

Fraunhofer-Forschungsfokus

Reimund Neugebauer (Hrsg.)

Quanten- technologien



Fraunhofer
VERLAG

Quantentechnologien

Reimund Neugebauer
(Hrsg.)

Quantentechnologien

Fraunhofer Verlag

Kontaktadresse:

Zentrale der Fraunhofer-Gesellschaft
Hansastraße 27 c
80686 München
Telefon +49 89 1205-0
info@fraunhofer.de
<https://s.fhg.de/quantentechnologien>
www.fraunhofer.de

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek:
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.de> abrufbar.

ISBN (Printausgabe) 978-3-8396-1869-1
ISBN (E-Book) 978-3-8396-1870-7

Satz: C.H.Beck.Media.Solutions, Nördlingen
Druck und Weiterverarbeitung: RCOM Print GmbH, Würzburg

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© Fraunhofer Verlag, 2022
Nobelstraße 12
70569 Stuttgart
verlag@fraunhofer.de
www.verlag.fraunhofer.de

als rechtlich nicht selbständige Einheit der

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung
der angewandten Forschung e. V.
Hansastraße 27 c
80686 München
www.fraunhofer.de

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

Inhaltsverzeichnis

Der Quantensprung vom Labor zur Anwendung	13
1 Quantenlösungen – jenseits der »klassischen« Grenzen	13
2 Von der ersten zur zweiten Quantenrevolution	14
3 Technologische und wirtschaftliche Perspektiven	16
Einschätzungen und Perspektiven zum Stand der Entwicklung	19
1 Wege zu einer neuen Schlüsseltechnologie	19
1.1 Motivation und Inspiration	19
1.2 Innovation und Quantenökosysteme	20
1.3 Bewertung des Status quo und Ausrichtung zukünftiger Entwicklungen	23
2 Aktuelle technologische Herausforderungen	26
2.1 Integration und Hochskalierung	26
2.2 Quanteninfrastrukturen	30
3 Aktuelle strategische Herausforderungen	34
4 Tribut und Perspektiven	38
 Quantensensorik	 43
Möglichkeiten der Sensorik in einer neuen Welt	45
Stickstoff-Fehlstellen-Zentren: Quantensensor für Magnetfelder	49
1 Einleitung	49
2 Quantenmagnetometrie mit NV-Zentren	50
2.1 Vorteile	55
2.2 Limitierende Faktoren	56
2.3 Überwindung von Begrenzungen mit dem Weitfeld-Magnetometer	58
2.4 Das Instrument	59
3 Entwicklung spezifischer Diamanten für das Weitfeld-Magnetometer	62
3.1 Diamantsubstrate, homoepitaktisches Wachstum und stickstoffdotierte δ -Schichten	62

4 Anwendungen	66
4.1 Messung von magnetischen Nanopartikeln	67
4.2 Materialwissenschaft – Stahllegierungen	71
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	74
6 Danksagungen	75
7 Literaturverzeichnis	76
Durchflussmessung auf Basis der Quantenmagnetometrie	79
1 Quantenmagnetometrie mit optisch gepumpten Magnetometern	80
2 Das Konzept der Durchflussmessung auf der Grundlage der Quantenmagnetometrie	82
3 Der Mehrwert für die Durchflussmessung	87
4 Literaturverzeichnis	91
Laserswellen-Magnetometrie	93
1 Die Idee: Verbesserung der Sensitivität durch das Auslesen mittels eines Lasers	93
2 Messung der stimulierten Emission von NV-Zentren	99
3 Magnetfeldabhängige Lichtverstärkung mit starken Signalen und Rekordwerten beim Kontrast	102
4 Literaturverzeichnis	106
Materialprüfung mit optisch gepumpten Magnetometern	109
1 Allgemeine Einführung	110
2 Magnetische Messung von Materialdefekten	110
3 Optisch gepumpte Quantenmagnetometer	112
4 Magnetische Antwort von Ermüdungsprozessen	115
5 Messung magnetischer Ermüdungssignale	117
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	123
7 Literaturverzeichnis	124
Fraunhofer CAP	127
1 Fraunhofer CAP und die britische Perspektive	127
2 Kaltatomsensor-Technologien	129
2.1 Einführung in die Atominterferometrie	129
2.2 Einführung in die Laseranforderungen für Quantensensoren	131
2.3 Entwicklung von Trapezverstärkern	134
3 SPAD für zeitaufgelöste Fernspektroskopie	135
3.1 Fernerkundung von Wasserstoff	135

3.2 Ergebnisse der Fernerkundung von Wasserstoff	138
4 Photonische Integration für Quantensensorik	139
4.1 Integrierte Quellen für Quantenlicht	140
4.2 Mikrooptische Integration für Rastermagnetometer	143
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	146
6 Literaturverzeichnis	146
Quantenbildgebung	151
Quantenbildgebung	153
Literaturverzeichnis	159
Quantenholografie mit nicht detektiertem Licht	161
1 Von der klassischen zur Quantenholografie	162
2 Nichtlineares Interferometer für die bildgebende Darstellung	163
3 Phasenverschiebungs-Holografie	166
4 Quantenholografie mit nicht detektiertem Licht	167
5 Rauschunempfindlichkeit	169
6 Literaturverzeichnis	172
Quanten-Ghost-Imaging mit asynchroner Detektion	175
1 Einleitung	175
2 Quanten-Ghost-Imaging (QGI)	177
3 Ergebnisse	182
4 Bildrekonstruktion	183
5 Relevante Quantenvorteile	185
5.1 Gleichmäßige Energieverteilung: entspannte Sicherheitsgrenzwerte	185
5.2 Inkohärente Quelle: verbesserte Bildqualität	186
5.3 Inhärente Zufälligkeit: Nicht-Detektierbarkeit und besserer Schutz	186
6 Schlussfolgerungen und Ausblick	187
7 Literaturverzeichnis	188
Quanten-Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie	191
1 Einleitung	191
2 Das Quanten-Fourier-Transform-Spektrometer	194
2.1 Korrelierte Photonenquelle	194
2.2 Nichtlineares Interferometer	195
2.3 Spektralanalyse	198

3 Schlussfolgerungen und Ausblick	203
4 Literaturverzeichnis	203
Quantenbildgebung mit nicht-detektierten Photonen	
im mittleren Infrarotbereich	205
1 Quantenbildgebung in nichtlinearen Interferometern	205
1.1 Parametrische Fluoreszenz. Quellen für korrelierte Photonenpaare	206
1.2 Bildgebung mit nicht-detektierten Photonen in nichtlinearen Interferometern	207
1.3 Stand der Technik bei der MIR-Quantenbildgebung	209
2 MIR-Quantenbildgebung mit Kristallen mit großer Apertur in einer Langpass-Interferometer-Konfiguration	210
2.1 Überlegungen zum Aufbau	210
2.2 Aufbau und Ergebnisse	212
2.3 Schlussfolgerungen und Ausblick	215
3 Literaturverzeichnis	215
Terahertz-Spektroskopie mit sichtbaren Photonen	217
1 Einleitung	218
2 Erzeugung von korrelierten Terahertz-Photonenpaaren im sichtbaren Bereich	220
3 Terahertz-Spektroskopie mit sichtbarem Licht	224
4 Quanteninspirierte Terahertz-Spektroskopie mit gepulsten Quellen	228
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	230
6 Literaturverzeichnis	231

Quantenkommunikation **235**

Quantenkommunikation: sichere Kommunikation durch	
Quantenschlüsselaustausch	237
Quantenkommunikationssysteme und -protokolle	239
1 Motivation	239
2 Quantenkommunikationssysteme für optische Netze	241
2.1 Massiv gebündelte Quantenkanäle	241
2.2 Gleichzeitige Übertragung von Quanten- und klassischen Kanälen	244
2.3 Eine Echtzeit-QKD-Versuchsplattform für quantensichere Telekom-Infrastrukturen	246

3 Fazit und Ausblick	251
4 Literaturverzeichnis	251
Satellitengestützte Kommunikation auf Basis von	
Quantenverschränkung am Fraunhofer IOF	253
1 Kommunikation im Weltall auf Basis von	
Quantenverschränkung	253
2 Grundsätzliche Überlegungen zu QKD-Links	255
3 Hochperformante Quellen für verschränkte Photonen	258
4 Fazit und Ausblick	262
5 Literaturverzeichnis	262
Photonische Komponenten für Quantentechnologien	265
1 Einleitung	265
2 Aktive Komponenten für die Integration	266
2.1 Einzelphotonen-Lawinendioden	267
2.2 InP-basierte photonische integrierte Schaltkreise	270
3 Hybride Integration	271
3.1 PolyBoard-Plattform	273
3.2 Mikrooptische Bank	277
4 Fazit und Ausblick	280
5 Literaturverzeichnis	280
Modulare Nanoelektronik für die Quantenkommunikation	283
1 Motivation	284
2 Modulare Elektronikplattform	286
2.1 Chiplet-Technologie	286
2.2 Digitale Signalprozessoren	289
2.3 Analog-Digital-Wandler	290
2.4 Digital-Analog-Wandler	291
2.5 Zeit-Digital-Wandler	292
2.6 Weiterentwicklung der Chiplet-Toolbox	293
3 QKD-Testumgebung für die Schaltungsentwicklung	294
4 Fazit und Ausblick	296
5 Literaturverzeichnis	297
Rauscharme Quantenfrequenzkonverter für den	
Quanteninternet-Demonstrator	299
1 Quanteninternet	300
1.1 Quantennetzwerke	301
1.2 Das Quantum Internet Demonstrator Project am QuTech	304

2 Quantenfrequenzkonversion	305
2.1 Leistungsanforderungen an einen QFC – jedes Photon zählt .	305
2.2 Funktionsprinzip, Konstruktionsherausforderungen und Stand der Technik	306
2.3 NORA – ein rauschreduzierter Ansatz für QFC	307
2.4 Prototypenentwicklung und Erprobung von NORA QFC . . .	309
3 Nächste Schritte	312
4 Literaturverzeichnis	313
Quantencomputing	317
Quantencomputing	319
Quantencomputing – von Materialien bis zur Anwendung . . .	325
1 Siliziumcarbid – ein vielversprechendes Material für das Quantencomputing	326
2 SiC-Halbleitertechnologie und Simulation	329
3 Integration und Materialaspekte für das Quantencomputing . . .	332
4 Quantencomputing für Simulation und Optimierung	336
5 Schlussfolgerungen und Ausblick	340
6 Literaturverzeichnis	341
Nutzung der Mikroelektronik für große Quantencomputing- Hardware	343
1 Einführung – Hardware für das Quantencomputing	344
1.1 Qubit-Plattformen – ein technologischer Überblick	345
2 Herausforderungen auf dem Weg zu nutzbaren Systemen	346
3 Konkretes Potenzial für Segmente des Quantencomputer- Stacks	348
3.1 Supraleitende Qubits	348
3.2 Spin-basierte Quantenpunkt-Qubits	351
3.3 Photonische Qubits	352
3.4 Neutrale Atome	354
3.5 2D- und 3D-Integration	355
3.6 Co-Integration mit CMOS-Logik	356
4 Schlussfolgerungen und Ausblick	357
5 Literaturverzeichnis	358
Fehlercharakterisierung, -minderung und -korrektur	361
1 Charakterisierung von Quantengatterfehlern	362
1.1 Von der Prozess- zur Gate-Set-Tomografie	362

1.2 Quantenprozesstomografie mit langen Sequenzen	366
1.3 Charakterisierung der Übersprecheffekte	368
2 Fehlerminderung	369
3 Quantenfehlerkorrektur	374
3.1 Klassische Fehlerkorrektur	375
3.2 3-Qubit-Bitflip-Code	376
3.3 Schwellenwerttheorem des fehlertoleranten Quantencomputings	377
4 Literaturverzeichnis	379
Quanten-HPC-Algorithmen und Workflows	381
1 Motivation: Quantencomputer als Beschleuniger von HPC-Systemen	381
2 Technologien und Ansätze	382
3 Hybride Simulation auf der Algorithmenebene	383
4 NISQ-Quantenanwendungen	385
5 Auf dem Weg zu hybriden HPC/Quanten-Workflows	388
6 Charakterisierung hybrider Workflows und Algorithmen	389
7 Wichtige Parameter für die Integration von QC in HPC-Systeme	390
8 Schlussfolgerungen und Ausblick	392
9 Literaturverzeichnis	393
Quantum Machine Learning	395
1 Einleitung	395
2 Was ist Machine Learning?	396
3 Was ist Quantencomputing?	397
4 Was ist Quantum Machine Learning?	400
5 Gegenwärtige Einschränkungen für QML	405
6 Vorschläge für QML in der NISQ-Ära	409
7 Schlussfolgerungen und Ausblick	411
8 Literaturverzeichnis	412
Qompiler: Interoperabler und standardisierter	
Quanten-Software-Stack	415
1 Einleitung	416
2 Fortschritt über den Stand der Technik hinaus	417
3 Notwendigkeit eines standardisierten Software-Stacks	419
4 Qrisp: Höhere Quantenprogrammiersprache	422
5 Standardisierbare Schnittstelle	424
6 Nutzungsmöglichkeiten	426

7 Schlussfolgerungen und Ausblick	427
8 Literaturverzeichnis	428
Ansätze für die strukturierte Entwicklung, das Testen und den Betrieb quantenbasierter ICT-Systeme	429
1 Einleitung	430
2 Verwandte Arbeiten	430
3 Quantum DevOps	431
4 Überblick über Tools für Quantum DevOps	435
4.1 Tools für den DEV-Teilzyklus	435
4.2 Tools für den OPS-Teilzyklus	437
4.3 Allgemeine DevOps-Automatisierung	438
5 Benchmarking für Quantum DevOps	439
5.1 Transpilierung und Quantenschaltkreis-Optimierung	440
5.2 Simulationen unter geeigneten Rauschmodellen	441
5.3 Entscheidung über das QPU-Backend	442
5.4 Ausführung auf der QPU	443
6 Anwendungsfälle	444
6.1 Problem des Handlungsreisenden in Quantum DevOps	444
6.2 Variationelle quantenrevolutionäre neuronale Netze mit verbesserter Bildkodierung für die Bildklassifizierung	447
7 Fazit und Ausblick	450
8 Literaturverzeichnis	451
Fraunhofer-Kompetenznetzwerk Quantencomputing	453
1 Fraunhofer-Kompetenznetzwerk Quantencomputing: Ziel und Struktur	453
2 Fraunhofer als Wegbereiter für Forschung und Industrie	455
3 Aktuelle Projekte mit dem IBM Quantum System One	457
4 Schlussfolgerungen und Ausblick	459
5 Literaturverzeichnis	460
Autorenverzeichnis	461

Der Quantensprung vom Labor zur Anwendung

Vorwort des Präsidenten der Fraunhofer-Gesellschaft

Reimund Neugebauer

1 Quantenlösungen – jenseits der »klassischen« Grenzen

Technologischer Fortschritt bildet das Rückgrat der modernen Gesellschaft. Viele wirtschaftliche und gesellschaftliche Errungenschaften unserer Zeit beruhen auf der rasanten Weiterentwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie. Diese ist getrieben durch immer weiter zunehmende Miniaturisierung, Geschwindigkeit, Zuverlässigkeit, Sicherheit und Effizienz. Die Entwicklung zeigt sich deutlich in dem berühmten Moore'schen Gesetz: Es beschreibt die billionenfache Steigerung der Leistungsfähigkeit von Computerchips in den letzten 60 Jahren. In jedem Jahrzehnt waren innovative Technologien erforderlich, um die Größe von Transistoren kontinuierlich vom Mikrometer- auf den Nanometerbereich zu reduzieren. Moderne Transistorbauteile haben nur noch eine Dicke von wenigen Atomen, was einer weiteren Miniaturisierung entgegensteht. Grundlegende Begrenzungen dieser Art können demnach den weiteren technischen Fortschritt aufhalten und erfordern disruptive Innovationen.

Quantentechnologien (QT) bieten vielversprechende, potenziell disruptive Lösungen für zahlreiche Problemstellungen. Zu den wichtigsten Vorteilen der Quantentechnologien gehören höhere Effizienz, Sicherheit und Präzision sowie neue Anwendungsmöglichkeiten in vielen Bereichen wie Informatik, Telekommunikation, Produktionstechnik, Medizin-

technik und Weltraumforschung. Auch zur Erreichung globaler Ziele wie Nachhaltigkeit und Umweltschutz könnte eine weitere Entwicklung und breitere Anwendung der Quantentechnologien wesentliche Beiträge leisten. Obwohl die Quantentechnologien noch eine relativ junge Disziplin mit vielen Herausforderungen und offenen Fragen sind, bieten sie ungeahnte Vorteile und einzigartige neue Möglichkeiten.

Aus diesen Gründen entwickelt Fraunhofer Schlüsseltechnologien für das Quantenzeitalter. Insbesondere die modulare Kombination solcher Technologien kann die praktische Umsetzung eines breiten Spektrums von QT-Anwendungen beschleunigen.

2 Von der ersten zur zweiten Quantenrevolution

Die rasante Entwicklung der Quantentechnologien begann mit der Entdeckung der quantenmechanischen Gesetze zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Diese Phase wird manchmal als das goldene Zeitalter der Quantenphysik bezeichnet. Große Wissenschaftler wie Max Planck, Niels Bohr und Werner Heisenberg legten den Grundstein für die moderne Physik. Dies spiegelte sich in zahlreichen Nobelpreisen und einer beispiellosen öffentlichen Aufmerksamkeit für die Grundlagenforschung wider.

Insbesondere die **Phänomene des Quanten-Tunneleffekts, der Quantensuperposition und der Quantenverschränkung**, die mit den Konzepten der klassischen Physik nur schwer zu erfassen sind, haben unser Verständnis der atomaren und subatomaren Welt revolutioniert. Sie bilden die Grundlage für heutige QT-Anwendungen.

- In der klassischen Physik können sich Teilchen nur dann über eine Barriere bewegen, wenn ihre Energie hoch genug ist. Quantenteilchen hingegen können unter bestimmten Bedingungen eine Barriere auch mit niedrigerer Energie passieren. Dies wird als **Tunneleffekt** bezeichnet.

- Im populärwissenschaftlichen Sprachgebrauch wird die **Quantensuperposition** häufig so beschrieben, dass Quantensysteme gleichzeitig in verschiedenen Zuständen existieren können, bis eine Beobachtung stattfindet. Der Physiker Erwin Schrödinger hat dies in seinem berühmten Gedankenexperiment veranschaulicht: Eine Katze wird mit einem Fläschchen mit giftigem Gas in eine Kiste gesperrt. Der probabilistische Zerfall eines Atoms entscheidet über die Freisetzung des Gases. Die Katze befindet sich in einer Überlagerung von zwei Zuständen – lebendig und tot zugleich –, bis die Kiste geöffnet und dadurch ein eindeutiger Zustand erkennbar und somit festgelegt wird.
- Die **Quantenverschränkung** beschreibt das Verhalten von Teilchen, die abstandsunabhängig miteinander verbunden bleiben. Jede Einwirkung auf ein Teilchen beeinflusst das andere Teilchen auf korrelierte Weise. Obwohl selbst Albert Einstein diesem Prinzip skeptisch gegenüberstand und von »spukhafter Fernwirkung« sprach, kommt es zur Anwendung im Bereich der Quantenkryptografie oder des sogenannten Ghost-Imaging.

Theoretische Erklärungen von Quantenphänomenen haben zu einem tieferen Verständnis wichtiger Naturgesetze bei chemischen Wechselwirkungen oder der Kernspaltung und Kernfusion geführt. Später bildete die Nutzung der Quantenprinzipien für große Quantenensembles die Grundlage für zahlreiche Innovationen: Die Erfindung des Lasers, der Halbleitertechnologie und der Magnetresonanztomografie hat unser Leben grundlegend verändert. Diese Technologien waren Teil der »ersten Quantenrevolution«.

Die Kontrolle über einzelne Quantensysteme wie separierte Atome, Elektronen und Photonen wurde jedoch erst mit der »zweiten Quantenrevolution« möglich, die vor etwa 20 Jahren begann und immer noch andauert. Sie ermöglicht viel kleinere und empfindlichere Geräte, erfordert aber auch nahezu perfekte Bedingungen und Werkzeuge, um Nanosysteme mithilfe der Quantengesetze einstellen und manipulieren zu können.

Der Reifegrad der Quantentechnologien ist in den letzten Jahrzehnten rapide gestiegen, was auch auf enorme Fortschritte in der klassischen Technologie zurückzuführen ist. Auf der Hardware-Seite sind hochkomplexe Materialien, ausgefeilte Fertigungstechniken, sehr nied-

rige Temperaturen, Hochvakuum und hochempfindliche Signaldetektion erforderlich. Gleichzeitig bedarf es einer enormen Rechenleistung, um Quantensysteme im Detail zu verstehen und präzise zu kontrollieren. All diese Voraussetzungen sind technisch machbar geworden. Damit haben wir den nächsten historischen Meilenstein erreicht: Die Quantentechnologien der zweiten Generation hat die Grenzen des Labors verlassen und ist in den Bereich der angewandten Forschung vorgedrungen, die den Weg bereitet für noch viele disruptive Innovationen.

3 Technologische und wirtschaftliche Perspektiven

Zu den wichtigsten Anwendungsfeldern der Quantentechnologien gehören **Quantensensorik, Quantenbildgebung, Quantenkommunikation** und **Quantencomputing**.

Quantensensoren nutzen die außergewöhnliche Empfindlichkeit von Quantensystemen, und ermöglichen somit eine beispiellos hohe Auflösungsqualität und Präzision bei schnellerem Betrieb und geringeren Kosten. Dies macht sie für ein breites Spektrum von Anwendungen attraktiv, etwa in der Mobilität, im Gesundheitswesen oder für das Internet der Dinge. Quantensensorik ist auch der bisher am weitesten ausgereifte Bereich der Quantentechnologien. Herausragende Beispiele sind Atomuhren und Quantenmagnetometer für medizinische Anwendungen. Quantengravitationssensoren versprechen eine präzise Kartierung des Untergrunds für die geologische Bodenerkundung, das Bauwesen und die Archäologie. Fraunhofer erforscht unter anderem im Leitprojekt »QMag« neue Möglichkeiten zur Messung kleinster Magnetfelder für den industriellen Einsatz, chemische Analysen und die zerstörungsfreie Materialprüfung.

Quantenbildgebung ist ein photonischer Ansatz, der insbesondere im Bereich der Biomedizin empfindliche, rauschunterdrückte und hochauflösende Bildgebung ermöglichen kann. Ein Beispiel ist das Ghost-Imaging, das sich das Prinzip der Quantenverschränkung zunutze macht. Ein Objekt kann auf diese Weise gleichzeitig mit störungsunempfindli-

cher Infrarot- oder Terahertzstrahlung und sichtbarem Licht, das keine teuren Detektoren erfordert, analysiert werden. So lassen sich die Vorteile zweier Spektralbereiche in einem System kombinieren, was im Vergleich zur klassischen Bildgebung höhere Qualität zu geringeren Kosten ermöglicht. Aktuell erforscht Fraunhofer neuartige Sensoranordnungen, Einzelphotonenquellen und photonische Komponenten für die Entwicklung fortschrittlicher Lösungen für die Quantenbildgebung. Das Leitprojekt »QUILT« lieferte hierzu bereits wertvolle Grundlagen.

Quantenkommunikation und -kryptografie ermöglichen höchste Sicherheit, die auf den Gesetzen der Quantenphysik beruht. Das entscheidende Ziel ist, unter Verwendung einzelner Photonen als Informationsträger die Datenübertragung fundamental zu sichern. Dieser Ansatz wurde bereits demonstriert, um eine sichere Kommunikation zwischen verschiedenen Städten via Satellit oder Glasfaser zu ermöglichen. Die Technologie ist insbesondere für Regierungs- und Finanzinstitutionen von höchstem Interesse. Eine erste quantensichere Videokonferenz dieser Art zwischen deutschen Bundesbehörden wurde 2021 mit Unterstützung von Fraunhofer im Rahmen der BMBF-Initiative »QuNET« durchgeführt. Hauptaufgaben für die anwendungsorientierte Forschung liegen in der Entwicklung von Schlüsseltechnologien wie Photonenquellen, effizienten Detektoren und sicheren Quantenkanälen.

Quantencomputer arbeiten mit Qubits als Informationseinheit. Im Gegensatz zu klassischen Bits können diese nicht nur die beiden Zustände 0 und 1 kodieren, sondern sie machen sich auch das Superpositionsprinzip zunutze, bei dem sich zwei gleiche physikalische Größen überlagern. Quantencomputer können deshalb mit einer einzigen Abfrage Berechnungen durchführen, für die ein klassischer Computer mehrere Schritte benötigt. Sie haben daher das Potenzial, die grundlegenden Beschränkungen klassischer Digitalrechner zu überwinden. Vielversprechende Anwendungen werden u. a. in den Bereichen Logistik, Kryptografie, Arzneimittelentwicklung, Finanzanalyse und Materialwissenschaft gesehen. Quantencomputing gilt damit als Schlüsseltechnologie für die IT der Zukunft und birgt ein enormes wirtschaftliches Potenzial. Allerdings erfordert es nicht nur die perfekte Kontrolle über gut isolierte einzelne Quantensysteme (Qubits), sondern auch die perfekte Koordination mehrerer Qubits untereinander. Die besten Computer enthalten heute Dutzende von Qubits. In Zusammenarbeit mit Fraunhofer

wurde 2021 der IBM Quantum System One in Ehningen in Betrieb genommen und ist der derzeit leistungsfähigste Quantencomputer in Europa. Ziel der Forschung ist es, Quantenüberlegenheit zu erreichen, d. h. Quantencomputer zu entwickeln, die Probleme lösen, die mit digitalen Computern nicht oder nur sehr langsam gelöst werden können. Dafür forscht Fraunhofer sowohl an Quanten-Hardware und Enabling-Technologien (u. a. in Mikroelektronik, Photonik, Packaging, Kryotechnik, Vakuum- und Hochfrequenztechnik) als auch an anwendungsnahe Algorithmen und Konzepten für Quantum Machine Learning.

Gesamtlösungen der zweiten Quantengeneration sind die Grundlage für viele disruptive neue Technologien, die in naher bis mittelfristiger Zukunft zahlreiche Anwendungsbereiche revolutionieren können. Das QT-Marktvolumen wird bis zu den 2030er-Jahren weltweit voraussichtlich einen zweistelligen Milliardenbetrag erreichen – mit stark steigender Tendenz. Das riesige Potenzial ist inzwischen in Wissenschaft, Industrie und Politik allgemein anerkannt und führt zu einem starken Wettbewerb bei staatlicher Finanzierung, Neugründungen und bei FuE-Aktivitäten führender Technologieunternehmen. Dies hat inzwischen weltweit eine Art Quantengoldrausch ausgelöst.

Um die deutsche Hightech-Industrie auf diesem zukunftsweisenden Gebiet zu verankern, hat die Bundesregierung 2020 gemeinsam mit einem Fachgremium unter Fraunhofer-Beteiligung eine Quanten-Roadmap entwickelt.

So vielfältig wie die technologischen Möglichkeiten sind auch die Anwendungsfelder der Quantentechnologien. Wir stehen kurz davor, ihr enormes Potenzial zur Lösung der drängenden Fragen unserer Zeit nutzen zu können. Jetzt kommt es darauf an, dass die Quantentechnologien die Forschungslabore verlassen, zur Reife gebracht und in reale Lösungen umgesetzt werden.

Als Innovationsmotor mit wissenschaftlicher Exzellenz, Anwendungsorientierung und einer engen Verknüpfung zur Industrie wird die Fraunhofer-Gesellschaft die Quantentechnologien auf den Weg in die praktische Anwendung bringen, um die großen Herausforderungen unserer Zeit zu bewältigen und unsere industrielle Wettbewerbsfähigkeit nachhaltig zu stärken.

Einschätzungen und Perspektiven zum Stand der Entwicklung

»Quantenmehrwert« und »Quantenvorteil« als Indikatoren für wettbewerbsfähige industrielle Anwendungen und leistungsfähige öffentliche Infrastrukturen

Andreas Tünnermann, Torsten Siebert

1 Wege zu einer neuen Schlüsseltechnologie

1.1 Motivation und Inspiration

Sind die Eigenschaften von Materie und Energie auf der Ebene einzelner Quanten hinreichend zugänglich und kontrollierbar, um als Grundlage für eine gänzlich neue Klasse an von Technologien zu dienen? Können mit diesem Ansatz Fähigkeiten und Leistungsparameter weitab von heutigen Industriestandards etabliert werden? Vor einem Jahrzehnt wurden diese Fragen durch die Verleihung des Nobelpreises für Physik an Serge Haroche und David Wineland in 2012 mit einem eindeutigen Ja beantwortet. Stellvertretend für die Errungenschaften einer größeren Gemeinschaft von Pionieren auf diesem Gebiet verkörpern die Arbeiten zum Nobelpreis einen neuen technologischen Ansatz, der auf einer praktischen Nutzung der einzigartigen und nicht intuitiven Eigenschaften von diskreten Quantenzuständen basiert. Dieses Leitmotiv zeigt sich in allen Aspekten der Entwicklung zu Quantentechnologien der zweiten Generation. Motiviert durch Bestrebungen zu neuen und stringenten Definitionen im internationalen System der Einheiten, hat die Metrologie

einzelner Quanten den Weg für quantenbasierte Messtechnik eröffnet. In Kombination mit Effekten, die auf Verschränkung und »squeezed« Quantenzuständen beruhen, bieten **Quantenimaging** und **Quantensensoren** einen Weg zu neuen Größenordnungen an Empfindlichkeit, Präzision und Genauigkeit in diversen Anwendungsbereichen. Die konsequente Prüfung von grundlegenden Eigenschaften der Verschränkung durch lückenlose Bell-Tests, Grundlagenexperimente zur Demonstration von Quantenteleportation sowie ein tieferes Verständnis der Quantenoptik und der Gesetzmäßigkeiten des Zufalls bei Quantenmessungen sind weitere Meilensteine. Diese bilden heute die Grundlage für aktuelle Entwicklungen zu sicheren und leistungsfähigen digitalen Infrastrukturen im Bereich der **Quantenkommunikation**. Die Manipulation einzelner Quanten, Strategien zur kohärenten Kontrolle und viele der bereits oben skizzierten Aspekte haben quantenbasierte Logikoperationen und Gatter für grundlegend neue und leistungsstarke Rechenmethoden im Bereich des **Quantencomputings** ermöglicht. Diese Entwicklungen eröffnen einen neuen Informationsstandard, der auf Quantenbits oder »Qubits« basiert. Es besteht die Aussicht auf eine Skalierung von Rechenkapazitäten weitab von etablierten Technologien, die auf klassischen »Bits« beruhen. Alle oben genannten Entwicklungen sind in Quantentechnologien der zweiten Generation vereint. Hierzu dienen einzelne Photonen, Elektronen, Atome, Moleküle und Aggregate als Träger wohldefinierter Quantenzustände und bilden somit die technologischen Bausteine einer neuen Disziplin unter dem Stichwort »*Quantum Engineering*«.

1.2 Innovation und Quantenökosysteme

Hochdotierte Förderprogramme adressieren das technologische Potenzial der oben skizzierten Entwicklungen zu Quantentechnologien der zweiten Generation. Die zugrunde liegende Mission nationaler Förderinitiativen weltweit wird im Titel des Rahmenprogramms der Bundesregierung »Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt« sehr prägnant zusammengefasst. Unter diesem Leitmotiv wird eine technologische Reife angestrebt, die eine zeitnahe Realisierung von kompetitiven Industrieanwendungen ermöglicht und zudem die Bewäl-

tigung von akuten gesellschaftlichen Herausforderungen mit einzigartigen und leistungsfähigen Eigenschaften von quantenbasierten Innovationen unterstützt. Die aktuelle öffentliche Förderung wird zudem mit privaten Investitionen in der Forschungs- und Innovationsagenda der Industrie sowie beträchtlichem Risikokapital begleitet und durch eine globale Proliferation an Inkubatoren und Start-ups in allen potenziellen Anwendungsbereichen gekennzeichnet. Diese Entwicklungen sind ein starker Indikator für den signifikanten Fortschritt zur **technologischen Reife** und einem effektiven Transfer dieser Technologien aus der Forschung in die Industrie. Auf dem aktuellen Stand der Entwicklungen sind Quantentechnologien zu einem wichtigen Faktor für die kompetitive Positionierung in zukünftigen Hightech-Märkten und der strategischen Ausrichtung der Wirtschaft im globalen Wettbewerb geworden. Ein beträchtlicher Anteil des privaten Kapitals und öffentlicher Ausgaben sollte aber als zukunftsorientierte, mittel- bis langfristige Investitionen betrachtet werden. In den meisten Bereichen sind weiterhin erhebliche Anstrengungen erforderlich, um die hohen technischen Anforderungen anspruchsvoller Anwendungsszenarien zu erfüllen. Die Ökosysteme zu dieser zukünftigen Schlüsseltechnologie bilden sich aber bereits heute, und die wichtigsten Akteure in Forschung und Industrie positionieren sich derzeit in zentralen Entwicklungen und grundlegenden Technologien. Diese Aktivitäten werden vom gezielten Aufbau strategischer Schutzrechte und Patentfamilien begleitet. Ein verzögerter Einstieg in diese Entwicklungen zu einem Zeitpunkt höherer technologischer Reife kann zu einem nachteiligen, möglicherweise unüberwindbaren Rückstand oder zum Verlust von Handlungsfreiheit bzw. »*freedom-to-operate*« auf diesem Gebiet führen. Die umfangreichen Erfahrungen und der langfristige Aufbau von Kompetenzen, die für eine wettbewerbsfähige Umsetzung industrieller Anwendungen erforderlich sind, unterstreichen die Notwendigkeit von frühzeitigen Investitionen und einem Engagement nach dem Prinzip »*Quantum Ready*«.

Kooperationsmodelle mit unterschiedlichen Anteilen aus öffentlichen und privaten Mitteln und Ressourcen bieten neue, institutionsübergreifende Konstellationen der Zusammenarbeit, die grundsätzlich in »*Public-private*«- oder »*Private-private*«- und »*Public-public*«-Szenarien unterteilt werden können. Innovative Kooperationsmodelle können einen entscheidenden Beitrag leisten, indem der hohe Schwellwert für

Industrieanwendungen gesenkt, der Weg zur Marktreife verkürzt und die Entwicklung öffentlicher Infrastrukturen beschleunigt wird. Gemeinsame **»Public-private«-Unternehmungen** sind besonders effektiv bei der Bewältigung von kostenintensiven Infrastrukturmaßnahmen mit hohem Aufwand in Forschung und Entwicklung (F&E), insbesondere bei der Integration von Quanteninformationstechnologien in terrestrische Kommunikationsnetze, Hochleistungsrechenzentren oder Satellitensysteme. Reine Industriekonsortien in Joint Ventures oder in der Konstellation eines **»Private-private«-Verbunds** adressieren Anwendungsbereiche mit hohem Marktpotenzial, vorteilhaft realisiert in der gemeinschaftlichen Nutzung und Evaluation von Quantencomputing-Plattformen über unterschiedliche Industriesektoren hinweg. Internationale Zusammenarbeit zwischen öffentlichen Institutionen und Einrichtungen in **»Public-public«-Kooperationen** bietet eine geeignete Plattform für übergreifende, strategische Entwicklungen. Prominentes Beispiel ist die Initiative nationaler metrologischer Institute und Normungsbehörden zur systematischen Beförderung von Standards und Normen als Grundlage für zukünftige Wertschöpfungsketten und wettbewerbsfähige Ökosysteme. **Öffentliche Forschungs- und Transferinfrastrukturen** erweisen sich derzeit als effektiver Weg zum Aufbau von Liefer- und Wertschöpfungsketten als Basis einer neuen Quantenindustrie, indem Prüfstände, Teststrecken, Anwendungslabore und Rechenzentren sowie vorwettbewerbliche Fabrikations- und Fertigungsanlagen gebündelt und der Industrie zugänglich gemacht werden. Diese Strategie ist für die Beförderung von Start-ups sowie klein- und mittelständischen Unternehmen (KMU) von besonderer Bedeutung. Mit dem Zugang zu hochwertigen F&E-Infrastrukturen kann sich das besonders ausgeprägte Innovationspotenzial von Start-ups und KMU kompetitiv und agil entwickeln und somit einen entscheidenden Faktor für die Formierung von wettbewerbsfähigen Quantenökosystemen darstellen.

1.3 Bewertung des Status quo und Ausrichtung zukünftiger Entwicklungen

Das hohe technische Potenzial und die Faszination zu den außergewöhnlichen wissenschaftlichen Methoden waren bislang eine wesentliche Triebkraft in der initialen Phase der Entwicklung zu Quantentechnologien der zweiten Generation. Die Eleganz des technologischen Ansatzes für sich allein wird aber auf Dauer kein ausreichender Motivator sein, um diese neue Schlüsseltechnologie erfolgreich in die industrielle Anwendung zu überführen. **Kosten, Leistungsfähigkeit und Praktikabilität** sind zentrale Kriterien, die den Wettbewerb dieser neuen Technologie mit etablierten, klassischen Ansätzen kennzeichnen. Hohe technische Anforderungen, intrinsisch lange Entwicklungszeiten und kostspielige Basistechnologien sind zudem große Hürden angesichts der Skalierbarkeit vieler klassischer Lösungen zu wesentlich geringeren Kosten. Innerhalb der Gemeinschaft von Forschung und Industrie führen diese Herausforderungen zu einer sehr unterschiedlichen Bewertung bezüglich einer praktikablen und wirtschaftlichen **Integration und Skalierbarkeit** von Quantentechnologien in unterschiedlichen Anwendungsszenarien. Breit gestreute Abschätzungen von Entwicklungszeiten bis zur Marktreife, die sich aus den jeweiligen technischen Herausforderungen ergeben, verhindern zudem den Konsens für Roadmaps zur kompetitiven Entwicklung dieser Technologie.

Der Fortschritt durch zielgerichtete, schnelle Entwicklungen wird auch von grundsätzlichen Fragen nach den vielversprechendsten Ansätzen und leistungsfähigsten Technologien erschwert. Derartige Diskussionen werden in allen Bereichen der Quantentechnologien geführt, aber im Bereich der Plattformentwicklung zum Quantencomputing sind Grundsatzbewertungen am deutlichsten ausgeprägt. Ursache für die unterschiedlichen Einschätzungen ist die Vielzahl an zweistufigen Quantensystemen, die Logikoperationen und Quantengatter universell unterstützen können. Hieraus lässt sich ein breites Spektrum an möglichen Plattfortmtypen ableiten, und bereits die grundsätzliche Unterteilung der Ansätze in Festkörper oder isolierte Systeme in der Gasphase spaltet die Community. Kritische Parameter in Fidelität, Kohärenzzeit, Topologie und

Skalierbarkeit bieten die Grundlage für stichhaltige Argumente für und gegen unterschiedliche Plattformkonzepte. Die breiten Diskussionen zum besten Ansatz umfassen Festkörpersysteme, die auf supraleitenden Schaltkreisen, dotierten Halbleitersystemen oder wohldefinierten Gitterdefekten basieren, wobei NV-Diamant ein prominenter Vertreter der letzten Kategorie darstellt. Komplementäre hierzu sind Systeme, die auf rein photonischen Plattformen aufbauen oder ultrakalte neutrale Atome und Ionen in Kombination mit den entsprechenden (magneto-)optischen oder elektrodynamischen Fallen nutzen. Quasipartikel in topologischen Plattformen sind zudem ein vielversprechendes Langzeitkonzept.

Im internationalen Bereich öffentlich geförderter Projekte sind nahezu alle Plattformtypen in hochdotierten Leuchtturmprojekten vertreten. Zahlreiche Start-ups sind zudem über das Spektrum der oben umschriebenen technologischen Konzepte verteilt, und die Bandbreite an Aktivitäten weltweit wird durch internationale Unternehmen und die Großindustrie unterstrichen, die mehrere Plattformtechnologien in ihrem F&E-Portfolio führen. Beim derzeitigen Stand der Entwicklungen bleibt nach wie vor die Frage offen, welche die besten technischen Lösungen und Plattformkonzepte für unterschiedliche Anwendungsbereiche des Quantencomputings sind. Diese Unklarheit über den besten Ansatz treibt den Fortschritt kompetitiv über alle Plattformtechnologien hinweg. Unabhängig davon, welches Konzept sich letztendlich durchsetzen wird, fördert der aktuelle Wettbewerb signifikanten Fortschritt in allen Bereichen mit hoher Relevanz für ein »*Spin-off*« in andere quantenbasierte oder eine Vielzahl von klassischen Technologien.

Das breite Spektrum an unterschiedlichen Ansätzen und Einschätzungen zur technologischen Reife ist symptomatisch für eine Entwicklung mit hohem technologischem Potenzial, die sich in der Pionierphase befindet. Um eine gute Einschätzung des Status quo zu erhalten und damit die Entwicklungen erfolgreich in die Richtung wettbewerbsfähiger Quanteninnovationen zu lenken, werden systematische Bewertungsmethoden zum Stand der Technik eine zentrale Rolle spielen. Von entscheidender Bedeutung für eine kompetitive Platzierung am Markt sind die Validierung von Funktionen, Benchmarking von entscheidenden Leistungsparametern und der rigorose Vergleich von klassischen und quantenbasierten Ansätzen mit präziser Definition kritischer Anwendungsanforderungen. Diese Strategie lässt sich anhand einer sehr einfachen,

aber gleichzeitig komplexen Frage aus dem Bereich des **Quantencomputings** veranschaulichen: Was ist ein »gutes Qubit«? Sollen Kriterien aus der Perspektive der Hardware-Entwicklung formuliert werden im Hinblick auf die Erfüllung grundlegender Voraussetzungen in Fidelität, Fehlerprofile, breite Konnektivität in Quantenregistern und lange Kohärenzzeiten – oder eher auf den Anforderungen von Software und Anwendungen basieren, beispielsweise mit der Anzahl und Komplexität von durchführbaren Gattern in einer Logiksequenz, gegeben durch »*Circuit Depth*«? Strenge Kriterien, wie am Beispiel des Quantencomputings angedeutet, sind für Entwicklungen auf allen Gebieten der Quantentechnologie unerlässlich.

Die Bewertung und Klassifizierung von unterschiedlichen Leistungsparametern und Protokollen für den Quantenschlüsselaustausch QKD (*quantum key distribution*) mit CV(*continuous variable*)- und DV(*discrete variable*)-Methoden sowie Unterkategorien wie MDI-Ansätzen (*measurement device independent*) stehen im Vordergrund bei den Entwicklungen zur **Quantenkommunikation**. Welcher Standard wird die erste Phase der Anwendungen sicherer Quantenkommunikation als eigenständige (»*stand-alone*«) Technologie ermöglichen? Im Hinblick auf die Realisierung entscheidender Netzwerkelemente wie den Quanten-Repeater ist die Art der Netzwerkarchitektur für die Überwindung der aktuellen Grenzen in Reichweite eine offene Frage. Können leistungsfähige Quantenspeicher die Notwendigkeit vertrauenswürdiger Knoten bzw. »*trusted Nodes*« überwinden und lückenlose Sicherheit über große Entfernungen jenseits von regionalen und interstädtischen Netzwerken ermöglichen? Welche Technologien können die Realisierung von Netzwerken, die die Quantenteleportation und Integration von Quantensimulatoren und Quantencomputern im Sinne eines Quanteninternets am besten unterstützen? Im Bereich der **Quantensensorik** stehen Leistungsparameter aus verschiedenen Ansätzen in Aussicht, die weit über die klassische Messtechnik hinausgehen. Es wird eine Herausforderung für die Methodik der Quantenmetrologie, Innovationen in diesem Bereich zu kalibrieren, Standards für Genauigkeit, Präzision und Empfindlichkeit zu entwickeln und hierdurch die Identifikation von sinnvollen und wettbewerbsfähigen Anwendungsbereichen zu ermöglichen.

Die Notwendigkeit für stringente Leistungskriterien in allen Bereichen der Quantentechnologien ist im Konzept des »**Quantenmehrerts**«

und des »**Quantenvorteils**« treffend zusammenfasst. **Quantenmehrwert** entsteht durch die Einführung von einzigartigen technischen Fähigkeiten und Vorteile quantenbasierter Elemente und Prinzipien, die mit klassischen Ansätzen grundsätzlich nicht lösbar sind. **Quantenvorteil** kann erzielt werden, wenn der quantenbasierte Ansatz klassische Technologien bei einem spezifischen Problem oder Anwendungsszenario eindeutig übertrifft. Mit einer strengen Bewertung der technischen Parameter und einer korrekten Einschätzung der Realisierbarkeit wettbewerbsfähiger Quanteninnovationen anhand dieser und anderer Kriterien kann sich diese Schlüsseltechnologie erfolgreich entfalten und »*Quantum Benefit*« erzielen.

2 Aktuelle technologische Herausforderungen

2.1 Integration und Hochskalierung

Forschung und Entwicklung zur grundsätzlichen Funktion einer quantenbasierten Innovation erfordern sehr spezielle technische Lösungen, und die Herausforderungen hierzu sind oft sehr spezifisch auf die jeweils anvisierten Anwendungsbereiche bezogen. Im Gegensatz hierzu besteht eine breite Klasse an Entwicklungen mit gesamtheitlicher Relevanz für die Integration und Skalierung in allen Kategorien der Quantentechnologien. Diese Entwicklungen werden unter dem Begriff »**Enabling-Technologien**« zusammengefasst. Quantentechnologien entspringen aus der Grundlagenforschung, und die Methoden aus *Proof-of-Principle*-Experimenten müssen in Anwendungsumgebungen übersetzt und den stringenten Anforderungen der Industrie angepasst werden. Der Einsatz von quantenbasierten Funktionsprinzipien erfordert oft stark kontrollierte Umgebungen und komplexe photonische und elektronische Schnittstellen für die elementare Kontrolle und das Auslesen von Quantenzuständen. Ein stabiler Betrieb mit reproduzierbarer Leistung unter hochspezifischen Umgebungsparametern, Abmessungen und Raumbedarf, Wirtschaftlichkeit der Integration und des Betriebs sowie die Aus-

sicht auf signifikante Hochskalierung sind zentrale Punkte, die für einen erfolgreichen Transfer der Technologie in die jeweiligen Anwendungsfelder entscheidend sein werden.

Aus der **Perspektive der Hardware-Entwicklung** werden neue und hohe Anforderungen an etablierte Bereiche wie die **Kryo- und Vakuumtechnologien** gestellt. *Packaging*-Methoden, die aus mikroelektronischen und photonischen Chip-Entwicklungen abgeleitet werden, sowie ein breites Spektrum an klassischen photonischen und elektronischen Integrationstechniken stehen hierbei im Vordergrund. Beispielhaft für die hohen Anforderungen an Integrationstechnik für Quantentechnologien sind verlustarme optische Kopplungen, die Unterdrückung von Wärmeeintrag aus Hochfrequenzsteuerung und Kontrollelektronik, die extrem hohe Anzahl an photonischen oder elektronischen Kopplungen auf begrenztem Raum sowie robuste Materialeigenschaften unter den besonderen Belastungen von kryogenen Temperaturen. An der Schnittstelle zwischen quantenbasierten und klassischen Funktionen spielen photonische Plattformen eine zentrale Rolle. Sie ermöglichen die Einbettung von Quantenelementen in das Umfeld von etablierten Technologien und eine Anbindung an gegenwärtige Standards der Industrie. **Photonische integrierte Schaltkreise** oder PICs (*photonic integrated circuits*) spielen eine Schlüsselrolle für eine praktische und effiziente Kopplung von Quantenfunktionalität mit der nächsten Ebene an klassischer Steuerungselektronik wie **ASICs** (*application-specific integrated circuits*) und **FPGAs** (*field-programmable gate arrays*) oder quantenbegrenzte Signalverstärker. Die Vielzahl an unterschiedlichen Entwicklungsstrategien und Materialsystemen für PICs und photonische Plattformen unterstreicht die Bedeutung für die Integration und Skalierung von Quantentechnologien. Hierbei variieren die Ansätze von monolithischen, hybriden oder heterogenen Strategien für die Kopplung und Integration verschiedenster Funktionalitäten in passiven und aktiven linearen und nichtlinearen optischen und elektrooptischen Elementen. Modulares Design und frei konfigurierbare Architekturen werden für die Bewältigung der technischen Herausforderungen für unterschiedliche Anwendungsszenarien entscheidend sein. Hierzu wird eine breite Palette an Materialsystemen in PICs eingesetzt. Unterschiedliche Ansätze erstrecken sich über die klassische Silizium-Photonik und diverse »On-Insulator«-Konfigurationen bis hin zu heterogenen Mischungen von

neuen und vielversprechenden photonischen Materialien. Neben der Grundfunktionalität einzelner Elemente müssen auch die optischen Eigenschaften in einem breiten Spektrum unterschiedlicher Frequenzen berücksichtigt werden. Dies gilt sowohl für Standard-Telekommunikationsbänder und optische Multiplexing-Strategien als auch für die breite Verteilung an Resonanzen in Atomen und Ionen, die üblicherweise bei Quantentechnologien zum Einsatz kommen. Die Herausforderung der optischen Funktion über große Frequenzbereiche hinweg ist auch bei **Quellen und Detektoren** für deterministische Einzelphotonen und verschränkte Photonenpaare ein zentrales Thema. Diese Entwicklungen stellen eine, wenn nicht sogar die wichtigste Klasse an Enabling-Technologien dar. Kompetitive Leistungsparameter von Quellen und Detektoren sind für die Qualität und Leistungsfähigkeit bei vielen quantenbasierten Technologien maßgeblich. Schlüsselparameter sind Stabilität, Wiederholraten und Quanteneffizienz. Diese anspruchsvollen Funktionen müssen den relevanten Frequenzen der eingesetzten Quantensysteme und den Vorgaben der jeweiligen Anwendungen angepasst werden. Besonders vorteilhaft ist die direkte Integration von abstimmbaren Quellen in der Form von Quantenpunkten oder anderen Einzelphotonen-Emitter sowie der Einsatz durchstimmbarer nichtlinearer Frequenzkonversion mit hoher Effizienz und geringem Rauschen.

Aus der **Perspektive der Software-Entwicklung** sind sehr grundlegende Entwicklungen für die Integration und die effektive Skalierung von Quantentechnologien erforderlich. Diese reichen von Basisfunktionen in Quantencomputing-Plattformen wie **Betriebssystemen** und Programmiersprachen, die die besonderen Eigenschaften und Vorteile der Quantenlogik berücksichtigen, bis hin zu Quantencompiler und Algorithmen, die einer wachsenden Community an Nutzern aus Wissenschaft und Industrie einen intuitiven und unkomplizierten Zugang zu quantenbasierten Rechenmethoden ermöglichen. Protokolle für effektives **Fehler-Management** sowie die Selbstregulierung optimaler Betriebsparameter für Quantencomputing-Plattformen mittels Methoden des maschinellen Lernens und der künstlichen Intelligenz werden ebenfalls eine Schlüsselrolle für die Skalierbarkeit spielen. Diese Methoden können einen Betrieb unterstützen, bei dem das höchstmögliche Niveau an Quantenressourcen in Rechenoperationen gebunden wird und nicht

in einem enormen Ausmaß an Fehlerkorrektur verloren geht. Viele der oben skizzierten Aspekte für Quantencomputing-Plattformen sind zugleich synergetisch mit den Software-Anforderungen bei leistungsfähigen Quantensensoren für den Transfer in spezifische Anwendungsbereiche. Im Bereich der Quantenkommunikation werden stringente Protokolle für die Kontrolle der Hardware-Funktion von wesentlicher Bedeutung sein. Diese Entwicklungen gewährleisten, dass das hohe Niveau an Sicherheit aus quantenphysikalischen Gesetzmäßigkeiten nicht durch operative Aspekte beeinträchtigt wird. **Schlüsselverwaltung** und **Authentifizierung** stehen stellvertretend für eine weitaus größere Satz an wesentlichen Funktionen, die zu dieser Kategorie von Entwicklungen gehören. Operative Aspekte werden auch bei der Integration von QKD-Protokollen in Hochsicherheitsnetzwerke entscheidend sein, indem strenge Anforderungen aus etablierten Systemen und Strategien der klassischen Cybersicherheit bei der Umsetzung von quantenbasierten Methoden berücksichtigt werden.

Hardware- und Software-Entwicklungen sind in hohem Maße voneinander abhängig, und keiner der beiden Bereiche ist vorrangig oder bestimmend für die Ausschöpfung des vollen Leistungspotenzials von Quantentechnologien in der Anwendung. Das Konzept zum **Hardware-Software-Co-Design** bringt diese gegenseitige Abhängigkeit beider Bereiche treffend zum Ausdruck, und dieser Ansatz hat sich zu einer der effektivsten Strategien für schnelle und zielgerichtete Entwicklungen erwiesen. Das Zusammenwirken von unterschiedlichen F&E-Communitys, die normalerweise nicht gemeinsam agieren, vereint auf sehr vorteilhafte Art und Weise das Konzept der »Push-Innovation« aus den Fähigkeiten der Hardware und »Pull-Innovation« aus den Anforderungen der Software und Anwendungen. Eng mit dieser Strategie verbunden sind aktuelle Bestrebungen zur Befähigung von großen Rechenzentren aus dem klassischen HPC (*high performance computing*)-Bereich mit den Ressourcen von Quantenprozessoren und Quantensimulatoren. Hierzu sind Integrationstechnologien auf höchstem Niveau erforderlich, die eine breite, latenzarme physisch Vernetzung zwischen klassischer und quantenbasierter Hardware garantieren und eine optimale Arbeitsaufteilung bzw. einen optimalen *Workflow* zwischen beiden Standards ermöglichen.

2.2 Quanteninfrastrukturen

Die Integration von Quanteninformationstechnologien in die Architektur etablierter Informationssysteme wird mit der stetigen Zunahme an Reife zu einem immer wichtigeren Aspekt bei der Realisierung **sicherer und leistungsfähiger digitaler Infrastrukturen** der nächsten Generation. Diese Entwicklung ist einer der vielversprechendsten Wege zum Aufbau industrieller Ökosysteme. Die Aktivitäten zur Befähigung von klassischen Informations- und Kommunikationsnetzwerken liefern entscheidende Impulse für den Aufbau eines neuen Industriesektors mit einer vorteilhaften Konstellation, um erste **wirtschaftliche Vorteile** mit dieser Technologie zu erzielen. Zugleich bieten leistungsfähige Quantenressourcen in digitalen Infrastrukturen neue Perspektiven für die Bewältigung von dringlichen gesellschaftlichen Herausforderungen. Innovationen im Bereich der Quantenkommunikation und des Quantencomputings stehen für einen Paradigmenwechsel gegenüber klassischen Lösungen bei der Notwendigkeit einer rigorosen Cybersicherheit in modernen Informationsgesellschaften. Sie bieten zudem neue Ressourcen für den großen Bedarf an Rechenleistung für die Simulation und das Verständnis von komplexen Systemen mit Relevanz für gesellschaftliche Entwicklungen. Die potenziellen Auswirkungen der Quanteninformationstechnologien auf diese und weitere Bereiche sind erheblich und erstrecken sich auf das allgemeine Konzept der **technologischen Souveränität selbstbestimmter Gesellschaften** innerhalb der wachsenden Komplexität und Bedeutung globaler Informations- und Kommunikationsnetzwerke.

In diesem Zusammenhang ermöglichen Quantenverschlüsselungs- und Quantenkommunikationstechnologien einen gänzlich neuen Sicherheitsstandard und adressieren hiermit einen grundsätzlichen Bedarf im Bereich der Souveränität staatlicher Informationsnetzwerke und Sicherung von kritischen Infrastrukturen sowie beim Schutz von Interessen der Industrie und Grundrechten einzelner Bürger im fortschreitenden Prozess der Digitalisierung. Quanteninformationstechnologien bieten eine Alternative zur kontinuierlichen Hochskalierung klassischer digitaler Ressourcen von Angreifern und Schutzmaßnahmen in scheinbar endlosen Zyklen. Diese Eskalation führt zu einer ständigen Ungewissheit

über den effektiven Stand der Cybersicherheit. Quantenbasierte Sicherheitskonzepte beruhen auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten von Quantenzuständen und sind von den Algorithmen und mathematischen Strategien aus der klassischen Cybersicherheit weitgehend unabhängig. Mit diesen Eigenschaften zielen mittel- bis langfristige Roadmaps öffentlicher Förderprogramme auf einen Ausbau lokaler QKD-Teststrecken und auf eine Zusammenführung regionaler Quantennetzwerke für den konsequenten Aufbau von **nationalen Quanteninfrastrukturen**. Diese Entwicklung beinhaltet das gesamte Spektrum an Kommunikationssystemen, von Glasfaserinfrastruktur in **terrestrischen Informationsnetzwerken** über Freistrahlsysteme mit hoher Relevanz für neue mobile Telekommunikationsstandards bis hin zu **Satellitensystemen** mit großer Reichweite für sichere globale Netzwerke. Große Herausforderungen ergeben sich aus der Bandbreite an Spezifikationen und Anforderungen aus den sehr unterschiedlichen Netzwerkarchitekturen. Schnittstellen zwischen diesen Netzwerken ohne Verlust an Datenraten oder eine Einschränkung der Sicherheit sind kritische Aspekte in der Realisierung einer gesamtheitlichen Quanteninfrastruktur. Die Interessen und Anforderung aus lokalen Quantennetzwerken und Sektoren, die verschiedene Protokolle in CV- oder DV-Standards nutzen, sowie die stringenten Voraussetzungen für die Integration in etablierte Hochsicherheitsnetzwerke und Berücksichtigung von klassischen Cybersicherheitsstrategien sind weitere signifikante Hürden in der Entwicklung quantengesicherter Infrastrukturen. Die Ungewissheit bei der Entwicklung von hoch anspruchsvollen Schlüsselkomponenten ist ein weiterer kritischer Punkt für die Planung der gesamtheitlichen Netzwerkarchitektur aus Glasfaser-, Freistrahls- und Satellitensystemen. Quanten-Repeater sind beispielhaft hierfür, da die Reichweite und die lückenlose Sicherheit in terrestrischen Systemen maßgeblich von der Realisierung dieser Technologie abhängen. Die wissenschaftlichen und technischen Herausforderungen, die mit einer gesamtheitlichen Netzwerkarchitektur verbunden sind, befördern die internationale Zusammenarbeit auf diesem Gebiet. Vertrauensvolle Partnerschaften, basierend auf ähnlichen nationalen Ökosystemen, sowie bereits etablierte internationale Kooperationen und Forschungsaktivitäten werden eine entscheidende Rolle bei globalen Entwicklungen zu **interkontinentalen Quanten-Links** und internationalen Netzwerken spielen.

Gleichermaßen bietet die Hochskalierung von Quantencomputern grundlegend neue Rechenfähigkeiten für die Bewältigung zentraler Herausforderungen in Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft. Die aktuellen Bemühungen bei der Integration von Quantenprozessoren und Quantensimulatoren in **Supercomputing-Rechenzentren** sind ein herausragendes Beispiel für die Realisierung eines effektiven Transfermechanismus dieser anspruchsvollen und kostenintensiven Technologie. Der hiermit verbundene Einsatz von etablierten digitalen Infrastrukturen ermöglicht einer großen Nutzergemeinschaft aus Forschung und Industrie breiten und frühzeitigen Zugang zu dieser neuen und wichtigen Rechenressource. Gleichzeitig wird die Lücke in der sehr weitreichenden Entwicklung von spezifischen Aufgaben in *Proof-of-Principle*-Szenarien auf kleinen bis mittelgroßen Quantenprozessoren bis hin zur Bewältigung von komplexen Anwendungsproblemen mit großen Quantencomputern überbrückt. Diese Entwicklung kann variabel gestaltet werden in einer flexiblen Kombination aus Quanten- und klassischen HPC-Ressourcen oder in *Stand-alone*-Szenarien quantenbasierter Methoden. Diese Strategie ebnet zudem den Weg für einen sehr leistungsfähigen Ansatz in **hybriden Quanten-HPC-Methoden**, die eine vorteilhafte Synthese aus sehr unterschiedlichen, aber komplementären Ressourcen für anspruchsvolle numerische Probleme bietet. Die Zusammenführung von Quanten- und HPC-Ressourcen in großen Rechenzentren wird weltweit in rein öffentlichen und rein privaten Vorhaben oder gemeinschaftlichen Projekten aus öffentlichen und privaten Mitteln realisiert. Unabhängig hiervon ist diese Bündelung von Ressourcen in Cloud-Plattformen ein besonders vorteilhaftes Szenario für Start-ups in der Hardware- und Software-Entwicklung, um ihre neuen und leistungsstarken Produkte in die Nutzergemeinschaft zu projizieren. Interessanterweise führt dieser Trend auch zu einer Zusammenführung von Rechenplattformen, die auf unterschiedlichen Hardware-Konzepten basieren. Diese Konstellation bietet ein optimales Testfeld für das Benchmarking der Leistungsfähigkeit verschiedener Plattformen zum Quantencomputing für bestimmte Anwendungsbereiche.

Von zentraler Bedeutung bei Einschätzungen zum aktuellen Stand der Entwicklung im Bereich des Quantencomputings ist die Feststellung, dass sich aktuelle Systeme noch im Stadium der **NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum Devices)** befinden. Eine Analyse der Rechenleis-

tung, die sich aus der verfügbaren Anzahl von Qubits in verschiedenen Architekturen und Plattfortmtypen ableiten lassen, ist in diesem Kontext äußerst komplex. Quantenvorteil wurde für einige wenige, sehr spezielle und eigens für diesen Zweck konzipierte Fälle demonstriert, aber aktuelle Entwicklungen befinden sich noch weitgehend in der Phase von *Proof-of-Principle* für verschiedene praktische Anwendungsszenarien. Unabhängig hiervon zeigt sich eine stetige Zunahme an Entwicklungen, die die einzigartigen Aspekte der Quantenlogik und die besonderen Vorteile von quantenbasierten Rechenmethoden konsequent nutzen. Hiernach sind aktuelle Entwicklungen in einer kritischen Phase auf dem Weg zum Quantenmehrwert.

Trotz der enormen Herausforderungen, die mit der Hochskalierung von Quantencomputern verbunden sind, wird weltweit eine konstant hohe Förderung der Weiterentwicklung dieser Technologie aus öffentlichen und privaten Mitteln aufrechterhalten. Um die grundlegende Motivation zu verstehen, können aktuelle Einschränkungen von klassischen Rechenstrategien eine aufschlussreiche Perspektive bieten. Trotz der Entwicklung von HPC-Technologien bis hin zur Exa-Skala sind viele Klassen an **komplexen Systemen** nach wie vor nur durch approximative Simulationen zugänglich und mit signifikanten Fehlermargen und Unsicherheiten verbunden. Die Notwendigkeit von heuristischen Ansätzen und die Frage nach der Konvergenz in iterativen Prozessen begrenzen aktuelle klassische Rechenstrategien trotz jahrzehntelanger Hochskalierung von HPC-Ressourcen. Einige Problemstellungen bleiben in ihrer Komplexität völlig unzugänglich. Quantenbasierte Rechenstrategien eröffnen einen neuen Ansatz mit der Möglichkeit, eine repräsentative statistische Verteilung an Wahrscheinlichkeiten zu zentralen Eigenschaften von komplexen Systemen zu erfassen ohne die Notwendigkeit von Heuristiken und Iterationen. Insbesondere für eine große Klasse von kombinatorischen Optimierungsproblemen, aber noch allgemeiner für Systeme, die üblicherweise durch einen erweiterten Satz von gekoppelten Differenzialgleichungen beschrieben werden, können quantenbasierte Rechenstrategien eine rigorose numerische Behandlung und ein tiefes Verständnis der Komplexität ermöglichen. Der quantenbasierte Ansatz ist so allgemein, dass er sich über **diverse wissenschaftliche Bereiche und Industriesektoren** erstreckt – von Fragestellungen aus Grundlagenforschung, Finanzwesen, Gesundheit und Medizin, Mate-

rialwissenschaften, Energie und IT-Netzwerke, Automobil und Mobilität, industriellen Prozessabläufen und Produktionstechniken bis hin zu Umwelt und Klima sowie viele anderen Themen. Die Skalierung der Rechenleistung bei quantenbasierter Hardware macht die einzigartigen Vorteile noch deutlicher: Im Vergleich zu klassischen HPC-Technologien, die prinzipiell linear mit der verfügbaren Anzahl von Transistoren skalieren, wird der Rechenumfang bei Quantenprozessoren von einer nichtlinearen Zunahme gekennzeichnet, idealerweise 2^N in N -Anzahl von Qubits. Hierdurch wird die Projektion zu signifikanten Rechenfähigkeiten mit progressiver Hochskalierung ermöglicht. Roadmaps der öffentlichen Förderprogramme und der Industrie prognostizieren die Verfügbarkeit einer außergewöhnlichen Rechenleistung aus der heutigen Perspektive von klassischen HPC-Technologien innerhalb dieses Jahrzehnts. Der heutige Stand von Quantencomputing-Plattformen ist jedoch vom NISQ-Regime gekennzeichnet. In diesem Bereich sind umfangreiche Ressourcen für die Fehlerkorrektur gebunden, und Quantenregister sind in ihrer Größe und Konnektivität noch begrenzt. Um die oben skizzierten außergewöhnlichen Fähigkeiten des Quantencomputings zu einem Reifegrad mit Relevanz für anspruchsvolle Anwendungsbereiche zu entwickeln, sind umfangreiche Anstrengungen erforderlich, die große Herausforderungen für Wissenschaft und Technik darstellen.

3 Aktuelle strategische Herausforderungen

Eine Analyse etablierter Industriesektoren kann wertvolle Einsichten liefern, um die Beteiligung der Industrie weiter zu fördern und so den Weg zum wirtschaftlichen Nutzen aus den Entwicklungen zu den Quantentechnologien erfolgreich weiterzugehen. Wettbewerbsfähige industrielle Ökosysteme beruhen in der Regel auf zentralen strategischen Elementen. Besonders relevant sind **Standards und Normen**, geschlossene **Liefer- und Wertschöpfungsketten** und Portfolios von **Schutzrechten und Patenfamilien** in strategischen Bereichen der wichtigsten technologischen Ansätze. Standards und Normen sowie die Zertifizierung von kritischen Funktionen ermöglichen einen aktiven Austausch

von Innovationen und Dienstleistungen und bieten einen Mehrwert an Ressourcen und Kompetenzen innerhalb der Gemeinschaft von Partnern eines Industriesektors. Standards und Normen erleichtern die Zusammenführung vieler technologischer Aspekte einer komplexen Entwicklung oder eines Produkts und sind eine äußerst relevante Strategie zur Erfüllung der interdisziplinären Anforderungen der verschiedenen Bausteine zu Quantentechnologien. Dennoch ist die Definition von Standards für eine neu entstehende Technologie mit Leistungsparametern außerhalb von etablierten Normen der Industrie eine große Herausforderung. Das neue **internationale Einheitensystem**, das vor Kurzem durch die Zusammenarbeit nationaler metrologischer Institute fertiggestellt wurde, ist tief in der Quantenmetrologie verwurzelt und somit ein sehr geeigneter Ausgangspunkt für die Standardisierung. Ohne die wertvollen Grundlagen eines Einheitensystems, das Phänomene auf der Ebene einzelner Quanten berücksichtigt, wäre die weitere Realisierung von Standards und Normen für Quanteninnovationen ein nahezu unüberwindbares Hindernis für den Transfer dieser Technologie in die Industrie. Hinsichtlich der Bedeutung von Standardisierung in etablierten Industriezweigen wird der wirtschaftliche Nutzen aus den Quantentechnologien vor allem Institutionen und Unternehmen offenstehen, die sich aktiv an diesem Prozess beteiligen und die Entwicklung maßgeblich mitgestalten. Die hohe strategische Priorität für eine erfolgreiche Wertschöpfung in den Quantentechnologien spiegelt sich in den aktuellen Initiativen für **Roadmaps zur Standardisierung** wider, die in nationale Förderprogramme eingebettet sind und die Bemühungen nationaler und internationaler Standardisierungsbehörden und metrologischen Institute mit den Aktivitäten von Forschungseinrichtungen und der Industrie koordinieren.

Standards und Normen stehen in direktem Zusammenhang mit Liefer- und Wertschöpfungsketten und sind in ihrem Zusammenwirken für die Industrialisierung von Quantentechnologien von zentraler Bedeutung. Öffentliche Forschungs- und Transferinfrastrukturen sowie Konsortien zu großen, öffentlich geförderten Leuchtturmprojekten erweisen sich als wirksame Keime für die Einbindung der Industrie in Partnerschaften, die erste **Templates für Quantenökosysteme** darstellen. Hierdurch können Netzwerke für Liefer- und Wertschöpfungsketten entstehen. Bereits bei der strategischen Unterstützung dieser Art von Ökosystemen

im Rahmen öffentlicher Förderprogramme ist der Aufbau von erweiterten Lieferketten zu den vielfältigen technologischen Anforderungen von Quanteninnovationen eine große Herausforderung. Besonders im Fall von sicherheitsrelevanten Technologien, die mit hohen Anforderungen bezüglich der Herkunft aller relevanten Komponenten verbunden sind, zeigt sich die Bildung von geschlossenen Lieferketten als komplexe Aufgabe. Ein gutes Beispiel für die Notwendigkeit frühzeitiger Überlegungen zu Lieferketten ist der weltweit eingeschränkte Zugang zu Helium-3, das für die Funktion von Kryotechnologien essenziell ist. Die eingeschränkte Verfügbarkeit dieser Ressource kann sich äußerst nachteilig auf ein breites Spektrum von Entwicklungen auswirken, die für ihre quantenbasierte Grundfunktionen kryogene Temperaturen benötigen. Dieser Umstand befördert Innovationen und neue Konzepte zu kryogener Kühlung mittels adiabatischer Entmagnetisierung oder durch Quantentechnologien, basierend auf Laserkühlung, sowie die alternative Entwicklung von Systemen, die bei höheren Temperaturen funktionsfähig sind. Letztere Strategie kann sich aber als äußerst einschränkend erweisen, und langfristige Lösungen sind unklar.

Probleme in den Lieferketten für mikroelektronische Chips sind ein weiteres Beispiel mit hoher Relevanz für Quantentechnologien. Besonders betroffen sind Industrieunternehmen, die hochwertige und funktionskritische Steuerungselektronik bei der Entwicklung von Quantentechnologien liefern. Die Erkenntnisse aus den Problemen dieser kritischen Lieferkette der Mikroelektronik haben zugleich zu hochdotierten nationalen Förderprogrammen geführt, die auch die Entwicklung und Herstellung von Quantenchips befördern. Die Bedeutung von Lieferketten reicht bis in das übergeordnete politische Thema der **technologischen Souveränität**, bei der die Quantentechnologien eine zentrale Rolle in langfristigen nationalen Förderstrategien spielen. Gleichwertig aus der Perspektive der Wirtschaft ist der Aufbau von Portfolios an Schutzrechten und Patentfamilien in strategischen Entwicklungen der Quantentechnologien. Als Grundlage für die Sicherung des wirtschaftlichen Nutzens ist dieses Thema für die Industrie prioritär zu sehen. Da die Debatte zu den besten technologischen Ansätzen für viele Quantentechnologien noch offen bleibt, lassen sich die Bedeutung und der Wert von Schutzrechten und Patentfamilien in spezifischen Bereichen nur schwer abschätzen. Um die **Handlungsfreiheit** in diesem neuen Tech-

nologiefeld mit vertretbarem Aufwand aufrechtzuerhalten, wird die gemeinsame Nutzung von geistigem Eigentum in Sinne von **»IP Sharing & Pooling«** als wirksame Strategie für Partner aus Forschung und Industrie in großen Konsortien zu öffentlichen und privaten Projekten und Unternehmungen angesehen.

Die oben genannten Themen konzentrieren sich auf die technischen, wirtschaftlichen und politischen Aspekte und Strategien zu einer erfolgreichen Industrialisierung der Quantentechnologien. Es besteht ein weiteres Problem bei der Bildung von erfolgreichen Quantenökosystemen, das durch die sehr schnelle Entwicklung einer ursprünglich akademisch motivierten Gemeinschaft in einer hochspezialisierten Wissenschaft entstanden ist. Als die technischen Implikationen und das wirtschaftliche Potenzial der Quantentechnologien im Laufe des letzten Jahrzehnts deutlich wurden, haben sich die Aktivitäten der Forschung und Industrie von dieser initialen Konstellation aus der Grundlagenforschung stark ausgedehnt. Hierdurch ist die Verfügbarkeit **hochqualifizierter Arbeitskräfte** zu einer der wertvollsten Ressourcen für den Fortschritt in diesem Bereich geworden. Der Bedarf an Arbeitskräften mit einer Ausbildung in Wissenschaftsbereichen oder im Ingenieurwesen mit direktem Bezug zu Quantentechnologien erweist sich als besonders kritisch für den Transfer und die Aufnahme dieser Technologie in der Industrie. Unter dem Arbeitstitel **»Quantum Education«** werden breit angelegte Anstrengungen zusammengefasst, die auf die interdisziplinären Aspekte der Quantentechnologien ausgerichtet sind. Im Mittelpunkt dieser Bemühungen stehen neue Studiengänge und Programme der Hochschulen an der Schnittstelle von Physik, Chemie und Materialwissenschaften, Mathematik und Informatik. Diese Initiativen werden von der Gründung von Lehrstühlen und Graduiertenschulen begleitet, die sich an den laufenden Forschungsaktivitäten orientieren und in die entsprechenden Programme eingebettet sind. Diese Initiativen berücksichtigen und betonen zudem anwendungsrelevante Themen sowie die Ausbildung von berufstätigen, professionellen Fachkräften in den entsprechenden Industriezweigen. Hierdurch bieten Quantentechnologien den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern sowie Ingenieurinnen und Ingenieuren aus diesen Programmen die Aussicht auf eine Karriere in einem Berufsfeld mit weitreichenden technologischen Entwicklungen in neuen High-tech-Branchen mit erheblichem wirtschaftlichem Wachstumspotenzial.

4 Tribut und Perspektiven

Ein Rückblick auf die zentralen Meilensteine, die zum heutigen Stand der Technologien geführt haben, bietet aufschlussreiche Perspektiven zu weiteren Möglichkeiten in zukünftigen Entwicklungen. Außergewöhnliche und grundlegende Errungenschaften wie die Arbeiten von **John Stewart Bell** haben die Entwicklungen eingeleitet, die wir heute als »Quantentechnologien der zweiten Generation« bezeichnen. Mit der Formulierung der Bell'schen Ungleichung im Jahr 1964 und jahrzehntelanges Arbeiten an der Realisierung lückenloser Bell-Tests wurden die nicht intuitive Eigenschaft der Verschränkung und das Verhalten von Systemen auf der Ebene einzelner Quanten als physikalische Realität bestätigt. Unsicherheiten zu möglichen Artefakten aus einer Verschleierung der Quantentheorie durch verborgene Variablen wurden weitgehend ausgeräumt. Diese Gewissheit einer korrekten physikalischen Beschreibung von Quantensystemen zusammen mit einem vertieften Verständnis der Theorie der Quantenoptik und Quantenmessung (**Roy Glauber**, Nobelpreis für Physik 2005) legte den Grundstein für die Nutzung von außergewöhnlichen Quanteneffekten als technologische Bausteine in einer neuen Klasse von Innovationen. Gleichzeitig stellt die Methodik von Bell-Tests die Grundlage für heutige Protokolle in der Quanteninformationstechnologie dar. Hochkreative Denker, beispielhaft vertreten durch **Richard Feynman**, haben diese Grundlagen mit der scheinbar einfachen und sehr klaren Erkenntnis erweitert, dass komplexe Probleme wie Quantensysteme nur durch den Einsatz von quantenbasierten Rechenmethoden und Simulationen richtig abgebildet und hierdurch verstanden werden. Diese Idee setzte das Konzept des Quantencomputings in Bewegung, und die breite Relevanz dieses Ansatzes für allgemeine mathematische Probleme bei komplexen Systemen in diversen Bereichen von Wissenschaft und Industrie wurde schnell erkannt. Die oben ausgewählten Beispiele sind nur ein Ausschnitt eines breiteren Spektrums an grundlegenden Beiträgen, die zur Verleihung des Nobelpreises für Physik in 2012 an **Serge Haroche** und **David Wineland** führten und die wichtige Erkenntnisse zur technologischen Tragweite von Physik auf der Ebene einzelner Quanten etabliert haben.

Viele andere Errungenschaften haben die wissenschaftlichen und technologischen Grundlagen für den Weg zu Quantentechnologien der zweiten Generation geebnet. **Paul-Fallen**, üblicherweise als Ionenfallen bezeichnet (Wolfgang Paul, Hans G. Dehmelt, Nobelpreis für Physik 1989), ermöglichen die Speicherung und Isolation von geladenen Teilchen in einer hochkontrollierten Vakuumumgebung und somit den systematischen Zugang zu Systemen auf der Ebene einzelner Quanten. Diese Technologie ist Ausgangspunkt für Atomuhren der zweiten Generation sowie die Basis für Quantencomputer und Quantensensoren. Die hohe Relevanz von elektrodynamischen Feldern für die kontrollierte Speicherung von Quantensystemen zeigt sich in der schnellen Entwicklung dieser Technologie, die derzeit auf der Chip-Ebene realisiert wird. **Laserkühlung** stellt eine weitere fundamentale Errungenschaft dar und bietet den Zugang zu Quantensystemen bei den bisher niedrigsten bekannten Temperaturen – viele Größenordnungen kälter als der Weltraum und ca. ein milliardstel Grad über dem absoluten Nullpunkt (Claude Cohen-Tannoudji, Steven Chu, William D. Phillips, Nobelpreis für Physik 1997). Laserkühlung ist wiederum Ausgangspunkt für einen grundlegend neuen Zustand der Materie in **Bose-Einstein-Kondensaten** (Wolfgang Ketterle, Eric A. Cornell, Carl E. Wieman, Nobelpreis für Physik 2001) mit enormer wissenschaftlicher und technologischer Bedeutung für das Verständnis und den Zugang zu Quantensystemen in einem derzeit beispiellos hochkontrollierten Zustand.

Das oben skizzierte Ensemble an herausragenden Errungenschaften ist bei Weitem nicht vollständig und sollte nur als sehr prägnante Veranschaulichung der Kette grundlegender Beiträge dienen. Angesichts der bahnbrechenden Arbeiten zum Verständnis **topologischer Phasen der Materie** (David J. Thouless, F. Duncan M. Haldane, J. Michael Kosterlitz, Nobelpreis für Physik 2016) sind weitere Inspirationen auch in Zukunft zu erwarten. Aktuelle Roadmaps zu Quantentechnologien der zweiten Generation werden durch fundamentale Beiträge dieser Art höchstwahrscheinlich immer wieder infrage gestellt werden und somit die Notwendigkeit zu einer Neuausrichtung der Entwicklungen mit sich bringen. Hierdurch unterscheiden sich Quantentechnologien von vielen anderen Entwicklungen, die aus den ersten Erkenntnissen der Grundlagenforschung durch eine weitgehend lineare Innovationskette in die angewandte Forschung und Industrie übertragen werden. Aktuelle

Herausforderungen, die aufgrund von Einschränkungen in Technik und Wissen den Fortschritt scheinbar verhindern, können durch neue Impulse aus der Wissenschaft zu alternativen Wegen und noch leistungsfähigeren Lösungen führen. Diese Dynamik erfordert eine kontinuierliche, langfristige Partnerschaft und einen engen Austausch zwischen der Grundlagenforschung, der angewandten Forschung und der Industrie. Auf diese Weise kann sich das volle Potenzial des technologischen Paradigmenwechsels, der als »Quantentechnologien der zweiten Generation« bezeichnet wird, in voller Tragweite entfalten.

In diesem Kontext kann die Aufstellung von Roadmaps zur Entwicklung von Quantentechnologien der zweiten Generation spannend sein. Diese Roadmaps zu verwirklichen ist wiederum eine bedeutende Herausforderung. Diese Aussage kann mehrfach unterstrichen werden angesichts der technischen und konzeptionellen Hürden, die mit der konsequenten Umsetzung von Roadmaps in die praktische Anwendung verbunden sind. In den nachfolgenden Kapiteln werden angewandte Forschung und Entwicklungen in den Bereichen des Quantenimaging und der Quantensensorik sowie der Quantenkommunikation und des Quantencomputings detailliert dargelegt. Die Arbeiten verfolgen das Ziel, diese Technologien in die Wirklichkeit zu überführen. Die große technologische Tragweite und das Spektrum an außergewöhnlichen Fähigkeiten sowie die potenzielle Bereicherung für Wissenschaft, Industrie und Gesellschaft motivieren die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten.

1 Quanten- sensorik

Möglichkeiten der Sensorik in einer neuen Welt



Einleitung

Rüdiger Quay, Peter Gumbsch

Die Phänomene rund um die mikroskopische Wechselwirkung von Atomen und Molekülen mit elektrischen und magnetischen Feldern sowie andere Formen der mikroskopischen Kopplung sind zahlreich und werden angesichts der vielen Möglichkeiten in der Welt der Quantenmechanik technisch nur zu einem kleinen Teil ausgenutzt.

Quantenmechanische Wechselwirkungen ermöglichen seit ihrer Entdeckung im dritten Jahrzehnt des letzten Jahrhunderts zahlreiche technische Anwendungen. Physikalisch gesehen ergänzen »Quanteneffekte« die große Klasse elektromagnetischer und anderer physikalischer Wechselwirkungen, die auf vielfältige Weise für die Sensorik genutzt werden können – sofern sie aus dem Physiklabor herausgebracht werden können und den Anforderungen und Spezifikationen der realen Sensorik entsprechen. Zwar sind diese Wechselwirkungen nicht grundlegend neu, die Nutzung in spezifischen Konzepten der Sensorik jedoch ist äußerst neuartig, herausfordernd und hochinnovativ und macht Fortschritte in einem atemberaubenden Tempo.

Neue Materialien und Materialqualitäten werden technisch verfügbar und ermöglichen nun die Herstellung von Sensoren neuer Qualität. Sie versprechen Innovationen, die auf einer stark verbesserten Präzision und Empfindlichkeit der Sensorik beruhen. Aufgrund des atomaren Maßstabs der Sensorstrukturen ermöglicht die Quantensensorik neue Eigenschaften wie die ultimative räumliche Auflösung auf nunmehr atomarer Ebene.

Gegenwärtig ist der Fortschritt der Quantensensorik an unsere Fähigkeit gekoppelt, spezielle Materialien, Bauelemente und Systeme zu entwickeln, vorherzusagen, zu simulieren, zu erzeugen, zu verarbeiten und zu skalieren, damit deren Eigenschaften von der makroskopischen Welt übernommen und integriert werden können.

In dieser Hinsicht steht die Quantensensorik erst am Anfang eines sich entwickelnden Bereichs, der jedoch bereits eine Vielzahl von industriellen Anwendungen hervorgebracht hat. In diesem Sinne entwickelt sich die Quantensensorik auf eine eher evolutionäre Weise. Historisch gesehen, war und ist die Quantensensorik mit Magnetometern verbunden, die auf Quanteninterferenzgeräten in Festkörpern und atomaren Dämpfen beruhen. Auch die Verwendung von Atomuhren ist damit verbunden, was wir bereits in anderen Bereichen wie der globalen Positionsbestimmung zu unserem Vorteil nutzen.

Für die technische Realisierung anderer Quantentechnologien, wie zum Beispiel den Qubits für die Datenverarbeitung, sind noch größere Hindernisse zu überwinden. Die Integration und Skalierung von Sensoren umfasst nicht nur die technische Skalierung und Entwicklung der Sensoren an und für sich, sondern auch die Verkleinerung und Skalierung der Art der Ansätze und die Integration der atomaren in die makroskopische Welt. In dieser Hinsicht zielt die Quantensensorik auf die Verringerung des Größenunterschieds zwischen dem Sensor und seiner Umgebung ab. Die Miniaturisierung der Auslesegeräte, Quellen und Detektoren und die Verringerung ihrer Größe um Größenordnungen stellen eine ständige Herausforderung dar. Dies bietet die Möglichkeit, das fortschrittlichste Potenzial der Physik, der Chemie, der Biologie, der Elektro- und Mikrosystemtechnik, der Optik, der Softwaretechnik und vieler anderer Bereiche zu kombinieren.

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über Ansätze und Anwendungen für:

- Magnetometrie und Sensorik
- Durchflussmessung auf der Grundlage der Quantenmagnetometrie
- Fortschritte in der Laserschwellen-Magnetometrie
- Materialprüfung auf der Grundlage der Magnetometrie
- eine internationale Perspektive einschließlich der zu integrierenden Komponenten.