

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](http://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](mailto:verlag@fraunhofer.de)

[www.verlag.fraunhofer.de](http://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](http://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
<b>Einschätzungen und Perspektiven zum Stand der Entwicklung . . . . .</b>	<b>19</b>
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
<b>Quantensensorik . . . . .</b>	<b>43</b>
<b>Möglichkeiten der Sensorik in einer neuen Welt . . . . .</b>	<b>45</b>
<b>Stickstoff-Fehlstellen-Zentren: Quantensensor für     Magnetfelder . . . . .</b>	<b>49</b>
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 $\delta$ -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
<b>Durchflussmessung auf Basis der Quantenmagnetometrie</b>	<b>79</b>
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
<b>Laserswellen-Magnetometrie</b>	<b>93</b>
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
<b>Materialprüfung mit optisch gepumpten Magnetometern</b>	<b>109</b>
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
<b>Fraunhofer CAP</b>	<b>127</b>
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
<b>Quantenbildgebung . . . . .</b>	<b>151</b>
<b>Quantenbildgebung . . . . .</b>	<b>153</b>
Literaturverzeichnis . . . . .	159
<b>Quantenholografie mit nicht detektiertem Licht . . . . .</b>	<b>161</b>
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
<b>Quanten-Ghost-Imaging mit asynchroner Detektion . . . . .</b>	<b>175</b>
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
<b>Quanten-Fourier-Transform-Infrarotspektroskopie . . . . .</b>	<b>191</b>
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
<b>Quantenbildgebung mit nicht-detektierten Photonen</b>		
	<b>im mittleren Infrarotbereich</b>	<b>205</b>
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
<b>Terahertz-Spektroskopie mit sichtbaren Photonen</b>		
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**

<b>Quantenkommunikation: sichere Kommunikation durch</b>		
	<b>Quantenschlüsselaustausch</b>	<b>237</b>
<b>Quantenkommunikationssysteme und -protokolle</b>		<b>239</b>
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
<b>Satellitengestützte Kommunikation auf Basis von</b>	
<b>Quantenverschränkung am Fraunhofer IOF . . . . .</b>	<b>253</b>
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
<b>Photonische Komponenten für Quantentechnologien . . . . .</b>	<b>265</b>
1 Einleitung . . . . .	265
2 Aktive Komponenten für die Integration . . . . .	266
2.1 Einzelphotonen-Lawinendiode . . . . .	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
<b>Modulare Nanoelektronik für die Quantenkommunikation . . . . .</b>	<b>283</b>
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
<b>Rauscharme Quantenfrequenzkonverter für den</b>	
<b>Quanteninternet-Demonstrator . . . . .</b>	<b>299</b>
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
	<b>Quantencomputing</b>	<b>317</b>
	<b>Quantencomputing</b>	<b>319</b>
	<b>Quantencomputing – von Materialien bis zur Anwendung</b>	<b>325</b>
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
	<b>Nutzung der Mikroelektronik für große Quantencomputing-Hardware</b>	<b>343</b>
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
	<b>Fehlercharakterisierung, -minderung und -korrektur</b>	<b>361</b>
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
	<b>Quanten-HPC-Algorithmen und Workflows . . . . .</b>	<b>381</b>
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
	<b>Quantum Machine Learning . . . . .</b>	<b>395</b>
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
	<b>Qompiler: Interoperabler und standardisierter</b>	
	<b>Quanten-Software-Stack . . . . .</b>	<b>415</b>
1	Einleitung . . . . .	416
2	Fortschritt über den Stand der Technik hinaus . . . . .	417
3	Notwendigkeit eines standardisierten Software-Stacks . . . . .	419
4	Crisp: Höhere Quantenprogrammiersprache . . . . .	422
5	Standardisierbare Schnittstelle . . . . .	424
6	Nutzungsmöglichkeiten . . . . .	426

7 Schlussfolgerungen und Ausblick .....	427
8 Literaturverzeichnis .....	428
<b>Ansätze für die strukturierte Entwicklung, das Testen und den Betrieb quantenbasierter ICT-Systeme .....</b>	<b>429</b>
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
<b>Fraunhofer-Kompetenznetzwerk Quantencomputing .....</b>	<b>453</b>
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
<b>Autorenverzeichnis .....</b>	<b>461</b>

# 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 einzustellen 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 Grundsatzzdebatten 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. Schlüsselp Parameter 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.