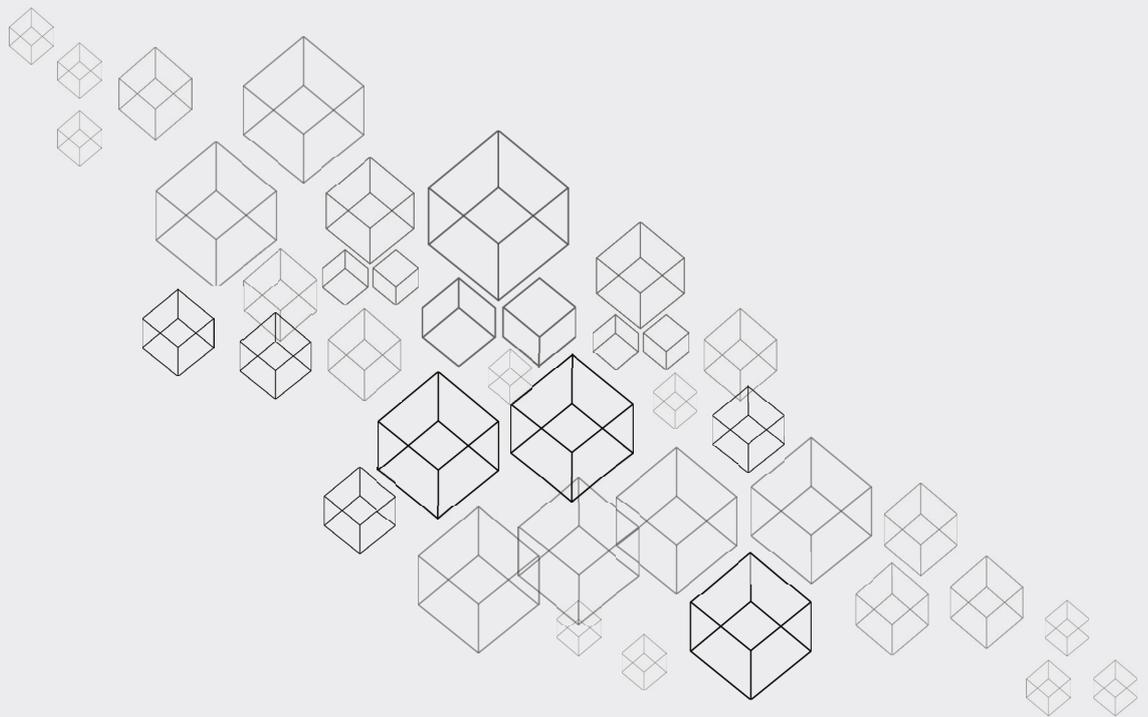




# QUANTENTECHNOLOGIE

## Grundlagen und Anwendungen





## **Impressum**

### **Herausgeber**

Nationale Initiative „Quantentechnologie – Grundlagen und Anwendungen“ (QUTEGA)

### **Koordination**

Prof. Gerd Leuchs

### **Autoren und Mitglieder des QUTEGA- Komitees**

Prof. Manfred Bayer, Prof. Immanuel Bloch, Prof. Holger Boche, Prof. Dagmar Bruß, Prof. Dmitry Budker, Prof. Tommaso Calarco, Prof. Ignacio Cirac, Prof. David DiVincenzo, Prof. Jens Eisert, Prof. Wolfgang Ertmer, Prof. Rudolf Gross, Prof. Sven Höfling, Prof. Gerd Leuchs, Priv.-Doz. Christoph Marquardt, Prof. Dieter Meschede, Prof. Giovanna Morigi, Prof. Christian Ospelkaus, Prof. Ernst Rasel, Prof. Martin Schell, Prof. Wolfgang Schleich, Prof. Piet Schmidt, Prof. Ferdinand Schmidt-Kaler, Prof. Thomas Schröder, Prof. Christine Silberhorn, Prof. Alexey Ustinov, Prof. Harald Weinfurter, Prof. Reinhard Werner, Prof. Jörg Wrachtrup

### **Editing und Layout**

Dr. Vanessa Chille, Christina Bornschein

### **Kontakt**

[qutega@mpl.mpg.de](mailto:qutega@mpl.mpg.de)

[www.qutega.de](http://www.qutega.de)

Januar 2017

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Zusammenfassung</b>	<b>4</b>
<b>2. Einleitung</b>	<b>5</b>
<b>3. Anwendungsorientierte Themen</b>	<b>6</b>
3.1 Quanten-Kommunikation	7
3.1.1 Stand von Forschung und Technik	7
3.1.2 Forschungsbedarf, Herausforderungen und Ziele	8
3.2 Rechnen mit Quantencomputern	9
3.2.1 Stand von Forschung und Technik	9
3.2.2 Herausforderungen und Ziele	10
3.3 Quanten-Sensorik	11
3.3.1 Stand von Forschung und Technik	11
3.3.2 Herausforderungen und Ziele	12
3.4 Quanten-Simulation	12
3.4.1 Stand von Forschung und Technik	13
3.4.2 Herausforderungen und Ziele	14
<b>4. Methodische Querschnittsplattformen</b>	<b>16</b>
4.1 Übergreifende theoretische Modelle und Konzepte	16
4.1.1 Quanten-Kommunikation	17
4.1.2 Quanten-Computing und -Algorithmen	18
4.1.3 Quanten-Sensorik	18
4.1.4 Quanten-Simulation	18
4.2 Hardware-Systeme	18
4.2.1 Festkörperbasierte Systeme	19
4.2.1.1 Supraleitende Systeme	19
4.2.1.2 Nanoskopische Systeme	21
4.2.2 Photonische Systeme	21
4.2.2.1 Stand von Forschung und Technik	22
4.2.2.2 Herausforderungen und Ziele	22
4.2.3 Atomare und Molekulare Systeme	24
4.2.3.1 Stand von Forschung und Technik	24
4.2.3.2 Herausforderungen und Ziele	25
<b>5. Schlüsseltechnologien</b>	<b>27</b>
5.1 Quantenkompatible Datenerfassung, schnelle Elektronik und Kryotechnik	27
5.2 Laser, Detektoren, Quellen und Schnittstellen	28
5.3 Materialien, Bauelemente und quantentechnologische Geräte	29
5.4 Quantenmessungen	30
<b>6. Standardisierung</b>	<b>31</b>
<b>7. Struktur der Nationalen Initiative</b>	<b>32</b>
7.1 Forschungs-Förderinstrumente	33
7.1.1 Forschungs- und Entwicklungsförderung	33
7.1.2 Strukturmaßnahmen	34
7.1.3 Öffentlichkeitsarbeit und Bildungsanstrengungen	34
7.2 Empfehlungen	35

## 1. Zusammenfassung

Im Frühjahr 2016 kündigte die Europäische Kommission an, im Rahmen ihrer Forschungsförderung ein Flaggschiff zum Thema "Quantentechnologie" mit den vier Säulen Quantenkommunikation, Quantensensorik, Quantencomputer und Quantensimulationsrechner einzurichten, das im Jahr 2018 starten soll. Ein großer Teil der Flaggschiff-Förderung kommt von der Europäischen Kommission, ein anderer Teil wird flankierend von den beteiligten Ländern aufgebracht. Im Mai 2016 entschied das BMBF in Deutschland, dazu eine Nationale Initiative "**Quantentechnologie – Grundlagen und Anwendungen**" (QUTEGA) einzurichten. Ziel dieser Initiative ist es, den Transfer von Forschungsergebnissen in die Industrie zu fördern. Dieses Ziel hat zwei Facetten: zum einen die Erforschung und Weiterentwicklung von Quantentechnologie gemeinsam durch Forschungseinrichtungen und Industrie in den Fällen, in denen die Anwendung bereits greifbar ist. Zum anderen soll auch Forschung zu Themen gefördert werden, bei denen eine mögliche Anwendung noch in weiterer Zukunft liegt und eine direkte, aktive Beteiligung der Industrie noch verfrüht ist. Das alles umfassende Ziel ist, die Quantentechnologie volkswirtschaftlich relevant nutzbar zu machen. Dazu hat sich das BMBF sowohl an die Industrie als auch an die Wissenschaft gewandt. Das vorliegende Konzeptpapier beinhaltet die Empfehlungen der Wissenschaft.

## 2. Einleitung

In der Wissenschaft konnte sich über die letzten Jahrzehnte das Gebiet der “Quantentechnologie” als eine neuartige Forschungsrichtung etablieren, die das Potential besitzt zukünftig eine Vielzahl technischer Geräte zu revolutionieren. Aktuelle Begrenzungen heutiger Metrologie- oder Strukturierungsverfahren, die oftmals das Rückgrat unserer klassischen Technologien bilden, können dabei mittels Quanteneffekten überwunden werden. Als Anwendungsbeispiele können Interferometrie, Mikroskopie, Lithographie, Bildgebung, Sensorik und zeitliche Synchronisation genannt werden.

Quanten-Bauelemente kombiniert mit Quanten-Lichtfeldern bieten zudem eine fundamental neuartige Perspektive für die sichere Übermittlung von Information und damit für die Telekommunikation.

Historisch gesehen betrifft einer der ersten Vorschläge für den Einsatz der Quantentechnologie in korrelierten Systemen die Simulation komplexer Aufgaben, eine notorische Schwäche klassischer Rechner. Selbst ein sehr komplexes Problem kann effizient gelöst werden, wenn es sich auf ein Quantensystem abbilden lässt, das selbst gut kontrollierbar ist. Ein Beispiel für eine solche Anwendung ist die Optimierung von magnetischen und supraleitenden Materialien. Im ultimativen Fall werden komplexe Rechen- und Simulations-Aufgaben von einem universellen, frei programmierbaren Quantencomputer durchgeführt.

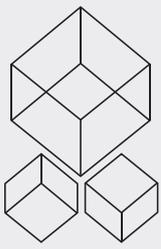
Die Nationale Initiative „Quanten-Technologie – Grundlagen und Anwendungen“ (QUTEGA) tritt an, die speziellen Eigenschaften der Quantenphysik aus dem Labor langfristig und Schritt für Schritt in die industrielle Praxis zu bringen. Die großen Fortschritte sowohl in der Laser-Technologie als auch in der einzigartigen Kontrolle von atomaren, photonischen und Festkörper-Systemen haben Teile der Quantentechnologie schon heute nahe an die Anwendung gebracht. Damit können unter anderem Atomuhren realisiert werden mit einer Unsicherheit von nur wenigen Teilen in 10<sup>18</sup>, entsprechend etwa 1 Sekunde Gang-

abweichung über dem Alter des Universums. So klein diese Zahl auch erscheinen mag, es gibt Anwendungen, die eine solche Genauigkeit erfordern. Durch die Methoden der modernen Quantentechnologie kann die intrinsische Quanten-Unschärfe im Messprozess kontrolliert und so höhere Auflösungen zum Beispiel in Interferometern erreicht werden. Bei komplexen wechselwirkenden Vielteilchensystemen geben Quantenkorrelationen Auskunft über den Quantenzustand. Der Stand der Forschung und ein Ausblick werden in der Studie zu den Quantentechnologien beschrieben, die im Jahr 2015 gemeinsam von Leopoldina<sup>1</sup> und den anderen Akademien der Wissenschaften herausgegeben wurde. Durch die Möglichkeit, Quanten-Eigenschaften zu kontrollieren und gezielt zu manipulieren, können herkömmliche Begrenzungen und Einschränkungen überwunden werden. Nach bereits zwei Jahrzehnten aktiver Grundlagenforschung zeichnen sich erste attraktive industrielle Anwendungen ab.

QUTEGA soll das auf europäischer Ebene geplante Quantentechnologieprogramm flankieren, dessen Ziele im Quantum Manifesto<sup>2</sup> niedergeschrieben wurden. Im Folgenden werden die vier anwendungsorientierten Säulen des Quantum Manifesto sowie die horizontalen methodischen Querschnittsthemen beschrieben.

1 [http://www.leopoldina.org/uploads/tx\\_leopublication/2015\\_Quantentechnologien\\_LF\\_DE\\_korr.pdf](http://www.leopoldina.org/uploads/tx_leopublication/2015_Quantentechnologien_LF_DE_korr.pdf)

2 [http://qurope.eu/system/files/u7/93056\\_Quantum%20Manifesto\\_WEB.pdf](http://qurope.eu/system/files/u7/93056_Quantum%20Manifesto_WEB.pdf)



## 3. Anwendungsorientierte Themen

Quantentechnologien können in unterschiedlichsten Bereichen Anwendung finden und ermöglichen in vielen Gebieten die Verbesserung von bekannten Techniken und eröffnen andererseits auch fundamental neue Möglichkeiten. Die Quanten-Kommunikation erlaubt es erstmals Kommunikation sogar gegen zukünftige, derzeit noch unbekannte Angriffe zu sichern (Kapitel 3.1). Die durch die Parallelisierung von Berechnungen gesteigerte Leistungsfähigkeit von Quanten-Computern lässt die Lösung bislang ungelöster Probleme in greifbare Nähe rücken (Kapitel 3.2). Quanten-Sensoren können verschiedenste Arten physikalischer Parameter mit bislang unerreichbarer Genauigkeit bestimmen (Kapitel 3.3). Und das Verhalten von komplexen Quantensystemen lässt sich mit Hilfe von anderen, hochkontrollierten Quantensystemen simulieren. Diese Vorgehensweise wird als Quanten-Simulation bezeichnet (Kapitel 3.4).

Im Folgenden werden der aktuelle Stand von Forschung und Entwicklung sowie zukünftige Herausforderungen und Ziele für die Zukunft in diesen vier Themenbereichen Quanten-Kommunikation, Quanten-Computing, Quanten-Sensorik und Quanten-Simulation dargestellt.

### 3.1 Quanten-Kommunikation

Die Quantenkommunikation beschäftigt sich mit dem Aufbau von quantenphysikalisch abgesicherten Verbindungen und der Verteilung von Quantenzuständen. Die abgesicherten Verbindungen können Punkt-zu-Punkt oder mit vertrauenswürdigen Knoten verteilt erreicht werden.

Ein zukünftiges Quanteninternet verspricht zukünftig nicht nur physikalische statt algorithmische Sicherheit in der Kommunikation, sondern auch die vollständige Vernetzung von Quantencomputern für dezentrale Berechnungen auf verteilten Maschinen. Es benötigt Methoden der Quantenkommunikation, die auf der Quantenteleportation aufbauen und die es erlauben, Quanteneigenschaften auch in weit entfernte Quantenspeicher zu laden.

#### 3.1.1 Stand von Forschung und Technik

Physikalisch und damit nachweisbar sichere Kommunikation wird erstmals möglich durch den Einsatz von Quantenzuständen als Träger der Information. Nach den Gesetzen der Quantenphysik verursacht jeder Lauschangriff bei geschickter Wahl der verwendeten Quantenzustände eine nachweisbare Zustandsveränderung auf der Leitung, was man als Quantenrauschen bezeichnen könnte. Da ein solcher Nachweis auf einem Naturgesetz beruht, kann er selbst durch heute noch gar nicht verfügbare Technologien nicht überwunden werden. Die Quantenschlüsselverteilung (engl. QKD für *quantum key distribution*) erlaubt es erstmals, durch Messung der Quantenzustände auf die Aktion des Abhörers und von ihm dabei erworbenes Wissen zu schließen und damit die Sicherheit der Kommunikation auf eine fundamentale Weise zu quantifizieren. Erste Systeme sind kommerziell erhältlich, bieten aber noch ein weites Feld für Verbesserungen in Bezug auf Reichweite, Rate, Übertragungsmedium und Standardisierung, bevor dieses Sicherheitskonzept die Praxis erobern wird.

Da Licht mit den geringsten Verlusten übertragen werden kann, haben sich die Quantenzustände des Lichtfeldes, also zum Beispiel einzelne Lichtquanten (d.h. Photonen), als das Werkzeug der Wahl herausgestellt. In glasfaserbasierten Systemen werden sichere Schlüssel bis zu Entfernungen von 400 km ausgetauscht, bis 50 km werden sehr hohe Schlüsselraten von etwa 1 Mbit/s erreicht. Freiraumsysteme können zum Beispiel für mobile Geräte, oder für kurze Verbindungen in Städten eingesetzt werden.

Über größere Entfernungen werden derzeit z.B. Netzwerke vom Battelle-Institut (USA) in Zusammenarbeit mit der schweizer Firma ID Quantique im Nordosten der USA oder in China über eine Distanz von 2000 km zwischen Peking und Shanghai aus Punkt-zu-Punkt QKD-Links und sicheren Netzwerkknoten aufgebaut und erprobt. Satellitenverbindungen ermöglichen es sogar, interkontinentale Distanzen zu überbrücken. Der im August 2016 von China gestartete Quantensatellit ist ein Beispiel für dieses Szenarium.

Ein Quantenrepeater übernimmt aus der Telekommunikation bekannte Prinzipien. Durch Aufteilung der Verbindung in einzelne Segmente kann die durch die Verluste und Rauschen in den optischen Fasern bedingte Reichweitenbegrenzung überwunden werden. Unter Verwendung von Quantenlogikgattern und gegebenenfalls Quantenspeichern an den Knoten können die einzelnen Segmente effizient verkettet werden. Das Prinzip der Punkt-zu-Punkt-Verschrankungsverteilung zum Beispiel wurde in München über 400 m mit derzeit zwei Qubits pro Minute demonstriert, über 1,3 km in Delft mit niedrigerer Rate.

Prinzipien der Quantenkommunikation können auch für eine Reihe weiterer Kommunikationsmethoden eingesetzt werden, z.B. für "Quantum Tokens", physikalisch sicheren Siegeln, für effiziente Kommunikation, oder für verteilte Berechnungen, Terminplanungen und Quanten-Authentifizierung. Für all diese Verfahren gibt es aber bisher nur proof-of-principle Experimente.

Die Sicherheit der meisten der heute benutzten asymmetrischen algorithmischen Verschlüsselungsverfahren kann zukünftig aus zwei Gründen gefährdet sein. Zum einen ist die Sicherheit dieser Verfahren nicht mathematisch bewiesen. Die Wahrscheinlichkeit für die sich daraus ergebende Gefährdung wird aber als extrem gering eingeschätzt. Zum anderen liefern diese Verfahren keine Sicherheit mehr, sobald ein Quantencomputer zur Verfügung steht. Deshalb wurde vor ca. 10 Jahren die Forschung nach neuen Algorithmen der asymmetrischen Kryptographie begonnen, die gegen bekannte Quantencomputer-Algorithmen bestehen können. Solch neue Verfahren müssen in den nächsten Jahren zur Einsatzreife gebracht werden, um langfristige Sicherheit unserer IT-Systeme zu gewährleisten, wie sie z.B. in Industrie 4.0, kritischen Infrastrukturen, autonomem Fahren oder in der Mobilkommunikation im Einsatz sind. Dies erfordert Forschung in den Bereichen Algorithmen, effiziente Implementierungen und Angriffssicherheit sowohl gegen algorithmische als auch physikalische Angriffe. Wie in der Vergangenheit wird auch in der Zukunft eine Sicherheit aufgrund von algorithmischer Komplexität nicht mehr gewährleistet sein, wenn die Leistung klassischer Rechner entsprechend gestiegen sein wird. Die Quantenschlüsselverteilung ist in Kombination mit der klassischen Kryptographie das geeignete Verfahren für die Langzeitsicherheit. Erste Schritte in Richtung Standardisierung solcher Verfahren werden beispielsweise bei ETSI in der Arbeitsgruppe ‚WG Quantum-Safe Cryptography‘ gemacht.

Ein weiterer Aspekt der Quantenkommunikation ist das Erreichen des Quantenlimits bei der Informationsübertragung. Die heutige optische Technologie ist noch einige Zehnerpotenzen von dem durch das Quantisierungslimit gegebenen minimalen Energieverbrauch entfernt. Der Übergang zum Quantenlimit wird erst mit einer neuen Generation quantenlimitierter Bauelementkonzepte möglich sein.

### 3.1.2 Forschungsbedarf, Herausforderungen und Ziele

Die Anwendungen in der Quanten-Kommunikation haben zwei Ziele. Zum einen eine sichere Quantenschlüsselverteilung zwischen zwei oder mehreren Partnern. Diese Verfahren haben bereits eine starke Nähe zur Marktreife. Wichtig ist hier das Erreichen von hohen Schlüsselraten in realistischen Umgebungen. Dazu müssen Verfahren entwickelt werden, die mit existierenden Telekommunikationsumgebungen kompatibel sind und sich in bestehende Sicherheitsarchitekturen gut einbinden lassen. Für die Überbrückung von sehr großen Entfernungen ist dafür die Entwicklung von satellitenbasierten Verfahren geeignet, d.h. sowohl die Entwicklung von geeigneten Satelliten als auch Bodenstationen.

Zum anderen zielt Quantenkommunikation darauf ab, in Netzwerken Überlagerungszustände von einem Knoten zu einem anderen zu übertragen und Quantenkorrelationen zwischen verschiedenen Orten herzustellen. Die Herausforderungen orientieren sich an den grundsätzlichen Erfordernissen aller Kommunikationsnetze: Die Quanten- und klassische Information muss gesendet, übertragen und empfangen werden, und zwar nicht nur in einfachen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen, sondern in Netzwerken. Dazu müssen zuverlässige Schnittstellen mit hoher Effizienz entwickelt werden, die Hybrid-Systeme aus technisch unterschiedlichen Komponenten miteinander verknüpfen, zum Beispiel Quantenspeicher und photonische Kommunikationskanäle.

Es wird darauf ankommen, komplexe Demonstratoren aus Einzelkomponenten aus der bisherigen Grundlagenforschung durch integrierte und miniaturisierte Komponenten zu ersetzen. Zu den Zielen einer künftigen Quantentechnologie als Basis für Anwendungen der Quantenkommunikation gehören z.B. die Entwicklung von leistungsfähigen Einzelphotonen-Quellen, von Quanten-Speichern und von verschiedenen Systemen für effizienten, sicheren Schlüsselaustausch und Kommunikation mit robusten Komponenten für unterschiedlichste Kommunikationsszenarien. In zukünftigen Netzwer-

ken kann die Quantenkommunikation nur mit eng auf die verfügbare Hardware abgestimmten Protokollen erfolgreich sein.

Um sich in der Energieeffizienz dem Quantenlimit zu nähern, müssen Attojoule-Technologien und Konzepte erforscht werden. Dies beinhaltet z.B. die Reduzierung der optisch aktiven Volumina um Zehnerpotenzen und das consequente Vermeiden elektrisch / optischer Umwandlungen.

Grundsätzlich sollen für die Kryptographie Post-Quantum-Verfahren erforscht werden, die sich kompatibel in die bestehende Infrastruktur integrieren und die effizient umsetzbar und gegen physikalische Attacken resistent sind. Post-Quantum bedeutet Immunität gegen Angriffe, die mit Hilfe eines Quantencomputers erfolgen. Zu den Post-Quantum Verfahren gehören sowohl klassische, algorithmische als auch quantentechnologische Verfahren. Für die klassischen Verfahren ist es hilfreich, mithilfe von Quantenphänomenen einzigartige Zufallszahlen sowie eindeutig dem Objekt zugeordnete kryptographische Schlüssel oder Identitäten zu erzeugen (*Physical Unclonable Functions*). Außerdem ist es wichtig, passende Verfahren zur sicheren Schlüsselverwaltung zu entwickeln.

### 3.2 Rechnen mit Quantencomputern

Bei einem Quantencomputer wird Information nicht wie in einem klassischen Computer binär mit Bits, also in den Werten von Null der Eins gespeichert, sondern mit Quantenbits, die in einer Superposition von Null und Eins vorliegen. Damit sind auf einem Quantencomputer massiv parallele Berechnungen möglich, die seine Leistungsfähigkeit mit der Zahl  $N$  der Quantenbits wie  $2^N$  exponentiell steigen lassen. Es wurden bereits viele Algorithmen ausgearbeitet, welche diese Quanten-Parallelität für bisher ungelöste Probleme nutzen.

#### 3.2.1 Stand von Forschung und Technik

Experimentelle Plattformen haben bereits die grundlegende Funktion gezeigt und erste Quantenalgorithmen wurden erfolgreich demonstriert, allerdings bisher nur mit einer vergleichsweise kleinen Zahl von weniger als 10 Quantenbits und logischen Operationen mit einer Fidelität von unter 99.9%. Es wurden in kleineren Prototypen mit gefangenen Ionen oder Atomen, aber ebenso auch in festkörperbasierten Systemen oder supraleitenden Schaltkreisen schon jetzt Rechnerarchitekturen realisiert, bei denen die Anzahl der Quantenbits prinzipiell skalierbar ist. Mit der Entdeckung topologischer Materialien bieten sich auch innovative Konzepte für die Entwicklung neuartiger Hardware für festkörperbasiertes Quantum-Computing an. Dabei wird erwartet, dass der Quantenzustand dieser topologischen Qubits durch die zweidimensionale Topologie geschützt wird. Schon ein Quantencomputer, in dem Information in 50 Quantenbits gespeichert und verarbeitet wird, würde bei geeigneten Rechenaufgaben jeden klassischen Supercomputer in den Schatten stellen. Damit stellt das Quantum-Computing unter allen Quanten-Technologien die vielleicht weitreichendste Innovation dar. Es ist dabei aber zugleich technisch und wissenschaftlich die herausforderndste und komplexeste Aufgabe, quantenlogische Operationen in ausreichend hoher Fidelität auf einem skalierbaren System von letztendlich hunderten von Quantenbits durchzuführen um fundamentale mathematische Probleme oder sicherheitsrelevante Algorithmen durchführen zu können. Diese Herausforderungen stimulieren zusätzlich Fortschritte bei allen anderen Quanten-Technologien: So kann jede digitale Quantensimulation eines komplexen Problems auf einem Quantencomputer durchgeführt werden. Quantenkommunikationsstrecken mit Repeatern benötigen eine Vielzahl kleiner Quantencomputer an den Knoten, um lokale Bell-Messungen durchzuführen und verarbeiten zu können oder auch Protokolle zur Verschränkungsdestillation ablaufen zu lassen.

### 3.2.2 Herausforderungen und Ziele

Aus den weit fortgeschrittenen Arbeiten an experimentellen Plattformen und Prototypen lassen sich schon jetzt die zentralen wissenschaftlich-technologischen Herausforderungen an einen Quantengatter-basierten Quantenrechner absehen:

- *Die Fidelität quantenlogischer Operationen soll besser sein als 0,99999, um damit die Voraussetzung für Quantenfehlerkorrektur-Algorithmen zu geben. Die Kohärenzzeit von Quantenbits wird weiter verbessert, ebenso die Geschwindigkeit der logischen Operationen.*
- *Initialisierung, Auslese-Qualität und Auslesegeschwindigkeit für Quantenbits soll weiter verbessert werden, so dass ein Messergebnis die Abfolge von Operationen kontrollieren kann.*
- *Mit diesen Verbesserungen sollen Quantenfehlerkorrektur-Algorithmen realisiert werden.*
- *Skalierbare Architekturen werden implementiert und weiter optimiert, um eine große Zahl von Quantenbits zu ermöglichen. Hierbei ist die Herstellung entsprechender Chips und Prototypen ebenso nötig wie die klassische Kontrolle der Operationen im Quanten-Computer mittels optimierten Kontrollspannungen so wie Laser-, Radiofrequenz- oder Mikrowellen-Pulsen. Schließlich arbeitet optimierte klassische Hardware in einem Quantencomputer eng mit der Quantum-Software für technologische, bzw. mathematisch-wissenschaftliche Anwendungsprobleme zusammen.*

Um die Herausforderungen eines Quantum-Computers zu bearbeiten, ist in Zukunft eine enge Zusammenarbeit zwischen experimentell und theoretisch arbeitenden Physikern mit ingenieurwissenschaftlich und industriell ausgerichteten Arbeitsgruppen nötig.

Globale IT-Unternehmen haben in den letzten zehn Jahren ein verstärktes Interesse am Rechnen mit Quantencomputern gezeigt. Dieses große technologische Interesse ist motiviert aus dem offensichtlich absehbaren Ende des Mooreschen Gesetzes, nachdem deutlich wurde, dass jenseits der 7nm-Technologie eine weitere Verbesserung konventioneller Ansätze stark begrenzt sein wird. Die Fortschritte im Design von Quantencomputern, fehlertolerante bzw. korrigierende Algorithmen und neue Fertigungstechnologien von Quantenprozessoren haben diesen wissenschaftlichen Ansatz in ein realistisches, technologisches Ziel verwandelt, klassische Rechner auf einem Zeithorizont von zehn bis zwanzig Jahren bei speziellen Anwendungen weit zu übertreffen.

Führende Unternehmen wie Intel, HRL Laboratories und NTT unterstützen beispielsweise die Implementierung von Spin-Quantenbits in Halbleitern; Google, IBM, D-Wave und Intel investieren in Architekturen mit supraleitenden Quantenbits, beide mit dem Gate-basierten Ansatz, und, im Falle von D-Wave, mit dem Ansatz der adiabatischen Optimierung. Microsoft setzt auf topologische Quantenbits; Lockheed Martin, IONQ Massachusetts, SANDIA Albuquerque, INFINEON und andere unterstützen Forschung bzw. arbeiten mit Quantenbits in gefangenen Ionen und deren Schnittstelle zu Photonen. Aufgrund der weltführenden Forschung in Quantum-Computing in Europa haben viele IT-Unternehmen akademische Partner in Europa für ihre F & E-Anstrengungen gewählt.

Für den verstärkten Ausbau von Kerntechnologien zum Quantum-Computing in Europa werden in einem zehnjährigen Zeitraum Synergien zwischen den industriellen und akademischen Partnern benötigt, sowie die Beteiligung von Instituten wie z.B. der Fraunhofer-Gesellschaft oder der Helmholtz-Gemeinschaft in multidisziplinären Konsortien. Solche Anstrengungen auf dem Bereich der Hardware sollten durch die Entwicklung von Quantum-Software flankiert sein, um Quantenalgorithmen für Anwendungsprobleme von Interesse zu optimieren. Europa ist führend in der Entwicklung von

Software für klassische High-Performance-Computing-Anwendungen und damit gut aufgestellt, um sich auch im neuen Gebiet des Quantum-Software Engineering zu etablieren.

### 3.3 Quanten-Sensorik

Das präzise Erfassen physikalischer Größen ist die Grundlage sämtlicher Naturwissenschaften und notwendige Voraussetzung sowie Triebfeder nahezu aller technischen Weiterentwicklungen. Zwar werden gegenwärtig klassische Sensorprinzipien verfeinert, miniaturisiert und kombiniert, allerdings ist abzusehen, dass damit keine entscheidende Steigerung der bisher erreichten Schlüsselparameter wie Empfindlichkeit sowie Spezifität erreicht werden kann. Quantenphänomene wie Kohärenz, Superposition und Verschränkung hingegen können dazu genutzt werden, Größen wie Druck, Temperatur, Position, Zeit und Bewegung bzw. Beschleunigung, Lage, Gravitation oder elektrische und magnetische Felder mit bisher unerreichter Genauigkeit nachzuweisen. Quantensensoren greifen dabei auf verschiedene Quantensysteme zurück, die jeweils spezifische Stärken aufweisen.

#### 3.3.1 Stand von Forschung und Technik

Atomare Quantensensoren haben das Potenzial, eine Schlüsseltechnologie nicht nur für optische Uhren der nächsten Generation, sondern auch zur genauen Bestimmung der Beschleunigung und Rotation eines Körpers zu werden. Frequenzmessungen an optischen Uhren sind mit inzwischen 18 signifikanten Stellen die genauesten Messungen in allen Bereichen von Technik und Forschung. Während bei einer Uhr die Interferenz interner Zustände der Atome den Takt angibt, detektieren Beschleunigungssensoren die Interferenz von atomaren Materiewellen, die eine unterschiedliche Beschleunigung z.B. im Schwerfeld der Erde erfahren haben. Inzwischen übertreffen atomare Quantensensoren ihre klassischen Pendant bereits in fast allen Leistungsindikatoren. Zukünftig werden Verbesserungen der Leistungsindikatoren um mindestens zwei weitere Größenordnungen erwartet. Damit lassen sich vielfältige Anwen-

dungen erschließen, die von der Erdbeobachtung und Erdexploration über die Satellitennavigation und Synchronisierung großer Netzwerke bis hin zu Fragestellungen in der Grundlagenforschung, wie z.B. nach Physik jenseits des Standardmodells reichen.

Festkörper-Quantensensoren hingegen erreichen in der Kombination von räumlicher Auflösung und Empfindlichkeit herausragende Eigenschaften. Verschiedene Sensorprinzipien lassen sich bei dieser Form von Quantensensoren miteinander kombinieren und erlauben im Prinzip sehr kompakte Bauformen bis hin zum vollständigen Device. Spin Quantensensoren z.B. weisen kleine Mengen von magnetischen Momenten bis hin zu einzelnen Elektronen- bzw. Kernspins unter Umgebungstemperatur und sogar physiologischen Bedingungen nach. Sie detektieren unter anderem magnetische und elektrische Felder bzw. Druck und Temperatur mit einer räumlichen Auflösung von wenigen Nanometern. Durch die Kombination verschiedener Materialien bzw. Bauformen (hybride Quantensensoren) eignen sich Festkörper Quantensensoren zum empfindlichen Nachweis von Massen, Lage bzw. Rotation. Multiqubit Quantensensoren verbessern die Empfindlichkeit und spektrale Auflösung sowie die Bandbreite von Spin-Quantensensoren mit Hilfe von Quantenalgorithmen. Halbleitende und supraleitende Festkörper-Quantensysteme spielen im Bereich der elektrischen Quantenmetrologie eine grundlegende Rolle. Einzel-Elektronenpumpen basierend auf Halbleiter-Quantenpunkten sollen zukünftig als Quanten-Stromstandards mit stark nichtklassischen Stromeigenschaften, sowie als Einzel-Photonenquellen genutzt werden. In der optischen Quantenmetrologie werden nichtklassische Eigenschaften von Licht eingesetzt, um die Auflösung von Messungen zu erhöhen bzw. überhaupt erst zu ermöglichen. Durch sogenanntes „Quetschen“ von Licht können gezielt Rauschbeiträge z.B. in Gravitationswellendetektoren reduziert oder in bildgebenden Verfahren die Auflösung erhöht werden. Verschränkte Photonen unterschiedlicher Wellenlänge ermöglichen sogenannte „Quanten-Abbildungen“, bei denen Bilder von Objekten in bislang schwer erreichbaren spektralen Bereichen aufgenommen werden können.

### 3.3.2 Herausforderungen und Ziele

In der Grundlagenforschung sind Quantensensoren aus einer Reihe verschiedener physikalischer Plattformen entwickelt worden. Die einzelnen Ansätze ergänzen sich und stehen vor jeweils systemspezifischen Herausforderungen. Im Folgenden werden einige plattformübergreifende zentrale Herausforderungen angeführt. Häufig verhindern beispielsweise eine aufwändige Zustandspräparation sowie rasche Dephasierung einen Empfindlichkeitsvorteil durch hochkorrelierte Quantensensorzustände. Hier kann die Entwicklung von spezifischen Quantenalgorithmien sowie die Erforschung von robusten Quantenzuständen in geeigneten physikalischen Systemen eine Schlüsselrolle für die Verbesserung der Empfindlichkeit von Quantensensoren spielen. Zudem sind bereits in der Grundlagenforschung entwickelte Sensorprinzipien bisher nur vereinzelt in die Praxis überführt worden. Dies liegt unter anderem daran, dass bisher genutzte Sensorprinzipien nicht ausreichend robust sind und dass die notwendige Integration in Sensorsysteme die Neuentwicklung einer Reihe von Schlüsselkomponenten auch in der Sensorperipherie erfordert (Kapitel 4, Methodische Querschnittsplattformen). Im Einzelnen identifizieren wir die folgenden Herausforderungen und Ziele:

- *Untersuchung neuer physikalischer Systeme und Anwendungsgebiete für die Quantensensorik*
- *Entwicklung von Sensoren und Sensorprinzipien, die durch Mehrteilchen-Effekte bis hin zu verschränkten Sensornetzwerken einen effektiven Empfindlichkeits- bzw. Selektivitätsgewinn erzielen*
- *Entwicklung von Quanten-Algorithmen zur Verbesserung von Sensoren*
- *Weiterentwicklung von aktuellen Laborsystemen zu Demonstratoren bzw. Prototypen durch Miniaturisierung und Integration der Sensorperipherie*

Quanten-Sensorische Systeme erfordern neben dem Erfassen der physikalischen beziehungsweise chemischen Eigenschaften auch eine Umwandlung in verarbeitbare d.h. elektrische oder photonische Signale. Insbesondere bei der Nutzung von Quanteneffekten zur Messerfassung sind dem Detektor nachgelagerte ‚Transducer‘ erforderlich, die aus dem detektierten Quantenzustand ein Messsignal erzeugen. Dies kann in atomaren und molekularen Sensoren über die Kopplung an wohlkontrollierbare Quantensysteme erreicht werden. In Festkörpersystemen muss die Materialentwicklung für sensorische Elemente dabei die Signalumwandlung und Signalweiterleitung im sensorischen System berücksichtigen. Dabei gilt es, das Detektorelement in bestehende Mikro- und Nanotechnologien anzukoppeln bzw. zu integrieren.

### 3.4 Quanten-Simulation

Die Idee eines Quantensimulators geht auf Richard Feynman zurück, der als erster vorschlug, dass wechselwirkende Quantensysteme mittels anderer hochkontrollierter Quantensysteme effizient simuliert werden können. Dies ist insbesondere auch in solchen Fällen möglich, in denen Simulationen auf klassischen Rechnerarchitekturen ineffizient und damit weitgehend undurchführbar sind.

Im Allgemeinen erfordert die Simulation von Quantensystemen exponentiell große Rechnerressourcen, da die Dimension des zugrundeliegenden Hilbert-Raums exponentiell mit der Größe des zu simulierenden Systems skaliert. Eine solche Skalierung kann in bestimmten Fällen durch eine geschickte Darstellung der Quantenzustände umgangen werden. Sogenannte Tensornetzwerk-Methoden, wie z.B. die Dichtematrix Renormierungsgruppe (DMRG) oder auch Quanten-Monte-Carlo-Methoden erlauben es so, in bestimmten Situationen Grundzustandseigenschaften von Vielteilchen-Quantensystemen gut zu bestimmen. Allerdings können solche klassischen Simulationsmethoden nur auf eine begrenzte Zahl von Problemen angewandt werden und stellen

keinen allgemeinen Lösungsweg dar. Mit Hilfe von Quantensimulatoren besteht die Hoffnung, solche Begrenzungen zu überwinden, um so wichtige Probleme der Physik und der Quantenchemie zu lösen, und sogar Simulationen auf weitere Wissenschaftsfelder über die Physik hinaus auszudehnen. Nachdem im Folgenden zunächst die verschiedenen Ansätze eines Quantensimulators diskutiert werden, sollen einige wichtige Beispiele vorgestellt werden, die mit Hilfe eines Quantensimulators gelöst werden könnten.

### 3.4.1 Stand von Forschung und Technik

Der Begriff eines Quantensimulators bezieht sich auf eng verwandte Konzepte von neuen physikalischen Rechnerarchitekturen, deren Ziel die Simulation von komplexen Quanten-Vielteilchensystemen mittels hochkontrollierter anderer Quantensysteme ist. Man unterscheidet dabei zwischen:

- *statischen Quantensimulatoren, die die statischen Eigenschaften von wechselwirkenden Quantenvielteilchensystemen untersuchen, wie z.B. deren Grundzustände, und*
- *dynamischen Quantensimulatoren, die die Eigenschaften von Quantensystemen untersuchen, die sich z.B. weit weg vom Gleichgewicht befinden und eine ausgeprägte und komplexe Zeitentwicklung aufweisen.*

Quantensimulationen können dabei auf verschiedene Art und Weise durchgeführt werden.

- *Digitale Quantensimulatoren basieren auf diskreten Quantenschaltkreisen, die auf einem Quantencomputer – prinzipiell auch fehlertolerant – implementiert werden können.*
- *Analoge Quantensimulatoren sind Simulatoren, die z.B. die Zeitentwicklung eines wechselwirkenden Quanten-Vielteilchensystems unter wohlkontrollierten Bedingungen voraussagen können. Das Potential solcher analogen Quantensimulatoren ist besonders in naher Zukunft sehr groß, da hier vielversprechend große*

*Systeme bereits mit gegenwärtigen Technologien realisiert werden konnten, die selbst die Rechenleistung von modernen Supercomputern übertreffen.*

Quantensimulatoren eröffnen einen neuen Einblick in komplexe Vielteilchen-Quantenphänomene, mit weitreichenden Anwendungen von der Festkörperphysik über die Statistische Physik, die Hochenergiephysik, dem Energietransfer in Molekülen oder in biologischen Systemen bis hin zur Gravitationsphysik oder kosmologischen Fragestellungen. Durch die fundamental neuen experimentellen Ansätze zur Untersuchung dieser Vielteilchensysteme ergeben sich radikal neue Möglichkeiten zum Studium dieser Wissenschaftsfelder. Theoretische Arbeiten beschäftigen sich einerseits damit, wie sich die physikalischen Plattformen zur Simulation physikalischer Phänomene einsetzen lassen. Andererseits sind konzeptionelle Fragen zu klären, wie etwa die Richtigkeit der Simulation zertifiziert werden kann, ohne das System klassisch effizient simulieren zu können.

In den letzten Jahren haben sich mehrere physikalische Plattformen als vielversprechend zur Realisierung eines Quantensimulators herausgestellt. Dabei bieten die verschiedenen Systeme verschiedene Vor- und Nachteile und unterscheiden sich u.a. auch in der Größe der simulierbaren Quantensysteme und ihrer Kontrolle. Zu den auch in Deutschland oft hoch erfolgreich vertretenen Systemen zählen dabei die folgenden Plattformen:

- *Ultrakalte atomare oder molekulare Quantengase, insbesondere Systeme aus kalten Atomen in optischen Gittern oder kontinuierliche Systeme in optischen Fallen oder sogenannte Atomchips*
- *Ultrakalte gefangene Ionen*
- *Polaritonen- und Photonen-Kondensate z.B. in Halbleiter-Nanostrukturen*
- *Circuit-Cavity-QED-Systeme aus supraleitenden Elementen und Resonatoren im Mikrowellenbereich*

- Quantendot-Netzwerke
- Josephson-Junction-Netzwerke
- Photonische Plattformen aus diskreten optischen Elementen oder auch photonischen Gittern und Kristallen

### 3.4.2 Herausforderungen und Ziele

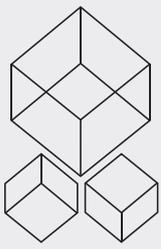
Nahezu jedes Quantenproblem, für das keine hinreichende analytische Lösung existiert oder das nicht mit Hilfe eines klassischen Rechners effizient berechnet werden kann, ist ein möglicher Kandidat für eine Quantensimulation. Hierzu gehören z.B.

- Grundzustände von Quantenvielteilchensystemen, insbesondere von frustrierten Spinsystemen oder Quantensystemen, die nicht mit Quanten-Monte-Carlo-Methoden simuliert werden können. Paradigmatische Beispiele in diesem Bereich sind Heisenberg Antiferromagnete auf einem Kagomé Gitter oder sogenannte anisotrope Dreiecksgitter.
- Fermionische Gittermodelle, wie das paradigmatische Hubbard-Modell, das aufgrund des „Vorzeichenproblems“ nicht mit wertungsfreien Quanten-Monte-Carlo-Methoden analysiert werden kann. Das Hubbard-Modell gilt als ein vielversprechendes Modell, welches die essentiellen Bestandteile der Hochtemperatur-Supraleitung enthalten könnte. Das Phasendiagramm selbst dieses einfachen Modells wird heute allerdings immer noch kontrovers diskutiert.
- Eine ähnliche Situation ergibt sich u.a. in der Quantenchromodynamik bei hohen Dichten und Temperaturen, wie z.B. dem Quark-Gluon Plasma, das auch dieses Problem besonders interessant für Quantensimulationen erscheinen lässt.
- Bosonische und fermionische Systeme, die künstlichen Magnetfeldern unter extremsten Bedingungen ausgesetzt sind, wie sie in keinem realen Magneten heute erzeugt werden können. Hier bietet sich das Potenzial ganz neue, bisher noch nicht realisierte Materiezustände zu entdecken.
- Boson Sampling bezeichnet ein Problem, bei dem einzelne Photonen in  $n$  Eingänge eines linearen optischen Netzwerks geschickt werden, das  $m$  Ein- und  $m$  Ausgänge hat,  $m > n$ . Für die Berechnung der dafür erforderlichen Permanenten ist kein klassischer, effizienter Algorithmus bekannt.
- Grundlegende ungeordnete Quantensysteme können bereits in Molekularfeldnäherung für klassische Simulationen unzugänglich sein. Atomare Systeme, Ionen und photonische Plattformen bieten hier Möglichkeiten, neue grundlegende Effekte von Unordnung und Störstellen auf Materiephasen und -eigenschaften zu verstehen.
- Neue theoretische Ansätze weisen auch auf das Potenzial von Quantensimulationen für das Verständnis des Energietransfers in biologischen Systemen hin.
- Selbst Fragestellungen, die von Gravitations- und Astrophysik inspiriert sind, können von effizienten Quantensimulationen profitieren, z.B. auf der Basis von ultrakalten Atomen und Molekülen oder Ionen.
- Klassische Optimierungsprobleme können als Grundzustände von Spin-Gläsern mit einstellbaren Wechselwirkungen dargestellt werden. Solche Grundzustände können im Rahmen von Quantensimulationen ermittelt werden („Adiabatic QC“).
- Probleme des Nichtgleichgewichts sind auch Kandidaten für geeignete Probleme für Quantensimulatoren.

Ein Schlüsselziel ist die Entwicklung von Quantensimulatoren in verschiedenen Plattformen mit einer ausreichend hohen Kontrollierbarkeit und Komplexität, um relevante Quantensimulationen durchführen zu können. Dazu gehören z.B. kontrollierbare Gittersysteme mit flexi-

blen und programmierbaren Kopplungsstärken zwischen Gitterplätzen und die Realisierung neuer Detektions- und Kontrollmöglichkeiten. Dabei sollten Detektionsgüten  $>90\%$  erreicht werden, bei gleichzeitig höchstmöglicher Einzelplatzkontrollierbarkeit. Gleichzeitig sollen kontrollierbare Wechselwirkungen verschiedener Reichweiten implementiert werden und eine möglichst hohe Anzahl von Qubits ( $>20$  Qubits, idealerweise  $>100$  Qubits) zur Verfügung stehen, um komplexere Quantensimulationen durchführen zu können.

Eine große Herausforderung ist es herauszufinden, wie verlässlich Ergebnisse einer Quantensimulation gerade in den Bereichen sind, die nicht mehr klassisch simuliert werden können. Hierzu müssen theoretische Entwicklungen gefördert werden, die den Experimenten Möglichkeiten zur Verifizierung und schließlich Zertifizierung geben. Es ist auch die Entwicklung von klassischen Simulationsverfahren nötig, etwa auf Basis von Tensornetzwerken, um Quantensimulationen in bestimmten Regime unter bestimmten Spezifikationen zu prüfen.



# QUTEGA

## 4. Methodische Querschnitts- plattformen

Im vorhergehenden Kapitel wurden die vier Säulen diskutiert, in die sich die anwendungsorientierten Themen aufteilen lassen. Trotz aller Vielfalt und Verschiedenheit, wird innerhalb der Säulen immer wieder auf ähnliche Methoden zurückgegriffen. Von fundamentaler Bedeutung ist dabei zunächst die Theorie, die die Grundlage aller experimenteller Ansätze und aller Anwendungen bildet. In experimenteller Hinsicht werden für unterschiedliche Anwendungen immer wieder ähnliche Hardware-Systeme verwendet, die auf Festkörpern, Licht oder Atomen und Molekülen basieren. Für die technische Durchführung sind zahlreiche Schlüsseltechnologien notwendig, die im Folgenden ebenfalls erläutert werden.

### 4.1 Übergreifende theoretische Modelle und Konzepte

Jede der vier anwendungsorientierten Themen-Säulen (Quanten-Kommunikation, Quanten-Computing, Quanten-Sensorik und Quanten-Simulation) ruht auf dem Fundament der Theorie. Dieses Fundament besteht zum einen aus gemeinsamen methodischen Konzepten, die somit eine Querverbindung zwischen den vier Säulen bereitstellen, und zum anderen aus spezifischen fundamentalen Fragestellungen, die für die vier Säulen jeweils unterschiedlich und individuell sind.

Wichtige gemeinsame methodische Konzepte sind Quanteninformationstheorie, Quantenressourcentheorien, Verschränkungstheorie, Quantenfehler-Analyse und -Korrektur, Kontrolltheorie sowie Komplexitätstheorie. Diese Konzepte haben die folgenden Fragestellungen und Zielsetzungen:

- *Quanteninformationstheorie bildet die Grundlage zum Verständnis der Unterschiede zwischen klassischer Informationsverarbeitung und Quanteninformationsverarbeitung. Die Entwicklung von geeigneten Güte-Maßen für informationstheoretische Größen wie etwa Entropien ist ebenso ein Ziel wie die Berechnung von Kanalkapazitäten und die Klassifizierung von Quantenkorrelationen.*
- *Quanten-Ressourcentheorien beschreiben nutzbare Eigenschaften von Quantenzuständen nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ. Es gibt bereits einige Quantenressourcentheorien, u.a. zu Verschränkung, Kohärenz und Reinheit, jedoch ist deren Weiterentwicklung und die Suche nach weiteren Ressourcen von großer Bedeutung, insbesondere im Hinblick auch auf die experimentelle Umsetzung.*
- *Die Verschränkungstheorie hat bereits viel zum Verständnis der grundlegenden Vorteile vom Rechnen mit Quanten beigetragen. Jedoch gibt es immer noch wichtige ungelöste Probleme, wie z.B. die Bedeutung von Verschränkung für Quantenalgorithmen mit gemischten Zuständen, oder die Charakterisierung und Dynamik von Vielteilchenverschränkung in komplexen Systemen.*
- *In der Quantenfehler-Analyse und -Korrektur werden die unvermeidbaren experimentellen Gegebenheiten, wie Rauschen und Verluste, charakterisiert und es werden Verfahren zur Korrektur dieser Quantenfehler entwickelt sowie auf ihre Performance hin untersucht. Zur Kodierung werden dabei gewisse Quantenzustände verwendet, die entweder immun gegen Fehler sind oder deren Fehler nachträglich entfernt werden können.*
- *In der Kontrolltheorie verfolgt man das essentielle Ziel, die grundsätzlich fragilen Quantenzustände zum einen über möglichst lange Zeit hinweg stabil zu halten (also die unerwünschte Dekohärenz zu vermeiden), und zum anderen genau die erwünschten Operationen mit großer Präzision durchzuführen, d.h. Quantenprozesse gezielt zu beeinflussen.*
- *Schließlich ist die Komplexitätstheorie zu nennen, in der man beschreibt, wie groß die Ressourcen (an Zeit, Bauelementen, Rechenschritten etc.) sind, die man zur Lösung eines vorgegebenen Problems benötigt. Je nach verwendeter Art der Informationsverarbeitung (klassisch versus quantenmechanisch) kann die Komplexität unterschiedlich sein; welche Probleme mittels Quanteninformationsverarbeitung schneller lösbar sind, ist noch längst nicht vollständig bekannt.*

Die spezifischen Fragestellungen und Ziele der Theorie innerhalb der vier Säulen sind im Folgenden skizziert; hier tauchen auch etliche der oben beschriebenen Themen wieder auf.

#### 4.1.1 Quanten-Kommunikation

Mithilfe von Quantensystemen können private Daten prinzipiell (aufgrund der Gesetze der Quantenphysik) abhörsicher übertragen werden. Jedoch führt unvermeidbares technisches Zusatzrauschen bei der Implementierung dazu, dass keine perfekte Sicherheit erreicht wird. Daher sind, im Zusammenhang mit konkreten Implementierungen, Sicherheitsanalysen auf Basis exakter metrologischer Charakterisierung notwendig, die quantitative Aussagen über erreichbare sichere Schlüsselraten in der gegebenen experimentellen Umsetzung machen. Die Sicherheit soll hierbei ohne Annahmen über die verwendeten Apparate untersucht werden – dies sind sogenannte Apparate-unabhängige Szenarien. Um Quanten-Kommunikation über lange Strecken zu ermöglichen, sind Satellitenverbindungen oder Quanten-Repeater notwendig. Eine notwendige Ressource im Zusammenhang mit Quanten-Kommunikation sind echte

und einzigartige Zufallszahlen, deren effiziente Erzeugung mithilfe von quantenmechanischen Methoden ebenfalls ein wichtiges Ziel darstellt.

#### 4.1.2 Quanten-Computing und -Algorithmen

Es ist bereits seit den 1990er Jahren bekannt, dass ein Quanten-Computer mit einem geeigneten Algorithmus manche Aufgaben sehr viel schneller lösen kann als dies ein klassischer Computer könnte. Jedoch ist bis heute nicht vollständig verstanden, welche der Quanten-Ressourcen Verschränkung, verallgemeinerte Quantenkorrelationen, oder Kohärenz für diesen Speed-Up verantwortlich ist. Dies ist eine auch in Bezug auf experimentelle Umsetzung wichtige theoretische Fragestellung. Ferner können verschiedene experimentelle Realisierungen von Quantencomputern mit Methoden der Quanteninformationstheorie im Hinblick auf ihre Gesamt-Performance verglichen werden: Welche Fehlermodelle bzw. verrauschten Kanäle treten auf, welche Quantenfehlerkorrekturverfahren sind anwendbar, und welche Quantenkontrollverfahren führen zu einer stabilen Quantenrechnung?

#### 4.1.3 Quanten-Sensorik

Die Quantenphysik bietet die Möglichkeit, hochempfindliche Sensoren zu bauen. Hier werden die Prinzipien wie Superpositionen, Verschränkung und Squeezing genutzt, um eine Präzision in der Bestimmung von physikalischen Parametern zu erreichen, die klassisch grundsätzlich nicht möglich ist. Ein Beispiel ist die Phasenbestimmung in einem Interferometer. Wichtige theoretische Fragestellungen betreffen die algorithmische Verlängerung von Kohärenzzeiten und die Identifizierung von optimalen Quanten-Abfrageprotokollen und Zuständen, die bei anwendungsspezifischem Rauschen und Imperfektionen einen Gewinn gegenüber nichtverschränkten Zuständen versprechen. Relevante Anwendungen in Form der präzisen Bestimmung von Naturkonstanten (wie beispielsweise der Erdbeschleunigung), von Magnetfeldern, oder von Zeit und Raum (z.B. im Zusammenhang mit Gravitationswellendetektoren) werden angestrebt.

#### 4.1.4 Quanten-Simulation

Die Berechnung der Eigenschaften komplexer physikalischer Systeme ist ein langgehegter Traum von Physikern, Chemikern und Ingenieuren. Jedoch wächst die Komplexität der Rechnungen exponentiell mit der Größe des zu untersuchenden Parameterraums, so dass man schon bald an die Berechenbarkeitsgrenze stößt. Auch falls man keinen Quanten-Computer zur Hand hat, erlaubt die Quantenmechanik eine Lösung in Form von Quanten-Simulationen: Anstelle des zu untersuchenden Systems wird ein kontrollierbares System verwendet, dessen Grundgleichungen formal identisch sind, auch wenn es aus ganz anderen physikalischen Bausteinen besteht. Die Eigenschaften dieses Simulators können nun gezielt untersucht werden – ein prominentes Beispiel sind Atome in einem optischen Gitter, die sich formal analog zu Elektronen in Kristallgittern verhalten und so Auskunft über Materialeigenschaften von Festkörpern geben können.

## 4.2 Hardware-Systeme

Um die aus der Theorie gewonnenen Ideen und Konzepte für Quantentechnologien praktisch umzusetzen, benötigen wir entsprechende Hardware-Systeme. Diese können sehr unterschiedlicher Natur sein und auf Festkörpern, Licht oder Atomen und Molekülen basieren. Für die Verwendung in der Quanten-Technologie ist es entscheidend, dass diese Träger der Quanteninformation diese Information möglichst lange behalten und wie viele logische Operationen in dieser Zeit durchgeführt werden können. Dazu muss jedwede unerwünschte Wechselwirkung mit der Umgebung klein genug sein. Freie Atome im Vakuum, neutral oder elektrisch geladen und in einer Falle gefangen sind selbst bei Zimmertemperatur gute Kandidaten. Photonen eignen sich besonders, wenn ihre Energie weit über der thermischen Energie liegt. Bei Zimmertemperatur erfüllen sichtbare Photonen diese Bedingung. Ein wesentlicher Unterschied ist, dass sich freie Photonen mit Lichtgeschwindigkeit bewegen, dies ist je nach Anwendung ein Vor- oder ein Nach-

teil. Aus Sicht einer kommerziellen Anwendung wäre sicher eine hoch-integrierte und kompakte Implementierung von Vorteil. Das spricht für eine der möglichen Realisierungen in einem Festkörper. Dort ist dann der Aufwand für die Entkopplung von der Umgebung höher, zum Beispiel durch Abkühlung auf kryogenische Temperaturen oder durch Herausätzen von freistehenden Nanostrukturen. Die Herausforderungen liegen in ganz anderen Bereichen und die für bestimmte quantentechnologische Aufgaben jeweils besten Lösungen erfordern noch erheblichen Forschungsaufwand. Im Folgenden werden die Möglichkeiten, die diese Systeme bieten, näher diskutiert und auf für die Zukunft notwendigen Entwicklungen hingewiesen.

#### 4.2.1 Festkörperbasierte Systeme

Das Interesse an festkörperbasierten Hardware-Plattformen ist im vergangenen Jahrzehnt aus mehreren Gründen stark gestiegen:

- *Es handelt sich überwiegend um skalierbare Architekturen, die mit etablierten Techniken mit großer Designflexibilität analog zu klassischen integrierten Schaltkreisen realisiert werden können.*
- *Der Bereich der starken Kopplung kann erreicht werden.*
- *Die Kohärenzzeiten können durch Materialoptimierung, Wahl des Arbeitspunkts und Design der Umgebung optimiert werden.*
- *Es können auf einem Chip integrierte photonische Systeme sowohl im sichtbaren als auch im Mikrowellenbereich realisiert werden.*

Insgesamt ist das Zukunftspotenzial von festkörperbasierten Systemen sehr hoch und die Weiterentwicklung der zugrundeliegenden Herstellungstechnologien ist im Hinblick auf die Realisierung komplexerer Systeme unverzichtbar. Wir werden im Folgenden insbesondere auf supraleitende und nanoskopische Systeme eingehen.

#### 4.2.1.1 Supraleitende Systeme

Supraleitende Materialien besitzen hinsichtlich der Realisierung von Quantenschaltkreisen eine Vielzahl spezifischer Vorteile. Sie verlieren bei tiefen Temperaturen den elektrischen Widerstand und der supraleitende Grundzustand ist durch eine Energielücke vom Kontinuum der elektronischen Anregungen getrennt. Der supraleitende Zustand ist ferner per se ein makroskopischer Quantenzustand. Die damit verbundenen Quantenphänomene wie die Fluxoid-Quantisierung und der Josephson-Effekt lassen sich gezielt ausnutzen, um maßgeschneiderte, lineare und nichtlineare Quantenschaltkreise zu entwerfen und mit Hilfe von etablierter Dünnschichttechnologie und Nanostrukturierungsverfahren kontrolliert herzustellen. Supraleitende Systeme stellen deshalb sehr flexible und leicht skalierbare Systeme dar. Ihre nach wie vor notwendige Kühlung stellt durch die Entwicklung leistungsfähiger und einfach zu bedienender „Knopfdruck“-Kühlsysteme kaum mehr einen Nachteil dar.

Aufgrund ihrer breit gefächerten Vorteile stellen supraleitende Systeme heute eine der erfolgreichsten Materialplattformen für Quantentechnologien dar. Seit der ersten Implementierung eines supraleitenden Qubits durch NEC im Jahr 1999 hat sich die supraleitende Quantentechnologie rasend schnell weiterentwickelt. So konnte z.B. die Kohärenzzeit von supraleitenden Qubits um fast 6 Größenordnungen von wenigen Nanosekunden auf heute fast eine Millisekunde verbessert werden. Die Komplexität supraleitender Quantenschaltkreise hat sich von Einzel-Qubit-Demonstratoren zu integrierten Multi-Qubit-Schaltkreisen weiterentwickelt, mit denen vor kurzem Quantenfehlerkorrektur implementiert werden konnte. Dieser unglaubliche Fortschritt wurde durch enorme weltweite Forschungsanstrengungen ermöglicht, wobei die supraleitende Quantentechnologie vor allem in den USA im Rahmen mehrerer staatlicher und privater \$10 Mio.-Programme stark gefördert wurde. Mittlerweile haben auch Firmen wie Google und IBM damit begonnen, in die supraleitende Quantentechnologie zu investieren.

Die sich abzeichnenden Anwendungsgebiete für supraleitende Quantenschaltkreise sind breit gefächert und reichen von skalierbaren universellen Quantencomputern, Quantensimulatoren, quantenlimitierten Verstärkern, Sensoren und Einzelphotonendetektoren bis hin zum Bereich der Quantenmetrologie und den Quanten-Metamaterialien.

Kleine digitale Quantenprozessoren mit bis zu 9 Qubits wurden bis 2015 bereits realisiert und eine Weiterentwicklung auf integrierte Quantenschaltkreise mit bis zu 100 Qubits ist in den nächsten 3-4 Jahren zu erwarten. Bereits bei diesem Komplexitätsgrad kann ein universeller Quantencomputer die Leistungsfähigkeit von klassischen Computer bei einigen Aufgaben übertreffen. Eine vielversprechende Anwendungsnische von supraleitenden Quantenschaltkreisen werden analoge Quantensimulatoren sein.

Die Kombination von supraleitenden Qubits mit supraleitenden Resonatoren bildet eine leistungsfähige Plattform für die Realisierung von Einzelphotonenquellen und hochempfindlichen Einzelphotonendetektoren für den Mikrowellenbereich (Kapitel 4.2.2). Die Anwendungsbreite solcher Systeme im Bereich der Sensorik wird zurzeit ständig erweitert, indem elektronische, mechanische, magnetische und optische Freiheitsgrade in hybriden Quantensystemen gekoppelt werden. Ein wichtiges Anwendungsgebiet für solche hybriden Systeme stellen z.B. effektive Frequenzumsetzer dar. Außerdem können mit supraleitenden Materialien hocheffiziente, integrierte Einzelphotonendetektoren für den optischen Bereich realisiert werden.

Mit supraleitenden Quantenschaltkreisen können nichtklassische Mikrowellenzustände der kontinuierlichen Variablen realisiert werden, welche für die Kommunikation zwischen supraleitenden Quantenprozessoren wichtig sind. Diese nichtklassischen Zustände lassen sich auch für die Realisierung von photonischen Quantenrechnern (Kapitel 4.2.2.), die Verbesserung wichtiger Mikrowellenmessverfahren

(z.B. ESR, NMR) und für vollkommen neuartige Anwendungen wie die Quantenbeleuchtung oder das Quantenradar benutzen.

Mit supraleitenden Materialsystemen wurden erfolgreich Quanten-Metamaterialien und Gitter aus nichtlinearen Resonatoren für die Quantensimulation realisiert. Supraleitende Systeme bieten hier wiederum spezifische Vorteile, da sie mit großer Designflexibilität skalierbar hergestellt werden können und mit dem Josephson-Kontakt ein intrinsisch nichtlineares Element zur Verfügung steht.

International werden supraleitende Systeme als Schlüsselplattform für die Quantentechnologie angesehen. Im Hinblick auf die Implementierung von Quantum-Computing gehören sie unter den skalierbaren Systemen zu denen, die am weitesten fortgeschritten sind. Sie werden auch bereits erfolgreich für Quantensimulatoren verwendet und besitzen großes Potenzial für Quantensensoren, -detektoren und -kommunikationssysteme.

Entwicklungsbedarf besteht insbesondere bei der für diese Systeme notwendigen Technologiebasis. Dies betrifft Materialentwicklung und Herstellungstechnologien für supraleitende Quantenschaltkreise genauso wie die Mikrowellentechnologie (Kapitel 4.2.2) und die Entwicklung spezieller Messverfahren.

Topologische Isolatoren sind neuartige Quantenmaterialien, die sich im Volumen wie normale Halbleiter verhalten, aber an der Oberfläche bzw. an den Rändern metallische Zustände besitzen. Unter bestimmten Umständen treten in diesen Systemen neuartige gebundene Zustände auf, die den Charakter von zweidimensionalen Quasiteilchen haben und die nach Ettore Majorana benannt wurden. Diese Majorana-Teilchen sind weder Fermionen noch Bosonen, sondern etwas dazwischen, das man Anyonen nennt. Anyonen könnten z.B. als Qubits eines topologischen Quantencomputers eingesetzt werden. Dieses vielversprechende neuartige Konzept findet weltweit große Aufmerksamkeit. Mittel- bis langfristig ist das Ziel,

zunächst die Majorana- Zustände und ihren anyonischen Charakter erstmals zu detektieren und für Quantencomputer-Prozesse nutzbar zu machen.

#### 4.2.1.2 Nanoskopische Systeme

Halbleiter dominieren die traditionellen Informationstechnologien und sie stellen aufgrund der etablierten Herstellungs- und Skalierungsmethoden ebenfalls sehr aussichtsreiche Systeme für Quantentechnologien dar. Photonenquellen auf Halbleiterbasis sind für den Einsatz in Quantentechnologien bereits sehr weit entwickelt. Photonenquellen sind zentrale Bauelemente, um Quanten-Bits (Qubits) mit Glasfasern oder auch im freien Raum über lange Strecken (bis zu ca. 300 km) zu transportieren, um die Verteilung von Verschränkung zu ermöglichen oder Verschränkung zwischen verschiedenen Orten auszutauschen. Halbleiter-Quantenpunkt-Quellen sind vielversprechende Quellen von Einzelphotonen oder verschränkten Photonenpaaren, sie offerieren hohe Quanten-Effizienz, hohe Wiederholraten, optische oder elektrische Ansteuerung auf Knopfdruck etc. Quantenpunkte bieten eine hohe Variabilität im Hinblick auf die Betriebswellenlänge, sie können z.B. für direkte Emission im Telekom-Band konfiguriert werden oder auf andere Bauelemente (Quantenspeicher) angepasst werden. Sie sind gute Kandidaten für faserbasierte Quantenkommunikation über große Strecken. Viele wichtige grundlegende Meilensteine und Demonstrationsexperimente sind für Halbleiterlichtquellen bereits erreicht: Künftig geht es vor allem darum, physikalisch-technische Eigenschaften wie Wiederholraten, Ununterscheidbarkeit, Bandbreiten etc. weiter zu verbessern und eine Skalierbarkeit zu erreichen. Auch in anderen Bereichen können Halbleiter eine wichtige Rolle spielen, beginnend von der Bereitstellung ultraschneller Elektronik als „enabling technology“ bis hin zum Einsatz von Spin-Anregungen in Nanostrukturen für intermediäre Speicherung von Quanteninformation bzw. ihrer Manipulation. Spin Qubits in lateralen Quantenpunkten sind eine weit entwickelte, festkörperbasierte Qubit-Realisierung. Hierbei

werden einzelne Elektronen in Quantenpunkten eingeschlossen, deren Spin Freiheitsgrad das Qubit darstellt. Typische Materialien für solche Quantenpunkte sind GaAs, SiGe oder auch Kohlenstoffallotrope wie Graphen oder Kohlenstoff-Nanoröhren. Der nächste entscheidende Schritt für den möglichen Durchbruch dieser Materialklasse ist der Ausbau auf mehrere Qubits, die alle separat adressierbar sein sollten.

#### 4.2.2 Photonische Systeme

In den Quantentechnologien kann den photonischen Technologien eine tragende Rolle beigemessen werden. Quantenzustände des elektromagnetischen Feldes sind ideale Träger von Information, da die Wechselwirkung mit der Umgebung bei der Ausbreitung im Vergleich zu anderen physikalischen Systemen sehr gering gehalten werden kann. Die photonischen Technologien profitieren dabei von einer ausgereiften Grundtechnologie aus industriellen Anwendungen und einer daraus folgenden einfachen Integrierbarkeit in bestehende Systeme. In den Quantentechnologien spielt die Photonik eine Vorreiterrolle und es existieren dadurch bereits viele ausgereifte Systeme. Als effizienter Träger von Information spielen elektromagnetische Felder eine wichtige Rolle in allen anwendungsorientierten Themen, nicht nur bei der Quantenkommunikation. Für Quanten-Computing benötigt man eine Verbindung verschiedener Einheiten, außerdem existieren Vorschläge für ein rein optisch basiertes Quanten-Computing. Für Quantensensorik sind, z.B. in der Gravitationsdetektion, Quantenzustände des elektromagnetischen Feldes sehr gut geeignet. Auch in der Quantensimulation gibt es Vorschläge zur Nutzung „photonischer Hardware“. Quantenzustände des elektromagnetischen Feldes spielen auch beim Auslesen der Ergebnisse eine entscheidende Rolle. Photonische Quantentechnologien sind in den unterschiedlichsten Themengebieten wichtig. Für die technische Umsetzung werden Photonen sowohl im optischen Bereich als auch im Mikrowellenbereich verwendet. Es ist zu erwarten, dass die Bedeutung des Tera-Hertz-

und Mikrowellenbereichs des elektromagnetischen Spektrums für die Quantentechnologie noch sehr steigen wird.

#### 4.2.2.1 Stand von Forschung und Technik

Kohärente Effekte, bei denen die relative Phase des elektromagnetischen Feldes eine wichtige Rolle spielt, wurden zunächst in der Wechselwirkung von Atomen und Molekülen mit Hochfrequenzstrahlung und Mikrowellen untersucht. Nach der Erfindung des Lasers konnten entsprechende Effekte auch im sichtbaren Teil des Spektrums beobachtet werden. Daraus entwickelte sich die Quantenoptik mit der Beobachtung von Effekten, die nur mit einer quantisierten Feldtheorie beschrieben werden können. In Zusammenhang mit den Fortschritten der Qubits im Bereich der Supraleitung wurden nun wiederum Techniken der Quantenoptik in den Mikrowellenbereich übertragen. Dieses Wechselspiel ist eine Erfolgsgeschichte *par excellence*, die es nun fortzuschreiben gilt. Manche der Techniken, wie der direkte Nachweis der Photonen, ist bisher auf das Sichtbare und das nahe Infrarot beschränkt. Andere Techniken, wie der heterodyne Nachweis von Feldschwingungen, sind im ganzen Spektrum einsetzbar.

Auf der Seite der Lichtquellen spielen Zweiniveausysteme basierend auf Molekülen, Ionen, Atomen, Farbzentren und Halbleiterquantenpunkten eine wichtige Rolle für die Erzeugung einzelner Photonen und verschränkter Photonenzustände. Halbleiterquantenpunkte in photonischen Strukturen können Photonen sehr effizient elektrisch oder optisch auf Knopfdruck generieren, und die Wellenlängen können auf optische oder Telekommunikationskanäle direkt angepasst werden. Weiterhin können nichtlineare optische Wechselwirkungen dienen, um Quantenlicht zu erzeugen. Neben Photonen spielt auch das Quantenlicht eine Rolle, bei dem das Quantenrauschen der Feldamplituden unsymmetrisch verteilt ist, dem sogenannten gequetschten Licht.

Photonische Systeme im Mikrowellenbereich sind in zweierlei Hinsicht sehr wichtig. Erstens müssen für die direkte Kommunikation zwischen einzelnen supraleitenden Quantenprozessoren (Kapitel 4.2.1.1) über kurze Strecken Mikrowellenphotonen verwendet werden. Für die Kommunikation über große Entfernungen müssen Frequenzumsetzer in den optischen Bereich entwickelt werden. Es besteht allerdings auch die Möglichkeit, dass eines Tages die Mikrowellenstrahlung direkt für die Übertragung eingesetzt werden kann. Zweitens können photonische Quantenrechner realisiert werden, die mit supraleitenden Quantenrechnern hinsichtlich Frequenzbereich und Materialbasis voll kompatibel sind und somit die Integration auf einem Chip erlauben. Quantenkommunikation auf der Basis propagierender Quanten-Mikrowellen wurde bereits erfolgreich realisiert, wobei ein Zugang auf Basis der Quantenzustände der kontinuierlichen Variablen verwendet wurde. Wichtige Meilensteine waren der Nachweis von Pfad-Verschränkung, die Erzeugung von gequetschten Zuständen, die Implementierung des Verschiebe-Operators als fundamentale Voraussetzungen für die Quanten-Teleportation und die Entwicklung eines neuen Verfahrens für die Zustandstomographie.

#### 4.2.2.2 Herausforderungen und Ziele

Ein wichtiger Baustein ist die Erzeugung von besonderen Quantenzuständen des Lichts. Ziel muss es sein Quellen zu entwickeln, die folgende Kriterien erfüllen: Effiziente Erzeugung verschiedener reiner Quantenzustände (Einzelphotonen, Fock-Zustände, gequetschte Zustände, verschränkte Zustände), Erzeugung in einer einzigen Lichtmode, flexible Wahl der Freiheitsgrade (z.B. Wellenlängenanpassung), Möglichkeit des Modenmultiplexing. Die Quantenzustände können dabei spontan erzeugt werden, müssen aber angekündigt sein und sollten in der Lage sein, mit Quantenspeichern verknüpft zu werden. Die Wahl der Quantenzustände hängt dabei von der zu bewältigenden Aufgabe ab. Die nichtlineare Wechselwirkung zweiter oder dritter Ordnung in Kristallen und optischen Fasern dient als Grundlage und muss so

entwickelt werden, dass sie die oben genannten hohen Anforderungen erfüllt. Idealerweise sollten die Systeme integrierbar und skalierbar sein. Systeme in Wellenleiterstrukturen und Resonatoren (chipintegriert, bulk, Flüstergalerien) sind vielversprechende Technologien, die aber noch zu den Anforderungen entwickelt werden müssen. Die Systeme können dabei auf diskreten oder kontinuierlichen Hilbert-Räumen arbeiten.

Integrierte photonische Quantensysteme bauen auf klassischen photonisch integrierten Schaltkreisen (PICs) auf. Für diese klassischen photonischen Bauelemente existiert bereits eine mehrjährige Erfahrung mit deren Integration, Bibliotheken von Bauelementen, die zu unterschiedlichen Systemfunktionalitäten kombiniert werden können, und Photonik Design Kits, die die Zugangshürden extrem absenken und es so wesentlich mehr Forschern erlauben, ihre gewünschten PICs zu realisieren. Auch neuartige quanten-photonische Bauelemente sollten hierin integriert werden.

Quantenzustände des Lichts können mit Hilfe von Schaltkreisen verarbeitet werden. Die Wechselwirkung wird durch ein nichtlineares Material ermöglicht. Die nötige Nichtlinearität kann auch durch effiziente Kopplung an ein anderes resonantes (z.B. atomares) System erfolgen. Die nötige Wechselwirkung für ein Schalten der Quantenzustände (z.B. kodiert in der Phase) muss von gegenwärtigen Systemen stark erhöht werden (durch den Einsatz neuer Materialien, Mikrostrukturierung, Resonatoren). Quantentechnologische Strategien benötigen dabei auch eine Integration von komplexeren Systemen mit mehreren nichtlinearen Elementen und Interferometern.

Um verschiedene Bauelemente in quantentechnologischen Systemen zu verbinden, ist es nötig, Quantenzustände zu übertragen und dabei die Freiheitsgrade anzupassen. Licht kann dabei als flexibler Überträger der Quanteninformation dienen. Gleichzeitig müssen die Freiheitsgrade (Wellenlänge, Polarisation, räumliche Mode) umgewandelt werden. Kon-

krete Beispiele sind die Verbindung von supraleitenden Schaltkreisen und Mikrowellen mit optischen Verbindungsstrecken oder die Konvertierung von optischen Frequenzen, so dass sie an Atomübergänge angepasst sind. Für diese Konversion können Frequenzumwandlungen mit nichtlinearen Prozessen dienen. Hier ist eine hohe Effizienz und Flexibilität wichtig. Um dies zu erreichen, müssen neuartige Systeme entwickelt werden, die z.B. Wellenleiterstrukturen, neuartige Resonatoren oder optomechanische Wechselwirkungen beinhalten.

Für die Detektion von Quantenzuständen sind über die grundlegende Umwandlung der Lichtenergie in elektronische Signale hinaus auch komplexere Quantenempfängerstrukturen wichtig. Alle anwendungsorientierten Themen profitieren von Quantenmessungen an der durch die Quantenmechanik erlaubten Grenze. Im optischen kann diese Grenze oft nur durch die Kombination von optischen und elektronischen Elementen erreicht werden. Optimale Quantenempfänger arbeiten mit interferometrischen Elementen und optimierten Photonendetektoren beziehungsweise nach dem Heterodyn-Prinzip zur Messung von Quadraturzuständen des Lichts. Solch optimale Quantenempfänger sollten als integrierte Elemente entwickelt werden, die Quantenzustände mit hoher Effizienz und Geschwindigkeit messen oder einordnen können. Eine Entwicklung von Wellenleiter- oder faserbasierten Systemen mit integrierten hocheffizienten Photodioden oder supraleitenden Detektoren zusammen mit schneller Datenerfassung und Rückkopplung dient als Beispiel.

Mögliche Schlüsseltechnologien im Bereich der photonischen Systeme sind:

- *Verbesserung der Effizienz und anderer Leistungsmerkmale sowie der Miniaturisierung und Skalierbarkeit von Quellen für Quantenlicht: einzelne Photonen, verschränkte Photonen, quantengequetschte Feldamplituden und auch kohärenter Zustände,*

- *Komponenten für die schnelle elektronische Verarbeitung (FPGAs, Datenerfassung und -aufbereitung),*
- *hochgenaue optische Komponenten (Einkopplungs-/ $2\pi$ -Einfangoptiken) und*
- *adaptive Optiken, computergenerierte Hologramme.*

Forschungsbedarf besteht auch bei der Weiterentwicklung der Komponenten für die Erzeugung und Detektion von Quantenlicht im Mikrowellenbereich und ihre Interaktion in einem Gesamtsystem. Mit diesen Komponenten können dann effektive Protokolle für die Präparation entfernter Quantenzustände und die Teleportation realisiert werden. Hierzu sollen gequetschte Mikrowellenzustände als Zustände der kontinuierlichen Variablen verwendet werden, die bereits erfolgreich mit auf Josephson-Kontakten basierenden parametrischen Verstärkern erzeugt wurden. Für die erfolgreiche Implementierung der Protokolle müssen die Korrelationszeiten von Zweimoden-gequetschten Zuständen sowie die Verschiebeoperation für gequetschte Zustände untersucht und optimiert werden.

### 4.2.3 Atomare und Molekulare Systeme

Die Entwicklung der Quantenmechanik als Grundlage der Quantentechnologie hat ihren Ursprung im Ringen um das Verständnis von Atomen und Molekülen. In den letzten Jahren sind in dem Bereich des Quantenengineering mit Atomen und Molekülen spektakuläre Erfolge erzielt worden, sichtbar an 11 Nobelpreisträgern in den letzten 20 Jahren (Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips, Wieman, Cornell, Ketterle, Hall, Hänsch, Glauber, Haroche, Wineland).

#### 4.2.3.1 Stand von Forschung und Technik

Heute lassen sich Atome und Moleküle auf Zeitskalen von Minuten bis Tagen in elektromagnetischen Feldern speichern, in all ihren Freiheitsgraden mit Laser- und Mikrowellenfeldern kontrollieren und in Form von quantenentarteten Materiewellen erzeugen. In ers-

ten Experimenten konnte gezeigt werden, wie sich diese Fortschritte auch zur vollständigen quantenmechanischen Kontrolle elementarer chemischer Reaktionen nutzen lassen.

Weil sie sich hervorragend von der Umgebung isolieren lassen, weisen atomare und molekulare Quantensysteme ein extrem hohes Maß an Kohärenz auf. Atomare Quantensysteme finden Anwendung als Plattform zur Quanteninformationsverarbeitung, wo gespeicherte atomare Ionen eines der am weitesten fortgeschrittenen, skalierbaren Systeme auf dem Weg zu einem zukünftigen Quantenrechner darstellen. Hierbei wurden die bis jetzt längsten Kohärenzzeiten aller Systeme von knapp einer Minute demonstriert, und der Fehler elementarer Logikoperationen liegt konsistent niedriger als in allen anderen Systemen. Obendrein stellen mikrostrukturierte Oberflächenfallen eine der am besten skalierbaren Basisplattformen bereit; alle wesentlichen, zur Skalierung notwendigen Techniken wurden in Systemen von wenigen Ionen bereits erfolgreich demonstriert, sowie elementare Algorithmen realisiert.

In der Quantensensorik finden Atome als Frequenzreferenzen Anwendung; hierbei liefern Vergleiche verschiedener Atomuhren die genauesten Messungen von Naturkonstanten in Form von Frequenzverhältnissen und können aufgrund ihrer extremen Präzision mit Hilfe relativistischer Effekte in Zukunft für die Geodäsie eingesetzt werden. Darüber hinaus sind Uhren die Schlüsselkomponenten der Satellitennavigation. Optische Frequenzstandards werden auf Basis von gespeicherten Ionen und Neutralatomen in optischen Gittern realisiert.

Unter Ausnutzung der Interferenz von Materiewellen können Atominterferometer winzigste Beschleunigungen und andere Trägheits-Effekte nachweisen und befinden sich an der Schwelle zum Einsatz in Weltraummissionen. Hierzu wurden chipbasierte Atomfallen als kompakte und robuste Basistechnologie entwickelt. Atomare Quantensysteme finden Anwendung in der Quantensimulation wechselwirkender Vielteilchensysteme; hierbei lässt sich sowohl

ein „bottom-up“ Vorgehen realisieren (Ionen), als auch ein „top-down“ Verfahren (z. B. kalte Gase in Gittern).

In der Quantenkommunikation können atomare Systeme als Quantenrepeater und Speicherelemente dienen. Es wurden erste Erfolge bei der Miniaturisierung, Kontrolle und Integration von Systemen zur Manipulation und Speicherung von Atomen und Ionen erzielt. Wichtige Schritte zur Überwindung der Grenzen klassischer Physik mittels nicht-klassischer Zustände wurden unternommen, zudem wurden neuartige Detektionskonzepte und auf Quantenlogik basierende Verfahren zur Spektroskopie entwickelt. Quantenlogik-Algorithmen erlauben es, die Vorteile von unterschiedlichen Spezies in sogenannten „hybriden Systemen“ zu kombinieren. Ein Beispiel hierfür ist die Quantenlogikspektroskopie, bei der ein Spektroskopie-Atom von einem gut kontrollierbaren Logik-Atom präpariert und ausgelesen wird.

Insgesamt stellen Atome und Moleküle die wohl am breitesten aufgestellte und gleichzeitig mit am weitesten fortgeschrittene Quantenhardware für Quantenrechner, Quantensimulationen und Sensorik dar und finden bei Kopplung an Photonen auch für die Kommunikation Einsatz.

#### 4.2.3.2 Herausforderungen und Ziele

Aufgrund der nahezu perfekten Quanteneigenschaften atomarer und molekularer Quantensysteme sind diese in der Lage, die Qualität der sie kontrollierenden Felder zu testen wie vielleicht kein anderes Quantensystem. Dies betrifft insbesondere den Einsatz als Quantenbits und die Realisierung von Quantengattern mit hoher Güte sowie die Sensorik und die Frequenzmetrologie. Eine wichtige Herausforderung für das Feld ist daher die Verfügbarkeit entsprechender Kontrollfelder mit extremer Stabilität und Genauigkeit. Dabei muss gleichzeitig in Hinblick auf die Skalierbarkeit und Portabilität von Sensoren sichergestellt werden, dass sie kompakt und wartungsarm sind.

In Hinblick auf die Skalierung atomarer und molekularer Quantensysteme ist die Entwicklung skalierbarer Quellen von Quantenmaterie (beispielsweise Atomchips und mikrostrukturierte Ionenfallen für die Quanteninformationsverarbeitung) von größter Bedeutung. Hierbei werden Lösungen benötigt, welche es erlauben, große Zahlen von Atomen auf engstem Raum zu manipulieren, ohne die hervorragenden Eigenschaften dieser Quantensysteme zu kompromittieren. Unter anderem sind dazu signifikante Anstrengungen in der Mikrofabrikation sowie der Oberflächen- und Materialanalyse erforderlich. Ultimativ wird es für eine Skalierung der zu kontrollierenden Atome erforderlich sein, sowohl elektronische als auch passive und aktive optische Komponenten direkt in die Fallenstrukturen zu integrieren. Miniaturisierte, auf Dauer evakuierte Vakuummesskammern mit entsprechenden Spezifikationen müssen dazu entwickelt werden. Hierzu ist es notwendig, in Deutschland beispielsweise im Rahmen von Ausgründungen allgemein zur Verfügung stehende Herstellungskapazitäten aufzubauen und darin existierendes Know-How zu bündeln. In Deutschland besteht hier im europäischen Vergleich sehr viel Potential, aber auch ein signifikanter Bedarf; beispielsweise werden in den USA entsprechende Kapazitäten systematisch aufgebaut.

Eine weitere Herausforderung ist es, bei der Miniaturisierung, Integration und Skalierung atomarer und molekularer Quantensysteme und Quellen von Quantenmaterie keine Kompromisse bei den spezifischen Leistungsdaten zu machen. Wesentliche Schritte und Techniken solcher Systeme sind in unabhängigen Experimenten gezeigt worden und müssen nun zusammengebracht und skaliert werden, um in allen vier Säulen der Quantentechnologie Fortschritte erzielen zu können.

Parallel hierzu werden neuartige Konzepte zur Herstellung und Detektion nichtklassischer Korrelationen und von Verschränkung benötigt zur Anwendung in allen vier Säulen. Hieraus soll eine Reduzierung der Komplexität in Bezug auf Anwendungen, eine Steigerung der Qualität der

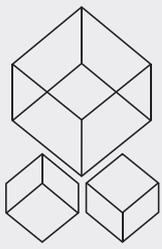
erzeugten Korrelationen und eine optimale Nutzung beispielsweise in der Sensorik resultieren.

Ein großes Potential für neuartige Anwendungen liegt in der Kombination aus atomaren und molekularen Quantensystemen mit den anderen Formen der Quantenhardware. Beispielsweise stellen Atome aufgrund ihrer langen Kohärenzzeiten hervorragende Speicher für Quantenzustände dar, während Festkörpersysteme sich aufgrund ihrer hohen Geschwindigkeiten als schnelle „Verarbeitungsplattform“ anbieten und Photonen sich zum Transport von Quantenzuständen eignen.

Die Entwicklung entsprechender Quantschnittstellen sollte eine hervorgehobene Rolle spielen; aufgrund der mit einer fortschreitenden Integration einhergehenden Miniaturisierung ergeben sich insbesondere zusammen mit dem Ziel der Skalierung beträchtliche Synergien. Solche „hybriden“ Quantensysteme könnten das Beste verschiedener Welten in einem integrierten Paket vereinen.

Langfristig können auf diese Weise Netzwerke von Quantensystemen aufgebaut werden, die z.B. in der Sensorik ganz neue Perspektiven eröffnen. Weltumspannende glasfaserbasierte Netzwerke mit entsprechenden klassischen und quantenbasierten Repeatern würden globale Quantschlüsselübertragung sowie Zeit- und Frequenzübertragung auf höchstem Niveau mit derselben Infrastruktur ermöglichen.

Uhrenvergleiche über solch ein Netzwerk wären eine wichtige Voraussetzung zum Beispiel für Neudefinitionen der SI-Sekunde und des globalen Höhensystems basierend auf Uhren (relativistische Geodäsie), für Tests fundamentaler Physik (Relativitätstheorien) und für eine Suche nach Physik jenseits des Standardmodells (dunkler Materie und dunkle Energie) mit quantenoptischen Systemen.



## 5. Schlüsseltechnologien

### 5.1 Quantenkompatible Datenerfassung, schnelle Elektronik und Kryotechnik

Für supraleitende Quantensysteme sind Temperaturen im Millikelvin-Bereich notwendig. Einfach zu bedienende „Knopfdruck“-Kühlsysteme auf der Basis der am Walther-Meißner-Institut entwickelten trockenen Mischkühler stehen seit einigen Jahren kommerziell zur Verfügung und müssen zielgerichtet weiterentwickelt werden. Entwicklungsbedarf besteht hinsichtlich der mit diesem Temperaturbereich kompatiblen Mikrowellenkomponenten (z.B. Abschwächer, Zirkulatoren, Strahlteiler, rauscharme Verstärker). Mit zunehmender Komplexität kommt es neben der Verbesserung der allgemeinen Leistungsdaten hier vor allem auf Reduktion von Baugröße und Kosten an. Auch Multiplexer zur Reduktion der notwendigen Datenleitungen gewinnen zunehmend an Bedeutung. Ein wichtiger Entwicklungsbedarf besteht im Bereich der quantenlimitierten Mikrowellenverstärker mit möglichst großer Bandbreite. Einen erfolgreichen Ansatz stellen hier parametrische Verstärker auf Basis von Josephson-Kontakten dar. Für entsprechende Verstärker besitzen auch hoch performante HEMT-Technologien, die für Betrieb bei kryogenen Temperaturen ausgelegt sind und im Betrieb bis unter 1 Kelvin hervorragende Rauscheigenschaften zeigen, ein großes Potenzial.

Für atomare und molekulare Quantensysteme werden hingegen eher Kühlaggregate benötigt, die bei 4K arbeiten, aber hier eine möglichst große Kühlleistung aufgrund des optischen Zugangs aufweisen bei sehr geringen Vibrationsamplituden.

Für die Analyse von allen Quantensystemen werden schnelle, Hardware-programmierte Signalverarbeitungssysteme benötigt, die in Echtzeit arbeiten (auf der Basis von *field programmable gate arrays*, FPGA) z.B. für die Zustandstomographie und die Implementierung von Quanten-Rückkopplung. In Echtzeit-Umgebungen integrierte rauscharme und agile Strom-, Spannungs- und Frequenzquellen werden für die Kontrolle der meisten Quantensysteme benötigt. Es wäre erstrebenswert, gemeinsame Soft- und Hardware-Plattformen für die Steuerung und Auswertung von Experimenten zu entwickeln.

## 5.2 Laser, Detektoren, Quellen und Schnittstellen

Quellen und Detektoren für einzelne Photonen sind zentrale Bestandteile für die Realisierung von Quantenkommunikationssystemen. Sie sind Schlüsselkomponenten sowohl für die Kommunikation über lange Strecken (mehrere 10 km), was typischerweise über Glasfasern im optischen/infraroten Bereich (z.B. Telekom-Band) erfolgt, als auch für die Kommunikation über kurze Strecken, z.B. zwischen einzelnen Quantenprozessoren. Sowohl supraleitende als auch atomare und molekulare Qubits weisen jedoch Energieskalen im Milli-Elektronenvolt-Bereich auf; daher wird entsprechende Kommunikation und Kontrolle über kurze Strecken häufig im Mikrowellenbereich erfolgen. Für beide Frequenzbereiche ist die Entwicklung von effizienten Quellen und Detektoren für Quantenlicht (Detektionseffizienz, Güte, Wiederholraten, Totzeit, Takt-Jitter, Ansteuerbarkeit, Integrier- und Skalierbarkeit) von zentraler Bedeutung. Sie stellen zentrale Technologiekomponenten dar, z.B. für die Realisierung von Quanten-Repeatern. Im Mikrowellenbereich sind sie auch für die Implementierung

interessanter metrologischer Anwendungen unverzichtbar.

Die Entwicklung integrierter Systeme (Photonische Integration), bei denen Quellen und Detektoren für Quantenlicht (optischer und Mikrowellen-Bereich) auf einem Chip integriert und durch photonische Wellenleiter verbunden sind, erscheint aufgrund des guten Forschungsstands in der Grundlagenforschung auf diesem Gebiet zum jetzigen Zeitpunkt erfolgversprechend und dringend notwendig. Sie erfordert verstärkte Anstrengungen im Bereich der Technologieentwicklung, da ohne die Entwicklung von Basistechnologien eine Überführung von in der Grundlagenforschung bereits demonstrierten Konzepten in die technische Anwendung kaum funktionieren wird. Für die Entwicklung von integrierten Photonenquellen und -detektoren ist insbesondere die Kombination von Halbleiter- und Supraleitungstechnologien sehr interessant. Solche Technologieentwicklungen stellen eine wichtige Grundvoraussetzung für die langfristig angestrebte Realisierung von Quanten-Repeatern, modular aufgebauten Mehrknoten-Quantennetzwerken, Kommunikationssystemen für Quantenprozessoren, photonischen Quantenrechnern oder metrologischen Konzepten wie der Quantenbeleuchtung oder des Quanten-Radars dar. Für die Photonische Integration bieten sich Silizium, SiN<sub>x</sub>, InP, und GaAs als Wellenleiter sowie die Heterointegration in 2D oder 3D an. Diese Techniken erlauben die phasenstabile Integration unterschiedlicher optischer und elektronischer Funktionalitäten und können auch auf mittlere und hohe Stückzahlen skaliert werden.

Für Anwendungen in der Sensorik und für atomare und molekulare Quantensysteme werden integrierte, feldtaugliche und modularisierte Laserquellen benötigt, welche die Möglichkeiten, die diese Quantensysteme bieten, nicht durch ihre spektralen Eigenschaften kompromittieren. Für Spektralbereiche, die nicht um Standard-Telekommunikationsbereich gehören (beispielsweise der ultraviolette Spektralbereich), sollte die Entwicklung von Kom-

ponenten vorangetrieben werden, wie sie bei Standard-Telekommunikationswellenlängen schon länger verfügbar sind (faserbasierte Modulatoren, Koppler etc.). Zu diesen Komponenten gehören auch Frequenzkonverter, die verschiedene Frequenzbereiche der elektromagnetischen Strahlung miteinander verbinden und bei denen die Quanteneigenschaft der konvertierten Strahlung möglichst erhalten bleibt. Solche Konverter sind insbesondere für Hybridsysteme erforderlich. Die Konversion zwischen optischen- und Mikrowellen Frequenzen ist dabei ein besonders anspruchsvolles Beispiel.

Für viele Quantensensoren wie z.B. optische Uhren, zukünftige Atominterferometer mit großer Basislänge und Gravitationswellendetektoren ist das thermische Rauschen von Spiegelschichten und -substraten schon jetzt eine wesentliche Limitierung. Neue Materialien und Ansätze zur Reduktion dieses Rauschens und weiterer Störeinflüsse, wie z.B. Vibrationen, müssen untersucht und für die Anwendungen verfügbar gemacht werden.

Glasfasernetzwerke werden für eine Reihe von Quantentechnologie-Anwendungen eine wichtige Rolle spielen. Daher müssen spezielle Komponenten für die gemeinsame Nutzung von Glasfasernetzen für z.B. Quantenschlüsselübertragung und Zeit- und Frequenzübertragung entwickelt werden und es muss die notwendige Glasfaser Infrastruktur dauerhaft zur Verfügung gestellt werden.

### 5.3 Materialien, Bauelemente und quantentechnologische Geräte

Materialwachstum und die Bauelementherstellung bilden zentrale Schlüsseltechnologien auf dem Weg zu einem festkörperbasierten Quantencomputer. Dies gilt für sämtliche festkörperbasierten Ansätze, seien es topologische, supraleitende oder nanoskopische Systeme.

Ein weiterer wichtiger Schlüsselbereich ist die elektrische Charakterisierung der Bauelemente. Hierzu sind besonders geeignete Messeinrich-

tungen notwendig, die es erlauben, Umwelteinflüsse (z.B. Elektro-Smog) im erforderlichen Maße von den Bauelementen fernzuhalten.

Im Bereich des topologischen Quantenrechnens stellt die Materialentwicklung eine der großen Herausforderungen dar. Im Zuge der Entwicklung topologischer Materialien haben sich einige wenige Systeme herauskristallisiert, die sich besonders in Kombination mit Supraleitern zur Implementierung von Konzepten topologischen Quantenrechnens eignen könnten.

Skalierbare Strukturen zum Fangen und zur Manipulation einzelner Atome und Moleküle werden seit einigen Jahren mit Methoden der Mikrostrukturierung hergestellt und weisen großes Potential für den Einsatz dieser Systeme in der Sensorik, Quantensimulation und für Quantenrechner auf. In Hinblick auf die Skalierung sollte angestrebt werden, Kapazitäten zur Herstellung solcher Mikrostrukturen aufzubauen, die den Anforderungen dieser Quantensysteme an Materialien und Geometrie genügen und die reproduzierbar und allgemein (für alle Anwender) verfügbar sind. Hier können Synergien zwischen Neutralatom-Fallen und Ionenfallen genutzt werden. Und es bietet sich auch an, die Anbindung anderer, zum Beispiel supraleitender Elemente, voranzutreiben.

Für die Fertigung von quantentechnologischen Komponenten und Systemen werden Kompetenzen der Mikro- und Nanoelektronik und Photonik benötigt, um die Ergebnisse der Grundlagenforschung auf dem Gebiet der Quantentechnologien in marktfähige Geräte überführen zu können:

- *Mikro- und nanoelektronische Komponenten*
- *Photonische und opto-elektronische Bauelemente*
- *Mikromechanische Komponenten (MEMS)*
- *Aufbau- und Verbindungstechnik, insbesondere für kryogenen Betrieb und unter Vakuum*

- *Epitaxie und Prozessierung von Silizium, Verbindungshalbleitern, Diamant und supraleitenden Schichtsystemen*
- *Deterministische und Nanometer-genaue Implantation von einzelnen Dotierungsionen in ultrareine Kristalle wie Diamant, Silizium etc. zur Erzeugung von photonischen Komponenten und Quantenspeicherbauelementen*

Im Bereich der Forschung und für die späteren Anwendungen besteht in den Bereichen Quantenkommunikation und Quanten-Computing z.B. der vorrangige Bedarf an Kleinserien von funktionsfähigen Einzelphotonenquellen, die identische Photonen auf Abruf emittieren. Ein sehr gutes Beispiel für die erfolgreiche Umsetzung von Ergebnissen der Grundlagenforschung in ein marktfähiges Produkt sind die bereits in den USA verfügbaren miniaturisierten Atomuhren<sup>1</sup>.

## 5.4 Quantenmessungen

Zur langreichweitigen Verbindung von atomaren und molekularen Quantensystemen und zum Einsatz dieser Quantensysteme als Frequenzkonverter zwischen verschiedenen spektralen Bereichen ist die Entwicklung von integrierten Detektionstechniken von großer Bedeutung, beispielsweise integrierte und miniaturisierte faseroptische Detektionselemente in Ionenfallen, Detektoren höherer Effizienz und Kanalzahl bei gleichzeitig hoher räumlicher Auflösung. Darüber hinaus müssen neue Quantenalgorithmen zum sensitiven und effizienten Auslesen von hybriden Systemen, basierend z.B. auf nichtklassischen Zuständen entwickelt werden.

---

<sup>1</sup> <http://www.microsemi.com/products/timing-synchronization-systems/embedded-timingsolutions/components/sa-45s-chip-scale-atomic-clock>

## 6. Standardisierung

Der Zertifizierung von Quantensystemen auf der Hardware-Seite und von Quantenprotokollen auf der Software-Seite kommt eine besondere Bedeutung zu. Dabei spielt die theoretische Modellierung eine entscheidende Rolle, sowohl für Sicherheitsbeweise als auch im Hinblick auf die Kompatibilität einzelner Teilsysteme. Die Standardisierung ist eine hoheitliche Aufgabe. Durch Standards wird es möglich, weitere Geräte oder Systeme durch Vergleich zu eichen und zu zertifizieren. Bei komplexeren Systemen ist die Definition und Standardisierung von Schnittstellen entscheidend. Das gilt sowohl für Schnittstellen im Hardware- als auch im Software-Bereich. Zum Thema Standardisierung im Bereich der Quantenschlüsselverteilung für die Kryptographie gibt es bereits eine aktive Arbeitsgruppe, die vom European Technologies Standards Institute (ETSI) koordiniert wird. ETSI hat 2015 eine Stellungnahme zu dieser Thematik verfasst: ETSI White Paper No. 8: *„Quantum Safe Cryptography and Security – An introduction, benefits, enablers and challenges“*<sup>1</sup>. Ähnliche Aktivitäten sind auch in anderen Bereichen erforderlich.

---

1 <http://www.etsi.org/images/files/ETSIWhitePapers/QuantumSafeWhitepaper.pdf>

## 7. Struktur der Nationalen Initiative

Die Quantentechnologien entwickeln neue Methoden und Anwendungen für die Informationsverarbeitung und Kommunikation sowie für hochempfindliche und hochgenaue Sensorik im Messwesen und in der Standardisierung. Darüber hinaus stellen sie wichtige Grundlagen für Verbesserungen und Verfeinerungen in zahlreichen Technologiefeldern dar, zum Beispiel in der Chemie, der Biologie oder der Nanotechnologie und ganz allgemein in der Sensorik. Sie sind unverzichtbar bei der fortschreitenden Miniaturisierung in der Nanoelektronik und zeigen auf, wie Quantenphänomene vielseitig nutzbar gemacht werden können. Deutschland leistete bei der Entstehung dieser interdisziplinären Technologien bereits entscheidende Beiträge zur Forschung. Mit weltweit angesehenen Wissenschaftlern an Universitäten und außeruniversitären Forschungsinstituten verfügt Deutschland über eine hervorragende Ausgangssituation für die Zukunft. Diese gilt es zu nutzen. Im Gegensatz zu immer mehr europäischen und außereuropäischen Ländern gibt es in Deutschland eine noch unzureichende industrielle Umsetzung der Quantentechnologien. Die Expertise zu den einzelnen Aspekten der Quantentechnologien ist weit über die unterschiedlichsten Fachgebiete verstreut.

An vielen verschiedenen Orten in ganz Deutschland wird Forschung zu Quantentechnologien auf international sichtbarem Niveau betrieben. Diese geographische Diversität ist durchaus als Stärke der deutschen Forschungslandschaft zu betrachten. Beispielsweise ergibt sich dadurch ein erleichterter Zugriff auf eine studentische Elite, die zu Beginn ihrer Karriere mehrheitlich ortsfest ist. Gleichzeitig besteht jedoch teilweise ein deutliches Defizit in der Koordinierung: Oftmals werden Synergieeffekte nicht ausreichend genutzt. Mithilfe einer Verbesserung der Strukturen sollte eine engere Vernetzung und eine Bündelung von Kompetenzen angestrebt werden.

## 7.1 Forschungs-Förderinstrumente

Im Folgenden empfehlen wir Maßnahmen, die wir als zielführend und notwendig erachten, um Quantentechnologien in effizienter Weise zu fördern und zur industriellen Anwendung zu bringen. Durch wen und durch welche Institutionen diese Vorschläge umgesetzt werden können, wird durch die jeweiligen Verantwortlichen an anderer Stelle zu entscheiden sein.

Um das Ziel der Etablierung und Anwendung der Quantentechnologie zu erreichen, sollten nicht nur Forschungsprojekte gefördert, sondern auch Anreize für strukturelle Verbesserungen geschaffen werden, die zu einer effizienteren Ausschöpfung der Forschungskapazitäten führen.

### 7.1.1 Forschungs- und Entwicklungsförderung

Unter Schwerpunktthemen kann die Forschung in den unterschiedlichen Feldern kompakt und fokussiert gefördert werden. Zu der benötigten Forschung gehört die Weiterentwicklung der zugrundeliegenden Theorien. Insbesondere soll die Schaffung von Verbundforschung die Einbindung der Industrie an den Schnittstellen zu den Ingenieurwissenschaften, der Chemie und der Biologie unterstützen. Die auf diese Weise entstehenden Plattformen werden auch Ausgründungen

längerfristig flankierend begleiten. Dazu gehört auch ein ausgründungsfreundliches Klima. Die benötigte engere Vernetzung von Industrie und wissenschaftlichen Institutionen kann durch wechselseitig genutzte Sabbaticals für Wissenschaftler und Entwickler erreicht werden.

**Förderung von Konsortien:** Als besonders effizient wird die Organisation der Entwicklung von Quantentechnologien im Rahmen von Konsortien betrachtet, die geografisch lokal oder verteilt sein können. In diesen Konsortien können Vertreter aus Wissenschaft und Industrie gemeinsam an der Verwirklichung konkreter marktrelevanter Projekte arbeiten. Auf diese Weise ist eine enge und ergebnisorientierte Abstimmung gewährleistet. Bei Grundlagenthemen werden Konsortien erforderlich sein, an denen sich noch keine Industrie direkt aktiv beteiligt. Die anwendungsnaheren Themen sollten unterschiedliche Grade der Industriebeteiligung erlauben, die den sehr unterschiedlichen Entwicklungsständen in der Quantenforschung Rechnung tragen. Die Begutachtung der Förderanträge durch ein internationales Panel wäre begrüßenswert. Die Beteiligung internationaler Gutachter eignet sich sehr gut, solange in dem Verfahren keine vertrauliche Information aus den am Konsortium beteiligten Unternehmen offen gelegt werden muss. Deshalb wird diese Art des Peer-Review insbesondere für Konsortien empfohlen, die Themen der Grundlagenforschung behandeln und somit wenig oder keine Industriebeteiligung haben.

**Schaffung von Zentren für Quantentechnologien:** Bestehende Forschungsaktivitäten, oft verteilt auf unterschiedliche Fachgebiete, können durch die Förderung von Zentren gebündelt und unterstützt werden. Initiativen für solche Zentren sollten in jedem Fall zunächst als industrie- oder anwendungsnahe Konsortien starten, um sich bei entsprechendem Erfolg gegebenenfalls zu Zentren zu entwickeln. Gemeinsame Veranstaltungen und der Ausbau gemeinsamer Infrastruktur ermöglichen eine verbesserte Zusammenarbeit. Solche

Zentren machen z.B. dann besonderen Sinn, wenn kapitalintensive Querschnittstechnologien realisiert werden müssen, die allen Quantenforschern zur Verfügung stehen sollen. Der Einsatz gemeinsam entwickelter Technologien wird zu einem Anstieg von Ausgründungen führen, die bewusst gefördert werden sollen. Ein gutes Beispiel hierfür sind Einrichtungen wie das Center for NanoScience (CeNS) in München. Solche Zentren erreichen durch das gemeinsame Auftreten der beteiligten Forschergruppen leichter die Industrie. Dies verbessert nicht nur die Berufsaussichten der Absolventen, sondern erleichtert auch die Annahme der Technologie durch die Industrie.

**Sabbaticals für Industrie und Forschung:** Ein flexibler, befristeter Austausch von Fachkräften bringt beiden Seiten Vorteile: Eine signifikante Verbesserung des Kompetenzaustauschs und die Berücksichtigung und Interessen der Industrie in der Forschung werden erreicht. Sabbaticals fördern Durchlässigkeit, die in beiden Richtungen genutzt werden kann. Industrievertreter können zeitlich begrenzt in Forschungseinrichtungen wechseln und Wissenschaftler in Industrieunternehmen.

### 7.1.2 Strukturmaßnahmen

**Ausbildung:** Quantentechnologien werden derzeit in der schulischen und in der fächerübergreifenden universitären Ausbildung nur unzureichend behandelt. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass es sich um verhältnismäßig junge Technologien handelt. Die Ingenieure in den relevanten Industrien sind bisher mit Quantentechnologien nur sehr wenig vertraut. Um die industrielle Anwendung zu befördern, sollen die Quantentechnologien deshalb in Zukunft verstärkt in die universitäre Ausbildung von Ingenieuren Eingang finden.

**Strukturveränderungen an Universitäten:** In den vergangenen Jahren ist eine deutliche Schwächung des akademischen Mittelbaus erfolgt. Um die Kontinuität in der Forschungsarbeit zu gewährleisten, ist dieser Mittelbau jedoch unverzichtbar. Durch häufig und innerhalb

von kurzen Zeitspannen wechselnde Mitarbeiter besteht derzeit die Gefahr, dass Erfahrung verloren geht, die für die umfassende Untersuchung von wissenschaftlichen Themen und für die Entwicklung von Ideen essentiell ist. Das Schaffen von Stellen im akademischen Mittelbau wird deshalb einen entscheidenden Unterschied machen. Darüber hinaus sollten zur Stärkung der Quantentechnologien neue Professuren mit den entsprechenden Ausrichtungen geschaffen werden.

**Einrichtung einer Koordinierungsstelle:** Eine Koordinierungsstelle fördert die Abstimmung zwischen den an der Nationalen Initiative beteiligten Forschern. Sie dient auch als Anlaufpunkt für Bundes- und Landesregierungen, staatliche und private Fördereinrichtungen, vor allem aber auch für die Industrie. Eine wesentliche Aufgabe wird auch die Technikfolgenabschätzung sein, die zu einem möglichst frühen Zeitpunkt begonnen werden soll. Die Arbeit der Koordinierungsstelle wird vom QUTEGA-Komitee unterstützt.

### 7.1.3 Öffentlichkeitsarbeit und Bildungsanstrengungen

Die Quantenphysik wird in der Öffentlichkeit zurzeit eher als wissenschaftliche Kuriosität wahrgenommen. Das gilt auch für weite Kreise in der Wirtschaft. Insbesondere die mit dem Begriff „Zweite Quantenrevolution“ verbundenen Konzepte und Potentiale für Anwendungen (d.h. zum Beispiel das Superpositionsprinzip und die Eigenarten des Quantenmessprozesses) sind weitgehend unbekannt. Aus der Sicht der QUTEGA-Initiative scheint daher zu Beginn des Programms eine besondere und gemeinsame Bildungsanstrengung außerordentlich wichtig, um sowohl die technisch interessierte als auch die breitere Öffentlichkeit mit diesem Thema vertraut zu machen. Konkret sollten diese Anstrengungen versuchen, die Quantenphysik mehr als bisher in den Lehrplan der Schulen zu integrieren, eine attraktive Wanderausstellungen zu konzipieren und zu betreiben oder geeignete Web-Inhalte bereitzustellen, um nur die wichtigsten Punkte zu nennen.

## 7.2 Empfehlungen

Das Hauptaugenmerk der Nationalen Initiative des BMBF sollte auf der Projekt-Förderung liegen:

- Die größte Breitenwirkung wird durch **Förderung von Konsortien** erreicht. Dieser Form der Förderung sollte daher das größte Gewicht zukommen. Zu Beginn könnte die Förderung ausschließlich in dieser Art durchgeführt werden.
- Die Einrichtung von **Zentren** unter Beteiligung von wissenschaftlichen Einrichtungen und Industriepartnern erscheint dann sinnvoll, wenn eine inhaltlich besonders überzeugende Idee zugrunde liegt und der Weg zur Anwendung klar vorgezeichnet ist. Insbesondere können diese Zentren aus zuvor geförderten Konsortien entstehen, so dass sie erst in einer späteren Förderphase in Erscheinung treten.
- Ein kleiner Teil der zur Verfügung stehenden Fördersumme soll für **Öffentlichkeitsarbeit, Workshops und Sabbaticals** verwendet werden.

Die Forschungsthemenfelder für öffentliche Ausschreibungen sollten sich an den Überschriften der Unterkapitel orientieren:

- **Quanten Computing**
- **Quanten Sensorik**
- **Quanten Kommunikation**
- **Übergreifende theoretische Modelle**
- **Schlüsseltechnologien für Quantensysteme**

KONTAKT

qutega@mpl.mpg.de  
www.qutega.de