mit seinem 53-Qubit-Sycamore-Prozessor erste Anzeichen von Quantenüberlegenheit für das Beispiel eines zufälligen Quantenschaltkreises zeigen. International liegt Deutschland in diesem Bereich deutlich zurück, soll aber durch die gezielte Neuausrichtung von Forschungseinrichtungen aufholen. Im Rahmen einer IBM-Fraunhofer-Kollaboration besteht Zugang zu einem IBM-Quantencomputer als Cloud-Dienst in Deutschland.

Ionenfallen-Qubits erlauben ähnliche Systemgrößen wie supraleitende Systeme bei den bisher höchsten demonstrierten Gattergüten und langen Kohärenzzeiten und eignen sich ebenfalls gut für Quantensimulationen. Neben den seit längerer Zeit verwendeten makroskopischen Paulfallen für solche Systeme werden mittlerweile auch chipbasierte Ansätze verfolgt. Im Vergleich zu den anderen Plattformen ist Deutschland in der Forschung im Bereich der Quanteninformationsverarbeitung mit Ionen und Neutralatomen seit Langem stark aufgestellt.

Neutralatom-Qubits basierend auf gefangenen Atomen in optischen Pinzetten oder optischen Gittern bieten einen vielversprechenden Ansatz, um

mithilfe von langreichweitigen Wechselwirkungen zwischen Rydbergatomen oder Kollisionsgattern Quantenprozessoren zu realisieren. Systemgrößen von mehreren Hundert Atomen in flexiblen zweidimensionalen Strukturen wurden bereits demonstriert. Als Grundlage für die Durchführung von digitalen Quantenalgorithmen konnte die Güte der Gatter in kleinen Systemen jüngst deutlich gesteigert werden. Auch in diesem Bereich haben sich international und in europäischen Kollaborationen bereits mehrere Start-ups gebildet.

Spinbasierte Ansätze beruhen vor allem auf Quantenpunkten in Halbleitern oder Fehlstellen, zum Beispiel in Diamanten. Der Entwicklungsstand elektrisch definierter Quantenpunkte liegt unter anderem hinsichtlich der Integration deutlich hinter dem von supraleiter-, ionen- und atombasierten Ansätzen zurück und umfasst nur wenige Qubits. Die Güte der Gatter ist dagegen bereits vielversprechend und zeichnet sich durch eine hohe Robustheit gegenüber Störeinflüssen aus. Gerade bei siliziumbasierten Ansätzen birgt die Ähnlichkeit mit herkömmlicher klassischer Computerhardware das Potenzial, die Erfahrungen der Halbleiterindustrie bei der Skalierung direkt nutzen zu können.

Photonische Systeme nutzen Quantenzustände des Lichts für die Quanteninformationsverarbeitung. Obwohl Photonen nicht direkt miteinander in Wechselwirkung stehen, lassen sich über konditionierte Messungen Quantengatter implementieren. Verfolgt werden vor allem Ansätze des messbasierten Quantenrechnens, in dem im Vorfeld hochgradig verschränkte Zustände präpariert werden. Die technologischen Herausforderungen liegen vor allem in der effizienten Erzeugung einzelner Photonen und der Präparation verschränkter Zustände. Das vorhandene signifikante Know-how der integrierten Photonik ist in diesem Kontext vorteilhaft für die Skalierung.

Topologische Qubits nehmen bei den verschiedenen Qubit-Ansätzen eine Sonderrolle ein. Die Idee ist, Qubits in durch exotische Materialeigenschaften geschützten Zuständen zu realisieren. Das heißt, die Quantenzustände sollen weitgehend immun gegen Störungen von außen sein. Damit ließen sich Quantencomputer bauen, die eine weit weniger aufwendige Fehlerkorrektur benötigen würden und



so mit einer deutlich geringeren Anzahl von (physikalischen) Qubits auskämen. Dieser große Vorteil motiviert den hohen Forschungsaufwand, der derzeit für die Realisierung einzelner topologischer Qubits getrieben wird. Bei der Synthese und Erforschung grundlegender topologischer Materialien hat Deutschland international einen Spitzenplatz. Qubit-Operationen wurden bisher allerdings noch nicht demonstriert.

Analoges Quantenrechnen und Quantensimulatoren

Quantensimulatoren sind leichter realisierbar als universelle Quantencomputer. Eine wesentliche Herausforderung ist jedoch die Identifikation geeigneter und relevanter Anwendungen, da Quantensimulatoren weniger flexibel sind als universelle fehlerkorrigierte Quantencomputer. Die Realisierung von Quantensimulatoren mit neutralen Atomen in optischen Gittern ermöglicht langfristig einen systematischen Übergang zur Entwicklung von Quantencomputern mit hochdimensionalen Quantenregistern in der Größenordnung von bis zu 1.000 Qubits. In Ionenfallen wurden sowohl digitale als auch analoge Simulationen implementiert. Die stark verbesserte Kontrolle supraleitender Schaltkreise kann auch hervorragend für die analoge Simulation von fundamental-physikalischen

Modellen eingesetzt werden. Photonische Quantensimulatoren stellen eine weitere vielversprechende Alternative dar, die vor allem in Europa verfolgt und weiterentwickelt wird. Im Bereich der Quantensimulation verfügt Deutschland über eine exzellente akademische Forschung.

Quantensimulatoren als analoge Zwischenstufe sind für erste anspruchsvolle Aufgabenstellungen beispielsweise in der Materialforschung geeignet und adressieren somit ein hoch relevantes Anwendungsfeld für die Industrie. Die dabei eingesetzten Plattformen sind größtenteils deckungsgleich mit den oben beschriebenen Plattformen für das Quantencomputing. Viele der beschriebenen Systeme lassen sich sowohl für analoges als auch digitales Quantenrechnen und für Quantensimulationen einsetzen.

Theoretische Fragen umfassen die konzeptionelle Entwicklung neuer, robuster Simulationsmethoden, die dem aktuellen Stand der Hardware Rechnung tragen, sowie die Entwicklung von Ideen zum Auslesen und zur Zertifizierung des Quantensimulators und zum konzeptuellen Verständnis von Robustheit. Technologisch gesehen sollen der Grad an Kontrollierbarkeit erhöht, Programmierbarkeit erzielt und flexiblere Geometrien erreicht werden. Dies eröffnet neue Möglichkeiten, stark korrelierte

Quantensysteme zu simulieren und damit verbundene Problemstellungen zu lösen. In den Bereichen Quantenchemie und Materialforschung lassen sich Prozesse und Eigenschaften modellieren und in der Simulation untersuchen. Eine Reihe bisher unlösbarer Optimierungsprobleme wird sich mittelfristig lösen lassen. All diese Anwendungen haben das Potenzial zur kommerziellen Nutzung.

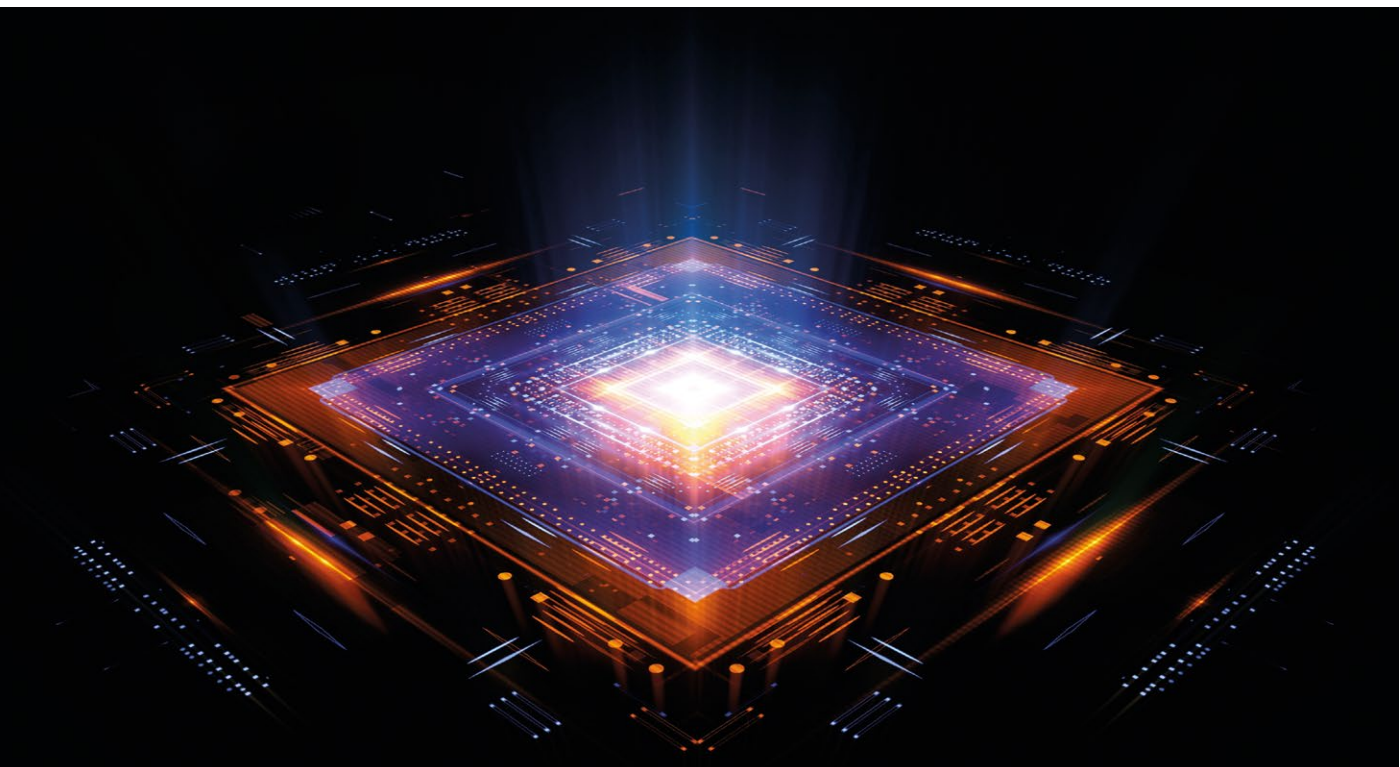
Parallel wird an der Entwicklung von **kohärenten Quantenannealern und adiabatischen Quantencomputern** gearbeitet, die auch als analoge Quantenrechner angesehen werden können. Diese Ansätze sind im Grunde äquivalent zu den gatterbasierten Ansätzen und ermöglichen zudem einen natürlichen Zugang zu industriell relevanten kombinatorischen Optimierungsproblemen. Die exakte Rolle von Kohärenz und anderen Faktoren beim Erreichen eines Quantenvorteils ist Gegenstand der aktuellen Forschung.

Algorithmen und Software

Erste **Quantenalgorithmen** wie der Shor-Algorithmus zur Faktorisierung in Primzahlen bzw. zur Lösung anderer Probleme zu verborgenen Untergrup-

pen existieren bereits seit den Neunzigerjahren. In jüngerer Zeit wurden weitere Algorithmen gefunden, die zur Lösung linearer Systeme und konvexer Optimierungsprobleme dienen und die dedizierte Quanteneigenschaften (Superposition und Verschränkung) ausnutzen. Die Anzahl dieser Algorithmen ist allerdings noch begrenzt, und sie setzen meist einen fehlerkorrigierten Quantencomputer voraus. Mittlerweile wurden zudem spezielle Quantenalgorithmen für NISQ-Systeme entwickelt. Ursprünglich für die Lösung von Problemen der Quantenchemie konzipiert, werden sie mittlerweile auch in anderen Anwendungsfällen eingesetzt. So versprechen beispielsweise Varianten des sogenannten QAOA (Quantum Approximate Optimization Algorithm) bessere Näherungslösungen in kombinatorischen Optimierungsproblemen als klassische Algorithmen. Auch gibt es eine Reihe von Ansätzen für die Anwendung im quantenunterstützten maschinellen Lernen, wie zum Beispiel Quantum Embedding als Analogie zu klassischen Kernelmethoden.

Entscheidend für die Weiterentwicklung des Quantencomputings wird sein, möglichst zeitnah praxisrelevante Algorithmen mit einem Quanten-



vorteil gegenüber klassischen Algorithmen zu entwickeln. Dies kann entweder ein Geschwindigkeitsvorteil (Quantum Speed-up) oder ein Qualitätsvorteil (zum Beispiel bessere Trennschärfe mit weniger Parametern bei Klassifikationsalgorithmen) sein. Insbesondere ist es mittelfristig unabdingbar, Algorithmen und Software an die spezifischen Eigenschaften von Hardwaresystemen (Konnektivität, Ansteuerung und Auslese, Fehlermodelle, Arten von Zwei-Qubit-Gattern) anzupassen, um die verfügbare Hardware ideal auszunutzen. Dafür braucht es eine enge Zusammenarbeit von der Systemplattform-, der Ansteuerungs- und Auslese- und der Softwareentwicklung bis hin zur Formulierung der Anwendungsfälle. In diesem Zusammenhang sind hybride Optimierungsalgorithmen vielversprechend, die in Kombination mit leistungstarker klassischer Hardware verwendet werden. Dabei ist es wichtig, das Zusammenspiel zwischen Quantencomputing und klassischem High Performance Computing zu berücksichtigen. Zudem werden klassische Quantencomputeremulatoren auch weiterhin eine Rolle in der Algorithmenentwicklung spielen. Diese findet in Deutschland überwiegend in den Bereichen der Physik und Mathematik statt. Der Informatiksektor ist hier noch relativ wenig eingebunden. Vielversprechend erscheint es auch, „Quantum-Inspired“-Algorithmen und -Systeme für klassische Hardware zu entwickeln, wie dies beispielsweise von Fujitsu betrieben wird.

Zertifikation und Benchmarking

Wichtig für die Entwicklung von Quantenhardware sind Konzepte, die das Funktionieren von Komponenten validieren und deren Qualität zertifizieren. Der Ansatz des Randomized Benchmarkings kann unter bestimmten Annahmen wichtige Gütezahlen wie die mittlere Gattergüte liefern. Die gegenwärtigen Methoden sind aber oft

nicht ausgereift genug, um allgemeine Gattersätze unter schwachen Annahmen über korrelierte und natürliche Fehler zu zertifizieren. Die System- und Hardwareentwicklung muss daher auch immer mit einer **Entwicklung des Benchmarkings** einhergehen, das mittelfristig in **Standardisierungsprozesse** eingeht. Um die Leistungsfähigkeit von Quantencomputern technologieübergreifend vergleichen zu können, sollten außerdem entsprechende Kenngrößen (zum Beispiel Quantenvolumen) einheitlich definiert werden.

Speziell im Bereich erster Anwendungen ist die deutsche Industrie in einer hervorragenden Ausgangsposition, die durch eine gezielte Förderung weiterentwickelt werden sollte.

Lösungsansätze und Herausforderungen

Aktuell hat Deutschland nur in Teilgebieten des Quantencomputings und der Quantensimulation eine Spitzenposition inne. Die breite Expertise in der deutschen Wissenschaftslandschaft, die hohe Kompetenz der Industrie in Enabling Technologies sowie die hochtechnologische Anwenderindustrie bieten jedoch die Chance, in dem gesamten Bereich eine international führende Rolle zu übernehmen.

Speziell im Bereich erster Anwendungen ist die deutsche Industrie in einer hervorragenden Ausgangsposition, die durch eine gezielte Förderung weiterentwickelt werden sollte.

Bisher gibt es vor allem einzelne gut aufgestellte Forschungsgruppen, die im Rahmen nationaler und internationaler Kooperationen an Teilaspekten des Quantencomputings arbeiten. Aufgrund der wissenschaftlichen und technischen Komplexität sowie der langen Entwicklungszeit ist eine langfristige, **strategische Schwerpunktförderung** notwendig, die mehrere zukunftsweisende Plattformen am jetzigen Entwicklungsstand abholt, sie systematisch mit klarem Anwendungs- und Technologiefokus weiterentwickelt und somit entsprechende Kompetenzen aufbaut. Es müssen Forschungsgruppen gestärkt werden, die sich mit praktischen und industriell relevanten Problemen beschäftigen. Zu-

dem ist ein stärkeres **Engagement der Industrie** unerlässlich, um die Technologie zur Marktreife zu bringen. Bisher ist die Industrie bei der Entwicklung von Quantenhardware noch eher zurückhaltend, insbesondere aufgrund des Zeithorizonts für den zu erwartenden Investitionsrückfluss. Start-ups können hier eine wichtige Rolle spielen, genauso wie der Staat als „Investor“ und Erstkunde.

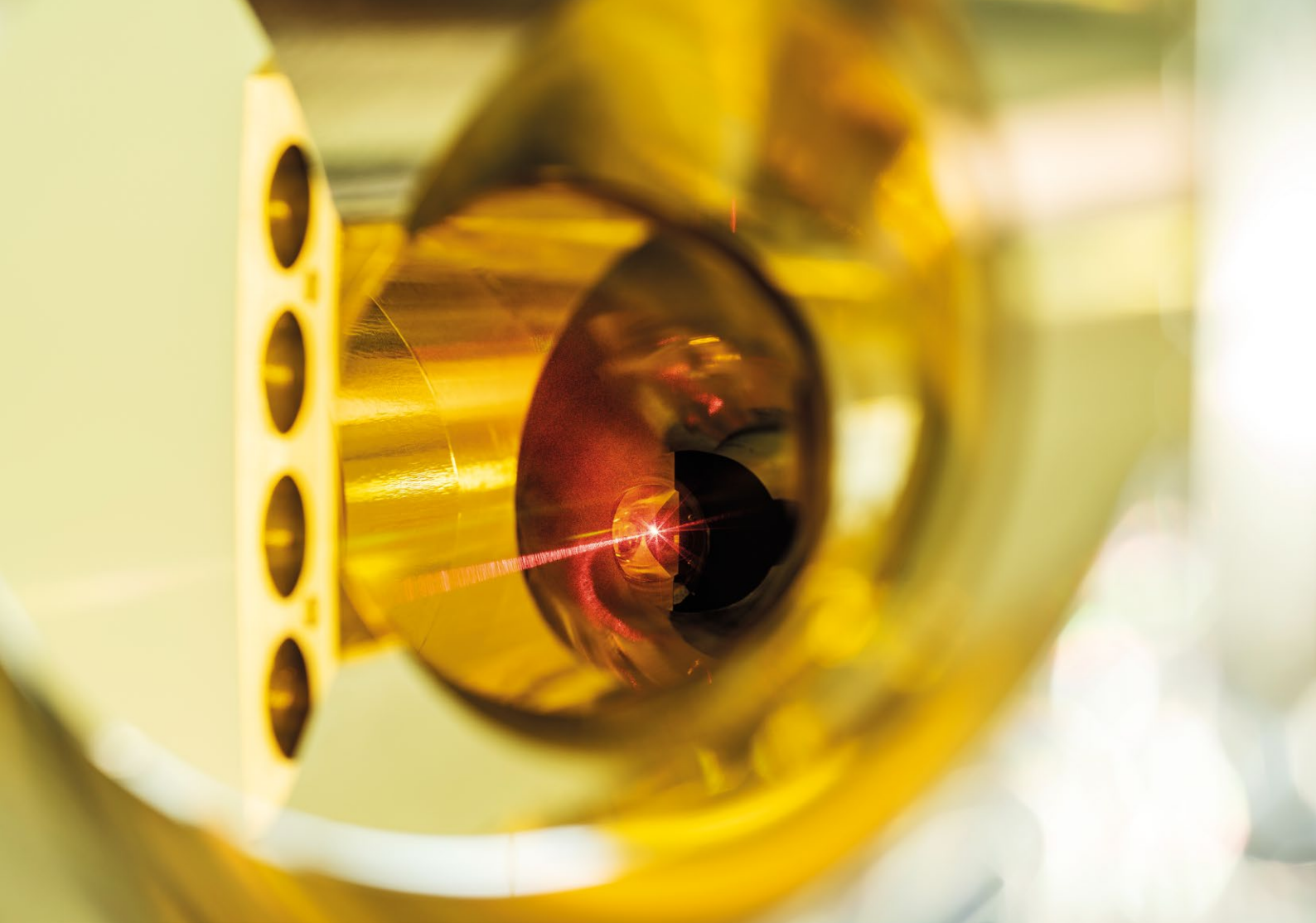
Insgesamt ist es wichtig, **Anreize für Ausgründungen** und einen Transfer in die unternehmerische Welt zu schaffen. Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Umsetzung von Ergebnissen aus staatlich geförderten Projekten in marktfähige Lösungen ist die Ausrichtung der Arbeiten auf anschlussfähige Ziele im Sinne der industriellen Umsetzung. Dies muss bei der Projektplanung von Anfang an berücksichtigt werden. In diesem Zusammenhang braucht es auch eine bessere **Vernetzung** der verschiedenen Wissenschafts-Community untereinander und mit der Industrie. Grenzen zwischen Forschung und Industrie müssen durch klare Vorteile in der Interessensgemeinschaft durchlässiger werden. Beispielsweise können neben dem Austausch von Kompetenzen und Wissen auch gemeinsame Ressourcen genutzt werden. Wünschenswert wären Akteure, die letztlich die Rolle des Systemintegrators übernehmen können und daneben Forschungsexpertise und industrielles Know-how zusammenführen.

Neben der Entwicklung eigener Hardware gilt es, Anwendern möglichst früh sicheren und flexiblen Zugang zu möglichst offenen NISQ-Systemen zu verschaffen. Zwar lassen sich viele Algorithmen durch den Einsatz von Emulatoren entwickeln, ein **Zugriff auf echte Hardwarekomponenten** ist dennoch notwendig. Wie auch bei der Hardwareentwicklung gilt es für deutsche Akteure (Unternehmen, Forschungsinstitute, Hochschulen), möglichst schnell Schutzrechte zu sichern und idealerweise zu bündeln. Mittlerweile gibt es international mehrere Firmen, die durch eine aggressive Patentstrategie versuchen, den Markt zu blockieren. Zudem sollte frühzeitig die Entwicklung von Standards verfolgt und mitgestaltet werden.

Neben der Stärkung der Technologie ist es wichtig, einen **Markt der Nutzerinnen und Nutzer** aufzubauen. Dafür ist gerade in der Anfangsphase eine

Kombination aus klassischen und quantenbasierten Verfahren (sowohl bei der Hardware als auch bei der Software) vielversprechend. Diese Aktivität sollte synergetisch in Aktivitäten der Hochschulen, der Forschungseinrichtungen und der Industrie erfolgen – sowohl im Anwendungsbereich als auch bei Zertifizierung und Benchmarking. Ein regelmäßiger Austausch der Endnutzerinnen und -nutzer mit Forschung und Entwicklung sowie Qualifizierungs- und Weiterbildungsmaßnahmen können eine weitere Verbreitung des Gebiets unterstützen und neue Berufsperspektiven eröffnen. Um der raschen Entwicklung auf dem Gebiet Rechnung zu tragen, sind flexible Förderformate mit kurzen Vorlaufzeiten von besonderer Bedeutung.

Wie in allen Bereichen der Quantentechnologien ist eine weitere wichtige Säule die Verfügbarkeit **hochqualifizierter Fachexpertinnen und -experten** in unterschiedlichen Disziplinen (*siehe auch 3.5*).



3.2 Quantenkommunikation

Eine wesentliche Erkenntnis der Quantenmechanik ist die Tatsache, dass der Zustand eines Quantenobjekts nicht gemessen werden kann, ohne seinen Zustand zu verändern. Dieses fundamentale physikalische Prinzip nutzt die Quantenkommunikation, um Verfahren zur Informationsübertragung bereitzustellen, die im Gegensatz zur konventionellen Informationsübertragung prinzipiell abhörsicher sind.

Herkömmliche Verfahren sind hingegen nicht prinzipiell sicher, da die Informationen mit entsprechendem Rechenaufwand entschlüsselt werden können. Die Sicherheit resultiert in diesem Fall nur daraus, dass verfügbare Rechner den Rechenaufwand zur Entschlüsselung nicht in überschaubarer Zeit leisten können. Schon jetzt ist klar, dass Quantencomputer prinzipiell in der Lage sein werden, solche konventionellen Schlüssel zu brechen. Sobald entsprechende Rechner verfügbar sind, werden bisher eingesetzte Verschlüsselungsverfahren wertlos sein.

Aktuelle Forschung im Bereich der Quantenkommunikation ist daher als Beitrag zur digitalen Souveränität zwingend erforderlich und sollte intensiviert werden. Dabei sollte die Quantenkommunikation nicht getrennt von anderen Systemen entwickelt werden, allein schon, um die Infrastrukturkosten zu begrenzen. Dies bedingt auch, dass klassische Kommunikationsverfahren in die Entwicklung mit eingebunden werden und Quantenkommunikation nicht nur als radikal neues Paradigma gedacht wird, sondern auch als Serie inkrementeller Verbesserungen existierender Techniken.

Im Handlungsfeld Quantenkommunikation werden Verfahren entwickelt, die durch Superposition und Verschränkung quantenmechanischer Zustände den sicheren Austausch von Quantenschlüsseln und die sichere Verschlüsselung von Informationen erlauben, sodass auch künftige Quantencomputer diese nicht überwinden können. Quantenkommunikation

nikation wird somit in Zukunft die Basis für die sichere Übertragung von Informationen sein.

In der Praxis wird die Umsetzung echter informationstheoretischer Sicherheit eine große Herausforderung darstellen. Reine One-Time-Pad-Konzepte (OTP-Konzepte) erfordern eine mit klassischen Kommunikationssystemen vergleichbare Bandbreite, sodass der Einsatz von hybriden Verfahren aus Gründen der Praktikabilität wahrscheinlicher ist. Für die Anwendung ist die praktische Sicherheit der Gesamtsysteme entscheidend. Dazu müssen die realen Implementierungen von Quantum Key Distribution (QKD) auf ihre Sicherheitseigenschaften untersucht werden. Hierzu gehört beispielsweise auch die Sicherheit vor Seitenkanalangriffen. Damit einhergehend werden Zertifizierungs- und Zulassungsverfahren erforderlich sein.

Entsprechend umgesetzt birgt die Quantenkommunikation das Potenzial für den Einsatz in diversen Bereichen kritischer Infrastruktur wie beispielsweise Behördenkommunikation, Finanzwesen, Gesundheitswesen und Sicherheit. Auch für die Industrie bietet sie einen großen Mehrwert gegenüber klassischen Systemen, da Quantenkommunikation im Kontext von Industrie 4.0 und IoT-Systemen (Internet of Things) Firmengeheimnisse und Fertigungsdaten hardwareseitig besser vor Angriffen und Industriespionage schützen kann.

Quantenkommunikation wird in Zukunft die Basis für die sichere Übertragung von Informationen sein. Daher ist das gesamte Themenfeld Quantenkommunikation ein Schwerpunkt im aktuellen Forschungsrahmenprogramm der Bundesregierung zur IT-Sicherheit.

Die Quantenkommunikation birgt das Potenzial für den Einsatz in diversen Bereichen kritischer Infrastruktur wie beispielsweise Behördenkommunikation, Finanzwesen, Gesundheitswesen und Sicherheit.

Anwendungsszenarien

Die Frage, wie **Quantenschlüssel verteilt** werden können, ist derzeit Schwerpunkt vieler Forschungsarbeiten. Für eine praktische Anwendung sind allerdings Zertifizierungsfragen – also Fragen bezüglich der Sicherheit von Implementierungen – und Fragen zum reibungslosen ökonomischen Einsatz zu beantworten. Primär gibt es dazu zwei Lösungswege: zum einen die terrestrische Übertragung durch optische Fasernetze, deren Reichweite derzeit noch limitiert ist, zum anderen die Verteilung von Quantenschlüsseln über Satellitenverbindungen.

Ein weiterer Anwendungsschwerpunkt ist der **Transfer von Quantenzuständen**. Anders als bei konventionellen Übertragungsverfahren sind die zu übertragenden Signale vergleichsweise schwach, und im Fall der Übertragung über Glasfasern setzen die auftretenden Verluste der Reichweite Grenzen. Anders als bei herkömmlichen Telekommunikationssignalen können die Verluste nicht durch einfache Verstärkung der Signale ausgeglichen werden. Hier

müssen neue Verfahren und Technologien erforscht und realisiert werden, um in Zukunft weltumspannende Quantennetze zu aufzubauen und den Datenaustausch zum Beispiel zwischen Quantencomputern, Quantenspeichern und Quantendatenbanken zu ermöglichen. Beginnend mit der Realisierung von Verbindungen von einem Meter bis zu einigen Kilometern müssen geeignete kurz-, mittel- und langfristige Teilziele definiert und erreicht werden bis

hin zur Realisierung von Netzwerken auf der Basis von Quantenkommunikationsverfahren, die in fernerer Zukunft die Dimension und Leistungsfähigkeit des gegenwärtigen Internets erreichen.

Kurzfristiges Ziel

Kurzfristig denkbar ist eine Umsetzung **abhörsicherer Punkt-zu-Punkt-Verbindungen auf Kurzstrecke**.

cken. Dies ermöglicht den sicheren Datenaustausch in lokalen Netzen mit existierender Glasfaserinfrastruktur auf Entfernungen von ca. 50 bis 100 Kilometern. Das ist aufgrund der optischen Dämpfung in Glasfasern zurzeit in praktischen Systemen die maximal mögliche Entfernung, über die Quantenzustände ohne den Einsatz von neuartigen QKD-Protokollen, Satelliten-QKD oder Quantenrepeatern übertragen werden können. Damit lässt sich im ersten Schritt eine abhörsichere Kommunikation zwischen Datenzentren realisieren, die beispielsweise die nationale Sicherheit betreffen. Darüber hinaus sind in diesem ersten Schritt weitere Anwendungen möglich in Bereichen mit hohen Sicherheitsanforderungen an die Informationsübertragung wie beispielsweise im Finanzsektor oder im Gesundheitswesen. Diese Anwendungen werden bis zur weiteren Verbesserung und Etablierung der Technologie vorerst weitgehend auf den Einsatz in kontrollierten Testsystemen beschränkt bleiben.

Die Entwicklung und Bereitstellung einer neuen Generation effizienter, hochintegrierter Quantenlichtquellen ist eine Voraussetzung, um die genannten kurzfristigen Ziele zu erreichen. Solche Komponenten werden ebenso für andere Anwendungsfelder der Quantentechnologien benötigt, wie zum Beispiel in der Quantensensorik (*siehe auch 3.3 und 3.4*). Schon bei den ersten Testsystemen müssen Anwendungsaspekte bedacht werden wie beispielsweise die Kompatibilität mit existierenden Fasernetzen, geeignete Kühltechnologien, standardisierte Schnittstellen oder Betriebsgrundsätze.

Bei Quanten-LANs (QLANs) besteht die kurzfristige Herausforderung vor allem in der Entwicklung von funktionsfähigen Remote-Gates und deren zugrunde liegenden Protokollen und Hardwareschnittstellen sowie von Quellen zur Erzeugung verschränkter Zustände mit Verfahren zur Übertragung dieser Zustände. Diese sind ebenso Voraussetzung für den Fortschritt auf anderen Anwendungsfeldern der Quantentechnologien, insbesondere dem Quantencomputing.

Mittelfristiges Ziel

Mittelfristig wird die Erweiterung von Punkt-zu-Punkt-Quantenverbindungen zu **größeren, verzweigten Quantennetzen** mit Entfernungen von mehr als 100 Kilometern zwischen den Kommunikationspartnern angestrebt. Hierbei werden je nach

Anwendungsfall sowohl Netze mit vertrauenswürdigen Knoten als auch mit Quantenrepeatern aufgebaut. Dies ermöglicht die Einrichtung von Mehrparteiennetzen mit Vielparteienverschränkung und -protokollen in Metropolen, die zum Beispiel die sichere Übertragung von Schlüsseln für kryptografische Zwecke ermöglichen. Fälschungssicher lassen sich damit Identität und Authentizität von Kommunikationspartnern feststellen. Eine sichere Mehrparteienautorisierung wird möglich. Auf nationaler Ebene lassen sich solche Netzwerke auf Basis der bestehenden terrestrischen Glasfasernetze aufbauen. Internationale Netzwerke könnten mittelfristig auf satellitengestützten Systemen basieren.

Da die klassische Signalverstärkung in Quantenkommunikationsnetzwerken grundsätzlich nicht möglich ist, sind Quantenrepeater, mit denen Quantenzustände übertragen werden können, eine notwendige Voraussetzung für den Aufbau der beschriebenen Netze mit Übertragungsdistanzen von deutlich mehr als 100 Kilometern. Um anwendungsrelevante Systeme aufzubauen, müssen diese Quantenrepeater kompakt und kostengünstig herstellbar sein – beispielsweise in Form volloptischer, auf einem Chip integrierter Systeme.

Neben den Komponenten zur physikalischen Informationsübertragung sind Verfahren zur Quantenfehlerkorrektur ähnlich wie beim Quantencomputing zu entwickeln (*siehe auch 3.1*). Ebenso müssen Authentisierungsverfahren, Verteilung von Authentisierungsdaten und digitalen Signaturen bis hin zu Quantenroutingmechanismen bereitgestellt werden.

Das Netzwerkmanagement bestehend aus Verfahren für Störungs-, Konfigurations-, Abrechnungs- und Leistungsmanagement ist ebenfalls ein notwendiger Bestandteil solcher Systeme. Besondere Bedeutung kommt dem Schutz der Netze gegen Angriffe wie DoS-Attacken (Denial of Service) zu. Diese beeinträchtigen zwar nicht die prinzipbedingte Sicherheit von Quantennetzen, sind aber einfach durchzuführen und können die Datenübertragungsraten so weit reduzieren, dass dies einem Zusammenbruch des Netzwerks gleichkommt.

Langfristiges Ziel

Als langfristiges Ziel sollen die Voraussetzungen für den Aufbau eines **globalen Quantennetzes** ge-

schaffen werden, sodass der sichere Datenaustausch zwischen einer Vielzahl von Teilnehmerinnen und Teilnehmern möglich ist. In diesen großen und im besten Fall globalen Quantennetzen wird der Datenaustausch mit prinzipiell abhörsicheren Verbindungen möglich sein. Auch verteiltes Quantencomputing, also die Vernetzung mehrerer Quantencomputer an verschiedenen Standorten zur Steigerung der Rechenleistung, sowie den Zugriff auf verteilte Quantenspeicher und Quantendatenbanken ermöglicht das Quanteninternet.

Ob solche Netze etabliert werden können, hängt unter anderem davon ab, wie sich die Infrastrukturkosten der Quantenkommunikation entwickeln. Relevant sind die Entwicklungen im Bereich der sogenannten **Post-Quantenkryptografie** (PQC oder auch QRA, Quantum-Resistant Algorithms), welche sich mit Verschlüsselungsverfahren befasst, die auch bei der Verwendung von Quantencomputern nicht zu entschlüsseln sind. Sie könnte den Einsatz von Quantenkommunikationsnetzwerken zum Teil überflüssig oder – je nach Technologie- und Kostenentwicklung in dem jeweiligen Bereich – unwirtschaftlich machen. Allerdings ist derzeit davon auszugehen, dass sich Quantenkommunikation und PQC-Verfahren ergänzen werden. PQC-Verfahren haben einerseits den Vorteil, dass die bestehende Kommunikationsinfrastruktur zur Schlüsselerteilung genutzt werden kann. Andererseits liefern sie keine prinzipbedingte Sicherheit. Quantenkommunikationsverfahren sind prinzipbedingt sicher, erfordern aber zumindest in Teilen den Aufbau einer neuen Kommunikationsinfrastruktur.

Bestehende Glasfasernetze können gleichzeitig für die klassische und die Quantenkommunikation eingesetzt werden, sodass hier auch langfristig ein hybrider Einsatz beider Systeme wahrscheinlich ist.

Wertschöpfung

Komponenten

Langfristig kann die Quantenkommunikation einen großen Beitrag zur Wertschöpfung am Standort Deutschland liefern. Derzeit resultiert dieser Beitrag im Wesentlichen noch aus dem Verkauf einzelner Komponenten für Experimente an Forschungsinstituten. Ein spürbarer Anstieg der Wertschöpfung ist zu erwarten, sobald mit dem Ausbau

der notwendigen neuartigen Quanteninfrastruktur begonnen wird. Kurzfristig betrifft dies den Aufbau kleinerer Quantennetze für die Forschung, während langfristig größere Aufträge zur Einrichtung von Quantennetzen in der Industrie folgen werden. Die Wertschöpfung dabei liegt zum einen in der **Implementierung der eigentlichen Netzwerktechnik und deren Bauteile** (Quanteninformationssysteme, Glasfasertechnik etc.), zum anderen aber auch in den zugrunde liegenden **Basistechnologien**. Dies betrifft beispielsweise die Photonik (Lichtquellen, Detektoren, integrierte Schaltkreise und effiziente Schnittstellen), die Elektronik, Kryotechnik und weitere, wobei eine große Überlappung mit anderen Technologiefeldern existiert (siehe auch 3.4). Ebenso wird der **Aufbau geeigneter Satellitentechnik** für Quantenkommunikationsanwendungen einen erheblichen Beitrag zur Wertschöpfung leisten.

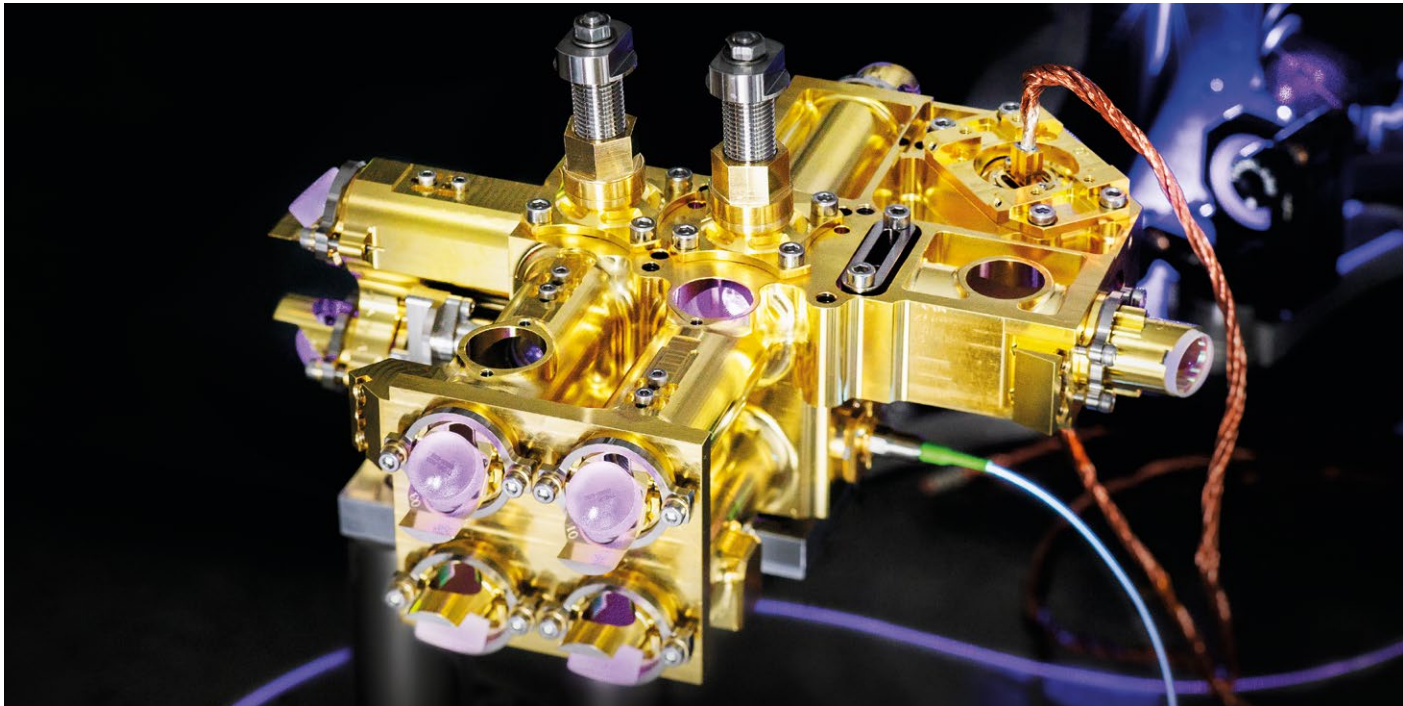
Anwendungen und Dienstleistungen

Langfristig wird ein erheblicher Anteil der Wertschöpfung aus dem Betrieb der Netzinfrastruktur sowie der Entwicklung und Produktion der technischen Komponenten und Gesamtsysteme entstehen. Aber auch die Bereitstellung von **Produkten, Anwendungen und Dienstleistungen**, die die Quantenkommunikation nutzen, wird eine erhebliche Rolle spielen. Dies ist vergleichbar mit der GPS-Technologie und den davon abgeleiteten Produkten. Cloudbasierte Anwendungen mit prinzipbedingt sicheren Verschlüsselungsverfahren bei gleichzeitig hohen Datenübertragungsraten werden voraussichtlich einen erheblichen Beitrag zur Wertschöpfung liefern, ebenso wie Angebote zu dezentralen Computingkonzepten.

Wie in jedem innovativen Technologiefeld wird eine Vielzahl von Neuentwicklungen und Erfindungen eine entsprechende Anzahl von **Schutzrechten** generieren. Lizenzgebühren und die Veräußerung solcher Schutzrechte werden ein weiterer Teil der Wertschöpfung sein.

Status quo in Deutschland

Wie in allen Teilbereichen der Quantentechnologien verfügt Deutschland auch in der Quantenkommunikation über eine Reihe von Instituten und



Forschungsgruppen, die im Bereich der Grundlagenforschung weltweit zur Spitze zählen.

Anwendungsbezogene Aspekte stehen bei diesen Forschungsaktivitäten nicht im Vordergrund. Der Austausch mit der Industrie und ein Wissenstransfer dorthin sind verglichen mit anderen Ländern eher gering. Dies hemmt derzeit noch die Technologieentwicklung in der Quantenkommunikation. Die notwendige interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Forschenden und Ingenieurinnen und Ingenieuren findet – wenn überhaupt – nur sehr begrenzt statt. Produktentwicklungen beispielsweise für QKD-Systeme finden derzeit in Deutschland nicht statt, Demonstratorsysteme werden teilweise im Ausland bereits hergestellt.

Die technologische Basis für den Aufbau von Quantenkommunikationsnetzen auf der Grundlage von Glasfasernetzen und Satellitenkommunikationssystemen ist in Deutschland sehr gut. Eine globale Führungsposition ist vor dem Hintergrund der bestehenden Forschungskompetenz erreichbar, sofern sich aus dem Forschungsumfeld eine Unternehmenslandschaft aus neu gegründeten Technologieunternehmen bildet.

Einige wenige auf dem optischen Kommunikationsmarkt erfolgreiche KMU und Konzerne zeigen intensives Interesse an Quantentechnologien. Globale Marktführer aus Deutschland im Bereich der sicheren

Datencenterkopplung und Verschlüsselungstechnologie engagieren sich bereits in Projekten zur Quantenkommunikation. Deutsche Telekommunikationsunternehmen beginnen, erste quantenkryptografisch gesicherte Kommunikationsverbindungen prototypisch aufzubauen. Ähnliche Aktivitäten gibt es bei Firmen, die im Bereich Satellitenkommunikation tätig sind. Insgesamt fehlt aber eine breite industrielle Beteiligung an FuE-Projekten im Bereich Quantenkommunikation.

Der Bedarf an Quantenkommunikationssystemen wird derzeit von den meisten Unternehmen noch nicht gesehen, da vermutlich die Probleme tendenziell unterschätzt werden, die sich aus dem Einsatz von Quantencomputern für sichere Kommunikationsverfahren ergeben können.

Für die zur Anwendung von Quantenkommunikation unverzichtbaren Zertifizierungsverfahren beispielsweise zur E2E-Verbindung (Ende-zu-Ende) existiert in Deutschland mit dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) eine weltweit anerkannte Behörde. Sie ist in der Lage, entsprechende Zertifizierungen durchzuführen. Bislang gibt es hierfür jedoch keine etablierten Verfahren.

Insgesamt befindet sich das gesamte Quantentechnologiefeld noch in einem frühen Stadium: Einzelne, noch nicht marktfähige Komponenten

wie Einzelphotonenquellen sind verfügbar, aber es gibt noch keine kostengünstigen Gesamtsysteme oder gar Netzdemonstratoren.

Herausforderungen und Lösungsansätze

Für eine nachhaltige technologische und wirtschaftliche Entwicklung der photonischen Quantentechnologien und der Quantenkommunikation im Speziellen sind diverse Herausforderungen zu bewältigen. Diese betreffen die Bereiche Forschung, Technologieentwicklung und wirtschaftlich-gesellschaftliche Rahmenbedingungen.

Forschung

Im Bereich Quantenkommunikation müssen auf der einen Seite die theoretischen **Grundlagen für die QKD** und die Übertragung von Quantenzuständen weiter erforscht werden. Auf der anderen Seite müssen die Forschungsaktivitäten stärker auf **anwendungsbezogene Fragestellungen** konzentriert und ausgeweitet werden. Dabei muss bei neuen Ansätzen die Frage nach prinzipiell erreichbaren Datenübertragungsraten gestellt und möglichst im Vorfeld beantwortet werden. Dies ist ein wichtiges Bewertungskriterium für die Anwendungsrelevanz solcher Ansätze.

Die **Überführung von Forschungsergebnissen in reale Kommunikationsnetze** muss grundsätzlich das erklärte Ziel sein. Dies betrifft nicht nur lineare Verbindungen, sondern vor allem auch verzweigte Netze, die unter Umständen neue Quantenkommunikationsprotokolle und Vielparteienverschränkung nutzen. Um die Forschungsarbeiten in diesen Bereichen zu unterstützen, müssen kurzfristig Demonstratoren für kurz- und langreichweitige Netze aufgebaut werden.

Um die zur Lösung der genannten Problemstellungen notwendige Forschung und Entwicklung leisten zu können, muss diese kontinuierlich und längerfristig planbar erfolgen. Dies ist auch erforderlich, um im internationalen Vergleich eine führende Position zu erreichen und zu halten. In diesem Zusammenhang wird die Einrichtung von **Forscherverbünden**

und industriellen Verbundprojekten mit Laufzeiten von typischerweise zehn Jahren empfohlen.

Forschungsaktivitäten im Bereich Quantentechnologien und speziell im Technologiefeld Quantenkommunikation müssen von vornherein **Kompatibilitätsfragen** berücksichtigen. Miteinander kompatible und standardisierte Techniken sind ausschlaggebend für eine langfristige Technologieentwicklung.

Um wirtschaftlich einsetzbare Quantenkommunikationssysteme zu entwickeln, müssen anwendungsbezogene Forschungsaktivitäten die Randbedingungen bestehender Netze und der damit verbundenen existierenden Infrastruktur berücksichtigen.

Die Schaffung einer gänzlich parallelen Infrastruktur für die Quantenkommunikation erscheint unrealistisch: Die Schwierigkeiten beispielsweise beim Ausbau des Glasfasernetzes in Deutschland zeigen, dass bereits vorhandene Infrastruktur wie Fasernetze soweit möglich für die Quantenkommunikation genutzt werden sollte. Dies benötigt auch Techniken, die einen gleichzeitigen Betrieb und optisches Routing von klassischer Kommunikation und der Übertragung von Quantenzuständen ermöglichen. Die großen Netzbetreiberorganisationen sollten daher eng in die nationalen Anstrengungen im Bereich FuE eingebunden werden und aktiv die Ausgestaltung der Programme unterstützen, um Synergien zu nutzen und betrieblich-wirtschaftliche Fragen frühzeitig zu beantworten. Weitere **Synergieeffekte** sollten genutzt werden, indem die Themen Quantencomputing, Quantenspeicher und Transport der Quanteninformation ganzheitlich bedacht werden. Hier gibt es große technologische Schnittmengen, insbesondere bei den zugrundeliegenden **Basiskomponenten** wie beispielsweise Photonikelementen (*siehe auch 3.4*). Die zu entwickelnden Quantenkommunikationstechnologien müssen sich an den miteinander zu verbindenden Quantentechnologien orientieren, um eine hohe Effizienz zu erreichen.

Ziel ist es, die Grundlagen für Quantenkommunikationssysteme zu erforschen, die gut skalierbar sind und sich vergleichsweise einfach in bestehende Netze einbinden lassen, beispielsweise durch die Erweiterung um Quantenkanäle.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die Kompatibilität mit der Quantencomputingtechnologie, da die Vernetzung von Quantencomputern, -speichern und -datenbanken in Zukunft eine zentrale Anwendung der Quantenkommunikation sein wird.

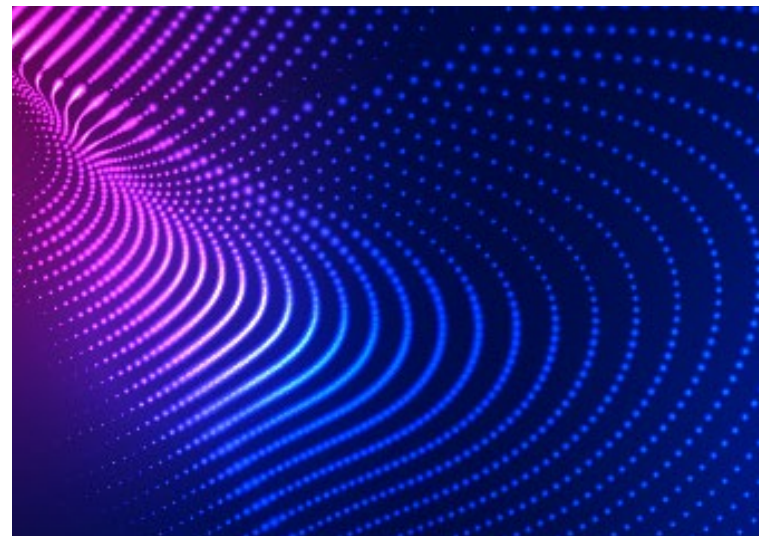
Technologie

Viele der für die Quantenkommunikation wichtigen Technologieaspekte sind für alle Bereiche der Quantentechnologien wichtig. Daher wird an dieser Stelle nur auf ausgewählte Aspekte eingegangen.

Grundsätzlich müssen Entwicklungsziele **plattform- und technologieoffen** formuliert werden, damit einzelne Technologien nicht unbeabsichtigt vernachlässigt werden. Viele Ansätze sind komplementär zueinander und konkurrieren nicht notwendigerweise.

Ein übergeordneter Aspekt, der insbesondere bei der Quantenkommunikation sehr wichtig ist, betrifft die **Robustheit und Sicherheit** von Quantenkommunikationssystemen gegenüber äußeren Störungen und gezielten Angriffen. Sogenannte Jamming- oder DoS-Attacken sind vergleichsweise einfach und günstig durchzuführen. Diese können zwar die inhärente Sicherheit der Quantenkommunikation nicht gefährden, wohl aber den Informationsaustausch über eine Quantenverbindung praktisch unterbinden. Um Quantenkommunikationssysteme anwendbar zu machen, müssen bei allen Technologieentwicklungen in diesem Bereich Sicherheitsaspekte schon in der Entwurfsphase als unverzichtbare Randbedingung berücksichtigt werden (Security by Design). Der Aufwand für die jeweilige Entwicklung muss dabei in einem wirtschaftlich vertretbaren Verhältnis zum Aufwand für mögliche Angriffe stehen.

Zum Aufbau von Übertragungsstrecken und Netzen mit großer Reichweite ist die **Verfügbarkeit von Quantenrepeatern** notwendig. Quantenrepeater sind bereits Gegenstand aktueller Forschung, diese muss aber deutlich intensiviert werden, um im sehr kompetitiven internationalen Forschungsumfeld eine praxistaugliche langreichweitige Quantenkommunikation realisieren zu können. Zudem ist eine weitere theoretische Entwicklung und Optimierung von Repeaterprotokollen für reale Systeme



notwendig, welche die konkreten physikalischen Eigenschaften realer Komponenten berücksichtigen. Der nächste technologische Schritt ist die Entwicklung modularer, multitaskingfähiger Multi-qubit-Knoten als Grundlage für internetähnliche Quantenkommunikationsnetze.

Die zu entwickelnden Bauteile müssen nicht nur funktionsfähig sein, sondern auch hinreichend schnell arbeiten. Zwar sind für einen gepufferten Schlüsselaustausch keine Echtzeitanforderungen nötig, für den langfristigen Einsatz von Quantenkommunikationsaspekten in taktilem Kommunikation sollten Antwortzeiten aber berücksichtigt werden.

Eine Basiskomponente, die sowohl für das Quantencomputing als auch für die meisten anderen Quantenkommunikationsanwendungen unverzichtbar ist, sind neben Quantenlichtquellen auch **Quantenspeicher** (siehe auch 3.1). Miteinander verschränkbare und gleichzeitig langlebige Quantenspeicher sind eine Grundvoraussetzung für die Einrichtung und Synchronisation langreichweitiger Quantennetze. Große, langlebige und fehlertolerante Quantenspeicher sind in diesem Zusammenhang eine unverzichtbare Technologie, die prioritär entwickelt werden muss. Hierzu gehören auch effiziente Schnittstellen zwischen Quantenspeichern und anderen Bauteilen wie Einzelphotonenquellen und -detektoren.

Auf schwachen Laserpulsen basierende Laserkommunikation im Freiraum ist eine Schlüsseltechnologie für die satellitengestützte Quantenkommunikation. Prinzipiell sind Laserkommunikationsterminals (LCTs) bereits vorhanden. Es gilt aber zu klären, wel-

che Anpassungen für die realistische Umsetzung von Quantenprotokollen erforderlich sind und wie diese praxistauglich umgesetzt werden können. Ebenso notwendig ist die echte Industrialisierung und Modularisierung von robusten und verlässlichen **Einzelphotonenquellen und -detektoren** inklusive einer effizienten und standardisierten Ankopplung an die Kommunikationsstrecke (siehe auch 3.4).

Eine große Herausforderung auf dem Weg zu praktisch nutzbaren Systemen und dem Aufbau einer Quanteninfrastruktur ist die Verfügbarkeit **kostengünstiger Basiskomponenten**. Technologische Grundlagenentwicklungen müssen der Ausgangspunkt für die Entwicklung entsprechender Produktionsverfahren für solche Komponenten sein. Davon hängt der Erfolg der Technologie in der Breite ab. Produktionsverfahren aus der Halbleitertechnik können dabei eine wichtige Rolle spielen, da hier ein umfangreiches technologisches Know-how zur Herstellung skalierbarer und kostengünstiger optoelektronischer Bauelemente existiert.

Ein Großteil der Komponenten und Systeme für die Quantentechnologien und speziell die Quantenkommunikation wird voraussichtlich tiefe Umgebungstemperaturen benötigen, um funktionsfähig zu sein. Die Verfügbarkeit kompakter, miniaturisierter Komponenten für die Kühlung von Bauteilen und Systemen ist eine wichtige Voraussetzung für die breite Anwendung von Quantenkommunikationssystemen. Entsprechende Technologien müssen anwendungsspezifisch entwickelt werden.

Systemaspekte

Für die konkrete Realisierung von Quantenkommunikationsnetzwerken müssen Fragen des **Netzwerkmanagements** geklärt werden. Insbesondere die Nutzung bestehender Glasfasernetze erfordert die enge Zusammenarbeit mit den Netzbe-

treiberorganisationen. Hierzu gehören Detailfragen wie die Umsetzung von hybriden Ansätzen aus QKD und PQC sowie übergeordnete Fragen zu Betriebsaspekten und generellem Netzwerkmanagement insbesondere im Hinblick auf die parallele Nutzung der Netze für konventionelle Kommunikationsverfahren und Quantenkommunikation.

Eine entscheidende Aufgabe, die schnell und für alle Bereiche der Quantentechnologien angegangen werden muss, ist die **Standardisierung** von Schnittstellen, Protokollen und Komponenten, insbesondere im Hinblick auf die industrielle Umsetzung. Ein organisches Anwachsen diverser paralleler Standards wäre ein großes Hemmnis für eine breite technologische Entwicklung und industrielle Realisierung der Quantenkommunikation. Um eine Standardisierung zu ermöglichen, sollten von vornherein Zertifizierungs- und Standardisierungsprozesse auf internationaler Ebene vorangetrieben und beeinflusst werden. Dabei müssen auch das BSI und die entsprechenden europäischen Partnerbehörden eingebun-

den werden, da nicht alle angedachten und skizzierten technischen Lösungen in der Praxis auch zulassungs- oder zertifizierungsfähig sind. So können nicht zukunftsfähige Fehlentwicklungen weitgehend ausgeschlossen werden. Ein wichtiger Aspekt ist in diesem Zusammenhang auch die Schaffung entsprechender rechtlicher Grundlagen zum Einsatz von QKD (Lawful Interception), da rechtliche Planungssicherheit insbesondere für die Industrie von hoher Bedeutung ist.

Die unterschiedlichen Aktivitäten, die zur Entwicklung anwendbarer Quantenkommunikationssysteme not-

wendig sind, müssen koordiniert werden. Dazu sollte eine entsprechende Stelle geschaffen werden, die alle an der Wertschöpfung in der Quantenkommunikation beteiligten Akteure einbindet (Forschung und Entwicklung, Hersteller, Betreiber, BSI etc.). Erste Aufgabe dieser **Koordinierungsstelle** sollte

Um eine Standardisierung zu ermöglichen, sollten Zertifizierungs- und Standardisierungsprozesse von vornherein auf internationaler Ebene vorangetrieben werden.

die Erstellung einer mit allen Partnern abgestimmten Roadmap sein. Diese beschäftigt sich mit dem Aufbau einer nationalen oder europäischen Produktionskette und eines industriellen Ökosystems für die Quantenkommunikation, das Entwicklungen und Investitionen ermöglicht. Die Koordinierungsstelle sollte auch die Verbindung zu anderen Teilbereichen der Quantentechnologien herstellen – insbesondere zum Teilbereich Quantencomputing. Eine weitere Aufgabe könnte die Aufstellung einer Roadmap für die Realisierung eines Satelliten-QKD-Systems sein.

Wirtschaft und Gesellschaft

Die Entwicklung der Quantenkommunikation zu einer anwendungsreifen Technologie braucht günstige wirtschaftliche und gesellschaftliche Rahmenbedingungen. Angestrebt wird der Aufbau eines Ökosystems für die Quantentechnologien und speziell für die Quantenkommunikation. Hierbei ist es besonders wichtig, die Entwicklung von Doppelstrukturen und somit eine Vergeudung von Zeit und Ressourcen von Beginn an zu vermeiden.

Um den Wissenstransfer von der Wissenschaft zur Industrie zu verbessern und zu beschleunigen, müssen auf der einen Seite Anreize durch entsprechende Fördermaßnahmen geschaffen werden und andererseits muss Personal bereitgestellt werden, das diesen Transfer ermöglicht. Um den damit einhergehenden Bedarf an **hoch ausgebildetem Personal** zu decken, das in der Lage ist, sowohl die komplexen wissenschaftlichen Grundlagen der Quantentechnologien zu verstehen als auch diese industriell in Produkte umzusetzen, wird die Förderung der Ausbildung von Quanteningenieurinnen und -ingenieuren angeregt. Ein Instrument dazu sollte die verstärkte Einrichtung von Quantentechnologiestudiengängen sein. Da persönliche Kontakte unter Forschenden sowie Ingenieurinnen und Ingenieuren essenziell sind, sollte der **Aufbau tragfähiger Netzwerke** unterstützt werden.

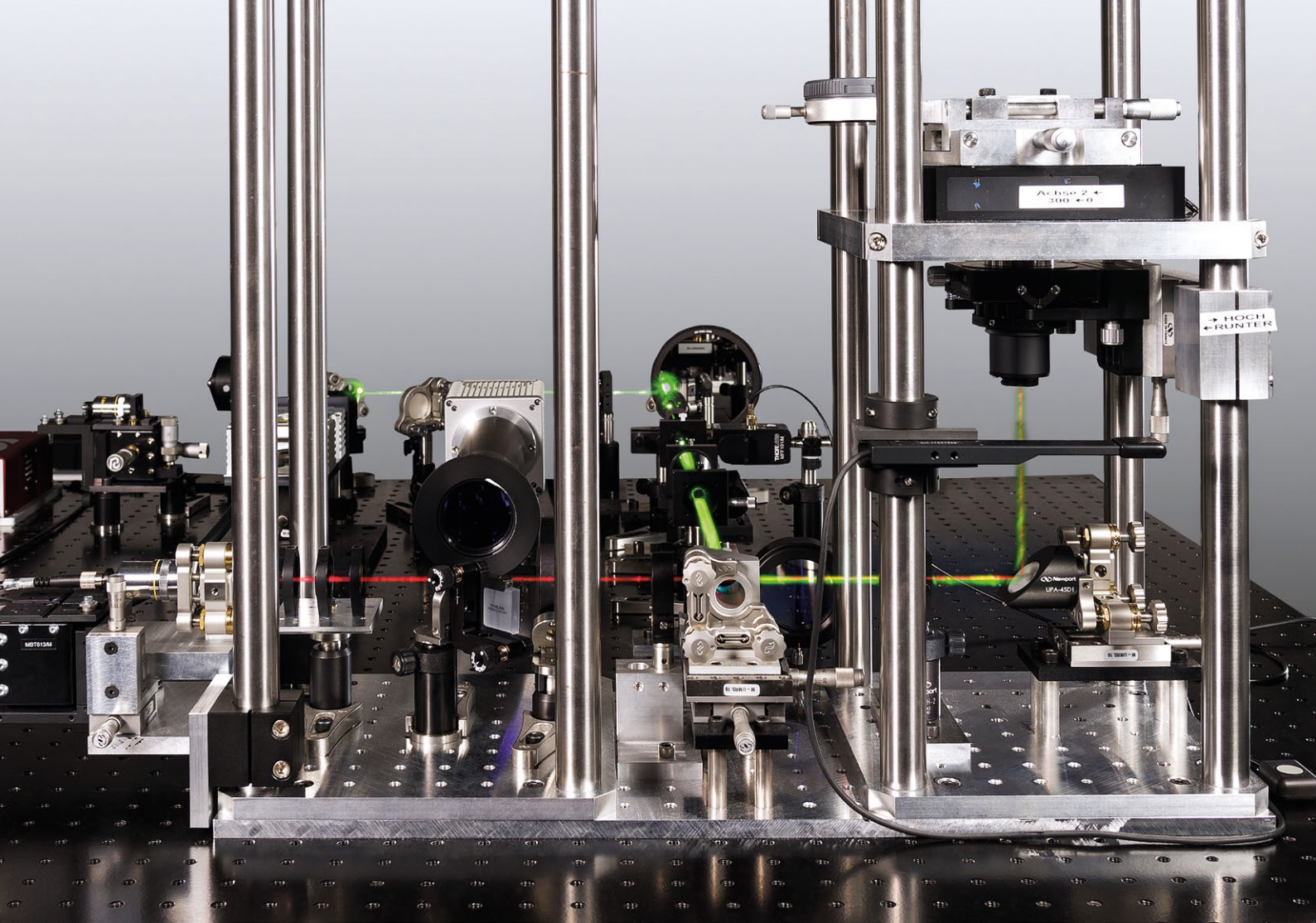
Grundsätzlich benötigen Firmen Märkte, die sie bewirtschaften können. Daher müssen Rahmenbedingungen geschaffen werden, in denen die Industrie **klare Marktperspektiven** erkennen kann. Im Hinblick auf die langfristige Wertschöpfung müssen potenziell profitable Anwendungen erforscht und

zur Marktreife entwickelt werden, selbst wenn das Risiko eines Fehlschlags hoch sein sollte. Außerdem müssen Endkunden sensibilisiert und Anreize geschaffen werden, damit beispielsweise KMU in quantensichere Kommunikation investieren, um so den eigentlichen Marktbedarf zu generieren. Nur so kann der Standort Deutschland im langfristigen internationalen technologischen Wettbewerb erfolgreich bestehen.

Um die Etablierung der Quantenkommunikationstechnologie in der Industrie zu fördern und eine breite Markteinführungen gezielt zu ermöglichen, sollten große Infrastrukturprojekte gefördert werden. Dies betrifft sowohl terrestrische als auch raumfahrtbezogene Projekte. Hilfreich könnte dabei auch die Einrichtung eines speziellen Quantum-VIP-Programms (VIP = Validierung von Innovationspotenzial) sein, um den Transfer innovativer Quantentechnologiekonzepte zielgerichtet in marktfähige Produkte zu überführen und Ausgründungen im Bereich der Quantentechnologien zu forcieren.

Wichtige Aspekte sind in diesem Kontext auch die **Exportkontrolle und Fragestellungen des geistigen Eigentums**: Es muss verhindert werden, dass eine aufwendig entwickelte Hochtechnologie einfach abwandert, im Ausland zu Produkten entwickelt wird und den Markt für europäische Anbieter unattraktiv macht, indem Nicht-EU-Produkte angeboten und gekauft werden. Dies könnte die langfristige digitale Souveränität Europas gefährden. Für den Erhalt der digitalen Souveränität ist auch insbesondere die Entwicklung und Fertigung sicherheitsrelevanter Produkte und Technologien in Europa geboten. Für eine Zulassung zur Verarbeitung höher eingestufte Informationen in nationalen oder EU-Netzen ist dies sogar Voraussetzung.

Um eine breite **gesellschaftliche Akzeptanz** solcher grundlegend neuer Technologien wie der Quantenkommunikation zu schaffen, die nicht immer intuitiv zu verstehen sind, muss auch die breite Öffentlichkeit den gesellschaftlichen und ökonomischen Mehrwert der Technologie verstehen. Parallel muss das Vertrauen der anwendenden Industrie in die verfügbaren Technologieprodukte sichergestellt werden. Dazu gehört eine gute Nachvollziehbarkeit und hohe Transparenz beispielsweise durch international abgestimmte Evaluierungs- und Zertifizierungsprozesse.



3.3

Quantenmesstechnik und Sensorsysteme

Dieses Kapitel stellt die Technologieentwicklungen und Anwendungen von Quantensensoren und quantenbasierter Messtechnik vor. Klassische Sensorkonzepte sowie technologische Entwicklungen im Bereich der Optik, Photonik, Elektronik und Software sind in 3.4 verortet. Deren Weiterentwicklung zu einer erforderlichen Technologiereife und Anpassung an Quantensensoren sind von zentraler Bedeutung für die Kommerzialisierung von Quantentechnologien.

Anwendungsszenarien

Die Quantensorik und -metrologie nutzt die Kontrolle über einzelne Quantensysteme oder Ensembles sowie intrinsische Quanteneigenschaften wie Kohärenz, Superposition und Verschränkung, um **Messungen jenseits der klassischen Möglichkeiten** zu verbessern oder sogar erst zu

ermöglichen. Neben der Steigerung der Messempfindlichkeit oder Spezifität sind Quantensensoren unempfindlicher bzw. robuster gegenüber Störgrößen. Weitere Vorteile mit direkten Auswirkungen für die Gesellschaft und Wirtschaft in Deutschland sind ihre Größe, ihre Betriebsumgebung, ihre Driftfreiheit und ihre möglicherweise einfachere Rückführbarkeit auf das neue SI-Einheitensystem (internationales Einheitensystem für physikalische Größen) im Vergleich zu klassischen Messgeräten. Sensoren bilden die Grundlage vieler Technologien und Produktionsverfahren und spielen eine wichtige Rolle in Forschung und Entwicklung. Die verbesserte Messung von Größen wie Druck, Temperatur, Position, Zeit, Geschwindigkeit, Gravitation oder von elektrischen und magnetischen Feldern mit bislang unerreichter Empfindlichkeit und Genauigkeit bietet neue Möglichkeiten bei einer ganzen Reihe von Anwendungen.

Das Feld zeichnet sich durch eine Vielzahl **verschiedener physikalischer Systemen** aus, die in der Quantensensorik und -metrologie genutzt werden können: atomare Dämpfe, gefangene Ionen, ultrakalte Atome, einzelne Moleküle, nano- und mikro-mechanische Oszillatoren und optomechanische Systeme, supraleitende und halbleitende Nanoschaltkreise, künstliche Systeme wie Quantenpunkte und Spindefekte in Festkörpern sowie rein optische Aufbauten mit nicht klassischen Lichtzuständen.

Die auf Basis dieser physikalischen Systeme entwickelten Sensoren haben **unterschiedlichste Entwicklungsgrade** (quantifizierbar über das Technology Readiness Level, TRL). In einigen Fällen sind Produkte bereits seit längerer Zeit am Markt oder wurden in den letzten Jahren in den Markt eingeführt. Beispiele dafür sind Magnetfeldsensoren wie Superconducting Quantum Interference Devices (SQUIDs) oder Optically Pumped Magnetometers (OPMs), Atomgravimeter, Atomuhren, Kernspintomografen und Superresolution-Mikroskope. Andere vielversprechende Sensortypen existieren zurzeit nur als Laborprototypen und benötigen skalierbare Technologien für eine erfolgreiche Industrialisierung. Die Vielzahl der Sensortypen erschließt eine entsprechend große Zahl von Anwendungsszenarien und Märkten mit neuen Möglichkeiten für das Angehen globaler Herausforderungen.

Spezifische Anwendungen

Navigation, Positionsbestimmung und Zeitmessung

Fünf bis acht Prozent des Bruttoinlandprodukts sind von der Navigation abhängig.⁵ Die Entwicklung von Navigationssystemen ist wiederum untrennbar verbunden mit der Entwicklung von Atomuhren und der Übertragung von Zeitsignalen. Verfahren zur Standortbestimmung unter Ausnutzung hochpräziser Atomuhren können durch die international vorangetriebene Erweiterung von Satellitennavigationssystemen und verbesserte Auswertungsverfahren immer weiter verfeinert werden. Präzisere Zeitnormale bieten weitere Entwicklungsmöglichkeiten beispielsweise für autonomes Fahren und die Indus-

trie 4.0. Hochpräzise und driftfreie Quanteninertialsensoren haben zudem Potenziale für die GPS-freie Navigation. Sie sind in Umgebungen nutzbar, in denen kein GPS-Empfang vorliegt – beispielsweise in Häuserschluchten oder Unterwasserfahrzeugen. Die Unabhängigkeit von GPS-Signalen und den damit einhergehenden Risiken, die von gestörten oder gefälschten Signalen ausgehen, ist zudem relevant für sicherheitskritische Bereiche.

Informations- und Kommunikationstechnik

In der IT ermöglicht die Synchronisierung von Hochgeschwindigkeitsnetzwerken und Rechenzentren eine schnellere Datenübertragung. Der Aufbau des auf Time Domain Multiplexing beruhenden 5G-Mobilfunknetzes stellt erhöhte Anforderungen an die Synchronisation und wird die Zahl der in Telekommunikationsnetzwerken eingesetzten Atomuhren vervielfachen.

Quantenverschlüsselung

Quantensichere Kommunikation, beispielsweise per QKD, basiert häufig auf der Detektion einzelner Photonen. Um die Sicherheit des Kommunikationskanals zuverlässig nachzuweisen, ist die genaue Kenntnis aller Verlustkanäle in der Praxis erforderlich. Voraussetzung dafür sind validierte und einfach einzusetzende, gut verfügbare und effektive quantenoptische Quellen und Sensoren. Ferner ist zur anwendernahen Umsetzung der Verschlüsselung kompakte Hardware notwendig (siehe auch 3.2).

Diagnose in der Medizin und molekularen Biologie

Die zunehmende Miniaturisierung und Automatisierung von Quantenmagnetometern wie Fehlstellen in Diamant (Nitrogen-Vacancy-Zentren, NV-Zentren) und anderen Materialien, OPMs und SQUIDs oder stabile optische Sonden in Form von diskreten Molekülen ermöglichen neue und vereinfachte Verfahren in der medizinischen Diagnostik. Miniaturisierte Quantenmagnetometer können direkt am Körper befestigt werden, sodass mit ihrer sonst nur von SQUIDs erreichten Empfindlichkeit funktionale Prozesse im Körper (Gehirn, Herz, Muskeln) nicht invasiv und während alltäglicher Bewegungen mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung aufgezeichnet werden können. Dies eröffnet völlig neue Perspektiven bei der Untersuchung von Bewegungsstörungen oder der Realisierung von Ge-

⁵ acatech.de/publikation/innovationspotenziale-der-quantentechnologien/

hirn-Computer-Schnittstellen zur Wiederherstellung von Körperfunktionen. Diese neuen Einblicke in den menschlichen Körper mit höherer Auflösung haben das Potenzial, bessere Behandlungen zu ermöglichen, und bieten damit Fortschritte für viele Menschen in Deutschland. Darüber hinaus eröffnen einzelne optische Emittierer (zum Beispiel NVs oder organische Moleküle) neue Einblicke – beispielsweise zur Unterstützung invasiver medizinischer Eingriffe, bei Temperatur- oder Potenzialmessungen in lebenden Zellen und der Aufklärung neuronaler Prozesse, welche besonders im Bereich der neurodegenerativen Krankheiten eine enorme Bedeutung haben.

Neue Arten der Bildgebung und Mikroskopie sowie der Charakterisierung von Materialien

Das Ausnutzen von Quantenkonzepten wie der Korrelation von Photonen ermöglicht beispielsweise lichtarme Abbildungen zur Untersuchung von biologischem Gewebe. Durch Ausnutzen von Quanteneffekten ist eine höhere Sensitivität erreichbar als bei der Beleuchtung mit klassischem Licht (Standardquantenlimit). Mithilfe von Verschränkung können Objekte bei einer Wellenlänge beleuchtet werden, die sich von der Detektionswellenlänge unterscheidet. So kann die Untersuchungswellenlänge für höchsten Kontrast und Spezifität unabhängig von der Detektionswellenlänge für maximale Effizienz optimiert werden. Häufig spielen hier auch empfindliche Detektoren für einzelne und wenige Photonen eine wesentliche Rolle. Diamantquantensensoren können als kleinstmögliche Tastmagneten in Rastersonden-Quantenmagnetometern bei der Prüfung mikro- und nanoelektronischer Bauteile zum Einsatz kommen.

Radar und Lidar – neuartige Detektoren und Quellen für elektromagnetische Strahlung

Die Erzeugung von optischen und Mikrowellensignalen mittels optischer Frequenzkämme erlaubt eine deutliche Reduzierung des Rauschens und damit unter anderem verbesserte Detektoranwendungen beispielsweise für Radar und Lidar. Neuartige Quantensensoren für die Detektion elektromagnetischer Strahlung zum Beispiel auf der Basis von Graphen, Quantenpunkten, Farbzentren oder Rydbergatomen bieten neue Ansätze für empfindliche Detektoren bzw. besonders breitbandige Detektoren in ansonsten nur schwer störungsfrei zugänglichen

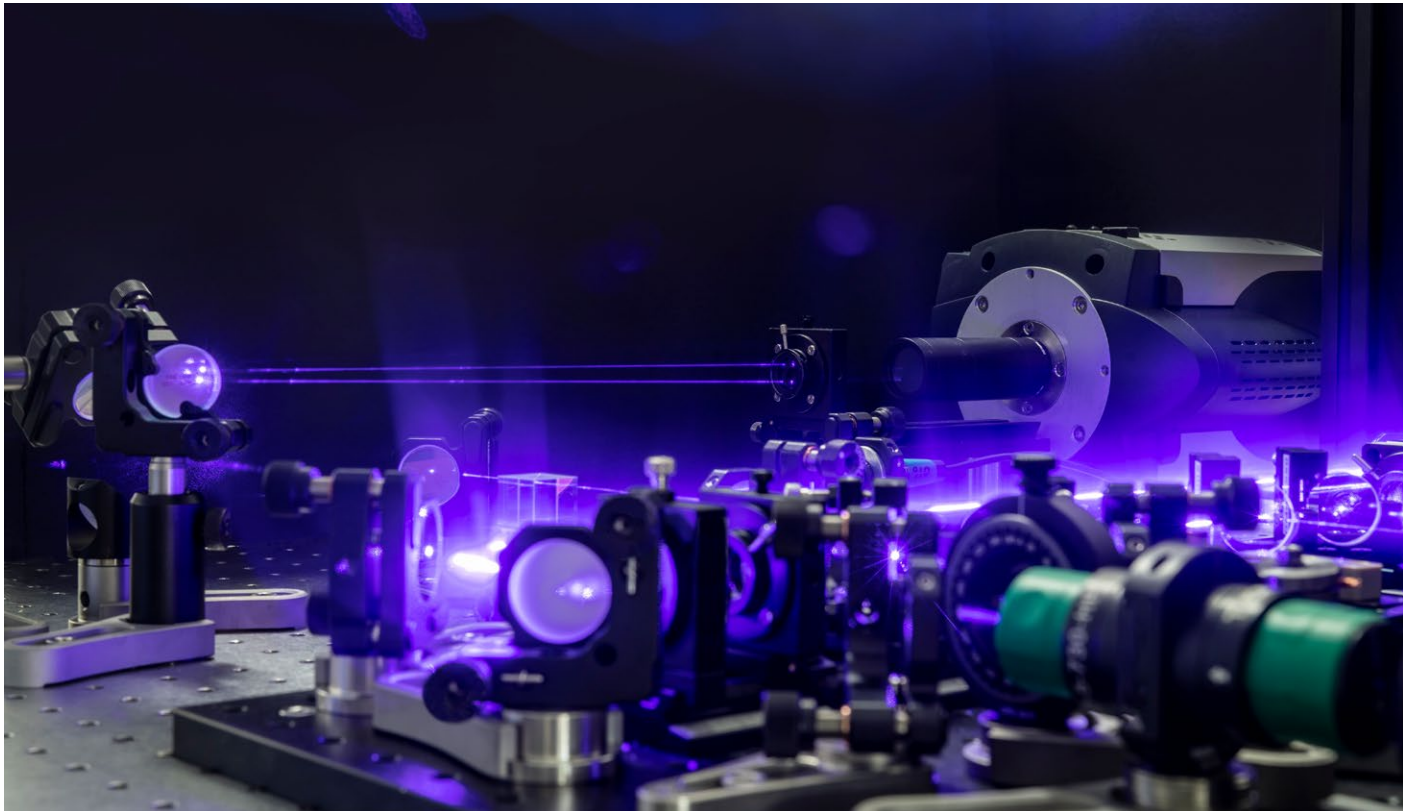
Frequenzbereichen (zum Beispiel Short Wavelength Infrared, SWIR). Durch Auswerten der quantenmechanischen Eigenschaften können zusätzliche Informationen aus den Signalen von Radar- und Lidarsensoren gewonnen werden.

Erdbeobachtung

Die Erdbeobachtung spielt eine wichtige Rolle, um – gerade in Zeiten des Klimawandels – die Veränderungen in unserer Umwelt zuverlässig und genau zu überwachen. Beispiele dafür sind das Abschmelzen von Eis, die Veränderungen des Meeresspiegels oder des Grundwassers. Hier können neue und empfindlichere Quantensensoren wie Atominterferometer und optische Uhren eine überlegene Langzeitstabilität und höhere Sensitivität liefern. Quantenbasierte Gravimeter ermöglichen die Frühwarnung vor Naturkatastrophen beispielsweise durch Gravitationsmessung von Magmabewegung in aktiven Vulkanen. Weiterhin können Quantensensoren bei der Exploration von Bodenschätzen neue Möglichkeiten bieten und erlauben die grabungsfreie Untersuchung von unterirdischen Hindernissen im Bauwesen. Große Felder von mit batteriebetriebenen Atomuhren ausgestatteten Hydrophonen können für die Unterwasser-Reflexionsseismologie bei der Erkundung von Erdölvorkommen eingesetzt werden. Die relativistische Geodäsie durch hochgenaue, transportable Atomuhren erlaubt einen neuartigen und zu vorhandenen Sensoren komplementären Ansatz und ermöglicht die Validierung der Ergebnisse von Atomgravimetern.

Zuverlässigere industrielle Anlagen und Baugruppen

Entwicklungen in der elektrischen Quantenmetrologie ermöglichen zunehmend den Einsatz beispielsweise automatischer und wartungsfreier quantenreferenzierter Spannungsquellen mit erhöhten Wertebereichen, vom Gleichspannungs- bis in den Wechselspannungsbereich. Aufgrund der universellen Verwendung elektrischer Spannungen in allen Bereichen der Mess- und Regeltechnik hat diese Entwicklung sehr hohes Anwendungspotenzial beispielsweise für die Elektromobilität und hochautomatisierte Mobilität und darüber hinaus für alle Anwendungen, in denen Mess- oder Steuersignale als Spannungen umgesetzt werden.



Metrologie und Eichwesen

Bei der Realisierung der im Mai 2019 neu definierten SI-Einheiten spielte die Quantensensorik eine wesentliche Rolle: Die Einheiten sind nun auf Naturkonstanten zurückgeführt, oft unter direkter Ausnutzung von Quanteneffekten. Besser reproduzierbare und selbstkalibrierende Standards wie beispielsweise auf dem Josephson Effekt beruhende Spannungsnormale erlauben den Aufbau einer vereinfachten und verbesserten metrologischen Infrastruktur, die wiederum den Markt befördert.

Grundlagenforschung

Mit hochpräzisen Quantensensoren können zudem fundamentale Fragestellungen adressiert werden. Wichtige Anwendungsmöglichkeiten sind insbesondere hochpräzise Messungen der Feinstruktur- und Gravitationskonstante, die Suche nach dunkler Materie und dunkler Energie, die Gravitationswellendetektion sowie Tests des Äquivalenzprinzips. Weiterhin können mit geeigneten Quantenmessverfahren Eigenschaften neuartiger Quantenmaterialien untersucht werden.

Wertschöpfung

Quantensensoren lassen sich in zwei Klassen einteilen: kleine und kostengünstige Ansätze für den

Massenmarkt und leistungsstarke, kostenintensive Lösungen für ausgewählte Spezialanwendungen und einen kleineren Markt. In beiden Fällen entsteht ein wesentlicher Teil der Wertschöpfung nicht im Markt für Sensoren selbst, sondern in den Anwendungen, die die neuen Techniken nutzen können (sekundäre Wertschöpfung). Grundsätzlich besteht daher ein sehr hohes Potenzial für wirtschaftlichen Impact. Eine belastbare Schätzung für die sekundäre Wertschöpfung in den Anwendungsbereichen fällt derzeit allerdings noch schwer. Eine erste Abschätzung bezüglich des Markts für Quantensensoren findet sich im Report „Quantum Sensors Markets, 2018 and Beyond“ und beläuft sich auf 1,3 Milliarden Dollar in 2023 mit einem potenziellen Wachstum auf 2,2 Milliarden Dollar bis 2028.⁶ Der Quantum Technology Hub Sensors and Metrology in Großbritannien geht in seinen Einschätzungen sogar von einem größeren potenziellen Markt von jährlich 4 Milliarden Pfund Sterling (etwa 4,5 Milliarden Euro) für Quantensensoren aus.⁷

⁶ insidequantumtechnology.com/product/quantum-sensors-markets-2018-beyond/

⁷ quantumsensors.org/

Anforderungen an die Technologie und Status quo

Status quo

Generell hat Deutschland im Bereich der Messtechnik und Metrologie traditionell eine hervorragende Ausgangsbasis in Wirtschaft und Wissenschaft. Dies gilt auch spezifisch für die Technologien der Quantensysteme und deren Verwendung in konkreten Einsatzfeldern. Weiterhin sind potenzielle Anwender der Technologie ebenfalls in Deutschland angesiedelt.

Im Bereich der Forschung gibt es eine große Anzahl von Universitäten, die sich mit Quantensystemen beschäftigen und die Anwendungen der Sensorik und Metrologie vorantreiben (zum Beispiel in den Regionen Hannover/Braunschweig, Stuttgart/Ulm). Dies wird ergänzt durch außeruniversitäre Forschungseinrichtungen wie Leibniz-, Fraunhofer- und Max-Planck-Institute sowie Einrichtungen wie die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR).

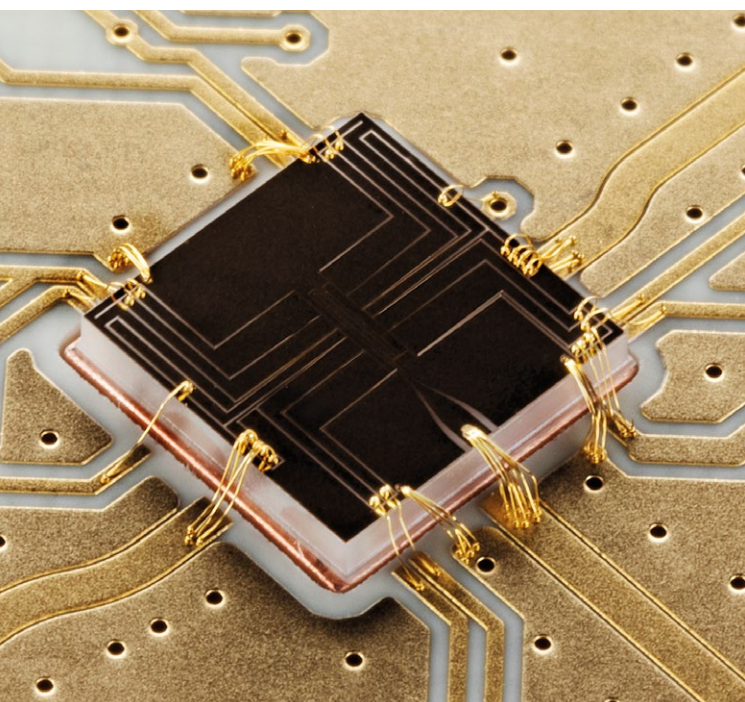
In der Wirtschaft besteht eine gewachsene KMU-Landschaft – sowohl im Bereich der Messtechnik, der Sensorik und der Schlüsseltechnologien als

auch im Bereich der Quantentechnologien. Hinzu kommt eine Vielzahl von Großunternehmen, die sowohl in den Anwendungen dieser Technologien als auch in der Technologieentwicklung selbst zunehmend aktiv sind.

Diese sehr gute Ausgangslage könnte noch stärker genutzt werden für den Transfer von Quantensensortechnologie in den Markt. Treiber der Innovation sind aktuell häufig die akademische und (geförderte) industrielle Forschung. Verbesserungsfähig ist in einigen Bereichen die direkte Einbindung des Markts als Triebfeder der Entwicklung. Eine Möglichkeit, diese Einbindung voranzutreiben, ist die Gründung neuer Unternehmen.

Technologische Souveränität spielt bei der Quantensensorik eher eine untergeordnete Rolle, da sicherheitspolitische Fragen nur am Rande berührt werden. Aufgrund ihrer Bedeutung als disruptive Technologie für viele verschiedene Wirtschafts- und Forschungszweige ist trotzdem eine starke Position Deutschlands in der Quantensensorik anzustreben.

Im internationalen Umfeld ist die Sensorik mit Quantensystemen ebenfalls bereits in Forschungsstrukturen etabliert. Ein wichtiges Beispiel ist der UK Quantum Technology Hub „Sensors and Timing“. Der Hub umfasst die Universitäten Birmingham, Glasgow, Imperial, Nottingham, Southampton, Strathclyde und Sussex sowie das British Geological Survey und arbeitet nach eigenen Angaben mit über 70 Industriepartnern in Projekten zusammen.⁸ Ziel ist die Erforschung von Quantensystemen für Sensorikanwendungen in den Bereichen Gesundheit, Transport, Industrie, Verteidigung sowie Bodenerkundung. Inzwischen wurden auch in den USA vergleichbare Zentren etabliert wie zum Beispiel das NSF Quantum Leap Challenge Institute Q-SEnSE (Quantum Systems through Entangled Science and Engineering), ein Zusammenschluss mehrerer Universitäten und Forschungseinrichtungen.⁹ Auch im Rahmen des Quantum Flagships der EU werden einige Quantensensorikprojekte mit starker deutscher Beteiligung verfolgt, die sich durch Kooperationen von Industrie und Wissen-



⁸ quantumsensors.org/

⁹ colorado.edu/research/qsense/

schaft auszeichnen.¹⁰ Das Spektrum erstreckt sich hier von NV-Zentren (ASTERIQS, MetaboliQs) über atomare Dampfzellen (macQsimal) und Quantenmikrowellen (QMICS) bis zu Atomuhren (IQClock).

Anforderungen an die Technologie

Über alle Ansätze hinweg ist es für den wirtschaftlichen Einsatz von Quantensensoren notwendig, die im Labor demonstrierte Kontrolle von Quanteneffekten beim Transfer in die Anwendung und ins Feld zu erhalten. Generell gilt, dass Strategien und Technologien zur Miniaturisierung für alle Messtechnik- und Sensorikansätze relevant sind. Wesentliche Punkte sind die Umsetzung von Laboraufbauten in robuste und industrietaugliche Demonstratoren sowie Lösungsansätze mit tatsächlichem Gebrauchswert in einer spezifischen Anwendung. Hier zeigt sich die Notwendigkeit von Kooperationen zwischen Wirtschaft und Wissenschaft sehr deutlich. Insgesamt ist es entscheidend, bei der Entwicklung folgende Eigenschaften zu berücksichtigen:

Technologische Wettbewerbsfähigkeit:

- klarer Vorteil der quantentechnologischen Lösung gegenüber klassischen Lösungen
- Erschließen neuer, vorher unzugänglicher Regime, Sensitivität, Genauigkeit

Integration in Gesamtsysteme:

- Integration von Komponenten aus Photonik, Festkörperkomponenten, Fallentechnologien, Elektronik in ein Gerät
- Verfügbarkeit, skalierbare, gleichzeitig günstige Herstellung, kleine Baugröße, Integration und Packaging, geringe Leistungsaufnahme, Verlässlichkeit, Sicherheit, Robustheit
- Zuverlässigkeit und Nutzbarkeit auch unter den nicht idealen Bedingungen in der jeweiligen Umgebung

Nutzerkonzept:

- Anwendbarkeit auch von Nichtexpertinnen und -experten durch Systemintegration
- möglichst geringer Wartungsaufwand und im besten Falle Selbstkalibrierung, ggf. Rückführbarkeit auf das SI

In den meisten Anwendungsszenarien wird erst die Erfüllung mindestens einiger dieser Anforderungen die kommerzielle Umsetzung ermöglichen.

Lösungsansätze und Herausforderungen

Eine zentrale Herausforderung bei der Nutzbarmachung der Quantenphysik für Sensorik und Metrologie ist es, die notwendigen Techniken zur vollständigen Kontrolle aller relevanten Quantenfreiheitsgrade und zum Schutz vor schädlichen Umgebungseinflüssen zu entwickeln. Dies gilt für alle Bereiche der Quantentechnologien. Jeder Quantensensor sollte vorhandene (klassische) Sensoren bezüglich mindestens eines der folgenden Kriterien übertreffen:

- Größe
- Betriebsumgebung
- Empfindlichkeit
- räumliche oder zeitliche Auflösung
- Kalibrierungsintervalle
- Lebensdauer
- Stromverbrauch
- Zuverlässigkeit
- Spezifität
- statistische oder systematische Unsicherheit
- Rückverfolgbarkeit
- Sicherheit

Für diese Vergleiche braucht es zuverlässige und etablierte Referenzsysteme, Standards/Normale sowie geeignete Normen und Regulierungen zur Überprüfung. In der Summe muss sich ein klarer Vorteil der quantentechnologiebasierten Lösung gegenüber der klassischen Lösung darstellen lassen, die sich im „Mess-Alltag“ bewährt.

¹⁰ qt.eu/

Basistechnologien

So vielfältig wie die Anwendungen der Quantentechnologien sind auch die benötigten **Basistechnologien** sowie die damit verbundenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten wichtig:

Eine Vielzahl von Quantensensoren benötigt **miniaturisierte, robuste und energieeffiziente Lösungen**. Dazu gehören zum Beispiel dauerhaft evakuierte Vakuumkammern, kompakte Kryostate, gepulste/schmalbandige Laserquellen, nicht klassische/verschränkte kompakte Lichtquellen, jitterarme und totzeitfreie Timingelektronik und stabile Optikkomponenten. Die Integration dieser Komponenten in robuste und wartungsfreie Aufbauten ist ein wichtiger Schritt bei der Nutzbarmachung auf breiter Basis. Weiterhin können mikroelektromechanische Systeme (Micro-Electro-Mechanical Systems, MEMS), Techniken der Mikrobearbeitung und der additiven Fertigung sowie der integrierten Photonik nutzbringend angewandt werden.

Weiterhin nötig ist die Erforschung von Sensoren und Sensorprinzipien, die durch Mehrteilcheneffekte bis hin zu **verschränkten Sensornetzwerken** einen effektiven Empfindlichkeits-, Auflösungs- bzw. Selektivitätsgewinn erzielen, und die Entwicklung hierfür geeigneter spezifischer Messalgorithmen in solchen Netzwerken. Basistechnologisch werden hier alle Ausprägungen des Quantensensors berührt. Auch werden Wechselwirkungen mit Themenfeldern der Quanteninformationstechnologie erwartet.

Des Weiteren braucht es einheitliche, flexible und **modulare Soft- und Hardware** zur Steuerung und Auswertung von Quantensensoren.

So vielfältig wie die Anwendungen der Quantentechnologien sind auch die benötigten Basistechnologien sowie die damit verbundenen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten.

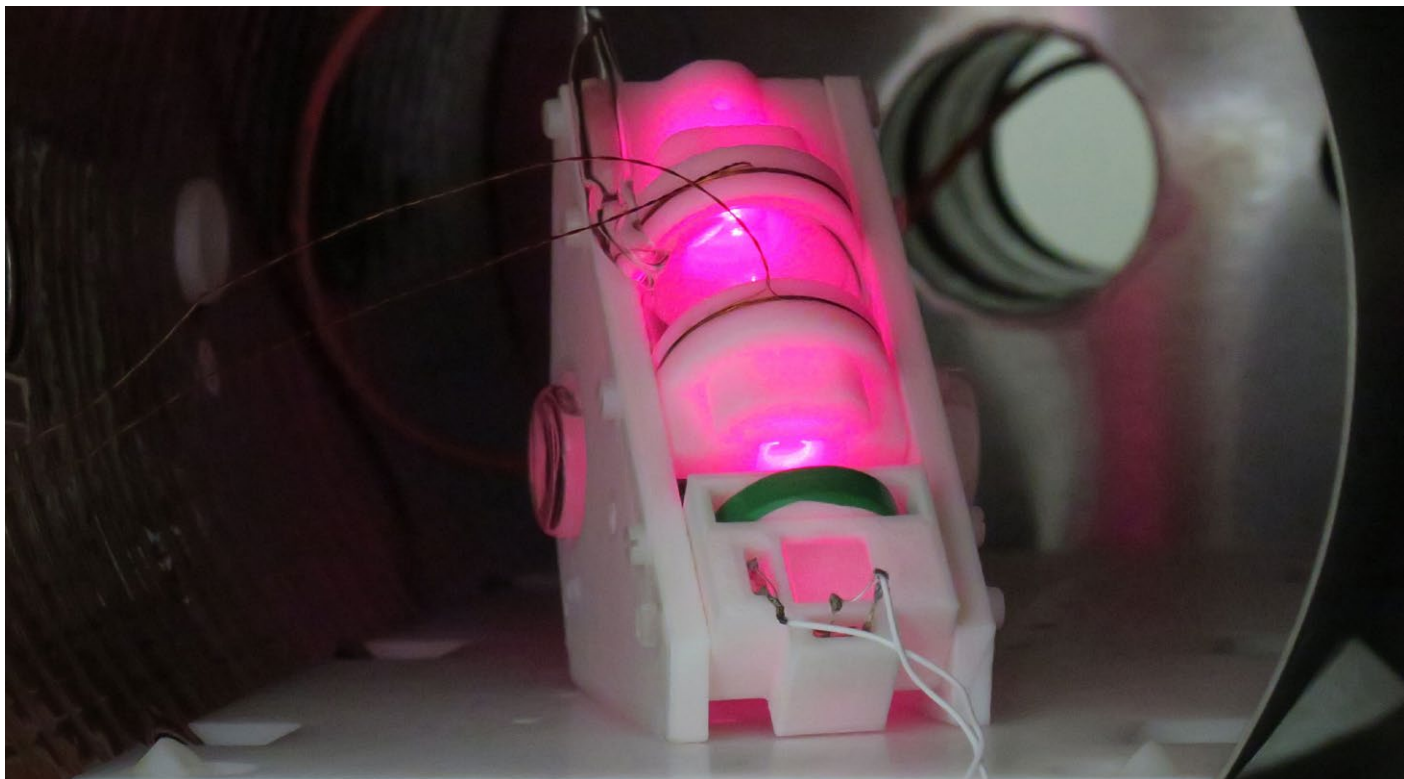
Im Bereich der **Festkörpersensoren**, zum Beispiel Farbzentren in Diamant, liegen Ansätze in der preisgünstigen Herstellung, Skalierung und gezielter Präparation der entsprechenden Zentren mit maximierter Ausbeute bei Raumtemperatur. Dabei sind Fragestellungen der Erhöhung der Detektionsempfindlichkeit zu berücksichtigen. Vergleichbares gilt auch für skalierbare hocheffiziente Halbleiterdetektoren.

Für **gaszellenbasierte Sensoren** wie OPMs oder rydbergatombasierte Sensoren ist die Verfügbarkeit qualitativ hochwertiger MEMS-basierter Gaszellen entscheidend, die reproduzierbar nach einem skalierbaren Verfahren hergestellt werden.

Bezüglich der Sensorik mit **atomaren und molekularen Quantensystemen** ist die Entwicklung kompakter, skalierbarer und preisgünstiger Fallen für Quantenmaterie von größter Bedeutung, beispielsweise Atomchips oder mikrostrukturierte Ionenfallen. Ziel einer kompakten Lösung ist die direkte Integration elektronischer und optischer Komponenten in die Fallenstrukturen.

Die interdisziplinäre Zusammenarbeit verschiedener Fachgemeinschaften kann neue Aspekte in die Entwicklung der Quantensorik einbringen, beispielsweise aus der Signalverarbeitung (Empfindlichkeit und Auflösung von Sensoren weiter verfeinern, optimierte Steuerprotokolle und statistische Methoden entwickeln), aus dem Quantencomputing, der Quanteninforma-

tion (Quantenlogikkonzepte, von Algorithmen für Quantencomputer entlehnte Methoden) und aus dem maschinellen Lernen bis hin zu Konzepten wie quantenunterstützte künstliche Intelligenz. Weiterhin ist in diesem Zusammenhang die Entwicklung neuartiger Sensorprinzipien ein wichtiger Ansatz, angeregt durch Untersuchungen neuer physikalischer Systeme und Anwendungsgebiete.



Forschungsthemen im Bereich des **Quantum Enhanced Imaging** sowie der **Quantenlithografie** betreffen Fragestellungen effizienter und preiswerter Strahlquellen von Einzelphotonen und verschränkten Photonen, dafür geeigneter Pumplaserquellen, effizienter und schneller Einzelphotonendetektoren (einzeln und in Matrixkonfiguration), robuster und miniaturisierter optischer Systeme, jitterarmer und totzeitfreier mehrkanaliger Energie- und Zeitmess-elektroniken sowie die Erforschung relevanter Anwendungsszenarien selbst.

Für die **Schaffung von Standards** ist die Erforschung von Referenzen für Zeit, Frequenz, Länge, Masse, Ladung, Spannung als zugängliche oder vermarktbare Infrastruktur ein wesentlicher Punkt. Gerade die Demonstration solcher gebrauchsfähiger Normale schafft eine erhebliche Aufmerksamkeit und ist für die Verbreitung der Quantentechnologien ein wesentlicher Erfolgsfaktor.

In der **Quantenelektronik** eröffnet die Erforschung und Entwicklung wartungsfreier und auf das SI zurückgeführter Spannungsreferenzen für Elektronik, direkt eingebettet in die Anwendung, neue Perspektiven. Hier können die Erzeugung von beliebigen zeitabhängigen Signalen und die Erweiterung der Frequenz- und Amplitudenbereiche neue Möglichkeiten erschließen und

die Weiterentwicklung der Kryotechnik sowie -elektronik Verbesserungen in Bezug auf die einfachere Handhabung und geringere Kosten bieten. Darüber hinaus kann die Erforschung neuer Materialien wie Graphen und topologischer Materialien den Weg für eine Verfügbarkeit der Technologie bei Raumtemperatur ebnen.

Quantenmagnetometer wie NVs, OPMs und SQUIDs müssen für medizinische Anwendungen kompatibel mit der Anwendung am Menschen weiterentwickelt werden. Häufig ist hierfür die Miniaturisierung bei gleichzeitig hoher Empfindlichkeit entscheidend. Insbesondere sind jedoch bei für die Komponenten notwendigen Temperaturbereichen von tiefen Minusgraden bis zu unter -150 Grad Celsius entsprechende Aufbau- und Verbindungskonzepte für Komponenten und daraus bestehende Systeme zu entwickeln.

Weitere Herausforderungen sind die **Erweiterung des Frequenz- und Messbereichs** sowie **Verbesserungen und Parallelisierungen bei der Ausleselektronik** (Parallelisierung bzw. Erhöhung der Samplingtiefe). Wichtig ist auch die Systemintegration. Gerade in der Medizin besteht im Sinne der Marktakzeptanz ein hoher Bedarf an Turn-Key-Systemen mit vielen Kanälen, die bisher nicht verfügbar sind.

Im Falle von SQUIDS bieten Fortschritte in der Kryotechnik Perspektiven für im Klinikalltag besser nutzbare Systeme. OPMs und NVs bieten den Vorteil, dass sie bei Raumtemperatur arbeiten und daher sehr nah am Menschen eingesetzt werden können. Damit lässt sich eine höhere Sensordichte und somit höhere räumliche Auflösung erzielen.

Kooperationen

Die Weiterentwicklung wichtiger Schlüsselkomponenten wird gemeinsam mit den anderen Quantentechnologie-Themenswerpunkten erfolgen, um Synergieeffekte optimal zu nutzen. Bei vielen dieser Aufgaben und Herausforderungen zeigt sich deutlich, dass eine enge Zusammenarbeit von Partnern sowohl aus der Wirtschaft als auch aus der Wissenschaft notwendig ist, um die komplementären Fähigkeiten gemeinsam für eine Lösung einzusetzen.

Es gibt dafür bereits einige Beispiele: Die „Quantum Challenges“ von Zeiss verknüpfen realistische Messprobleme mit Lösungen aus der Quantensensorik. Im BMBF-geförderten Projekt „opticlock“ entwickelt ein Konsortium aus Industrie und Wissenschaft eine transportable und dauerbetriebsfeste optische Atomuhr für Anwender. Darüber hinaus stellen Innovationsnetzwerke mit Partnern aus der akademischen Forschung und der Industrie ein starkes Instrument für den Wissenstransfer, die Initiierung gemeinsamer Forschungs- und Entwicklungsprojekte und die Kommerzialisierung von Quantentechnologien dar.

Ein wichtiger Aspekt ist der **niederschwellige Zugang** für akademische und industrielle Partner zur typischerweise komplexen und aufwendigen Infrastruktur für die Entwicklung und Validierung von Quantentechnologien. Das Quantentechnologie-Kompetenzzentrum (QTZ) der PTB beispielsweise ermöglicht solch einen Zugang zu der an der PTB über Jahrzehnte hinweg entwickelten Infrastruktur, Messtechnik und Expertise. Dort können in Zusammenarbeit und unter Nutzung der vorhandenen Expertise Komponenten für Quantensysteme entwickelt, vermessen und charakterisiert und so die mögliche Eignung für applikationsrelevante Einsätze bewertet werden. Darüber hinaus kann das QTZ eine koordinierende

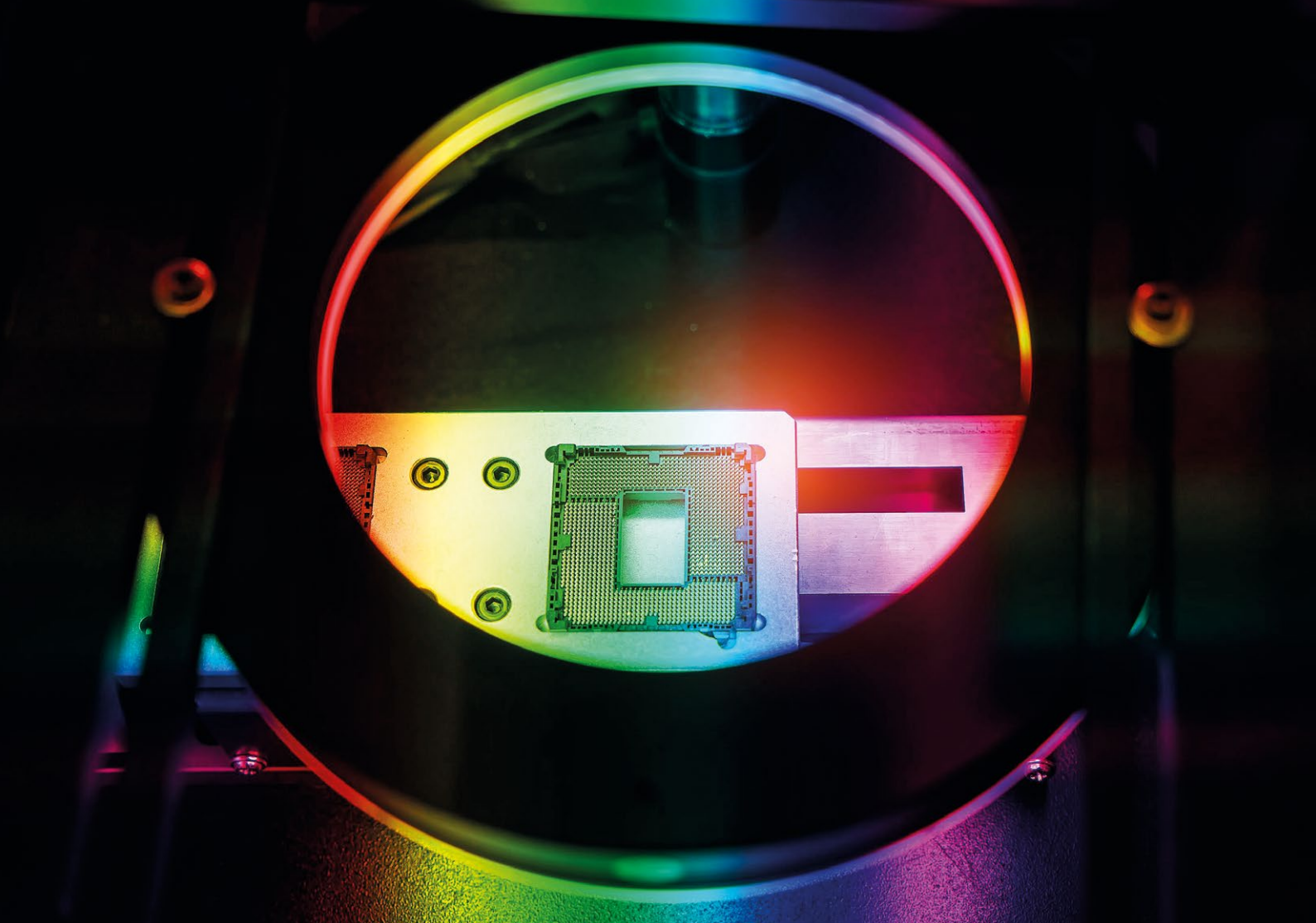
Rolle einnehmen und Akteure aus Industrie und akademischer Welt zusammenbringen.

Fundamental für die Kommerzialisierung und die zuverlässige Vergleichbarkeit sind weiterhin **Normen und Standards** – auch in den Quantentechnologien. Erst etablierte Normen ermöglichen einen sicheren Vergleich zwischen Quantentechnologiekomponenten und -produkten, und erst standardisierte Schnittstellen zwischen Quantentechnologiekomponenten erlauben die Entfaltung des Markts. Diese Entwicklung wurde in jüngster Zeit beispielsweise durch Euramet/EMN-Q¹¹ und die Focus Group QT von CEN-CENELEC¹² angestoßen. Eine möglichst breite Beteiligung aus der Industrie ist hier entscheidend.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist die begleitende **Ausbildung geeigneter Fachkräfte**, die die Brücke zwischen der Grundlagenforschung zu Quantentechnologien hin zu marktfähigen Produkten bilden. Die Initiativen hier sollten sich sowohl auf die schulische und studentische Ausbildung als auch die Weiterbildung im Berufsleben erstrecken (anwendungsnahe Forschungseinrichtungen, Transferzentren). Hierfür sollten ein abgestimmtes Aus- und Weiterbildungsprogramm sowie eine harmonisierte Tagungsstruktur für Deutschland erstellt werden, um unsere begrenzten Ressourcen effizient einzusetzen (siehe auch 3.5).

11 euramet.org/european-metrology-networks/quantum-technologies/

12 cencenelec.eu/standards/Topics/QuantumTechnologies/Pages/default.aspx



3.4

Integrierte Quantenplattformen und Enabling Technologies

Langfristig die Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands und Europas in den Quantentechnologien zu sichern gelingt nur durch das Etablieren einer unabhängigen europäischen Zulieferer- und Anwendungsindustrie. Diese treibt Anwendungen in den Märkten Computing, Kommunikation und Quantensensorik voran und stellt systemkritische Materialien, Komponenten, Module und Technologien entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Software und Hardware bereit. Dazu gehört auch die Entwicklung von Software und Algorithmen, die an die Hardwarekomponenten angepasst sind. Je nach Anwendungsgebiet basieren Quantentechnologien auf unterschiedlichen technologischen Plattformen. Forschungs- und Entwicklungsziele müssen daher plattformagnostisch definiert werden und dabei immer einen holistischen Systemansatz verfolgen. Lösungen für den Hardwarebereich werden

aus den Materialwissenschaften, der Photonik, der Mikroelektronik und der Informatik entstehen und betreffen unter anderem folgende Themen:

- Lineare und nichtlineare optische Materialien geringster optischer Verluste
- Photonische Schnittstellen und Schaltkreise (integrierte Optik/Faseroptik)
- Deterministische und verschränkte Photonenquellen, Einzelphotonendetektoren
- Aktive und passive (mikro- und nano-)optische Elemente (Metamaterialien, Freiformoptik)
- Mikrowellentechnik, Kryotechnik, Vakuumtechnik und Feinmechanik

- Mikroelektronische Kontrollsysteme, Signalverstärkung und Verarbeitung
- Nanoelektronische Komponenten und Schaltungen
- Hybride Integrationstechnik sowie Produktionstechnik und Automatisierungstechnik

Anforderungen an die Technologie

Das zu entwickelnde Ökosystem der Quantentechnologien soll die Voraussetzungen schaffen, um Ergebnisse der Grundlagenforschung wirtschaftlich zu verwerten.

Technologieführerschaft, Anwendungskompetenz und hohe Umsetzungsgeschwindigkeit sind neben wissenschaftlicher Exzellenz die wesentlichen Voraussetzungen, um marktfähige Anwendungen und Produkte zu entwickeln. Gleichzeitig müssen die äußerst dynamischen und disruptiven Entwicklungen in den Quantentechnologien flexibel aufgenommen werden können, wofür Unabhängigkeit und damit Resilienz notwendige Randbedingungen sind.

Start-ups und KMU sind ein wichtiger Träger, um einen schnellen Markttransfer zu sichern. Diese benötigen jedoch für ihren Erfolg einen niederschweligen Zugang zu kapitalintensiven technologischen Infrastrukturen zur Entwicklung von Systemen, mit denen Quantenzustände dargestellt, präpariert und kontrolliert werden können. Denn dies ist die Basis für Computer, Kommunikationsnetze, Sensoren oder Bildgeber und viele weitere Anwendungen der Quantentechnologien.

Status quo

In vielen Bereichen der Basistechnologien für quantentechnologische Systeme hat Deutschland eine sehr gute Ausgangsposition. Dies gilt insbesondere für die Photonik. Diese ist von fundamentaler Bedeutung für die Entwicklung der Quantentechnologien, und Deutschland hat hier eine internationale Spitzenstellung. Sie kann der Ausgangspunkt sein, um auch in den Quantentechnologien eine Vorreiterrolle einzunehmen.

Dank des in den letzten Jahrzehnten etablierten Ökosystems aus exzellenten Forschungseinrichtungen und innovationsstarken Unternehmen stehen Partner für einen wirksamen Technologietransfer aus dem Labor in die Anwendung bereit. Allerdings wird dieser Transfer nicht durch bestehende Marktmechanismen unterstützt, weshalb der Staat hier fördernd eingreifen muss. Die Anwendungen der zu entwickelnden Technologien sind nicht auf die Quantentechnologien beschränkt, sondern werden für weitere Zukunftsmärkte wie Digitalisierung, Gesundheit, Mobilität, Produktion und Sicherheit relevant sein. Insbesondere die Beherrschung von Enabler-Technologien im Bereich der Komponenten für die Quantentechnologien sind Voraussetzung für die Souveränität Deutschlands und Europas im Bereich Quantentechnologien.

Diese Souveränität an den kritischen Stellen entlang der Technologiekette vom Material über die Komponenten bis zum Hybriden ist eine Voraussetzung, um in den Quantentechnologien eine führende Rolle einzunehmen. Diese wird Deutschland im internationalen Vergleich mit China, den USA und Großbritannien aber nur gelingen, wenn die Spitzenstellung in der Photonik mit den hier umrissenen Facetten erhalten und ausgebaut wird.

Eine weitere Voraussetzung für den wirtschaftlichen Erfolg der Quantentechnologien neben technologischer Souveränität sind widerstandsfähige Wertschöpfungsketten. Diese erfordern die sichere Verfügbarkeit von speziellen Materialien, die für die Quantentechnologien unverzichtbar sind. So müssen beispielsweise für die Wafer-Level-Integration optische, optoelektronische und supraleitende Funktionsmaterialien in der erforderlichen Qualität und dem notwendigen Volumen verfügbar sein. Kritische Abhängigkeiten von Zulieferern außerhalb Europas sind zu vermeiden.

Eigene Forschungsaktivitäten zu derartigen Materialien sind nur in geringem Umfang vorhanden, die nationalen (und europäischen) Fähigkeiten zur Materialsynthese sind begrenzt. Diese Fähigkeiten müssen daher erheblich gestärkt und ausgebaut werden. Außerdem muss klar identifiziert werden, welche Kompetenzen in Deutschland und Europa verfügbar sein müssen und in welchen Bereichen Zulieferer außerhalb Europas eingebunden werden

können. Für Basistechnologien müssen auch Ausführbeschränkungen erwogen werden.

Fehlende Netzwerke für Basistechnologien abseits der Photonik

Während für photonische Komponenten, wie bereits erwähnt, ein nahezu komplettes Ökosystem existiert, fehlen bei weiteren Basistechnologien jedoch weitgehend entsprechende Netzwerke und Industriepartner für den Technologietransfer. So steckt beispielsweise die Entwicklung von **Mikrowellenkomponenten** zur Kontrolle von Quantenzuständen in Deutschland noch in den Kinderschuhen, ein Netzwerk von verwertenden Unternehmen fehlt.

Den Markt der **Kryotechnik** im tiefen Millikelvin-Bereich sowie supraleitender Bauelemente und -systeme dominieren Forschungseinrichtungen und Unternehmen außerhalb der EU. In Deutschland existieren dazu vereinzelte, wenig koordinierte Aktivitäten in Forschungseinrichtungen und Start-ups. Nur im Bereich der Quantensensorik gibt es Module, die bereits das Stadium einer kommerziellen Verwertung in Deutschland erreicht haben.

Im Bereich **Vakuumtechnik** existieren dagegen in Deutschland bereits vielfältige unternehmerische Aktivitäten, die auch mit Blick auf die technischen Rahmenbedingungen von Vakuumkomponenten und deren Zusammenspiel für Quantentechnologieranwendungen vorangetrieben werden. Die notwendige mehrwertstiftende basistechnologieübergreifende Vernetzung existiert weder in Deutschland noch international.

Hybride Mikrointegration bei Wellenlängen im Nahinfrarot-Bereich (NIR) ist eine Schlüsseltechnologie für viele Anwendungsfelder der Quantentechnologien.

Mikro- und nanooptische Komponenten mit aktiven und passiven Wellenleiterbauelementen sowie optischen Fasern werden zu einem vollständig funktionsfähigen System gekoppelt. In diesem Bereich sind Forschungseinrichtungen und in der optischen Telekommunikation tätige Unternehmen international an erster Position. Die Heterointegration photonischer Systeme für den Wellenlängenbereich unterhalb von 1,3 Mikrometern steht dagegen auch international noch ganz am Anfang. Der Schwerpunkt entsprechender Forschungsaktivitäten liegt derzeit in Asien und Nordamerika. Hochschulen und Forschungseinrichtungen in Deutschland haben die Voraussetzungen, um auch auf diesem Gebiet eine Spitzenposition einzunehmen.

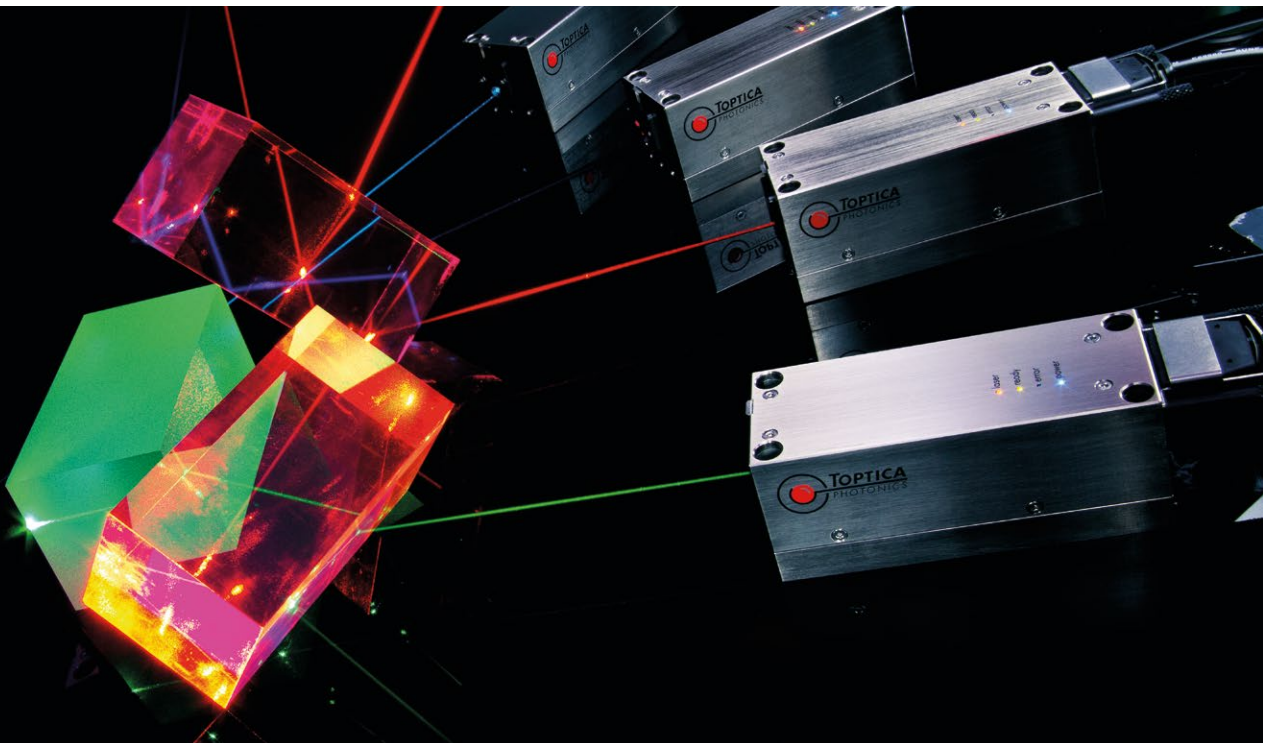
Um international relevante Fertigungskapazitäten aufzubauen, müssen Unternehmen in die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten eingebunden

und strukturbildende Zentren geschaffen werden, die die notwendigen Infrastrukturen vorhalten.

Systeme zur Erzeugung definierter Photonen mit Wellenlängen vom kurzwelligen ultravioletten Bereich bis in den Millimeterwellenspektralbereich sind Voraussetzung, um weite quantentechnologische Anwendungsfelder zu erschließen. Hierzu gibt es umfangreiche Forschungsaktivitäten, denen andererseits aber nur praktische Umsetzungen im sichtbaren und angrenzenden Spektralbereichen gegenüberstehen.

Start-ups und KMU benötigen niederschwelligen Zugang zu kapitalintensiven technologischen Infrastrukturen zur Entwicklung von Systemen, mit denen Quantenzustände dargestellt, präpariert und kontrolliert werden können.

Probabilistische Systeme bei Raumtemperaturbetrieb werden mittlerweile routinemäßig in Laboren, teilweise aber auch bereits in Quantenkommunikationssystemen außerhalb der Forschungseinrichtungen erfolgreich eingesetzt. Deterministische Systeme setzen aufwendige Kryotechnik voraus und sind daher zurzeit überwiegend Gegenstand der Forschung. Marktfähige, industriell einsetzbare



Einzelphotonenquellen sind aktuell schwer herstellbar und limitieren die Anwendbarkeit der Quantentechnologien.

Selbiges gilt für die **Erzeugung von nicht klassischem Licht** zur Reduktion des Quantenrauschens. Solche Systeme sind insbesondere in den Bereichen Quantensensorik und Quantencomputing unverzichtbar.

Systeme für die Präparation, Kontrolle, Manipulation und das Auslesen von Quantenzuständen sind eine weitere Voraussetzung für den Transfer der Quantentechnologien in die Anwendung. Sie sind weltweit Gegenstand intensiver Forschung. Quantenzustände werden derzeit nach sehr unterschiedlichen physikalischen Prinzipien realisiert. Die technische Umsetzung in anwendbare Systeme erfordert eine Vielzahl von Lösungsansätzen, deren Erfolg nicht vorhersehbar ist. In der Folge sind unternehmerische Aktivitäten auf diesem Gebiet derzeit sehr selten.

Handlungsempfehlungen

Entlang der Wertschöpfungskette zur Realisierung und Kontrolle von Quantenplattformen und deren Anwendung in unterschiedlichen Szenarien lassen sich drei prioritäre, eng miteinander verzahnte Handlungsfelder ableiten:

1. Materialien, Komponenten und adaptierte Fertigungstechnologien als Basis für die Realisierung von Quantenplattformen
2. Module und Systeme für die Präparation, Detektion, Kontrolle, Manipulation und das Auslesen von Quantenzuständen
3. Systemkritische Basistechnologien für Design, Simulation, Fertigung und Charakterisierung

Die prioritären Handlungsfelder sind synergetisch miteinander über die Basistechnologien verknüpft. Als Instrumente zur Förderung der wirtschaftlichen Verwertung der Quantentechnologien empfehlen sich:

- Verbundforschung
- Nachwuchsgruppen
- kritische Infrastrukturen (Basistechnologien)
- Moonshot-Projekte
- Start-up-Entwicklung
- Qualifizierung

3.4.1

Materialien, Komponenten und adaptierte Fertigungstechnologien als Basis für die Realisierung von Quantenplattformen

Eine Voraussetzung für eine breite wirtschaftliche und gesellschaftliche Nutzung der Quantentechnologien ist eine solide Basis in den Bereichen Materialien, Komponenten und zugehörigen Fertigungsverfahren, die auf die spezifischen Anforderungen der Quantentechnologien ausgerichtet ist. Diese Basis muss geschaffen bzw. ausgebaut werden und zwei wesentliche Ziele verfolgen:

- Technische Lösungen müssen kompakter, robuster und energieeffizienter werden.
- Herstellungsprozesse müssen zuverlässiger, kostengünstiger und reproduzierbarer werden.

Das erste Ziel lässt sich mithilfe von **Miniaturisierungskonzepten** erreichen. Für das zweite Ziel braucht es geeignete, automatisierte und möglichst skalierbare **Fertigungstechnologien**. Hierzu müssen entsprechende Forschungsaktivitäten initiiert und unterstützt werden.

Eine zentrale Aufgabe ist die **Integration optisch aktiver Quantensysteme** in mikro- und nanophotonische Elemente zur effizienten Lichtsammlung, Anregung, Emissionsverstärkung und für quantenkohärenten Informationsaustausch zwischen Quantensystemen und Licht. Themenschwerpunkte sind hierbei die hochgradige Integration auf Komponentenebene, die Verbindungstechnik auf Mikroebene – insbesondere für optoelektronische Gruppen sowie Mikrosystemtechnik – und hybride Ansätze zur Realisierung multifunktionaler Bauteile. Fortschritte auf diesem Gebiet kommen auch anderen Bereichen wie beispielsweise der Medizintechnik zugute.

Zunehmende Miniaturisierung und Integrationsdichte stellen Anforderungen an die Energieeffizienz und das Wärmemanagement. Bei hochintegrierten Systemen hängt hiervon der Aufwand für die Kühlung ab – insbesondere bei Systemen, die unter Tieftemperaturbedingungen betrieben werden.

Materialien für Quantenkomponenten

Der Einsatz der in den Quantentechnologien benötigten Komponenten stellt hohe Anforderungen an die zu verwendenden Materialien. Das Spektrum reicht von optischen und elektrooptischen Materialien über hochreinen und nanoskalig strukturierten Diamant bis hin zu aluminium- und niobbasierten supraleitenden Schaltkreisen.

Für die Miniaturisierung müssen geeignete optische Materialien mit hoher Wirkungsichte bereitgestellt werden, um beispielsweise nicht lineare Frequenzkonversion, optische Isolatoren oder Modulatoren in kompakten oder integrierten Aufbauten zu realisieren.

Für die Integration optisch aktiver Elemente bis zu Quantenemittern und Quantenspeichern in photonisch integrierten Schaltkreisen (Photonic Integrated Circuit, PIC) werden hochtransparente, hochbrechende Materialien mit sehr geringer Eigenfluoreszenz benötigt. Für die Massenfertigung müssen diese Materialien mit lithografischen Verfahren bearbeitet werden können.

Unter anderem hat sich **Lithiumniobat (LN)** als Plattform für die Quantenphotonik etabliert. Es vereint eine sehr breitbandige hohe Transmission, hohe optische Nichtlinearität und elektrooptische Modulierbarkeit und ist damit sowohl für Phasen- und Amplitudenmodulatoren als auch für die nicht lineare Frequenzkonversion einsetzbar.

Durch eine Dotierung mit Fremdatomen sind auch Quellenfunktionalitäten monolithisch integrierbar. In Form von LN-on-Insulator-Wafern (LNoI) ist es als Basisplattform für hochintegrierte photonische Chips bestens geeignet.

Herstellungsverfahren für LNoI-Wafer sind aktuell nur in China etabliert. Ein strategisches Ziel ist in diesem Zusammenhang der Aufbau von Fertigungskapazitäten in Europa, die die Herstellung von LNoI-Wafern im industriellen Maßstab erlauben. Begleitend dazu müssen Technologien zur Herstellung des Kristallmaterials in hoher Qualität, die Bondtechnologie für LNoI-Wafer und Strukturierungstechnologien für verlustarme Wellenleiter in LN entwickelt werden. Ebenso müssen Verfahren

zur Funktionalisierung von LN durch periodisches Polen bereitgestellt werden. Dies ist beispielsweise die Voraussetzung für die nicht lineare Frequenzkonversion auf LNoI-Wafern.

Aluminiumgalliumarsenid (AlGaAs) ist ein weiteres vielversprechendes Materialsystem für die Quantentechnologien. Aufgrund seines hohen optisch nicht linearen Koeffizienten ist es für die effiziente spontane parametrische Abwärtskonversion (SPDC) – beispielsweise zur Erzeugung verschränkter Photonenpaare – sehr gut geeignet. AlGaAs wird in der Halbleiterfertigung eingesetzt, die Prozesse sind etabliert und eignen sich für die Fertigung großer Stückzahlen. Dieses Materialsystem ermöglicht es zum Beispiel, Pumplichtquellen auf einem Chip zu integrieren und so sehr kompakte Bauteile für die Quantentechnologien herzustellen. AlGaAs ist nicht doppelbrechend, sodass die für die Erzeugung verschränkter Photonen notwendige Phasenanpassung durch andere Techniken wie Quasi-Phasenanpassung oder Bragg-Reflexionswellenleiter erreicht werden muss. Dies stellt hohe Anforderungen an den Fertigungsprozess, um Schichtdicken und Materialkonzentrationen beispielsweise von Aluminium präzise einzuhalten.

Monokristalliner Diamant ist ein gut geeignetes Hostmaterial für den Aufbau von Quantenemittern, -speichern und Quantenmagnetfeldsensoren. Durch gezieltes Einbringen von Defektzentren wie NV-Zentren oder Gruppe-IV-Defektzentren mit Silizium, Germanium oder Zinn als Element lassen sich beispielsweise hochempfindliche Magnetfeldsensoren aufbauen. Die optischen Eigenschaften der Defektzentren sind stark von der Magnetfeldstärke am Ort des Defektzentrums abhängig. Die herausfordernde Aufgabe besteht darin, diese Änderung der optischen Eigenschaften zu detektieren. Dazu muss das zur Detektion und Kontrolle verwendete Licht sehr effizient an die Defektzentren gekoppelt werden. Fertigungsverfahren, die die Produktion geeigneter Strukturen in monokristallinem Diamant in großer Stückzahl ermöglichen, gibt es derzeit noch nicht.

Materialien, die ihre Eigenschaften aus ihrer geometrischen Struktur erhalten, sind wahrscheinlich eine weitere Basis insbesondere für Strahlquellen für die Quantentechnologien. Hierzu zählen unter anderem

Halbleiterquantenpunkte, Quantenemitter in 2D-Materialien, Quantenemitter in Siliziumcarbid, molekulare Quantenemitter wie organische Moleküle und Kohlenstoff-Nanoröhrchen sowie Ionen seltener Erden, die in dielektrischen Kristallen oder molekularen Komplexen eingebettet sind.

Quantenschaltkreise auf Aluminium- oder Niobtechnologiebasis bieten derzeit die einzige Möglichkeit, nanoskalige Quantenschaltkreise herzustellen. Josephsonkontakte mit Abmessungen im Nanometerbereich werden derzeit ausschließlich mit der Aluminiumtechnologie hergestellt. Diese sind unter anderem eine vielversprechende Hardwareplattform für das Quantencomputing. Für Quantenmikrowellenkomponenten und hochfrequente supraleitende Qubits (größer 15 Gigahertz) muss die Materialbasis erweitert werden. Aussichtsreiche Kandidaten sind beispielsweise Niob, Niobtitan und granulares Aluminium. Im Bereich der Majorana-qubits sind topologische **Supraleiter** für Majorana-Zero-Moden relevant.

Mit Dielektrika beschichtete Substrate sind die Grundlage für die Fertigung von Neutralatom- und Ionenfallenmikrochips für optische Uhren, Quantensimulatoren und Quantencomputer. Die Dielektrika müssen dafür hohe Wärmeleitfähigkeit, niedrige Radiofrequenzverluste und gute mechanische Eigenschaften (frei von mechanischen Eigenspannungen) aufweisen.

Bei allen verwendeten **Fertigungstechnologien** und Materialien besteht eine wesentliche Aufgabe darin, Lösungen unter anderem für die Bautechnik zu finden, welche die Herstellung von Komponenten erlauben, die unter Hochvakuumbedingungen in einem weiten Temperaturbereich von Raumtemperatur bis zu Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt funktionieren.

Um **Fertigungsverfahren für hohe Stückzahlen** verfügbar zu machen, müssen Verfahren wie Laser-, Ätz- oder andere subtraktive Verfahren entwickelt werden, die die Strukturierung von Wafermaterialien in drei Dimensionen erlauben. Besonders zu nennen sind hier Verfahren für Diamant und Saphir, da diese Materialien voraussichtlich eine hohe Bedeutung für die Quantentechnologien haben werden.

Alle Verfahren müssen **Bearbeitungs-genauigkeiten** bis zur Größenordnung einzelner Atome erreichen können. Dies bezieht sich auch auf die Fähigkeit, gezielt einzelne Ionen im Material zu implantieren. Hierfür braucht es zum Beispiel geeignete Ionenstrahl- und Laserprozesse.

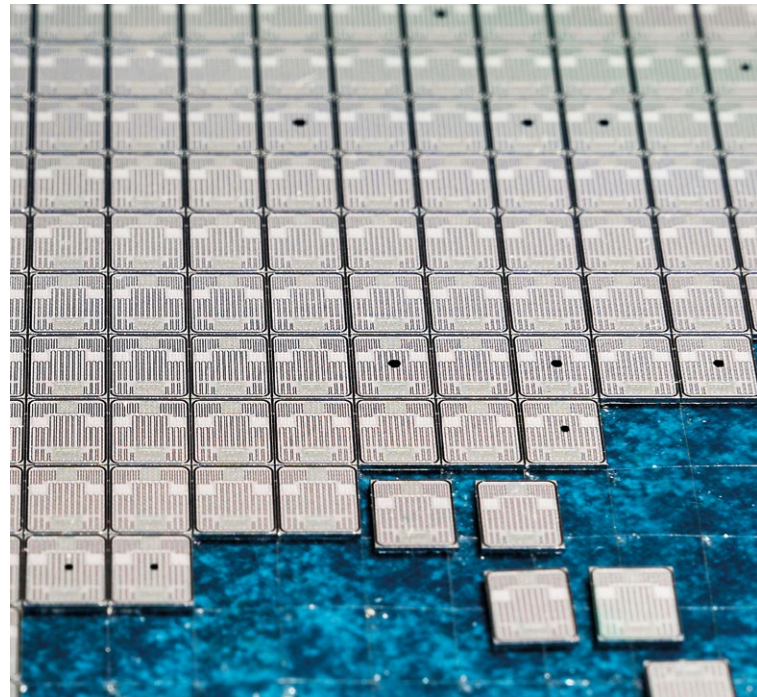
Um die Material- und fertigungstechnologische Basis für die Produktion von Komponenten für die Quantentechnologien zu schaffen, müssen zahlreiche materialwissenschaftliche Fragen geklärt werden. Eine enge Zusammenarbeit mit diesem Fachgebiet ist daher die Voraussetzung für den Erfolg der Quantentechnologien in Deutschland und Europa und der Schlüssel für die technologische Souveränität in diesem Bereich.

Komponenten für die Realisierung von Quantenplattformen

Für eine breite industrielle Nutzung von Quantensystemen müssen diese von einem komplexen, raumfüllenden Laboraufbau auf die Größe eines Chips reduziert werden.

Damit dies gelingt, müssen unter anderem folgende Voraussetzungen auf Komponentenebene erfüllt sein, die auch teilweise schon vorliegen:

- Mikrofabrikation (Foundry Service)
- Integration von Mikrooptik und Elektronik
- Verfügbarkeit von integrierten Mikroresonatoren höchster Güte
- Integrierte effiziente Einzelphotonendetektoren
- Integrierte Wellenleiter und Auskoppler
- Verlustarme Kopplung von Mikrooptiken und Glasfasern
- Dünnschichttechnologien zum Beispiel für die Herstellung integrierter Ionenfallen sind vorhanden
- Verfügbarkeit geeigneter Sockeltechnologien
- Füge- und Justageverfahren für dreidimensionale Strukturen sind verfügbar



- Vertikale Konnektivität auf Chips kann hergestellt werden
- Integrierte Elektronik für echtzeitfähige Automation und Kontrolle ist verfügbar
- Miniaturisierte, effiziente Kryotechnologie ist verfügbar
- Standardisierung von optischen und elektrischen Schnittstellen ist vorhanden
- Standardisierte Verfahren für Tests und Charakterisierung von Komponenten existieren und sind etabliert

Die Quantentechnologien brauchen folgende Komponenten:

Strahlquellen

Komponenten zur Erzeugung und Kontrolle klassischer oder nicht klassischer optischer Strahlung sind wichtige Komponenten von Systemen für die Quantensensorik, das Quantencomputing und die Quantenkommunikation. Zentral sind hierbei Laser zur Erzeugung klassischer optischer Felder. Für Anwendungen in den Quantentechnologien sind komplexe, aber kompakte Lasersysteme erforderlich, die

auch außerhalb von Laboren zuverlässig einsetzbar sind. Hier liegt der Fokus auf der Entwicklung von Diodenlasern, die für die monolithische und die Heterointegration geeignet sind und sich in großer Stückzahl zu vergleichsweise geringen Fertigungskosten herstellen lassen.

Für die unterschiedlichen Anwendungen in den Quantentechnologien müssen die jeweils am besten geeigneten Halbleiterlaserkonzepte gefunden werden (Kanten- versus Oberflächenemitter, Quantum Well versus Quantum Dot etc.).

In diesem Zusammenhang sind intensive Forschungsaktivitäten unter anderem auf folgenden Gebieten erforderlich:

- Zuverlässigere galliumarsenidbasierte (GaAs) Hochleistungsdiodenlaser und optische Verstärker
- Qualifizierung von integrierten, mikrooptischen MOPAs (Master Oscillator Power Amplifier) für den Einsatz in den Quantentechnologien
- Entwicklung von galliumnitridbasierten (GaN) Diodenlasern speziell für den Einsatz in den Quantentechnologien

Strahlmanipulation

Komponenten zur Manipulation von Lichtstrahlung sind für die Quantentechnologien unverzichtbar. Die nicht lineare Frequenzkonversion spielt hierbei eine besondere Rolle. Dies gilt sowohl für die Konversion klassischer Felder für die Quantensensorik und für das Quantencomputing als auch für Einzelphotonenanwendungen in der Quantenkommunikation und dem Quantenimaging. Bei der Konversion klassischer Lichtfelder liegt der Fokus häufig auf einer hohen Konversionseffizienz und einer hohen Ausgangsleistung. Geringe Standzeiten und damit geringe Zuverlässigkeit von kristallbasierten Lösungen im blauen/ultravioletten Spektralbereich begrenzen derzeit die Anwendbarkeit entsprechender Komponenten.

Auch die Kontrolle von Wellenlänge und Polarisationszustand von Photonen sind für die Quantentechnologien sehr wichtig. Hierzu müssen kompakte Filter entwickelt werden, die dies im Wellenbereich von Ultraviolett bis Infrarot ermöglichen. Neu-

artige Metaoberflächen bzw. Metastrukturen bieten sich hierfür an. Methoden für das Design und Nanostrukturierungsverfahren zur wirtschaftlichen Herstellung solcher Filter müssen entwickelt werden.

Phasen- und Amplitudenmodulatoren

Phasen- und Amplitudenmodulatoren werden für die zeitliche Kontrolle der Polarisierung, Phase, Frequenz, der optischen Leistung sowie für das Schalten von optischen Pfaden mit sehr hoher Kanaltrennung benötigt. Sie müssen verlust- und rauscharm sein. Für hohe Leistungen bis in den Wattbereich und Wellenlängen unterhalb von 1,3 Mikrometern stehen vor allen Dingen kristallbasierte Lösungen zur Verfügung, die als Bulk oder Wellenleiter ausgeführt sind. Im Wellenlängenbereich um 400 Nanometer ist Quarzglas als Phasenmodulator geeignet. Neben Methoden zur Erhöhung der erwähnten Standzeit müssen Verfahren zur Miniaturisierung, Strukturierung und hybriden Mikrointegration dieser Komponenten entwickelt werden.

Für geringere Leistungen können Phasen- und Amplitudenmodulatoren halbleitertechnologisch (monolithisch) realisiert werden. Für Anwendungen in der Telekommunikation sind solche Lösungen bereits in der Indiumphosphidtechnologie (InP-Technologie) etabliert. Für den Wellenlängenbereich unterhalb von 1,3 Mikrometern müssen diese existierenden Bauteilkonzepte auf GaAs- und später auf GaN-Technologie übertragen werden. In diesem Zusammenhang müssen auch hocheffiziente akustooptische Modulatoren und Schalter erforscht werden. Diese halbleitertechnologischen Lösungen sind für die hybride Mikrointegration sowie für die Heterointegration geeignet.

Optische Isolatoren und Zirkulatoren

Optische Isolatoren und Zirkulatoren sind ein unverzichtbarer Bestandteil von Lasersystemen. Jenseits der bereits thematisierten Materialfragen müssen für die monolithische bzw. Heterointegration halbleitertechnologisch realisierbare, wellenleiterbasierte Konzepte für optische Isolatoren entwickelt werden, die bisher nur in Ansätzen verfügbar sind. Optische Isolatoren auf Glasbasis wurden bereits in geeigneter Qualität als Demonstrator hergestellt, ebenso wie halbleiterbasierte optische Isolatoren. Für die wirtschaftliche Herstellung in großen Stückzahlen braucht es wirtschaftliche Verfahren.

Mikrooptiken

Im Bereich der Optiken werden Mikrooptiken hoher Qualität benötigt. Dafür müssen vor allen Dingen günstige Fertigungsverfahren entwickelt werden. Insbesondere für das Rapid Prototyping bieten additive Fertigungsverfahren ein großes Potenzial. Ferner müssen – je nach Anwendung – (Mikro-)Optiken verfügbar sein, die als Freiformflächen auslegbar sowie adaptiv oder feinjustierbar sind (zum Beispiel MEMS-basierte Lösungen).

Verlustarme optische Fasern

Zur Ankopplung der neuen integriert-optischen Quantenchips an bestehende Kommunikationsnetze und die Kopplung der Komponenten untereinander werden verlustarme optische Fasern im sichtbaren und ultravioletten Bereich benötigt. Diese sind derzeit nicht in ausreichender Qualität verfügbar. Neuartige Lösungsansätze auf Basis von zum Beispiel Hohlkern- oder photonischen Kristallfasern müssen hier erforscht werden. Effiziente Verfahren zur Lichteinkopplung in Quantenchips könnten auf Basis photonischer Kristalle oder chipintegrierter Beugungsgitter realisiert werden. Auch hier besteht hoher Forschungsbedarf.

Für die Spektroskopie atomarer (zum Beispiel Rubidium, Kalium, Caesium) und molekularer Gase (zum Beispiel Iod) bei Raumtemperatur werden ultrakompakte Gaszellen benötigt. Dies ist die Grundlage für atombasierte Mess- und Sensorverfahren wie hochempfindliche Quantenmagnetometer und

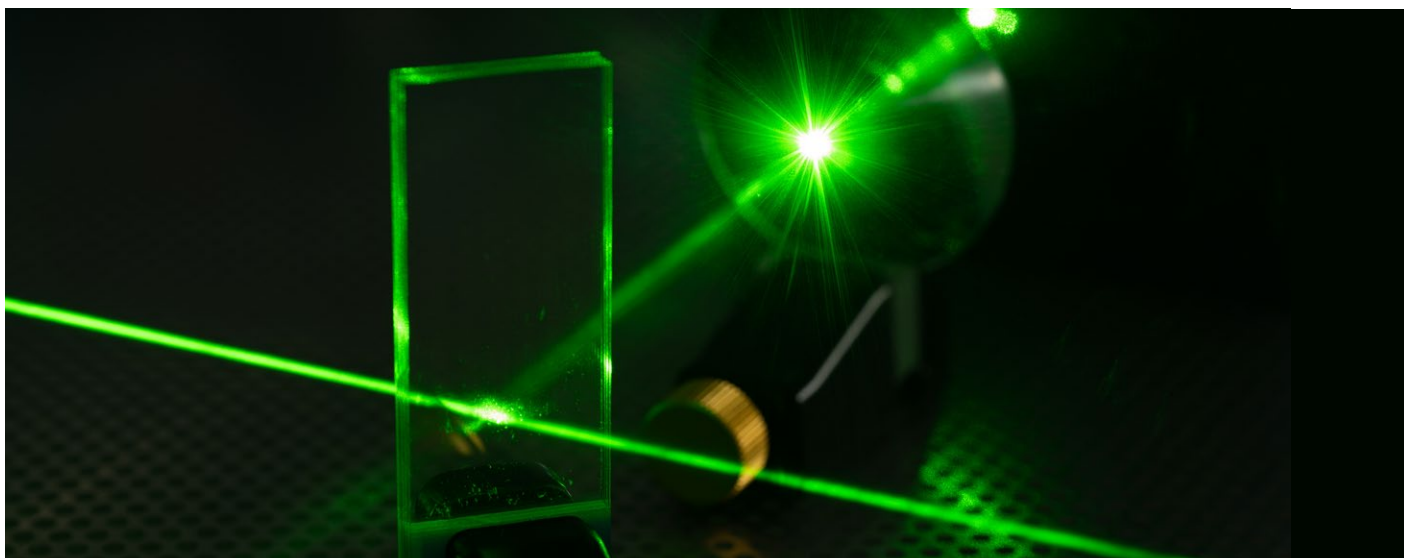
Rydbergsensoren sowie Referenzsysteme zum Beispiel für Frequenzen. Hierfür müssen wirtschaftliche Verfahren für die Herstellung in großen Stückzahlen entwickelt werden. Dazu gehört die Auswahl geeigneter Materialkombinationen und Bondingverfahren ebenso wie die Entwicklung von Konzepten zur Integration von optischen Komponenten in die Gaszelle bis hin zur Entwicklung von Komplettsystemen bestehend aus Mikrogaszelle, elektromagnetischer Schirmung, Heizelementen und Photodetektor.

Atomstrahlquellen

Für die direkte Spektroskopie bei hohen Temperaturen in Atomstrahlapparaturen (zum Beispiel Strontium, Calcium) oder als Startpunkt von Systemen, die mit ultrakalten Gasen arbeiten (zum Beispiel Strontium, Rubidium, Kalium, Caesium), werden kompakte, langlebige und brillante Atomstrahlquellen benötigt. Diese bestehen neben einem Atomreservoir aus fokussierenden Elementen (mechanisch, magnetisch) und einer entsprechenden Abschirmung und sind für den Einsatz im Ultrahochvakuum vorgesehen. Einige Anwendungen erfordern den Betrieb auf bewegten Plattformen bis hin zum Einsatz im Weltraum.

Supraleitende Quantenschaltkreise

Qubits und Quantenspeicher auf der Basis supraleitender Schaltkreise mit den zugehörigen Koppelschaltkreisen und der erforderlichen Mikrowellentechnologie sind eine vielversprechende Basis für die Realisierung von anwendbaren Quantencomputern.



Die Architekturen für supraleitende Qubits sind derzeit Gegenstand der Forschung. Um hier die technologischen Grundlagen für eine breite Anwendung bereitzustellen, müssen die zentralen Eigenschaften wie Langlebigkeit, geringe Zustandsleckage, gute Reproduzierbarkeit etc. verbessert werden. Dies lässt sich unter anderem durch Erhöhung der Anharmonizität und Resetgeschwindigkeit oder höheren Arbeitsfrequenzen über 15 Gigahertz bei bestehenden Architekturen erreichen. Daneben müssen alternative Architekturen untersucht werden. Dabei muss die Entwicklung von Komponenten wie zum Beispiel Kopplungsschaltkreisen vorangetrieben werden, wobei Konnektivität und Kompatibilität mit verschiedenen Qubit-Architekturen im Vordergrund stehen.

Quantenspeicher für Mikrowellenzustände basieren auf einem einfacheren technologischen Prinzip und sind technologisch weiterentwickelt als die Qubit-Architekturen.

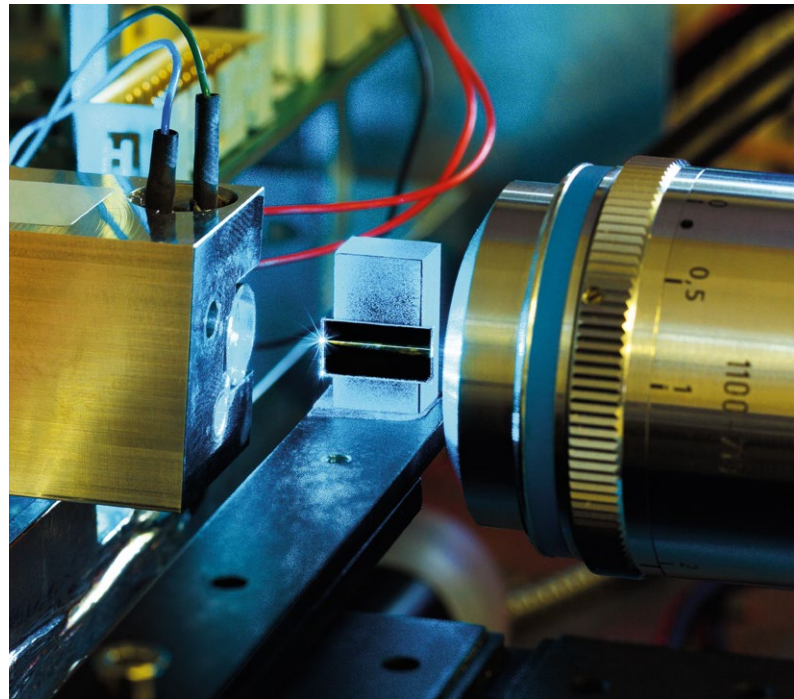
Hier müssen Lösungen für die Fertigung dieser Komponenten in hoher Stückzahl gefunden werden. Gleichzeitig müssen diese Speicher kompakt sein und Quantenzustände mit geringer Fehlerrate speichern und ausgeben können.

Neue Architekturen für Quantenschaltkreise können die Grundlage für neuartige Komponenten wie Mischer, Router und Zirkulatoren sein. Auch hier müssen die Grundlagen für On-Chip-Integration und die Fertigung in hoher Stückzahl bereitgestellt werden.

Ergänzend hierzu müssen verlustarme supraleitende Wellenleiter für die Quantenmikrowellenkommunikation und Komponenten für Freistrahlsquantenmikrowellenkommunikation Gegenstand der Forschung sein. Klassische, rein unterstützende Komponenten (Teiler, Koppler, Zirkulatoren, Filter, Abschwächer, Verbinder etc.) werden bereits von der Industrie hergestellt. Weiterer Handlungsbedarf besteht bei Kompaktheit, Miniaturisierung und Optimierung für den Einsatz im Tieftemperaturbereich.

Packaging

Für das hermetische Packaging auch großer Hybride mit elektrischen und optischen Durchführungen müssen für den Einsatz in den Quantentechnologien geeignete Gehäusematerialien (zum Beispiel



nicht magnetisch, hoch-wärmeleitend, steif, Ultrahochvakuumtauglich, EMV-konform (elektromagnetische Verträglichkeit) sowie dafür geeignete hermetische Bearbeitungs- und Gehäuseverschlusskonzepte entwickelt werden.

Für **Einzelphotonenanwendungen** braucht es sehr verlustarme, zuverlässige und robuste Koppelkonzepte – beispielsweise für die Anbindung elektrophotonischer Hybride an miniaturisierte Gaszellen und Vakuumapparaturen. Für Anwendungen in der Quantensensorik und dem Quantencomputing mit ultrakalten Atomen und Ionen müssen diese für Leistungen im einstelligen Wattbereich geeignet sein.

Für **Quantensysteme im Mikrowellenbereich** müssen Schlüsselkomponenten für die verlässliche Verbindung skalierbarer supraleitender Quantenprozessoren (Probenhalter, PCB-Design [Printed Circuit Board], Bonding- und Signaldurchführungsmethoden etc.) entwickelt werden. Dazu gehört insbesondere mikrowellenkompatibles Packaging für supraleitende Bauelemente. In diesem Zusammenhang sollen Spezialentwicklungen auf Basis existierender Technologien initiiert werden, beispielsweise die Entwicklung von Mikrowellenverbindungen, die mit Supraleitern metallisiert sind.

Auch in diesem Fall müssen geeignete Konzepte zum Wärmemanagement und zur Kontrolle von Temperaturgradienten entwickelt werden.

Ein wichtiger Schritt auf dem Weg zur industriellen Anwendung der Quantentechnologien ist die Entwicklung von **Charakterisierungsverfahren** für die verwendeten Komponenten. In Deutschland und weltweit kann auf Verfahren und den zugehörigen Markt für die Charakterisierung klassischer Mikrowellenkomponenten zur Signal-erzeugung und -analyse zurückgegriffen werden – beispielsweise für Mobilfunk, Sensorik, Metrologie oder Fernerkundung. Diese Verfahren müssen weiterentwickelt werden, um insbesondere folgende Eigenschaften von Quantentechnologiekomponenten zu charakterisieren:

- Transport und Kohärenzeigenschaften in Einzel-elektronenschaltungen
- Bandbreite, Rauschverhalten, Verstärkung, Kompressionspunkt etc. von supraleitenden, quantenlimitierten Verstärkern im Gigahertzbereich
- Auslese- und Charakterisierungstechnologien für supraleitende Quantenschaltkreise (Qubits, Kopplerschaltkreise, Quantenspeicher etc.)

Fertigungstechnologien und Werkzeuge für Quantenkomponenten

Zur industriellen Umsetzung und Anwendung der Quantentechnologien braucht es angepasste Werkzeuge und Fertigungstechnologien. Dies betrifft sowohl die Herstellungsverfahren als auch die Messwerkzeuge. In den meisten Fällen sind diese noch nicht vorhanden oder nicht für den Einsatz unter Industriebedingungen geeignet, weshalb hier ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

Verfahren zur Heterointegration

Mittelfristig werden **Heterointegrationskonzepte** die Basis für anwendbare Quantentechnologiesysteme bilden. Die Heterointegration erlaubt beispielsweise bei Wahl geeigneter Materialsysteme die Integration von photonischen gemeinsam mit elektronischen Funktionseinheiten, sodass

Konzepte des Edge Computing beispielsweise mit analogen Computern auf dem System-on-Chip/ System-in-Package (SoC/SiP) umgesetzt werden können. Auch die Integration von Mikrogaszellen wird möglich. Für diese Konzepte müssen existierende Verfahren wie das Wafer-Bonding, das Transfer-Printing oder chipletbasierte Technologien weiterentwickelt werden.

Planartechnologie

Mittel- bis langfristig müssen Heterointegrationskonzepte so weit wie möglich durch Fertigungsverfahren ersetzt werden, die auf Prozessen der Planartechnologie beruhen. Nur so können immer komplexere und robustere miniaturisierte Systeme entstehen, die auch in großen Stückzahlen bei geringen Fertigungskosten hergestellt werden können. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für die breite Anwendung der Quantentechnologien.

Hierzu müssen zunächst monolithische Integrationskonzepte erforscht werden, die die Integration einer Vielzahl von Funktionalitäten auf einem Chip erlauben. Ein Beispiel hierfür ist die monolithische Integration von Extended-Cavity-Diodenlasern auf einen Halbleiterchip.

Mit entsprechenden Werkzeugen und Verfahren für Hetero- und monolithische Integrationskonzepte können SoC- sowie SiP-Lösungen realisiert werden, die die Grenze zwischen Komponente und System aufheben.

Die halbleitertechnologische, monolithische Integration von aktiven photonischen Schaltungen ist besonders für die Telekommunikation (1,3 Mikrometer und 1,6 Mikrometer), also in der InP-Technologie und der Siliziumphotonik, weit fortgeschritten.

Der für die Quantentechnologien relevante Wellenlängenbereich für optische Funktionalitäten reicht vom Ultraviolett bis ins Nahinfrarot. Technische Lösungen für diesen Bereich basieren auf GaN-, GaAs- und InP-Halbleitertechnologie sowie auf Siliziumnitrid (Si_3N_4) und glasbasierten Materialien. Für den Bereich der GaAs- und GaN-Technologie steht die monolithische Integration noch am Anfang. Hier müssen Epitaxie und Prozesstechnologie so weiterentwickelt werden, dass die mit InP-Technologie umsetzbaren monolithischen Integrations-

konzepte soweit wie möglich auf GaAs- und GaN-Technologie übertragen werden können. Auch für LN-basierte integriert-optische Chips muss eine Weiterentwicklung der Strukturierungstechnologie vom aktuellen Laborstatus erfolgen. Weiterhin ist die laserbasierte und die lithografische Strukturierungstechnologie für die Herstellung sehr verlustarmer Wellenleiter in LN weiterzuentwickeln.

Für sehr verlustarme passive photonische Schaltkreise, zum Beispiel wellenleiterbasierte Mikroresonatoren oder Schalter für die Quantenkommunikation, kommen andere Materialsysteme in Betracht: etwa Silicon-on-Insulator-(SoI)-, LNOI-, siliziumnitrid-(SiN)-, aluminiumnitrid-(AlN)-basierte sowie Si_3N_4 -, glas- oder gar diamantbasierte Konzepte.

Bearbeitung von Diamant- und Saphirsubstraten

Insbesondere im Hinblick auf die Bedeutung von Saphir und Diamant als Substratmaterialien für Quantentechnologiekomponenten müssen Strukturungsverfahren entwickelt werden, die für diese Materialien geeignet sind. Das Selective Laser Induced Etching (SLE) ist hier das Verfahren der Wahl. Es gibt damit umfangreiche Erfahrungen und Ergebnisse aus der Bearbeitung von Quarzsubstraten. Darauf aufbauend muss die Methode für die Bearbeitung von Saphirsubstraten weiterentwickelt werden. Für die Strukturierung von Diamant braucht es darüber hinaus Methoden der direkten Laserstrukturierung.

Additive Fertigungsverfahren

Additive Fertigungsverfahren ermöglichen die Realisierung von Komponenten mit komplexen Geometrien und -strukturen, die mit herkömmlichen Verfahren nicht herstellbar sind. Für die Anwendung in den Quantentechnologien sind diese insbesondere für keramische Komponenten (zum Beispiel Aluminiumoxid $[\text{Al}_2\text{O}_3]$, AlN) in Kombination mit selektiver Metallisierung von Interesse. Dieser Ansatz kann genutzt werden für das Rapid Prototyping bzw. die Entwicklung komplexer optischer Bänke oder für verschiedene Komponenten der sogenannten Physics Packages (Atomquellen, -ofen, -chips, Antennen).

Serientaugliche Verfahren zur Herstellung von Josephsonkontakten

Für Komponenten, die den Josephson-Effekt nutzen wie Josephsonkontakte oder Josephson-paramet-

rische Verstärker, müssen Fertigungsverfahren für die Serienproduktion entwickelt werden. Das Ziel ist die reproduzierbare Herstellung von Josephsonkomponenten für supraleitende Quantensysteme mit Kohärenzzeiten von mehr als 100 Mikrosekunden, unter anderem mit vorgegebenen Nichtlinearitäten und Werten für den kritischen Strom.

Unter anderem folgende Fertigungsverfahren und Prozesse sind hierfür relevant:

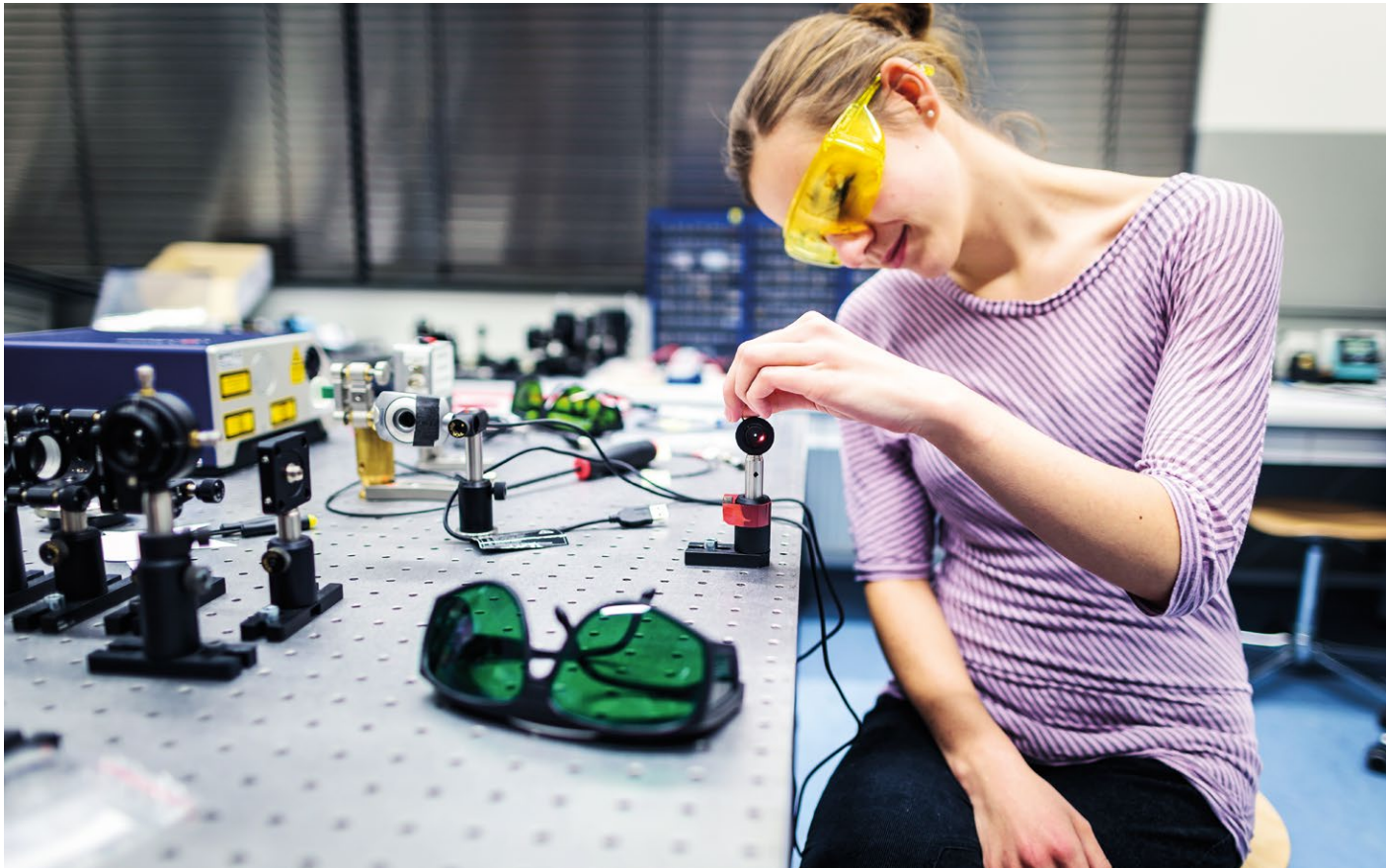
- Fabrikationstechnologien für Grenzflächenreinigung und Depositionsprozesse
- 3D-Fertigungstechniken wie 3D Si, Through Silicon Vias (TSV), Through Glass Vias (TGV)
- Schattenbedampfung und Elektronenstrahlolithografie

Neue Lichtquellen und Bildgebungskonzepte

Die Quantentechnologien erfordern neuartige funktionale Materialien und Strukturen. Für deren Entwicklung müssen geeignete Untersuchungs- und Messmethoden zur Verfügung stehen, welche die Charakterisierung und Untersuchung dieser Strukturen erlauben. Dazu müssen neue bildgebende Verfahren und die dazugehörigen Lichtquellen entwickelt werden. Insbesondere braucht es Laserstrahlquellen, die Strahlung jenseits des VIS- und NIR-Bereichs erzeugen. Bislang kann kohärente Strahlung in diesen Bereichen nur mit Synchrotrons erzeugt werden.

Sekundärstrahlquellen

Lasersekundärstrahlquellen könnten Strahlung in dem genannten Spektralbereich liefern. Bislang existieren noch keine leistungsstarken Quellen für diesen Bereich, und das Potenzial hinsichtlich Effizienz und Brillanz ist bei Weitem noch nicht ausgeschöpft. Entsprechende Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten, welche das Lasersystem, die Komponenten zur Frequenzkonversion, Methoden zur Strahlführung und Strahlformung und die jeweilige Anwendung als System im Blick haben, müssen dies ändern. Insbesondere können dadurch neue und leistungsstarke Bildgebungs- und Spektroskopiemethoden mit Terahertz (THz) und Röntgenstrahlung realisiert werden, die verglichen mit



etablierten Verfahren detailliertere Einblicke in komplexe Strukturen mit bisher nicht erreichter Auflösung erlauben.

Unter anderem folgende Anwendungsszenarien sind denkbar:

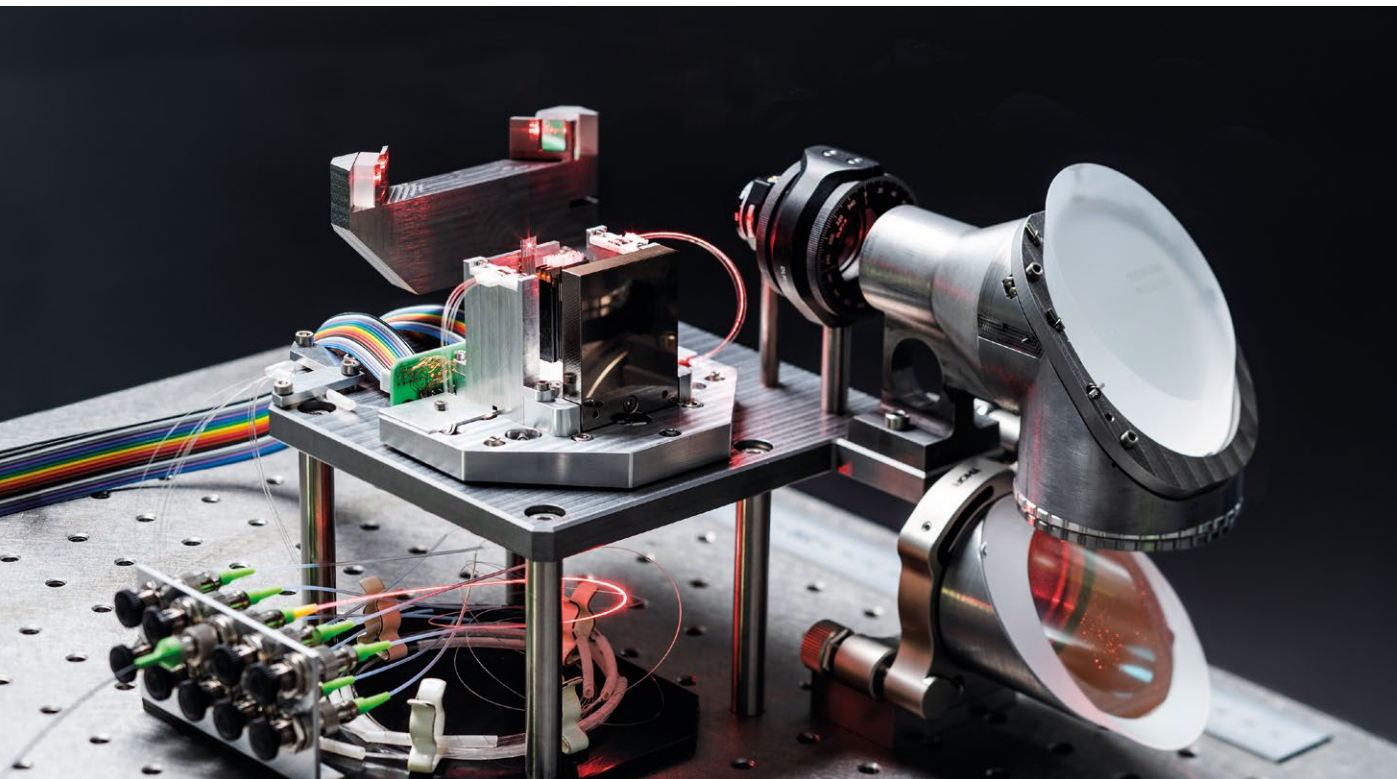
- hochauflösende Bildgebung im Röntgenbereich mit Nanometerauflösung
- Prozessüberwachung und Qualitätssicherung bei der Lithografie mit EUV-Metrologieverfahren (extrem ultraviolett)
- biomolekulare Sensorik und medizinische Bildgebung im Mid-Infrarot- und THz-Spektralbereich.
- spektroskopische Anwendungen im Mid-Infrarot- und THz-Bereich mit breitbandiger Strahlung
- präzise Zeitbereichsspektroskopie

Sekundärstrahlquellen sind mittelfristig ein unverzichtbares Werkzeug für die Realisierung hochintegrierter Quantensysteme und zur Sicherung der Vorreiterrolle in den Quantentechnologien.

Digitale Optik

Methoden der digitalen Optik werden vom THz- bis in den Röntgenbereich eingesetzt und ermöglichen eine Bildgebung jenseits der Limitierung konventioneller Optiken, benötigen aber ebenfalls Quellen, die hoch kohärente Strahlung emittieren. Diese Verfahren müssen weiterentwickelt werden. Insbesondere Verfahren, die zusätzliche Bildinformationen aus den Messdaten gewinnen können, haben großes Potenzial. Unter anderem sind in diesem Zusammenhang folgende Verfahren von Bedeutung:

- 3D-Bildgebung, klassische Tomografieverfahren und zu entwickelnde Kombinationen aus Kohärenztomografie und lateraler, linsenloser Bildgebung
- Darstellung von Polarisationskontrasten und Materialzusammensetzungen durch Auswertung materialspezifischer Wellenlängenkontraste und Verfahren zur strukturierten Beleuchtung
- Charakterisierung dynamischer Vorgänge mit Verfahren für zeitaufgelöste Messungen



3.4.2 Module und Systeme für die Präparation, Detektion, Kontrolle, Manipulation und das Auslesen von Quantenzuständen

Ausgehend von den Voraussetzungen in den Bereichen Materialien, Komponenten und Fertigungs- und Messverfahren wird der Handlungsbedarf im Bereich der Module zur Präparation, Detektion, Kontrolle, Manipulation sowie das Auslesen von Quantenzuständen abgeleitet und der Rahmen für langfristige, plattformagnostische Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten beschrieben.

Systeme in den einzelnen Teilgebieten der Quantentechnologien basieren auf unterschiedlichen physikalischen Prinzipien und Plattformen. Eine Interoperabilität zwischen einzelnen Funktionseinheiten und Modulen ist dadurch in der Regel nicht gegeben. Neben der Interoperabilität werden aber in allen Bereichen der Quantentechnologien Module und Systeme benötigt, die stabil, manipulierbar und skalierbar sind. Derzeit bilden photonische Systeme eine gute Ausgangsbasis, auf der sich Systeme und Module mit solchen Eigenschaften realisieren lassen. Die Photonik kann somit der

Schlüssel sein, um die Interoperabilität von Quantentechnologieplattformen herzustellen. Dies betrifft beispielsweise Mikrowellen und supraleitende Systeme sowie den Transfer von Quantenzuständen zwischen Quantencomputern, wofür photonische Verfahren die geeignete Verbindungstechnologie sind (*siehe auch 3.2*).

Was die Herstellung leistungsfähiger Module für die Quantentechnologien betrifft, besteht Handlungsbedarf auf folgenden übergeordneten Gebieten:

- Entwicklung neuartiger Konzepte für Anwendungen im Quantenengineering
- Konzepte für Module, die in einem weiten Temperaturbereich von Raumtemperatur bis zu kryogenen Temperaturen einsetzbar sind
- Entwicklung von Funktionsmodulen zur Ankopplung photonischer Schaltungen an elektronische Qubits und integrierte optoelektronische Module mit komplexen photonischen Schaltkreisen (Programmable Photonics)
- Entwicklung von Mikroringresonatoren hoher Güte für spektrale Filter und nicht lineare Funktionseinheiten

- Entwicklung von verlustarmen, skalierbaren optischen Schalterarraymodulen und dispersionskontrollierten Systemen zur Kontrolle von Einzelphotonen und Clusterzuständen
- Entwicklung mikroelektronischer Module für den phasenerhaltenden Hochfrequenzempfang oder die hochgenaue, zeitaufgelöste Aufnahme von Signalen mit einer Auflösung im Nano-sekundenbereich
- Entwicklung von Multi-Chip-Modulen für supraleitende Schaltkreise für den Mikrowellenbereich

Die **Satellitenkommunikation** wird wie in 3.2 erläutert ein Schlüsselement beispielsweise bei der Verteilung von Quantenschlüsseln sein. Zur Realisierung solcher Systeme werden unter anderem folgende Module benötigt:

- stabile Lasermodule für die Entfernungsmessung
- kompakte Modulatoren mit geringem Phasenrauschen
- Elektronikmodule, die schnell, präzise und effizient arbeiten
- Module für hochgenaue, langzeitstabile Uhren (optisch)
- Module zur Erzeugung hochpräziser Frequenzkämme
- Module mit hochempfindlichen Inertialsensoren für die optische Freistrahlkommunikation (Satellit–Satellit, Satellit–Boden) sowie für die nächste Generation der Satellitennavigation (Kepler) (siehe auch 3.2).

Atom- und Ionenfallen haben für die Quantentechnologien zentrale Bedeutung und sind der Schlüssel für eine Vielzahl von Anwendungen wie Inertialsensoren, Gravimeter und Ähnlichem. Die Entwicklung modularer Konzepte erfordert:

- automatisierte Lademechanismen

- faseroptische Zugänge für alle relevanten Wellenlängen
- integrierte (echtzeitfähige) Elektronik für Automation und Kontrolle
- integrierte Kryotechnologie
- Standardisierung der optischen und elektrischen Schnittstellen
- standardisierte Mess- und Charakterisierungsverfahren für Ionenfallenhardware

Performante Detektormodule

Für alle Bereiche der Quantentechnologien ist die **Detektion von Photonen** eine Schlüsselfunktion. Für die breite Umsetzung der Grundlagenenergebnisse in industrielle Anwendungen müssen leistungsfähige Detektormodule zur Verfügung stehen.

Detektormodule für anwendungsorientierte Quantentechnologien müssen kompakt aufgebaut sein, eine rauscharme Detektion ermöglichen und eine hohe Quanteneffizienz aufweisen, sodass insbesondere die Detektion einzelner Photonen möglich ist.

Die Haupteinsatzfelder sind die Quantenkommunikation, die Quantensensorik und Quantencomputer, die auf photonischen Verfahren beruhen.

Es werden Module für die beiden grundlegenden Detektionskonzepte benötigt:

- Module zur Detektion der Lichtphase mit kohärenten Empfängern. Diese werden zum Beispiel für den Quantenschlüsselaustausch mit kontinuierlichen Variablen benötigt.
- Module für den direkten Nachweis einzelner Photonen. Hierfür werden Photomultiplier und Si-basierte Avalanche-Photodioden (SPADs) für Wellenlängen unterhalb von 900 Nanometern eingesetzt. Für größere Wellenlängen kommen InGaAs-basierte Detektoren und Detektoren auf Basis supraleitender Nanodrähte infrage. Bei letzteren können Materialien mit höheren Sprungtemperaturen erhebliche Fortschritte bringen.

- Module mit SPAD-Arrays und integrierter Auswerteelektronik als nächste Entwicklungsstufe für den verbesserten Einzelphotonennachweis.

In diesem Zusammenhang sind Module auf der Basis **supraleitender Detektoren** besonders vielversprechend, da sie eine hohe Quanteneffizienz bei gleichzeitig geringem Rauschen aufweisen. Supraleitende Detektormodule können verschiedenste Frequenzbereiche abdecken, von Optik über Röntgen- bis hin zu Mikrowellenstrahlung. Detektormodule für Mikrowellenphotonen stehen noch am Anfang der Entwicklung. Hier besteht die Herausforderung, dass die Einzelphotonenenergie im Vergleich zu Photonen im VIS- und NIR-Bereich um rund fünf Größenordnungen geringer ist. Am weitesten entwickelt sind supraleitende Detektoren für optische und Röntgenphotonen. Hier gilt es dennoch, die Leistungsfähigkeit weiter zu steigern und kommerzielle Anwendungen zu erschließen.

Das größte Hindernis bei der Überführung der Technologie supraleitender Detektoren in industriell einsetzbare Systeme ist die notwendige Kühlung, die derzeit sehr aufwendig ist und dementsprechend viel Energie verbraucht. Hier ist die Entwicklung supraleitender Materialien mit höheren Sprungtemperaturen erforderlich, sodass die Kühlung über kompakte thermoelektrische Elemente erfolgen kann. Dies ist Voraussetzung für die Entwicklung thermoelektrisch gekühlter Einzelphotonendetektormodule mit hoher Zeitauflösung, hoher Sensitivität und geringen Totzeiten für das Spektrum von VIS bis NIR.

Detektormodule für die industriellen Quantentechnologien müssen kompakte Systeme sein, bei denen Detektor und beispielsweise passive optische Bauelemente monolithisch oder hybrid integriert sind. Solche Systeme gilt es zu entwickeln. Beispiele hierfür sind:

- wellenleiterintegrierte SPADs, die kostengünstig und in hoher Stückzahl hergestellt werden
- Einzelphotonendetektorarrays mit hohem Füllfaktor und hoher Ortsauflösung für den Spektralbereich von VIS bis NIR

- Kointegration mit den im Modul benötigten elektronischen Schaltungen (zum Beispiel Quenching Circuit für SPADs) oder Ausleseelektroniken (zum Beispiel Time Tagger)

- neuartige Module aus Kombinationen von supraleitenden Qubits, Resonatoren, parametrischen Elementen oder Graphenflocken in einem geeigneten Package

Für alle Detektionsarten müssen vielkanalige, effiziente und integrationsfähige Elektroniken zur (Multi-)Koinzidenzdetektion oder generellem Zeitmessen (Time Tagging) mit hoher Präzision in Kombination mit hohem Datendurchsatz entwickelt werden. Ausgangspunkt können hier eventuell Detektorkonzepte sein, wie sie in der Teilchenphysik verwendet werden.

Module für Lichtquellen zur Erzeugung definierter Photonen und anderer Quantenlichtquellen

Neben den Detektormodulen spielen **Module zur Lichterzeugung** eine entscheidende Rolle bei der Entwicklung der Quantentechnologien. Der Fokus liegt hierbei auf Modulen zur Erzeugung von Einzelphotonen und verschränkten Photonenpaaren.

Technisch zuverlässige und reproduzierbare Einzelphotonenquellen mit Industriestandard sind bisher nur schwierig in marktreife Produkte umzusetzen und limitiert in vielen Bereichen den Fortschritt der anwendungsnahen Quantentechnologien.

Zusammengefasst besteht folgender Handlungsbedarf bei (Quanten-)Lichtquellen:

- Entwicklung elektrisch gepumpter und elektrisch triggerbarer Einzelphotonenquellen und Quellen für verschränkte Photonen auf Halbleiterbasis (hohe Reinheit, hohe Ununterscheidbarkeit und deterministisch) mit Erzeugungsraten von mehreren Hundert Megahertz
- Entwicklung elektrisch gesteuerter Einzelphotonenquellen auf Halbleiterbasis, die bei Raumtemperatur oder mit TEC zugänglichen Temperaturen betrieben werden können

- Entwicklung elektrisch gesteuerter Einzelphotonenquellen auf Basis von Heralding und schneller Optoelektronik
- Entwicklung von Einzelphotonenquellenarrays und Quellen von n-Photonenzuständen
- Entwicklung von hybriden Integrationsplattformen für effiziente Ankopplung elektrisch gesteuerter Einzelphotonenquellen an verlustarme Wellenleiternetzwerke zur Implementierung von Quanteninformationsverarbeitung oder Bildgebung in der Quantensensorik
- Entwicklung hochintegrierter Quellen für abgeschwächte kohärente Laserzustände
- Entwicklung extrem wellenlängenstabiler Lasermodule für optische Atomuhren und Ionenfallen zusammen mit hochlinearen Photodioden

Module für nicht lineare Prozesse

Der zurzeit etablierteste Weg zur Erzeugung einzelner oder verschränkter Photonen mit hohen Raten ist die Ausnutzung von Frequenzkonversion von Pumpphotonen aufgrund von nicht linearen optischen Effekten.

Handlungsbedarf besteht bei Modulen zur Erzeugung von Wellenlängen von UV bis MIR mithilfe nicht linearer Prozesse, der Erforschung von Frequenzkonversion in neuen optischen Schichtmaterialien zum Beispiel über Chi3-Prozesse und der Untersuchung nicht linearer Prozesse in photonisch integrierten Schaltkreisen (PICs). Benötigt werden zudem rauscharme, nicht linearer optische Frequenzumsetzer hoher Effizienz für die Anbindung von Übergängen in Atomen/Ionen, Feststellen und Halbleitern an faseroptische Kommunikationsbänder. Integriert-optische Querschichtquellen werden für die Quantensensorik unterhalb des Shot-Noise-Limits und die optische Informationsverarbeitung benötigt.

Weitere relevante Themen sind:

- nicht lineare Prozesse in Überhöhungs-kavitäten und integrierten Wellenleiterresonatoren hoher Güte
- verlustarme Anbindung nicht linearer Kristalle und passiver Wellenleiterplattformen
- frequenzstabile, optimierte und integrierbare Frequenzkonversionsmodule, zum Beispiel für den Wellenlängenbereich 1,560 Nanometer bis 780 Nanometer, um Quantenmemory anzusprechen (Rydberg-Atomwolken)
- Herstellung von Frequenzkonversions- und Manipulationsmodulen mithilfe von Chi2- und Chi3-Prozessen zu Spontaneous Parametric Down Conversion (SPDC) und Spontaneous Four Wave Mixing (SFWM) in quantenoptischen Wellenleitern (zum Beispiel Ringresonatoren)
- Entwicklung von kompakten, hochstabilen Frequenzkammmodulen

Miniaturisierte und robuste Tieftemperatur- bzw. Ultrahochvakuummodule

Viele Quantensysteme erfordern für ihre Verwendung in den vier Kernbereichen der Quantentechnologien tiefe Temperaturen von unter einem Kelvin.

Ebenso ist ein Ultrahochvakuum (UHV) für den Betrieb von beispielsweise Atomöfen und Atomuhren unverzichtbar.

Die Größe und der eingehende Energieverbrauch der für die Erzeugung sehr tiefer Temperaturen notwendigen Technik (zum Beispiel Kryopumpe) verhindern derzeit den Transfer in ein industrielles Umfeld. Hier werden üblicherweise sehr kompakte thermoelektrische Elemente zur Kühlung eingesetzt. Im Bereich der

Viele Quantensysteme erfordern tiefste Temperaturen von unter einem Kelvin und funktionieren nur im Ultrahochvakuum.

den üblicherweise sehr kompakte thermoelektrische Elemente zur Kühlung eingesetzt. Im Bereich der

Kryostate und allgemein der **Kryotechnik** zeichnet sich daher ein dringender Handlungsbedarf ab. Die Entwicklung von kompakten und kostengünstigen leistungsstarken Millikelvin-Kryostaten ist dringend notwendig. In diesem Zusammenhang müssen funktionsfähige Halbleiterelektronikkomponenten für tiefe Temperaturen entwickelt werden. Da die für solche Kühlsysteme erforderlichen Heliumisotope weltweit nur sehr begrenzt verfügbar sind, sollte der Schwerpunkt der Entwicklung auf effizienten Systemen mit Endtemperaturen von 20 bis 50 Millikelvin und Kühlleistungen bis zu einem Milliwatt liegen, die mit geschlossenen Kreisläufen arbeiten.

In aktuellen Experimenten nimmt der Platz für **Vakuumanlagen** mehrere Kubikmeter ein. Für anwendbare quantentechnologische Systeme müssen Module zur Erzeugung von Ultrahochvakuumbedingungen entwickelt werden, die ein Volumen von nur wenigen Kubikdezimetern aufweisen. Die notwendige Miniaturisierung braucht völlig neue technologische Ansätze. Die gewünschte geometrische Kompaktheit (weniger Gewicht, weniger Platz) bei gleichen oder höheren geforderten Zusatzspezifikationen (optisch, thermisch, vakuumtechnisch, elektrisch etc.) ist nur dann möglich, wenn ein ganzheitliches Konzept für Vakuumanwendungen entsteht.

Module für die Präparation, Kontrolle, Manipulation und das Auslesen von Quantenzuständen

Um Quantentechnologien zur Lösung vielfältiger anwendungsbezogener Probleme zu nutzen, braucht es anspruchsvolle Technologien, die neben der präzisen Präparation und dem effizienten Auslesen von Quantenzuständen auch die gezielte Manipulation und Kontrolle solcher Zustände erlauben. Die größte Herausforderung besteht darin, zwei gegensätzliche Forderungen zu erfüllen: Auf der einen Seite sollen die jeweiligen Quanteneigenschaften wie die Verschränkung nicht beeinflusst werden, auf der anderen Seite müssen Informationen über den Zustand des Quantensystems gewonnen bzw. muss dieser Zustand kontrolliert manipuliert werden. Da reale Systeme auf sehr unterschiedlichen physikalischen Plattformen basieren werden, müssen hierfür jeweils geeignete Module entwickelt werden, die Quantensysteme an die Umwelt anbinden und die

Schnittstelle zwischen herkömmlichen Technologien und Quantentechnologien bilden.

Unter anderem werden folgende Module benötigt:

- Arbitrary-Wave-Form-Generatoren, die Signale mit höchster Genauigkeit in Bezug auf Frequenz, Phasenlage und Amplitude erzeugen können. Dies ist eine unverzichtbare Voraussetzung, um Qubits zu initialisieren und Operationen auf Qubits auszuführen
- Module zur Detektion und dynamischen Kompensation von Umwelteinflüssen wie zum Beispiel externen Magnetfeldern
- Integration der Funktionalität von Laboraufbauten, die derzeit aus einzelnen Geräten aufgebaut sind, in Module
- Einsatz von Verfahren der Mikroelektronik zur Integration von unter anderem Hochfrequenzschaltungen, Mixed-Signal-Signalwandlern und digitaler Signalverarbeitung und Einsatz dieser Technologie zur Anbindung an integrierte Rechenplattformen, mit denen sich entsprechende Module ansteuern und viele Qubits gleichzeitig ansprechen und manipulieren lassen

Handlungsbedarf besteht zudem in folgenden Bereichen:

- Ankopplung von Ionen- und/oder Atomfallen
 - Miniaturisierung und Integration von Quantenprozessoren auf Basis gekoppelter Ionen- oder Atomfallen in Photonikchips
 - 2D- und 3D-Integration in Form mehrlagiger Designs, Integration von Mikrowellentechnik und Einzelphotonendetektoren, MEMS, Faseroptik, optischen Systemen, Packaging, mehrmodulige Prozessoren, Modulausrichtung. PIC, Implantationsverfahren, Nanostrukturierung, Chip-Faser-Kopplung, Chip-Freistrahl-Kopplung
 - Entwicklung von Verfahren zum präzisen Alignment in der Kette aus verschiedenen Technologieschritten



- Hard- und Softwareentwicklung für die Steuerung des Gesamtsystems
- Skalierbarkeit auf mehr als 1.000 Qubits
- Mikrowellenphotonik
 - Kombination von VIS, IR, Millimeterwellen
 - Entwicklung ultrapräziser Mikrowellentechnik bzw. -elektronik
 - (Weiter-)Entwicklung und Miniaturisierung der Mikrowellentechnologie mit dem Ziel, kompakte und skalierbare Aufbauten für Kontroll- und Auslesesysteme für supraleitende Qubits zu erstellen
- Photonische Quantensysteme
 - Entwicklung von Integrationsplattformen mit hoher Bandbreite und geringen optischen Verlusten
 - Verfahren zur flexiblen Kombination der entwickelten Funktionsblöcke
 - Module für nicht lineare Prozesse und Einzelphotonenquellen(-Arrays) zur Erzeugung von n-Photonenzuständen
 - Komplexe Kopplernetzwerke mit geringen Verlusten und kurzen Schaltzeiten zur Präparation der Quantenzustände
 - Effiziente Detektor(-Arrays) zum Auslesen von Quantenzuständen
 - Entwicklung schneller FPGA-basierter (Field Programmable Gate Array) Module zur Zustandspräparation

3.4.3 Systemkritische Basistechnologien für Design, Simulation, Fertigung und Charakterisierung

Für die kommerzielle Umsetzung komplexer quantentechnologischer Systeme bedarf es neuer Lösungen für die vollständige Integration auf Systemebene. Schwerpunkte liegen bei der Konvergenz von Photonik und Elektronik sowie der Modellierung und Simulation komplexer Systeme. Industrietaugliche Systemdesigns sind unverzichtbar für die Anwendung. Ganzheitliche Entwicklungsumgebungen für Quantensysteme sind daher gefragt. Neben den Werkzeugen für das Hardwaredesign müssen Plattformen für die Entwicklung von Steuer- und Datenverarbeitungssoftware und die Highlevelprogrammierung entwickelt werden.

Konvergenz von Photonik und Elektronik für Quantenplattformen

Für die Heterointegration von Quantensystemen zur Realisierung von SoC- und SiP-Lösungen bedarf es der Integration von III-V-Materialien in Si-basierte Technologien für aktive und passive Strukturen. Strategien zur Ankopplung an miniaturisierte Atomzellen (zum Beispiel MEMS-basierte Spektroskopiezellen, Si/Glas) und optische Resonatoren (SiN, SiO₂, GaAs) werden benötigt. Dazu müssen Technologieplattformen für integrierte quantenphotonische On-Chip-Lösungen vorangetrieben werden, beispielsweise auf Basis der Heterointegration von LNOi, Nitrid- und Siliziumphotonik. Handlungsbedarf besteht insbesondere auch bei integrierten On-Chip-Quellen für verschränkte Photonen auf Basis skalierbarer Prozesse aus der Halbleiterfertigung.

Fortschritt ist ebenfalls bei Technologieplattformen für integrierte quantenphotonische In-Package-Lösungen notwendig, beispielsweise auf Basis der Heterointegration von einzelnen Komponenten



wie auch SoC-Komponenten auf glasbasierten Substraten, sowohl passiv wie auch mit entsprechenden Dotierungsverfahren (teil)aktiv. Gegenüber rein halbleiterbasierten Lösungen versprechen SiP-Ansätze eine leichtere (More Than Moore) Integration und eine niedrigere Einstiegshürde.

Für hybride Plattformen, bei denen Quantenemitter unabhängig vom Material der integrierten optischen Schaltkreise sind, müssen für die Integration hocheffiziente Schnittstellen realisiert werden, die mit nahezu 100 Prozent Effizienz die photonischen Quantenzustände zwischen den Komponenten (und somit den verschiedenen Materialien) koppeln.

Die Anbindung der SoC-/SiP-Lösungen an das Fasernetzwerk oder untereinander erfordert die höchsteffiziente Kopplung (weniger als 5 Prozent Verluste) von fasergeführtem Licht auf optische Chips und umgekehrt. Die in der Industrie gegenwärtig angewendeten Butt-Coupling-Methoden zwischen Faser und Chip erreichen nicht die notwendige Kopplungseffizienz.

Das Assembly erfordert neuartige robotische Lösungen, die extrem präzise sind (weniger als 100 Nanometer Auflösung und Genauigkeit). Sie müssen äußerst flexibel einsetzbar sein und hochkomplexe Hybride auch bei geringen Stückzahlen teilautomatisiert wirtschaftlich fertigen können. Dies erfordert den Einsatz von Fertigungskonzepten der Industrie 4.0: Fortschrittliche Mensch-Maschine-Interfaces müssen eine intuitive Steuerung der Assembler-Roboter ermöglichen, sodass Konzepte der Human Augmentation für den hochpräzisen Assembler-Prozess sehr komplexer Hybride nutzbar werden. Die Justage komplexer Systeme erfordert die simultane Optimierung vieler Freiheitsgrade. Dazu werden fortschrittliche Optimierungsverfahren benötigt, etwa KI-basierte Ansätze. Hierzu müssen FuE-Kooperationen zwischen den Disziplinen initiiert werden, die bisher so nicht im Austausch standen: der Quantentechnologien, der Photonik, der industriellen Robotik und der angewandten Mathematik.

Die Integration photonischer und elektronischer Funktionalität in einen elektronisch-photonischen Hybriden bedarf auch neuer Konzepte für die Ansteuerung von Komponenten mit großer

Signalbandbreite (zum Beispiel Modulatoren oder Photodetektoren) sowie die dezentrale, extrem rauscharme Verarbeitung analoger und digitaler Signale, auch im Sinne von Edge Computing.

Systems Engineering – Modellierung, Simulation und holistisches Design integrierter Quantenplattformen

Für das ganzheitliche Design quantentechnologischer Systeme müssen folgende Voraussetzungen erfüllt sein bzw. folgende Entwicklungen gestartet werden:

- Entwicklung virtueller Labore für heterointegrierte SoC-Lösungen auf Basis von Multi-Physics-, multiskalenfähiger Modellierungssoftware, mit denen sich SoC quantenmechanisch vollständig beschreiben lassen
- Messkonzepte für Quantensysteme in SoC, die für Umgebungen mit Störungsrauschen geeignet sind
- Weiterentwicklung existierender Designtools für die optische Kommunikationstechnik für photonisch-integrierte Schaltkreise im Hinblick auf die Beschreibung aller elektrooptischen Eigenschaften für konkrete Anwendungen (Leistungs- und Phasenrauschen, ASE-Untergrund, Sättigungsverhalten etc.)
- Entwicklung von Modellen, mit denen sich die für die Quantentechnologien relevanten Eigenschaften realer, optoelektronischer Komponenten adäquat beschreiben lassen, sodass verschiedene Designs in virtuellen Laboren untersucht werden können
- Entwicklung virtueller Labore, mit denen ein Quantensystem vollständig, das heißt inklusive der Wechselwirkung mit der Umwelt, modelliert und untersucht werden kann
- Designwerkzeuge für supraleitende Schaltkreise im Mikrowellenbereich, mit denen hochintegrierte Chips mit supraleitenden Qubits entworfen werden und wichtige Parameter wie Gattergenauigkeiten und Fehlertoleranz optimiert werden können

- Entwicklung von Designtools zum Entwurf skalierbarer, hochintegrierter Architekturen für Quantenmikrowellenkommunikation und für lokale Netzwerke supraleitender Quantenprozessoren mit diskreten und/oder kontinuierlichen Variablen
- Entwicklung von Modellen und Simulationswerkzeugen zur Reduktion des negativen Einflusses von Materialdefekten auf die Qubit-Kohärenz und die Erforschung bzw. Bekämpfung von Ursachen für niederfrequentes Ladungs- und Flussrauschen
- Erforschung und Entwicklung von Verfahren der KI zur effizienten Optimierung von komplexen Komponenten und Systemen

Optimierte Datenverarbeitung für integrierte Quantenplattformen

Für Quantentechnologien wie für die meisten anderen komplexen Systeme der Gegenwart gilt, dass die große und wachsende Rolle von Software auch in der Hardwareentwicklung unterschätzt wird. Auch ist die Angebotslage sehr unterschiedlich: Software der untersten Ebene existiert oft in sehr individuellen Versionen in Forschungslabors oder proprietär und gut gehütet in großen Firmen.

Der Komplex Test und Validierung war und ist Gegenstand von Forschungsprogrammen und Debatten. Die Quasistandards wurden im Umfeld strukturierter Programme entwickelt und werden von nordamerikanischen Organisationen angeboten. Es ist wichtig, dass Deutschland hier auf Augenhöhe bleibt und sich in die Community einbringt, um nutzungsspezifische Benchmarks entlang seiner eigenen Agenda zu entwickeln. Dies benötigt die Ver-

netzung von theoretischen Wissenschaften und industriellen Nutzern.

Werkzeuge für das Design und Co-Design sowie die Modellreduktion (also das Erzeugen eines zertifizierten Qubit-Modells oder von Ähnlichem für höhere Ebenen) sind in Ansätzen in Forschungsgruppen und eventuell bei großen Hardwareorganisationen proprietär vorhanden. Dennoch erarbeiten gerade unter anderem öffentliche Forschungsförderer in den USA Programme in dieser Richtung. Es ist jedoch zu befürchten, dass die Ergebnisse nicht öffentlich bzw. nicht exportierbar sein werden. Dieses multiskalenfähige Computer Aided Design (CAD) für Quantensysteme ist sowohl eine Kernkompetenz für die lokale Entwicklung als auch ein weit vermarktbare Produkt. Diese Software sollte so organisiert werden, dass sie kompatible Quantentechnologien adressiert (mikrowellenbasiert, optisch etc.). Sie wird aber nicht alles einschließen können, sodass mehrere Werkzeuge entwickelt werden sollten.

Die Rolle von Software für die Quantentechnologien auch in der Hardwareentwicklung wird oft unterschätzt. Sie existiert meist nur als individuelle Lösung in Forschungslabors oder proprietär und gut gehütet in großen Firmen.

Für die Entwicklung von Steuer- und Betriebssoftware ist in Deutschland und Europa eine sehr hohe Kompetenz vorhanden, die aber noch nicht zur Professionalisierung und Kommerzialisierung geführt hat. Kommerzielle Angebote wie zum Beispiel das verbreitete Qiskit (Anpassung auf neue Hardware möglich, aber schlecht erprobt) stehen noch am Anfang der Entwicklung. Die Weiterentwicklung erfordert die

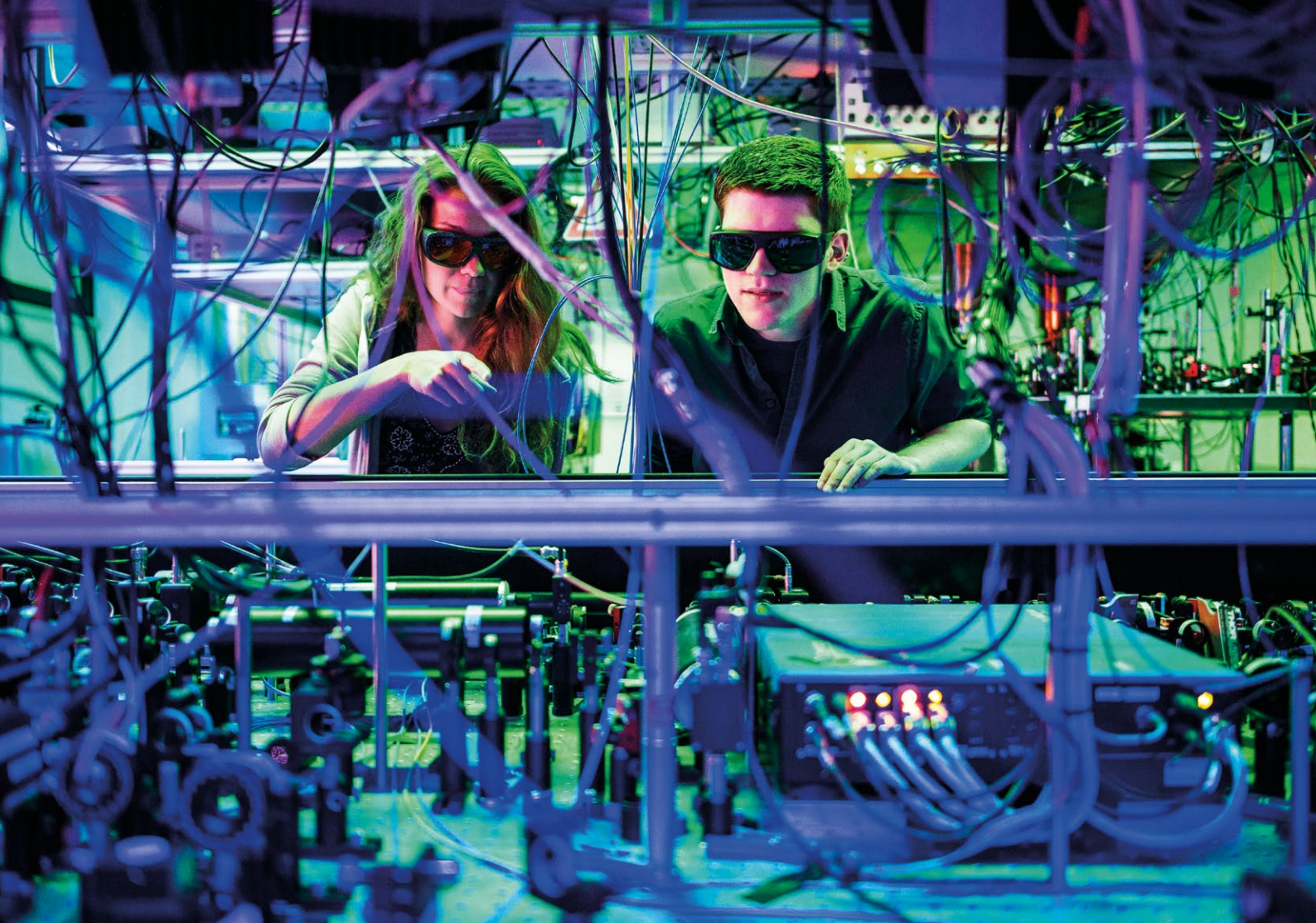
Professionalisierung von Softwarewerkzeugen und die Verbreiterung der Nutzerbasis.

Entwicklungsbedarf besteht auf allen Ebenen unter anderem in folgenden Feldern:

- Softwaretools für das Benchmarking und der Validierung von Quantentechnologien



- Tools für das Co-Design von Soft- und Hardware
- Softwarewerkzeuge für die Entwicklung von Betriebssystemen für Quantensysteme sowie die Kalibrierung und Charakterisierung solcher Systeme
- Die Betriebssysteme stellen die Schnittstellen zur Nutzungsebene und zur Hardware bereit
- Entwicklung von echtzeitfähigen Systemen auf FPGA-Basis zur Kontrolle von Quantensystemen und der Highlevelprogrammierbarkeit
- Konzeption einer übergreifenden Middleware für den Zugang zu Quantencomputern, die standardisierte Schnittstellen sowie Application Programming Interfaces (APIs) mit quantencomputerspezifischer Übersetzung der API-Aufrufe und einem geeigneten Mapping auf die darunter liegende Architektur umfasst
- Konzepte zur Modularisierung und Kapselung von Algorithmen und deren Ausführung auf Quantenrechnerinstanzen
- Anpassung der Algorithmen für (aus Sicht der Informatik) klassische API-Zugriffe
- Automatische Generierung von Orakeln auf Basis der Eingaben und der Spezifika der Algorithmen und der darunter liegenden Rechenarchitektur für anwendungsbasierte Tests
- Entwicklung von Lösungen für Sicherheit, Privatsphäre und Datenschutz bei Quantum Computing as A Service
- Entwicklung von Nutzungssoftware mit den Programmier- und Nutzungsschnittstellen für den Betrieb der Quantentechnologien sowie Software zum anwendungsspezifischen Benchmarking
- Entwickeln von Standards und Validierungsverfahren für Nutzungssoftware, Compiler und Ähnlichem in Deutschland und Europa, um die Vielzahl an Ansätzen zu reduzieren
- Test und Validierung von Software und Theorie, der schnellen Ein- und Ausgabe und Reprogrammierung für variationelle Quantenalgorithmen sowie der Datenauswertung und Decodierung zur Quantenfehlerkorrektur



3.5

Education, Training, Outreach, Kooperation und Vernetzung

3.5.1

Education, Training und Outreach

Ziele und globale Herausforderungen

Die neuen Quantentechnologien entstehen aus der Überführung der grundlegenden Quantenphysik in neue industrielle Anwendungsfelder. Sie umspannen einen weiten Bereich traditioneller Forschungsfelder und erfordern daher Kenntnisse und Fähigkeiten aus Physik, Mathematik, Informatik und Ingenieurwesen. Ebenso sind die komplementären Expertisen und Herangehensweisen in Industrie und Universitäten bzw. Forschungseinrichtungen zu verbinden. Während die Industrie über die besten technischen Fähigkeiten verfügt und die Erfah-

rung besitzt, Produkte ausgehend vom Prototypen zur Marktreife zu entwickeln, sind ihre Ingenieurinnen und Ingenieure mit der Quantenphysik im Allgemeinen nicht vertraut. Auf der anderen Seite bilden die Universitäten in fortgeschrittenem theoretischem und experimentellem Wissen aus, sind jedoch nicht in der Lage, Produkte zu entwickeln, die unmittelbar von der Industrie oder der Öffentlichkeit aufgegriffen und verwendet werden können. Daher müssen die Universitäten Bildungspfade schaffen, um sowohl theoretische Fähigkeiten als auch praktische Laborfähigkeiten zu verbessern. Die Industrie muss ihre Fachkräfte fortbilden oder um Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie Ingenieurinnen und Ingenieuren mit Quantenerfahrung ergänzen.

Dies erfordert neuartige Konzepte für Education und Training, das heißt für Aus- und Weiterbildungsprogramme, die zukünftige Quantenwissenschaftlerinnen und -wissenschaftler sowie Quanteningenieurinnen und -ingenieure ansprechen. Neue Programme sollen nicht nur an die schulische, universitäre und technische Ausbildung anknüpfen, sondern auch als berufsbegleitende Trainingsmaßnahmen realisiert werden. Vorhandene Ansätze sollen standortübergreifend koordiniert werden und Konzepte aus anderen stark interdisziplinären Gebieten als Best-Practice-Modelle herangezogen werden.

Das Verständnis und die Bedeutung der neuen Quantentechnologien sind sowohl in den technisch-wissenschaftlichen Fächern außerhalb der Physik als auch in der Öffentlichkeit noch wenig verbreitet. Das Bewusstsein für diese neuen, disruptiven Technologien, ihre Vorteile, aber auch möglichen Risiken ist jedoch für ihre breite Akzeptanz obligatorisch. Dies ist im Bereich der Quantentechnologien umso bedeutender, wenn man bedenkt, wie unanschaulich und scheinbar paradox viele ihrer Phänomene wie Verschränkung oder Superposition sind. Das macht die Entwicklung und Bündelung neuer Outreach-Maßnahmen nötig.

Ziele

- Entwicklung gemeinsamer Konzepte und standardisierter Inhalte für Ausbildung und Training
- Koordination und Bündelung von Maßnahmen
- Bereitstellung und Austausch von Materialien und Ausbildungswerkzeugen
- Unterstützung von beispielhaften Best-Practice-Modellen

- Bekanntmachen des Themas
- Herstellen und Dokumentieren eines Dialogs mit der Öffentlichkeit
- Wecken von Interesse bei zukünftigen Studierenden und Fachkräften, bei Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträgern sowie in der Bevölkerung (auch über ein ohnehin technisch interessiertes Publikum hinaus)

Anforderungen und Status quo

Die Quantentechnologien als neues zukunftsweisendes Technologiefeld benötigen gut ausgebildete Fachkräfte insbesondere auch aus Bereichen, die bisher kaum mit Themen aus der Quantenphysik zu tun hatten wie den Ingenieurwissenschaften und der Informatik. Um Quantencomputer, Quan-

tensensoren, Quantenkommunikationssysteme und andere, heute vielleicht noch gar nicht absehbare Produkte auf quantentechnologischer Basis entwickeln und betreiben zu können, ist einerseits die tiefgehende Forschungsperspektive von Physikerinnen und Physikern erforderlich, andererseits aber auch die an der Entwicklung von Produkten orientierte Expertise von Quanteningenieurinnen und -ingenieuren. Auf ver-

Die Quantentechnologien benötigen gut ausgebildete Fachkräfte insbesondere auch aus Bereichen wie den Ingenieurwissenschaften und der Informatik, die bisher kaum mit Themen der Quantenphysik zu tun hatten.

schiedenen Ebenen der Hardware und Softwareentwicklung wird es einen Bedarf an Quanteninformatikerinnen und -informatikern geben. Dieses Problem und damit die Notwendigkeit, neue Ausbildungskonzepte für diese Zielgruppen zu entwickeln, wurden auf internationaler und nationaler Ebene erkannt. Zwar herrscht insgesamt Einvernehmen über die Notwendigkeit einer stärkeren Vernetzung und der Entwicklung gemeinsamer standardisierter Konzepte, deren Umsetzung steht jedoch noch ganz

am Anfang und ist eher durch einzelne Aktivitäten als durch ein strategisches Vorgehen bestimmt.

Status quo in Europa und international

Das **Quantum Flagship** ist das EU-weite Leuchtturmprojekt im Bereich der Quantentechnologien in Europa.¹³ Basierend auf Roadmaps und Positionspapieren einer Interessengemeinschaft aus Forschung und Industrie wurde ein Zehn-Jahres-Programm von einer Milliarde Euro aufgelegt, um die Stärken Europas weiter zu forcieren und seine Schwächen zu überwinden. Ein eigener Bereich Education und Training innerhalb des Flagships fördert die Vernetzung der Akteure – insbesondere auch der Industrie, die Etablierung des Themas in Schulen, die Koordination der Entwicklung von europaweiten Masterprogrammen sowie Trainingsprogramme für Arbeitskräfte aus der Industrie. Darüber hinaus widmet er sich verschiedenen Outreach-Aktivitäten. Für diesen Bereich sind derzeit 100 Millionen Euro aus dem Programm Digital Europe eingeplant.

Hinzu kommen die jeweiligen nationalen Programme. Das kürzlich vorgestellte **französische Programm**¹⁴ mit drei Hubs in Paris, Saclay and Grenoble beinhaltet die Entwicklung von Ausbildungs- und Trainingspfaden mit einer Spezialisierung auf Engineering und Quantencomputing, um auf den wachsenden Bedarf an Ingenieurinnen und Ingenieuren sowie technischen Fachkräften zu reagieren¹⁵.

Im Vereinigten Königreich wurden eine Milliarde Pfund über zehn Jahre für ein koordiniertes Programm in den Quantentechnologien investiert.¹⁶ Partneruniversitäten (University of Strathclyde, University of Glasgow, Heriot-Watt University) der **vier britischen Quantum-Technology-Hubs** haben bereits eine internationale Graduiertenschule für Quantentechnologien eingerichtet.¹⁷ An der Univer-

sity of Sussex wurde eine Doctoral and Industry Training Academy gegründet.¹⁸ Besonders hervorzuheben ist auch das UK Flagship Outreach Programme „Quantum City“, das in einem Dialog mit der breiten Öffentlichkeit den Einfluss der neuen Quantentechnologien auf die Gesellschaft diskutiert.¹⁹

Bezüglich der Quantenphysikausbildung an Schulen zeigt eine internationale Vergleichsstudie, dass die Quantenphysik in den meisten europäischen Ländern kein Bestandteil des regulären Schulcurriculums ist.²⁰ Ausnahmen sind Großbritannien, die Niederlande, Frankreich und die skandinavischen Länder, wo die Quantenphysik in unterschiedlichem Umfang im Unterricht vertreten ist. Italien hat die Quantenphysik erst vor wenigen Jahren ins Schulcurriculum aufgenommen. In Kanada und Australien gehört die Quantenphysik zum Bereich „Moderne Physik“, während in den USA unter dem Einfluss der zweiten Quantenrevolution Initiativen zur Einführung der Quantenphysik (und speziell der Quantentechnologien) an Highschools gestartet wurden.²¹

Status quo in Deutschland

Ein Überblick über die aktuelle **Lehrsituation** im Bereich Quantentechnologien an Universitäten, Hochschulen und hochschulnahen Forschungseinrichtungen in Deutschland findet sich in der vom BMBF beauftragten und von bayern photonics e. V. und Optence e. V. erhobenen Studie „Erhebung des Lehrangebotes mit Bezug zu den Quantentechnologien an deutschen Hochschulen und hochschulnahen Forschungseinrichtungen“ vom Dezember 2018.²² In dieser Studie konnte zwar eine große Zahl

13 qt.eu/

14 forteza.fr/wp-content/uploads/2020/01/A5_Rapport-quantique-public-BD.pdf

15 quantumcomputingreport.com/france-unveils-proposed-national-strategy-for-quantum-technologies/

16 uknqt.epsrc.ac.uk/

17 igsqt.ac.uk/

18 sussex.ac.uk/research/centres/sussex-centre-for-quantum-technologies/

19 epsrc.ukri.org/newsevents/pubs/epsrc-quantum-technologies-public-dialogue-full-report/

20 H. K. E. Stadermann, E. van den Berg, and M. J. Goedhart, Analysis of secondary school quantum physics curricula of 15 different countries: Different perspectives on a challenging topic, Phys. Rev. Phys. Educ. Res. 15, 010130, 2019.

21 reuters.com/article/us-usa-quantum-trump-idUSKCN2511XG

22 quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Kurzstudie-Lehrangebot-Quantentechnologien-DE-2018-bf-C1.pdf

an Lehrangeboten im Bereich der „Quantentechnologien der zweiten Generation“ identifiziert werden, die zu 81 Prozent in Bachelor- und Masterstudiengänge der Physik integriert sind, jedoch fand dieses Angebot nahezu ausschließlich (95 Prozent) an Universitäten statt. „Hochschulnahe Forschungseinrichtungen bieten bis auf wenige Ausnahmen (drei Einrichtungen) unter ihrem Namen keine Lehrveranstaltungen an, sondern führen diese an den jeweils benachbarten Universitäten durch.“

Dezierte Ausbildungsprogramme (Bachelor-, Masterstudiengänge oder Graduiertenschulen) finden sich jedoch bislang nur sehr wenige.

Name	Art des Studiengangs	Ort	Start des Studiengangs
Quantum Science & Technology	Masterstudiengang	Ludwig-Maximilians-Universität München und TU München	WS 2020/21
Quantum Engineering	Masterstudiengang	Universität Würzburg	2020
Quantum Engineering	Bachelorstudiengang (Physik und Ingenieurwissenschaften)	Universität des Saarlandes	2019
Berlin School of Optical Sciences and Quantum Technology (BOS.QT)	International Graduate School	FU Berlin, HU Berlin, TU Berlin, Max-Born-Institut	2019
Quantentechnologie	Vertiefungsrichtung im Masterstudiengang Physik	RWTH Aachen University	WS 2020/21
Quantenphysik und Quanteninformation	Vertiefungsrichtung im Masterstudiengang Physik	Universität Konstanz	2017, Vorlesungen dazu seit über zehn Jahren
Photonik und Quantentechnologie	Vertiefungsrichtung im Bachelor- und Masterstudiengang Elektrotechnik	TU Braunschweig	WS 2020/21

Im starken Gegensatz zur Forschung verläuft die **Entwicklung von Studienangeboten** weitgehend unkoordiniert und an jedem Standort individuell. Ebenso ist eine interdisziplinäre Verankerung von grundständigen Studiengängen (Bachelor) noch kaum vorhanden.

Derzeit existieren keine koordinierten **Trainingsangebote für Fachkräfte an Universitäten**, ebenso fehlen Möglichkeiten für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, sich im industriellen Umfeld weiterzubilden. Zwar sieht das Rahmenprogramm der Bundesregierung „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ die Gründung eines Kompetenzzentrums für Quantentechnologien an der PTB in Braunschweig vor.²³ Hier sollen Dienstleistungen und Infrastruktur für die Industrie, insbesondere für KMU geschaffen werden, die den Transfer von Quantentechnologien in die Industrie unterstützen. Wegen aktuell noch sehr begrenzt verfügbarer Finanzierung konnte das Kompetenzzentrum allerdings bisher nur einen Bruchteil seiner vorgesehenen Aufgaben angehen.

Seit 2018 findet jährlich die vom BMBF initiierte „Quantum Futur Akademie“ statt, eine einwöchige Praxiswoche für Studierende zunächst aus Deutschland, im Jahr 2019 durchgeführt in Kooperation mit französischen und deutschen Partnern und seit 2020 im europäischen Maßstab. Die Veranstaltung richtet sich an Studierende der Natur- und Ingenieurwissenschaften und bietet eine Einführung in die angewandten Quantentechnologien mit Praxis- und Vernetzungsanteilen insbesondere hinsichtlich verschiedener quantentechnologischer Anwendungsfelder.²⁴ Ebenfalls Teil des **Quantum-Futur-Programms** sind die Quantum Futur Nachwuchsgruppen. Der Wettbewerb „Quantum Futur“ soll exzellente Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler dabei unterstützen, mit Forschungsprojekten den Übergang von Erkenntnissen

der Grundlagenforschung zu neuartigen Anwendungen in der Industrie voranzutreiben.²⁵

Was die **Quantenphysikausbildung an den Schulen** betrifft, hat Deutschland im europäischen und internationalen Vergleich eine lange Tradition. Quantenphysik ist seit mehreren Jahrzehnten fester Bestandteil der Oberstufencurricula. Entsprechend ausgereift und im internationalen Vergleich weit entwickelt sind die fachdidaktischen Konzepte. Auf welche Weise man die modernen Aspekte des quantenphysikalischen Weltbilds für Schülerinnen und Schüler verständlich unterrichten kann, ist seit den Neunzigerjahren Gegenstand der fachdidaktischen Forschung. Unterschiedliche Ansätze wurden entwickelt und in empirischen Untersuchungen zum Teil aufwendig evaluiert.²⁶ Es haben sich Konzepte wie die „Wesenszüge der Quantenphysik“ etabliert, die gezielt die modernen, nicht klassischen Aspekte der Quantenphysik betonen und für Unterrichtskonzepte zu Quantentechnologien unmittelbar anschlussfähig sind.²⁷ Vonseiten der Schulbehörden wurden diese Entwicklungen aufgegriffen. Schon die einheitlichen Prüfungsanforderungen für das Abitur (EPA) der Kultusministerkonferenz (KMK) von 2004 betonten moderne quantenoptische Fragestellungen. In den am 18.06.2020 beschlossenen Bildungsstandards der KMK für das Fach Physik wurde diese Orientierung an modernen Aspekten der Quantenphysik aufgegriffen und fortgeführt. Sie sind in hohem Maße kompatibel mit Unterrichtskonzepten, die sich an den grundlegenden quantenphysikalischen Aspekten der Quantentechnologien (stochastische Gesetzmäßigkeiten, Superpositionszustände, Komplementarität, Messprozess) orientieren. Diese Entwicklungen bieten Ansätze, um Unterricht zu den modernen Aspekten der Quantenphysik in den Schulen zu verankern.

Bedeutende Entwicklungsarbeit, um die Quantenphysik für Schülerinnen und Schüler experimentell

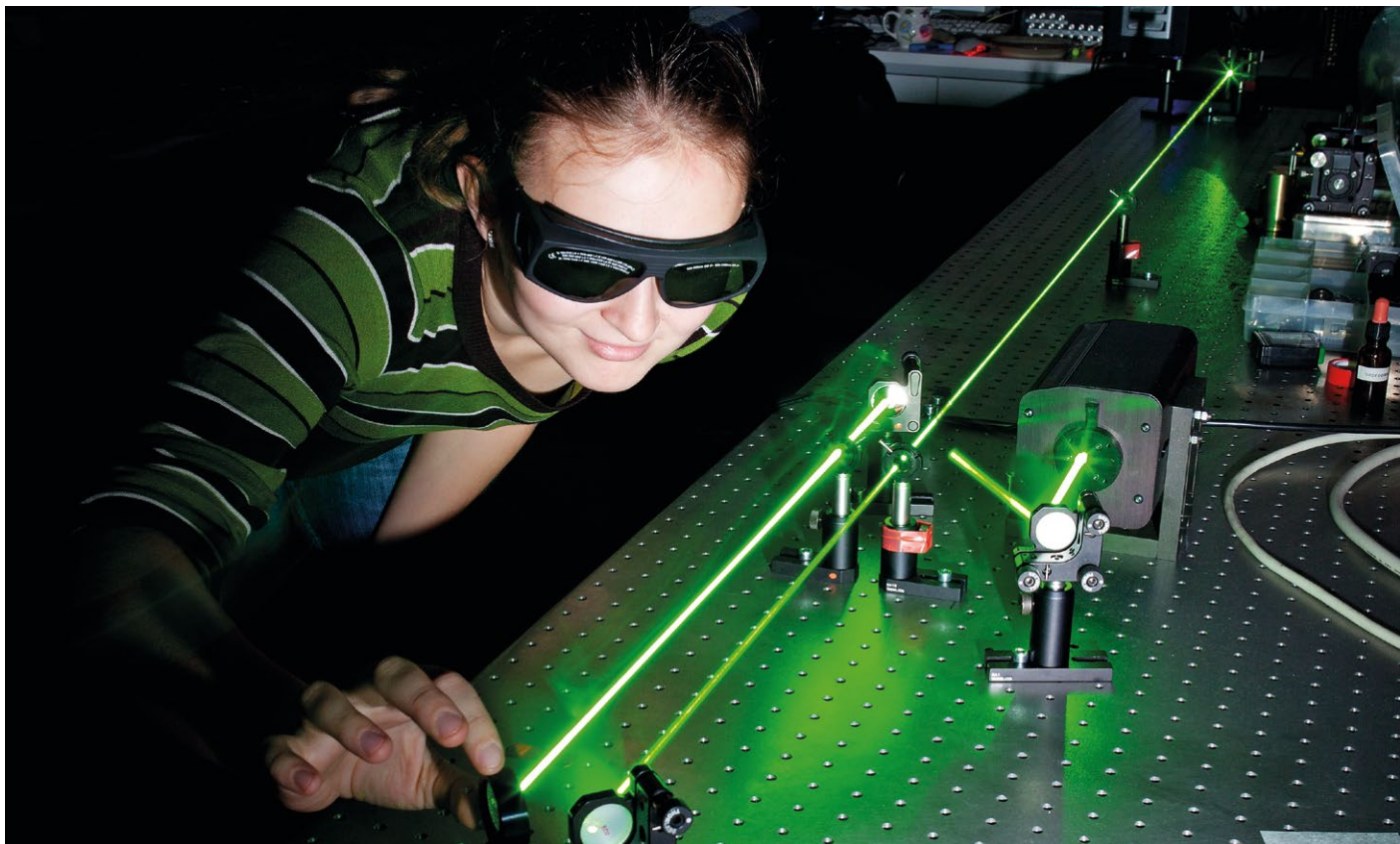
²³ quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Rahmenprogramm-Bundesregierung-Quantentechnologie-2018-bf-C1.pdf

²⁴ quantentechnologien.de/bildung/quantum-futur-akademie.html

²⁵ quantentechnologien.de/forschung/foerderung/quantum-futur.html

²⁶ R. Müller, T. Wilhelm, Quantenphysik, in: T. Wilhelm et al. (Hrsg): Unterrichtskonzeptionen für den Physikunterricht, Springer: Heidelberg, 2020.

²⁷ J. Küblbeck, R. Müller, Wesenszüge der Quantenphysik, Köln: Aulis, 2003.



erfahrbar zu machen, wurde in Schülerlaboren geleistet, zum Beispiel im QuantumLab in Erlangen oder im foeXlab in Hannover. Hier wurden kostengünstige und zuverlässig einsetzbare Schülerversuche mit Einzelphotonen entwickelt und empirisch untersucht.

Status quo im Bereich Outreach

Die Aktivitäten im Bereich Outreach richten sich an breitere Gruppen der Bevölkerung. Aus der Berichterstattung in den Medien erfährt die Öffentlichkeit, dass die Quantentechnologien der zweiten Generation als Zukunftstechnologie mit dem Potenzial für disruptive Innovationen gelten. Es herrscht die Erwartung, dass das Beherrschen fortgeschrittener Quantentechnologien zukünftig eine wichtige Rolle für die Konkurrenzfähigkeit moderner Volkswirtschaften spielen wird. Outreach-Aktivitäten von Hochschulen und Industrie sollten daher größeren Gruppen von Entscheiderinnen und Entscheidern, aber auch der allgemeinen Bevölkerung die Möglichkeit geben, sich über die neuen Entwicklungen auf dem Gebiet zu informieren. Dadurch kann auch dem Entstehen von Ängsten und Vorurteilen vorgebeugt werden, die oftmals mit der Etablierung neuer Technologien einhergehen.

Mit Blick auf Outreach-Aktivitäten stellt international das oben erwähnte Outreach Programm „Quantum City“ des UK-Flagships das umfassendste dokumentierte Material eines Dialogs zu Quantentechnologien mit einer breiten Öffentlichkeit dar. Der Dialog hatte zum Ziel,

- die öffentliche Wahrnehmung von Quantentechnologien aufgrund spontaner, unaufgefordert geäußelter Ansichten, aber auch stärker durchdachter Meinungen als Reaktion auf Informationen und Diskussionen zu verstehen,
- die öffentliche Bewertung von Quantentechnologien zu untersuchen, das heißt, die Erwartungen, Wünsche, aber auch Vorbehalte und Ängste sowie die Gründe für diese Ansichten aufzudecken,
- die Öffentlichkeit in einen Dialog mit Expertinnen und Experten sowie Forscherinnen und Forschern einzubinden.

Die **Outreach-Aktivitäten in Deutschland** gingen bislang überwiegend von lokalen Forschungsverbünden oder Forschungszentren aus. Mit der Fördermaßnahme „Quantum aktiv – intuitive Outreach-Konzepte für die Quantentechnologien“ ver-

folgt das BMBF das Ziel, Quantentechnologien möglichst vielen Menschen näherzubringen und begreifbar zu machen.²⁸

Laufende koordinierte **Outreach-Fördermaßnahmen** bestehen derzeit nicht. Ebenso gibt es keine breit angelegten Maßnahmen, um Wünsche und Anforderungen der Öffentlichkeit an die Quantentechnologien festzustellen, zum Beispiel auch vor dem Hintergrund zukünftiger Kundenwünsche/ Märkte für quantentechnologische Produkte.

Lösungsansätze und Herausforderungen

Um in Deutschland ein Ökosystem aus gut ausgebildeten „Quantum Natives“ zu schaffen, das die Quantentechnologien der zweiten Generation in die Industrie trägt und vorantreibt, ist die **Ausbildung an den Hochschulen** essenziell. Bereits jetzt planen verschiedene Universitäten und Fachhochschulen Masterstudiengänge zu Quantum Engineering oder haben sie bereits eingerichtet. Daneben werden zunehmend Neben- oder Vertiefungsbereiche zum Thema Quantentechnologien in Physik oder ingenieurwissenschaftlichen Studiengängen angeboten. Damit die Fachkräfte, die in fünf bis zehn Jahren für den Ausbau der Quantentechnologien in Industrie und Wirtschaft benötigt werden, dann auch verfügbar sind, müssen schon jetzt entsprechende Maßnahmen ergriffen werden. Das beinhaltet die weitere Einrichtung von Studiengängen an Universitäten und Fachhochschulen, die stärkere Erweiterung der Zielgruppe auf Studierende der Inge-

nieurwissenschaften, der Informatik und weiterer Fächer sowie die Weiterbildung von Arbeitskräften aus der Industrie, die derzeit bereits im Beruf stehen.

Studienkonzepte für die neue Generation von Studierenden werden sich von denjenigen eines traditionellen Physikstudiums unterscheiden. In einer Ausbildung, die sich auf die Konzepte der Quantentechnologien fokussiert, rücken neue Modellsysteme wie Qubits und photonische Freiheitsgrade in den Mittelpunkt. Die traditionelle Orientierung an Atomphysik und Chemie (Wasserstoffatom) wird abgelöst vom Bezug zur Informatik (Qubits und Quantenalgorithmen, Gatteroperationen). Insbesondere bei Studierenden aus anderen Fächern als der Physik können dabei kaum Vorkenntnisse aus der Quanten- oder Atomphysik vorausgesetzt werden. Die Entwicklung angemessener Studienangebote für diese neue, heterogene Zielgruppe an

Studierenden ist eine Herausforderung, die gezielt angegangen werden muss. Um den verschiedenen inhaltlichen Anforderungen zu genügen, muss ein Bündel innovativer Konzepte mit unterschiedlichen Vertiefungsniveaus und inhaltlichem Umfang entwickelt und in seiner Wirksamkeit evaluiert werden. Dies betrifft nicht nur Lehrveranstaltungen und ihre Inhalte, sondern auch geeignete Demonstrationsexperimente, Praktikumsversuche, Simulationen und Programmierungsumgebungen insbesondere für Quantencomputer.

Outreach-Maßnahmen können einen wichtigen Beitrag zur Nachwuchsförderung liefern und ein Baustein sein, um eine ausreichende Zahl talentierter junger Menschen zu gewinnen, die zukünftig für die Weiterentwicklung der Quantentechnologien unverzichtbar sind.

Ein wichtiger Baustein beim Austausch zwischen Hochschulen und Industrie wird die **Weiterbildung** von bereits im Beruf stehenden Fachkräften sein. Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus Industrie und Wirtschaft, die bisher in ihrem Studium und Berufsleben noch nicht mit Konzep-

²⁸ quantentechnologien.de/forschung/foerderung/quantum-aktiv.html

ten der Quantenphysik in Berührung gekommen sind, sollten die Möglichkeit bekommen, Qualifikationen im Bereich der Quantentechnologien zu erwerben. Das Angebot kann dabei von allgemeinen Grundkenntnissen für Anwenderinnen und Anwender bis zum Spezialwissen in bestimmten Anwendungsfeldern reichen. Analog zu den Masterprogrammen der Universitäten kann eine Vergleichbarkeit mittels eines Zertifizierungssystems für bestimmte Kompetenzbereiche hergestellt werden. Bei der Definition und Etablierung eines solchen Weiterbildungssystems für Fachkräfte könnte das Kompetenzzentrum der PTB aufgrund ihrer schon jetzt etablierten Rolle als Partner von Unternehmen eine koordinierende Rolle spielen.

Wie bereits ausgeführt hat Deutschland gute Voraussetzungen für einen Ausbau des **Unterrichtsangebots** zu Quantentechnologien in der Schule. Notwendig dazu ist die Entwicklung und Implementierung von Unterrichtskonzepten, die den Anforderungen an Quantentechnologien der zweiten Generation gerecht werden. Die Entwicklung der Angebote muss qualitätssichernd von empirischen Untersuchungen gestützt werden, die zeigen, dass das Thema in der verfügbaren Zeit mit dem angestrebten Lernerfolg unterrichtet werden kann. Diese empirisch gestützte Entwicklung von Unterrichtskonzeptionen braucht fachdidaktische Expertise. Für eine nachhaltige Verankerung im Schulunterricht sind aber nicht nur die Konzepte entscheidend. Auch die Lehrerinnen und Lehrer müssen die Gelegenheit bekommen, sich mit den aktuellen Entwicklungen vertraut zu machen. Dazu müssen Lehrerfortbildungen entwickelt, angeboten und die Teilnahme daran von den Schulbehörden ermöglicht werden.

Da der Schulunterricht auf Experimente gestützt sein soll, ist es für eine erfolgreiche Umsetzung erforderlich, **im Unterricht einsetzbare Experimentiermöglichkeiten** zu entwickeln. Bedingt durch die hohen Kosten und den teilweise hohen experimentellen Aufwand sind mit Schulmitteln derzeit keine Experimente mit einzelnen Quantenobjekten möglich. Auch vielversprechende Entwicklungen wie der Quantenkoffer der Firma qtools sind für einzelne Schulen derzeit noch unerschwinglich. Der durch eine zukünftige Serienfertigung von Detektoren und Quellen mögliche Preisverfall könnte hier Abhilfe schaffen. Deshalb ist es schon heute

sinnvoll, künftige Experimentiermöglichkeiten zu entwickeln und bezüglich ihrer Lernwirksamkeit zu untersuchen. In der Zwischenzeit kann es sinnvoll sein, auf Verleihmodelle wie das von der Heraeus-Stiftung gestartete Modellprojekt zum Verleih von Quantenkoffern an Schulen, auf Projekte wie den SchulPOOL der Uni Wuppertal oder auf mobile Experimentiereinrichtungen (Quantenmobil) zurückzugreifen. Darüber hinaus sollten gezielt Anreize geschaffen werden, um unterschiedliche Ansätze zu Einzelphotonenexperimenten aus der Forschung auf „Low-Cost“-Varianten hin zu adaptieren.

Ein wesentliches Ziel von Outreach-Aktivitäten ist das **Motivieren junger Menschen**. Sie sollen dafür begeistert werden, sich mit dem Gebiet in und außerhalb der Schule näher zu beschäftigen, Interesse dafür zu entwickeln und ein entsprechendes Studium zu beginnen. Outreach-Maßnahmen können einen wichtigen Beitrag zur Nachwuchsförderung liefern und ein Baustein sein, um eine ausreichende Zahl talentierter junger Menschen zu gewinnen, die zukünftig für die Weiterentwicklung der Quantentechnologien unverzichtbar sind.

Entsprechend dem Catch and Hold Approach beim Outreach sollte es einerseits Maßnahmen geben, deren primäres Ziel die Förderung von Interesse ist, bei denen also der Lernerfolg weniger im Mittelpunkt steht. Andererseits sind Maßnahmen erforderlich, die eine vertiefte Beschäftigung zulassen (etwa durch eigene Projekte in Schülerlaboren). Solche Outreach-Maßnahmen sollten für verschiedene Zielgruppen und Altersstufen, insbesondere für Schülerinnen und Schüler, entwickelt werden.

Schülerlabore spielten bisher schon eine große Rolle beim Ansprechen und Begeistern von Schülerinnen und Schülern für physikalische Themen. Einige Schülerlabore (Hannover, Erlangen, Hamburg) haben bereits einen expliziten Fokus auf moderne Themen der Quantenphysik. In Analogie zum Ansatz des „Netzwerks Teilchenphysik“ wurden Masterclasses zu Themen der Quantenphysik eingerichtet, in denen Schülerinnen und Schüler authentisch von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern an Themen der aktuellen Forschung herangeführt werden (Braunschweig, Hannover). Es besteht aber noch erheblicher Entwicklungsbedarf, zum Beispiel was Experimente und Simulationen betrifft.

Ein vielversprechender Ansatz für das Wecken von Motivation liegt in der **Gamification**. Jugendliche und Erwachsene werden durch spielbasierte Ansätze zwanglos an das Thema herangeführt, können Erfahrungen sammeln und im besten Fall auf spielerische Weise Wissen erwerben. Es gibt bereits eine Reihe von Angeboten (QuVis an der University of St Andrews oder Qiskit-Spiele von IBM). Hier sollte das Angebot ausgebaut und weiterentwickelt werden. Auch die Kooperation mit professionellen Spieleentwicklern sollte vorangetrieben werden. Um die Qualität der Angebote sicherzustellen, sollten die entwickelten Angebote in Bezug auf Lernwirksamkeit und motivierende Wirkung untersucht werden.

Zusammenfassung

Hochschule:

- Entwicklung neuer fachübergreifender Studiengänge/Graduiertenkollegs im Bereich der Quantentechnologien (Informatik, Physik, Ingenieurwissenschaften) auch mit stärkerem praktischem Bezug. Es fehlt an Ingenieurskompetenz bei Physikerinnen und Physikern, aber auch an Wissen über Quantentechnologien bei Ingenieurinnen und Ingenieuren; Unterstützung bei der Konzeption und wissenschaftliche didaktische Begleitung
- Ansprechen neuer Studierendengruppen beispielsweise aus dem Ingenieurwesen oder der Informatik. Identifizieren von sinnvollen Lernstoffen (bzw. zu erreichenden Kompetenzen) für diese Zielgruppen und Erstellen entsprechender Lehrkonzepte, Experimente und Materialien
- Vernetzung von Akteuren in diesem Bereich, um einheitliche Ziele und Standards zu erzielen und lokal entwickelte Materialien und Ideen auszutauschen
- Einrichtung von Quantenengineering-Lehrstühlen; Lehrstühle für Quantencomputer als Teil der Informatik und nicht nur der Physik
- Verstärkte Zusammenarbeit bei Ausbildungsabschnitten (Praktika, insbesondere auch Reinraumpraktika, Bachelor- und Masterarbeiten sowie Promotion) mit der Industrie, speziell auch

KMU (inklusive Finanzierungsinstrumenten). Schaffung/Förderung der Möglichkeit von Vorlesungen durch Dozentinnen und Dozenten aus der Industrie

- Wettbewerb „Best-Practice-Modelle“

Training (Industrie):

- Identifizieren von Schnittstellen zwischen Hochschulen und Industrie, um Bedarfe auszutauschen und gemeinsame Interessen zu definieren
- Konzeption von Fortbildungsprogrammen zu Quantentechnologien für Arbeitskräfte, die bereits im Beruf stehen
- Schaffung von Akademie-/Instituts-Mobilitätsprogrammen nicht nur für Promovierende (EU), sondern auch für Postdocs oder Professorinnen und Professoren, Industrie-Sabbaticals
- Dezidierte Rückkehrprogramme für deutsche Quantentechnologinnen und -technologen aus dem Ausland
- Mehr personelle (temporäre) Durchlässigkeit zwischen Akademie und Industrie auf Expertenebene in beiden Richtungen; auch in Bezug auf Lehr-/Trainingsaktivitäten

Schule:

- Entwicklung und Evaluation von Unterrichtskonzepten und Arbeitsmaterialien zu Quantentechnologien, die für den Einsatz in der Schule geeignet sind
- Entwicklung und Evaluation von neuen Experimenten, mit denen sich die Konzepte der Quantentechnologien verdeutlichen lassen
- Ausleihmodelle für Experimente zu Quantentechnologien von Hochschulen für Schulen; mobile Experimentiergelegenheiten („Quantenmobil“)
- Vernetzung der Akteure, zum Beispiel Netzwerke aus Hochschulen und Kooperationsschulen

Outreach:

- Entwicklung von Materialien, um die Konzepte der Quantentechnologien einer breiten Öffentlichkeit zu verdeutlichen
- Förderung eines Dialogs mit der Öffentlichkeit
- Feststellung der Wünsche und Anforderungen der Öffentlichkeit an die Quantentechnologien vor dem Hintergrund zukünftiger Kundenwünsche/ Märkte für quantentechnologische Produkte
- Einsatz neuer Medien (Video, Augmented Reality, Virtual Reality) zu diesem Zweck
- Entwickeln von Formaten (Schülerlabore, Masterclasses), um gezielt interessierte Schülerinnen und Schüler in der Oberstufe für diese Themen zu begeistern und für ein entsprechendes Studium zu motivieren
- Einsatz von Formaten wie zum Beispiel im Netzwerk Teilchenphysik („Masterclasses“), um Schülerinnen und Schüler auf breiter Ebene anzusprechen
- Workshops für Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger in der Industrie (Multiplikatoren)
- Allgemein zugängliche (Kooperation mit Science-Museen) Demonstratoren von Anwendungen der Quantentechnologien (Quantenkommunikation, Quantencomputing): Wozu sind Quantentechnologien nützlich?
- Kooperationsmaßnahmen mit Science-Museen; Dauer/Wanderausstellungen
- Ausstellungen für eine breitere Öffentlichkeit über das Publikum von Science-Museen hinaus



3.5.2 Kooperation und Vernetzung

Ziele und globale Herausforderungen

Die Übertragung von Konzepten der Quantentechnologien in die Anwendung stellt Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft vor erhebliche Herausforderungen, weil sie auf bisher wirtschaftlich noch wenig genutzten und oft wenig bekannten physikalisch-technischen Phänomenen beruhen. In der gesellschaftlichen Breite enthält insbesondere der vorhergehende Abschnitt Strategieempfehlungen zur Verbreitung von Kenntnissen.

In den einzelnen Themenfeldern wurde die Herausforderung des Transfers von Grundlagenergebnissen in wirtschaftlich und gesellschaftlich gewinnbringende Anwendungen unter verschiedenen Aspekten diskutiert. Wissen aus den unterschiedlichen Bereichen muss ausgetauscht und zusammengeführt werden. Unterschiedliche Kooperationsmodelle, die dies unterstützen, sind generell die Voraussetzung dafür, dass Synergien effizient genutzt werden können.

Der Aufbruch in die Quantentechnologien findet zu einem Zeitpunkt statt, an dem das Know-how der Quantentechnologien noch immer überwiegend in der akademischen Welt zu finden ist. Die akademische Welt orientiert sich in erster Linie an der Grundlagenforschung. Grundlagenforschung wird auch weiterhin unbedingt erforderlich sein, weil heute noch nicht klar ist, welche technologischen Plattformen (Systeme mit Ionenfallen, neutralen Atomen, supraleitenden Qubits etc.) die erfolgreichste Strategie für Anwendungen versprechen.

Die Arbeitsgruppen der akademischen Welt forschen typischerweise mit kleinen Teams aus Doktorandinnen, Masterstudierenden und Postdoktoranden an Bauelementen oder kleinen Systemen, um Prozesse der Quantentechnologien zu studieren.

Im Gegensatz dazu werden quantentechnologische Anwendungen für die Gesellschaft Systemcharakter haben und noch deutlich wachsende technologische Komplexität aufweisen. Forschung in eher kleinen

Arbeitsgruppen wird nicht ausreichen, um funktionsfähige Systeme zu entwickeln. Neue Strategien zur Netzworlbildung, die eine Voraussetzung konkreter und erfolgreicher Kooperation ist, können deshalb die Umsetzung der Quantentechnologien unterstützen. Es wird darauf ankommen, unter den verschiedenen Wissenschaftsinstitutionen und mit der Wirtschaft eine **gemeinsame Strategie zur Netzworlbildung und Kooperation** zu entwerfen, die die Realisierung der Quantentechnologien befördert. Kooperation mit schon bestehenden Netzwerken wie beispielsweise dem Verbund „Photonik

Deutschland/Photonics Germany“ kann bestehendes Know-how sowie Erfahrungen für die Vernetzung der Akteure aus Wissenschaft und Industrie nutzbar machen.

Individuelle Forschung in einzelnen Arbeitsgruppen wird nicht ausreichen, um funktionsfähige Systeme zu entwickeln. Wir brauchen eine gemeinsame Strategie zur Netzworlbildung und Kooperation für Wirtschaft und Wissenschaft.

Anforderungen und Status quo

In Deutschland gibt es seit Langem **etablierte Förderinstrumente**, um die Zusammenarbeit zu stimulieren: In der akademischen Welt wird der Kooperationsrahmen aufgespannt von den Sonderforschungsbereichen (SFBs) und Forschergruppen der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), mehreren Exzellenzclustern zum Thema Quantenphysik über Zentren an ausgewählten Universitäten

bis hin zu den Verbundprojekten des BMBF. Strukturell sehen sich die SFBs einer rein neugiergetriebenen Grundlagenforschung verpflichtet, während bei den Verbünden des BMBF problemorientierte Fragestellungen im Vordergrund stehen. Wirtschaftsunternehmen sind an diesen Kooperationsprojekten in langsam wachsendem Maße beteiligt, sie beschränken sich aber bisher überwiegend auf eine begleitende Beobachterrolle.

Die Konzepte reiner Grundlagenforschung versus problemorientierter Forschung werden immer wieder als antagonistisch gesehen, was die Umsetzung von Ergebnissen aus der akademischen Forschung eher behindert. Eine erfolgreiche Forschung zu Quantentechnologien mit Anspruch auf wirtschaftliche Verwertung wird in den nächsten Jahrzehnten beide Konzepte dringend brauchen. Die wissenschaftliche Gemeinschaft sollte versuchen, diesen Widerspruch zu überwinden.

In den deutschen Großforschungseinrichtungen war das Thema Quantentechnologien bisher nur geringfügig verankert. Erst das 2018 eingerichtete Quantum Flagship der EU hat ein Umdenken veranlasst.

Die **europäischen Kooperationsprojekte** ähneln den nationalen deutschen Kooperationsprojekten strukturell in vielerlei Hinsicht. Allerdings erschweren einige Regeln (beispielsweise die Verteilung auf mehrere europäische Staaten) und nicht zuletzt die nach wie vor sehr unterschiedlichen Betriebskulturen sowohl der akademischen als auch der institutionellen Forschung eine effiziente Zusammenarbeit in der Breite:

Quantum Flagship

Das Quantum Flagship ist die europäische Keimzelle und Auslöser aller nationalen Anstrengungen zu den Quantentechnologien geworden.

Auf der EU-Ebene des Flagships ist die oben beschriebene Problematik bekannt. Dort beschäftigt sich die Innovation Working Group mit der Frage des Wissenstransfers und der Netzwerkbildung. Sie schlägt unter anderem diese Maßnahmen zur Unterstützung vor:

- Connect with existing trade or professional associations

- Promote workshops with sessions devoted to applications
- Connect potential start-up creators with business incubators/accelerators/innovation boot camps/venture capital
- Connect European technology/nanofabrication and nano-manipulation platforms amongst each other and with Start-ups and SME's with the aim of facilitating access
- Develop criteria/methodology for identifying use-cases²⁹

European Research Council (ERC)

Die individuellen ERC-Programme (Advanced, Consolidator, Starting Grants) haben hervorragende und sichtbare Einzelleistungen in der Grundlagenforschung ermöglicht, während das Synergy-Programm bisher kaum Spuren hinterlassen hat.

Quanteria

Das Quanteria-Programm entspricht den Forschergruppen der DFG und ist im Wesentlichen der Grundlagenforschung verpflichtet.

FET-Flagships

Im FET-Programm (Future and Emerging Technologies) sind problemorientierte Projekte auch zu den Quantentechnologien gewünscht. Allerdings wird ein möglicher Erfolg stark dadurch beeinträchtigt, dass Antragstellerinnen und Antragsteller sich wegen der geringen Erfolgsaussichten vielfach überlappend bewerben und damit ein qualitätsorientiertes Auswahlverfahren konterkarieren.

Lösungsansätze und Herausforderungen

Um das in Deutschland vorhandene Wissen für die Forschung an und die Umsetzung von Quantentechnologien effizient zu nutzen, sollten Netzwerke und Kooperationen nach diesen **Leitlinien** unterstützt werden:

²⁹ qt.eu/engage/community/working-groups/innovation-working-group

- Die Realisierung von Quantentechnologien benötigt auf absehbare Zeit beides: Grundlagenforschung und problemorientierte Forschung.
- Es kommt darauf an, auf sachgerechte Kommunikation ausgerichtete Netzwerke sowohl innerhalb der akademischen Institutionen und der Großforschung als auch untereinander und mit der Wirtschaft zu schaffen.
- Kooperationen sind sowohl eine Folge als auch eine Voraussetzung funktionierender Netzwerke. Die Netzwerkbildung benötigt genügend Zeit, um effiziente Arbeitsweisen zu finden und zu installieren.

Konkrete Elemente zur Förderung der Netzwerkbildung und effizienter Kooperationen zur Umsetzung der Quantentechnologien können sein:

Initialisierung und Förderung von Netzwerkbildung:

- Workshops zu problemorientierten Fragestellungen, die gemeinsam von Vertreterinnen und Vertretern der akademischen Welt, der Großforschung und der Wirtschaft geleitet werden.
- Kooperation mit bestehenden Netzwerken aus dem Themenbereich Quantentechnologien und Photonik.
- Die Förderung ausgewählter Leuchtturmprojekte, an denen die verschiedenen Bereiche in einem offenen Wettbewerb gemeinsam beteiligt sind.

Strukturierung von Kooperationen:

- Systemorientierte Verbundprojekte sollten ihre Fragestellungen unter umfassender Betrachtung der physikalisch-technologischen Eigen-

schaften, also zum Beispiel durch Vergleich verschiedener Hardwarerealisierungen (Plattformen), bearbeiten.

- Systemorientierte Verbundprojekte können von einer Geschäftsführung profitieren, die wissenschaftlich-technologische und administrative Aspekte eng koordiniert.
- Systemorientierte Verbundprojekte sollten am Ende ihrer Projektphasen Roadmaps (Hinweise zur konkreten weiteren koordinierten Forschung und Entwicklung) vorlegen, die mittelfristig quantitative Bewertungen ermöglichen.
- Aus der Grundlagenforschung entstehende Verbünde sollten mittelfristig angehalten werden, TRLs für ihre Systeme zu definieren.
- Nationale, lokale und regionale One Stop Agencies für Quantentechnologien und/oder Photonik können helfen, die Aktivitäten der verschiedenen beteiligten Institutionen zu koordinieren und die regionalen Netzwerke zu stärken.
- In der akademischen Welt können neue „Belohnungsmodelle“ (Einrichtung von geeigneten Mittelbaustellen etc.) helfen, den (scheinbaren) Antagonismus von individueller Grundlagenforschung und kooperativer problemorientierter Forschung zu überwinden.

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung	Abkürzung	Bedeutung
Al₂O₃	Aluminiumoxid	GaAs	Galliumarsenid
AlGaAs	Aluminiumgalliumarsenid	GaN	Galliumnitrid
AlN	Aluminiumnitrid	InGaAs	Indiumgalliumarsenid
API	Application Programming Interface	InP	Indiumphosphid
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung	IoT	Internet of Things
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik	IP	Intellectual Property
CAD	Computer Aided Design	KI	künstliche Intelligenz
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft	KMK	Kultusministerkonferenz
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	KMU	kleine und mittlere Unternehmen
DoS	Denial of Service	LCT	Laser Communication Terminal
E2E	Ende zu Ende	LN	Lithiumniobat
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit	LNoI	Lithiumniobat-on-Insulator
EPA	einheitliche Prüfungsanforderungen für das Abitur	MEMS	Micro-Electro-Mechanical Systems
ERC	European Research Council	MOPA	Master Oscillator Power Amplifier
EUV	extrem ultraviolett	NIR	Nahinfrarot
FET	Future and Emerging Technologies	NISQ	Noisy Intermediate Scale Quantum
FPGA	Field Programmable Gate Array	NV	Nitrogen Vacancy
FuE	Forschung und Entwicklung	OPM	Optically Pumped Magnetometer
		OTP	One Time Pads

Abkürzung Bedeutung

PCB	Printed Circuit Board
PIC	Photonic Integrated Circuit
PQC	Post-Quantum Cryptography
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
QAOA	Quantum Approximate Optimization Algorithm
QKD	Quantum Key Distribution
QLAN	Quanten-LAN
QRA	Quantum-Resistant Algorithms
Q-SEnSE	Quantum Systems through Entangled Science and Engineering
QTZ	Quantentechnologie-Kompetenzzentrum
SFB	Sonderforschungsbereich
SFWM	Spontaneous Four Wave Mixing
Si	Silizium
SI	Internationales Einheitensystem
Si₃N₄	Siliziumnitrid
SiN	Siliziumnitrid
SiO₂	Siliziumdioxid
SiP	System-in-Package
SLE	Selective Laser Induced Etching

Abkürzung Bedeutung

SoC	System-on-Chip
SOI	Silicon-on-Insulator
SPAD	Si-basierte Avalanche-Photodiode
SPDC	Spontaneous Parametric Down Conversion
SQUID	Superconducting Quantum Interference Device
SWIR	Short Wavelength Infrared
TEC	Thermoelectric Cooler
TGV	Through Glas Vias
THz	Terahertz
TRL	Technology Readiness Level
TSV	Through Silicon Vias
UHV	Ultrahochvakuum
VIP	Validierung von Innovationspotenzial
VIS	visuelles Spektrum

Mitwirkende:

ADVA Optical Networking SE ■ Albert-Ludwigs-Universität Freiburg ■ AMO
 Automatisierung Messtechnik Optik GmbH ■ asphericon GmbH ■ AWK Group AG
 ■ Balluff GmbH ■ Balluff GmbH ■ BASF SE ■ BMW AG ■ Carl Zeiss AG ■ CiS
 Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH ■ Covestro AG ■ Deutsche Telekom AG
 ■ Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. ■ Duale Hochschule Baden-
 Württemberg ■ ETH Zürich ■ EurA AG ■ Ferdinand-Braun-Institut, Leibniz-Institut
 für Höchstfrequenztechnik ■ Forschungszentrum Jülich GmbH ■ Fraunhofer-Institut
 für Angewandte Festkörperphysik IAF ■ Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und
 Feinmechanik IOF ■ Fraunhofer-Institut für Integrierte Schaltungen IIS ■ Fraunhofer-
 Institut für Lasertechnik ILT ■ Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-
 Hertz-Institut, HHI ■ Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme FOKUS
 ■ Fraunhofer-Institut für Organische Elektronik, Elektronenstrahl- und Plasmatechnik
 FEP ■ Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik IPM ■ Fraunhofer-Institut für
 Silicidforschung ISC ■ Fraunhofer-Institut für Techno- und Wirtschaftsmathematik ITWM
 ■ Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM ■ Freie Universität
 Berlin ■ Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg ■ Friedrich-Schiller-
 Universität Jena ■ Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf ■ Humboldt-Universität
 zu Berlin ■ IBM Research ■ IHP GmbH Leibniz-Institut für innovative Mikroelektronik
 ■ Industrieanlagen-Betriebsgesellschaft mbH (IABG) ■ Infineon Technologies AG
 ■ Johannes Gutenberg-Universität Mainz ■ Julius-Maximilians-Universität Würzburg
 ■ KARL STORZ SE & Co. KG ■ Karlsruher Institut für Technologie ■ Laser Zentrum
 Hannover e.V. ■ LAYERTEC GmbH ■ Leibniz Institut für Photonische Technologien e. V.
 ■ Leibniz Universität Hannover ■ Leibniz-Gymnasium Dormagen ■ Leibniz-Institut für
 Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden ■ Leibniz-Institut für Kristallzüchtung
 im Forschungsverbund Berlin e. V. ■ LEONI Fiber Optics GmbH ■ Ludwig-Maximilians-
 Universität München ■ Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts ■ Max-Planck-Institut
 für Quantenoptik ■ Menlo Systems GmbH ■ Nanoscribe GmbH & Co. KG ■ OHB SE
 ■ Paul-Drude-Institut für Festkörperelektronik, Leibniz-Institut im Forschungsverbund
 Berlin e. V. ■ Photonics BW e. V. ■ Physikalisch-Technische Bundesanstalt ■ PicoQuant
 GmbH ■ Q.ANT GmbH ■ qutools GmbH ■ Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität
 Bonn ■ Robert Bosch GmbH ■ Rohde & Schwarz GmbH & Co. KG ■ Ruprecht-Karls-
 Universität Heidelberg ■ RWTH Aachen University ■ SAP Deutschland SE & Co. KG
 ■ SCHOTT AG ■ Sicoya GmbH ■ Siemens AG ■ SPECTARIS - Deutscher Industrieverband
 für Optik, Photonik, Analysen- und Medizintechnik e. V. ■ Technische Hochschule
 Mittelhessen ■ Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG ■ Thorlabs GmbH ■ TOPTICA
 Photonics AG ■ TRUMPF GmbH + Co. KG ■ TU Berlin ■ TU Braunschweig ■ TU Dresden
 ■ TU Kaiserslautern ■ TU München ■ Universität des Saarlandes ■ Universität Hamburg
 ■ Universität Kassel ■ Universität Paderborn ■ Universität Rostock ■ Universität
 Siegen ■ Universität Stuttgart ■ Universität zu Köln ■ VACOM Vakuum Komponenten
 & Messtechnik GmbH ■ Volkswagen AG ■ Walther-Meißner-Institut der Bayerischen
 Akademie der Wissenschaften ■ Westfälische Wilhelms-Universität Münster

Impressum

Herausgeber

VDI Technologiezentrum GmbH
VDI-Platz 1
40468 Düsseldorf

Verantwortlich für den Inhalt:

Der Programmausschuss „Quantensysteme“ vertreten durch die Sprecher Prof. Dr. Immanuel Bloch (Max-Planck-Institut für Quantenoptik) und Dr.-Ing. E. h. Peter Leibinger (TRUMPF GmbH + Co. KG)

Redaktion

VDI Technologiezentrum GmbH

Gestaltung und Umsetzung:

familie redlich AG Agentur für Marken und Kommunikation, Berlin
KOMPAKTMEDIEN Agentur für Kommunikation GmbH, Berlin

Druck

BMBF

Bildnachweise

Titel: AdobeStock/Bokehstore; S. 1: Cira Moro für TRUMPF, Jan Greune; S. 4: AdobeStock/Peter Jurik; S. 12: AdobeStock/luchschenF; S. 15: IQM/Henrikki Mäkynen; S. 16: AdobeStock/rybindmitriy; S. 19: Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF; S. 23: Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF; S. 25: AdobeStock/starlineart; S. 28: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB); S. 31: Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF; S. 32: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB); S. 35: Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB); S. 37: panthermedia.de/firefox; S. 40: TOPTICA Photonics AG; S. 43: AdobeStock/Viacheslav; S. 45: AdobeStock/luchschenF; S. 46: TOPTICA Photonics AG; S. 49: AdobeStock/lightpoet; S. 50: Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF; S. 55: AdobeStock/lightpoet; S. 56: TOPTICA Photonics AG; S. 57: AdobeStock/lightpoet; S. 60: Universität des Saarlandes/Oliver Dietze; S. 65: AdobeStock/lightpoet; S. 69: AdobeStock/Irina Schmidt

