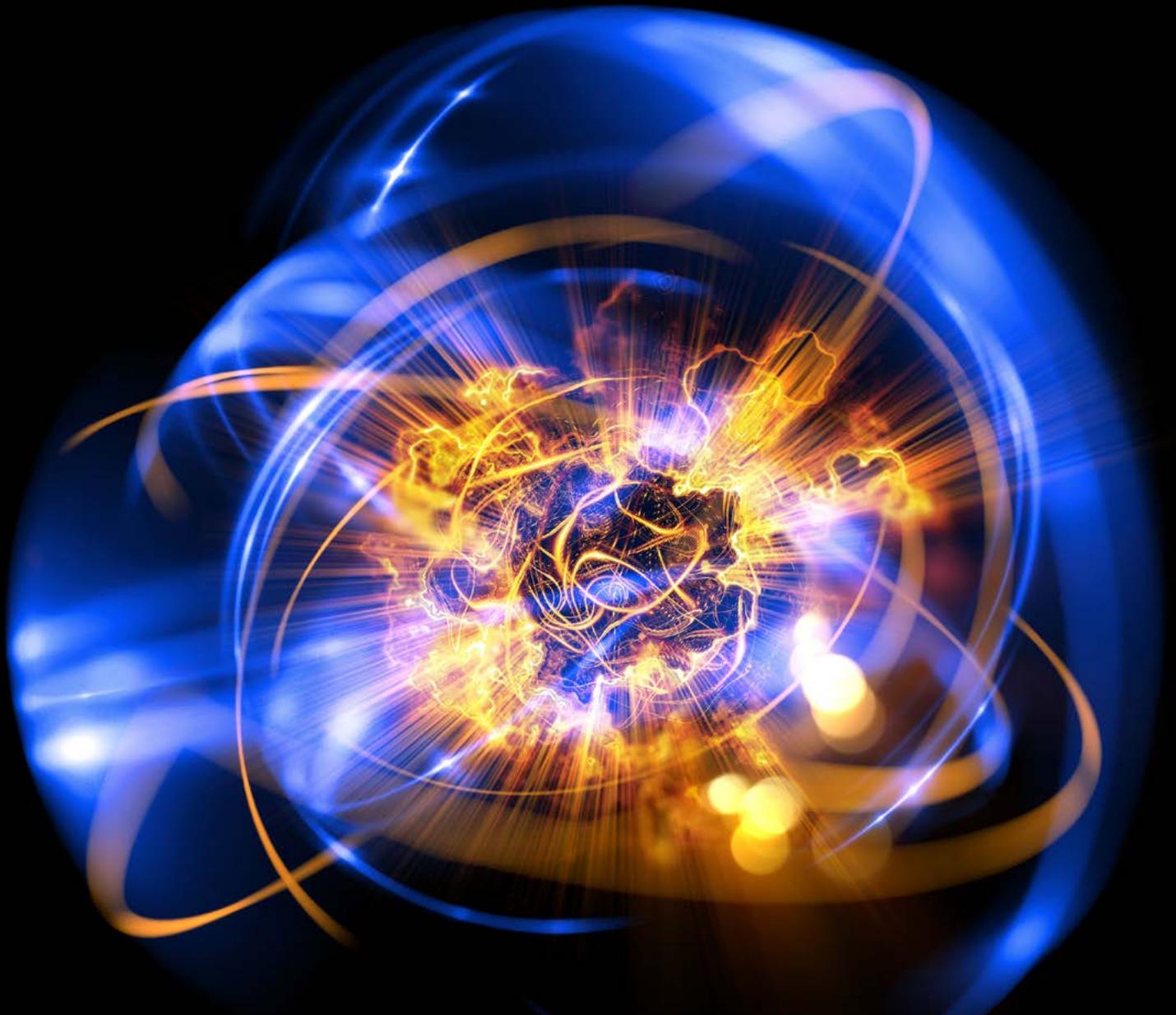


FÖRDERUNG VON QUANTENTECHNOLOGIEN

Positionspapier der
Deutschen Industrie



Inhaltsverzeichnis

1	QUANTENTECHNOLOGIE: DEFINITION UND MARKTANALYSE	4
1.1	Definition	4
1.2	Marktanalyse	4
1.3	Internationale Situation der QT	5
1.4	Deutscher Markt und deutsche Firmen	7
2	QUANTENKOMMUNIKATION (QK)	9
2.1	Marktreife und -größe	9
2.2	Marktdurchdringung	10
2.3	Chancen und Risiken	10
3	QUANTENSENSORIK UND -METROLOGIE (QSM)	11
3.1	Marktreife und -größe	11
3.2	Marktdurchdringung	12
3.3	Chancen und Risiken	12
4	QUANTUM-ENHANCED IMAGING (QeI)	13
4.1	Marktreife und -größe	13
4.2	Marktdurchdringung	13
4.3	Chancen und Risiken	13
5	QUANTENCOMPUTING UND SIMULATION (QCS)	14
5.1	Marktreife und -größe	15
5.2	Marktdurchdringung	15
5.3	Chancen und Risiken	16
6	QUANTUM-ENABLING TECHNOLOGIES (QeT)	17
6.1	Marktreife und -größe	17
6.2	Marktdurchdringung	17
6.3	Chancen und Risiken	17
7	IM RAHMEN VON QUTEGA ZU FÖRDERNDE TECHNOLOGIEN UND APPLIKATIONEN	18
7.1	Quantenkommunikation (QK)	18
7.2	Quantensensorik und -metrologie (QSM)	18
7.3	Quantum-enhanced Imaging (QeI)	18
7.4	Quantencomputing und Simulation (QCS)	19
7.5	Quantum-Enabling Technologies (QeT)	19
7.6	Mögliche QT-Leuchtturmprojekte	20
8	NOTWENDIGE NÄCHSTE SCHRITTE FÜR QT-INNOVATIONEN	22
8.1	Förderung einer Bereichs- und Funktionsübergreifenden QT-Kompetenz- und Austauschplattform	22
8.2	Förderung von Leuchtturm-Projekten mit klarer QT-Roadmap	22
8.3	Förderung von neuem Unternehmertum im Bereich QT	23
8.4	Förderung der Entstehung von geschlossenen QT-Wertschöpfungsketten	24
8.5	Aufbau einer öffentlichen Nachfrage nach QT-Technologie	24
8.6	Ausbildung und QT-Nachwuchsförderung	25
9	REFERENZEN	27

Positionspapier der Deutschen Industrie zur Förderung von Quantentechnologien

Dieses Papier soll Empfehlungen zu einem möglichen Quantentechnologien-Förderprogramm des BMBF bzw. der Bundesregierung geben. Es ist das Ergebnis einer Diskussion zwischen Vertretern verschiedener deutscher Firmen, die entweder bereits heute mit Quantentechnologien (QT) arbeiten, oder in den kommenden Jahren ein Interesse am Einstieg in diese Felder haben.

Nach einer kurzen Definition der QT beschreiben wir zunächst den heutigen und zukünftig möglichen Markt für die aufgeführten Felder der QT. In der Darstellung wird erläutert, inwieweit diese Einzelmärkte von deutschen Unternehmen bereits heute bedient werden, welchen internationalen Wettbewerb wir sehen, und wie man weitere Entwicklungen von staatlicher Seite gezielt fördern kann.

Dann leiten wir in den folgenden Abschnitten die Technologien und Applikationsbereiche ab, die wir für besonders vielversprechend (weil marktrelevant und mit starker deutscher Forschungskompetenz hinterlegt) und daher förderungswürdig halten, inklusive konkreter Empfehlungen für gemeinsame industriell-akademische Leuchtturmprojekte.

Im letzten Abschnitt „Rahmenbedingungen für Innovation“ geben wir Empfehlungen für Förderinstrumente, die wir für die QT als besonders effektiv erachten oder die in ähnlicher Form in anderen Ländern bereits existieren, in Deutschland jedoch fehlen, und damit einen Nachteil für die deutsche Industrie darstellen. Dies erscheint uns als besonders wichtig, da das Thema QT prinzipiell eine sehr große Bandbreite an Anwendungen betrifft. In Anbetracht der endlichen Ressourcen erachten wir eine strategische Förderung in Form von ausgewählten Leuchtturmprojekten als zielführend. Da es sich um strategische Projekte handelt, sollte jedes dieser Projekte mindestens einen industriellen und wissenschaftlichen Partner haben. Die Fokussierung auf diese strategischen Leuchtturmprojekte erlaubt es in einem zweiten Schritt, gezielt die hierfür nötigen kompletten Lieferketten möglichst durch deutsche Firmen aufzubauen.

Eine zentrale Forderung ist die Schaffung einer „Nationalen Koordinierungsstelle für Quantentechnologie“, die organisatorisch und fachlich die Entwicklung in den nächsten Jahren führt und wesentlich zu einer Konvergenz der akademischen und industriellen Prozesse beitragen soll. Ergänzt werden sollten die Aktivitäten durch gezielte Förderung von Marktforschung und zum Überbrücken der Distanz zwischen Wissenschaft und Industrie zur Identifikation von gemeinsamen Zielen und Durchführung gemeinsamer Projekte.

Neben der Bereitstellung immer besserer Werkzeuge für die akademische Forschung („Quantum-enabling Tools“) durch frühzeitig eingebundene Industriepartner, gehört dazu ebenfalls die verbesserte Unterstützung bei der Neu- und Ausgründung von QT-Firmen in Form von methodischer und finanzieller Hilfestellung. Des Weiteren muss in der Ausbildung von Ingenieuren und Informatikern eine Erweiterung auf Quantentechnologien erfolgen, insbesondere um diese auf die Breite der notwendigen Fähigkeiten in diesem Feld vorzubereiten.

1 Quantentechnologie: Definition und Marktanalyse

1.1 DEFINITION

Unter Quantentechnologie (QT) verstehen wir Technologien und Anwendungen, welche gezielt auf der Ausnutzung von Quanteneffekten beruhen. Auch im 20. Jahrhundert gab es schon eine Vielzahl von Entwicklungen bei denen Quanteneffekte eine zentrale Rolle spielen. Beispiele hierfür sind die Halbleitertechnologien im Allgemeinen, das Magnetspin-Resonanzverfahren oder der Laser.

Im Unterschied zu diesen technologischen Entwicklungen steht bei der Quantentechnologie des 21. Jahrhunderts aber dediziert der kontrollierte Quantenzustand einzelner oder gekoppelter Systeme im Vordergrund, d.h. seine gezielte Präparation/Initialisierung, seine kohärente Kontrolle und nachfolgende Abfrage. Durch die gezielte Einwirkung von außen auf einzelne Quantenzustände und ihre Kopplung untereinander von außerhalb des Quantensystems ergeben sich Möglichkeiten für neue Anwendungen, die unübertreffbare Informationssicherheit, höchstpräzise und höchstensible Mess- und Abbildungsverfahren und vieles Weitere mehr versprechen, wie auch das Überwinden heutiger Beschränkung bei der Simulation von allgemeineren Quantensystemfragestellungen. Es wird erwartet, dass im 21. Jahrhundert viele Wissenschafts- und Technologie-Branchen von den neuen und sich rapide weiter entwickelnden Technologien im Bereich des Quantencomputings profitieren werden.

Aus heutiger Sicht kann man Quantentechnologien in folgende Felder einteilen:

- Quantenkommunikation
- Quantensensorik und -metrologie
- Quantenbasierte bildgebende Verfahren (quantum-enhanced imaging)
- Quantencomputing und Quantensimulation

Basis für diese nach Anwendung strukturierten Bereiche sind unterstützende Technologien (Quantum-enabling Technologies), die oft mehr als eine dieser Anwendung fördern. Insbesondere sehen wir hier:

- Materialverbesserungen (z.B. Diamantsynthese für Farbzentren QT)
- Verbesserung/Professionalisierung von spezifischen Produktionstechniken für QT, insbesondere zur Miniaturisierung und Skalierung (optische Aufbau- und Verbindungstechnik)
- Entwicklung von lichtleitenden Technologien wie Faserassemblies, Waveguides, Splittern, Isolatoren mit komplexer und integrierter Funktionalität bei stark reduzierter Dämpfung auch bei Wellenlängen außerhalb von 1550 nm
- Verbesserung der Detektoren und Lichtquellen (z.B. ultraschmalbandig, kohärenz-kontrolliert, Einzelphotonenquellen)

1.2 MARKTANALYSE

Der zurzeit größte bekannte Markt für Quantentechnologien ist die universitäre öffentliche Forschung. Es ist auch davon auszugehen, dass es einen signifikanten nicht öffentlichen Markt im Sicherheitsbereich gibt, der sich aus unserer Wahrnehmung noch sehr stark im Forschungs- und Entwicklungsstadium befindet. Beide Märkte fragen heute die unterstützenden „Quantum-enabling Technologies“ in einer großen technologischen Breite ab und werden in Deutschland zumeist von kleinen oder mittleren Unternehmen (KMUs) bedient. Wir gehen, basierend auf den Zahlen aus Großbritannien, heute weltweit von etwa 30.000 Personen und einem Forschungsetat von jährlich mehr als 1,5 Mrd. € aus [1]. Deutschland hat davon einen geschätzten globalen Anteil von etwa 6 bis 10%.

Dieser Forschungsmarkt wird weitestgehend von hochspezialisierten Unternehmen unterstützt, insbesondere von Herstellern von Laborausstattung, Lasersystemen, Vakuum- oder Kryo-Ausrüstung, Spezialkameras, Detektoren zusammen mit entsprechender Auslese-Elektronik, Radiofrequenz-Quellen und allgemeiner Messtechnik, Laborsteuerung etc., welche in möglichst modularer und flexibler Ausführung angeboten werden, um den sehr verschiedenen individuellen Anforde-

rungen der Forscher gerecht zu werden. Neben der Grundlagenforschung sind Raumfahrt, Innere und Äußere Sicherheit und Militärforschung (Sicherheitsmarkt) heute und in naher Zukunft die maßgeblichen Nachfragemärkte für QT. So hat die Europäische Raumfahrtagentur (ESA) eine dediziert auf Quantentechnologie („Optical Atomic Frequency Standards“, „High Performance Frequency Dissemination Technology“, „Gravity Mapping“) abgestimmte Mission-Roadmap erstellt [2] und verfolgt diese auch in Deutschland langfristig mit akademischen und industriellen Partnern (Uni Düsseldorf, PTB, QUEST Hannover, FBH, DLR etc., aber auch Airbus, TESAT, OHB, SpaceTech etc.). Der originäre Zugang zu QT wird in diesem Feld zunehmend zum entscheidenden Faktor für die Vergabe von kompletten Raumfahrt-Missionen oder -Infrastrukturprojekten (z.B. GPS der 2. Generation) und hat daher erhebliche wirtschaftliche Bedeutung. Neben dem Forschungsmarkt ist die Industrie (Volkswagen, TRUMPF etc.) an Prozessen wie dem Quanten-Annealing interessiert, da viele High-Tech-Prozesse von Optimierungsproblemen dominiert werden.

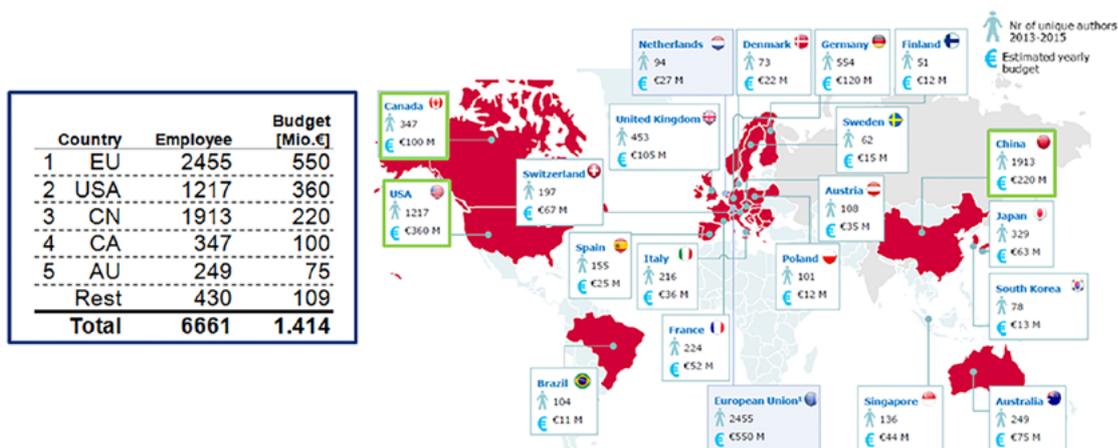
Eine offenere Marktdynamik unter der Einbeziehung von weniger spezialisierten Unternehmen ist erst dann zu erwarten, wenn durch eine industrielle Produktent-

wicklung und Produktion hohe Stückzahlen und damit auch niedrigere Preise angeboten werden können. Der Zeitpunkt, zu dem die jeweilige Quantentechnologie erstmalig in den breiteren Markt kommen könnte, hängt stark von der verfügbaren und eingesetzten Basistechnologie ab. Für bestimmte Quantensensoren (z.B. Magnetfeldsensoren auf Grundlage von NV-Zentren in Diamant) oder auch Quantenzufallszahlengeneratoren oder Quantenschlüsselverteilungssysteme nehmen wir eine sehr baldige Marktrelevanz (3 - 5 Jahre) an. Soweit die Quantentechnologien dagegen auf technologisch anspruchsvolle Weiterentwicklungen von Enabling Technologien angewiesen ist, beispielsweise miniaturisierte und robuste Tieftemperaturtechnologie oder Ultrahochvakuum, ist erst ein späterer Markteinstieg zu erwarten.

1.3 INTERNATIONALE SITUATION DER QT

Besonders groß sind die vor allem durch staatliche Nachfrage getriebenen Märkte in Raumfahrt, Innerer Sicherheit und Militärforschung in den USA und China, aber auch in Großbritannien. Aus strategischen

Abbildung 1: Das jährliche öffentliche weltweite Forschungsbudget wird auf 1,5 Mrd. € geschätzt. Dazu kommen erhebliche nicht-öffentliche Ausgaben für hoheitliche Zwecke [1]. Quelle: Ministerie van Economische Zaken, Global developments Quantum Technologies NL 2015.



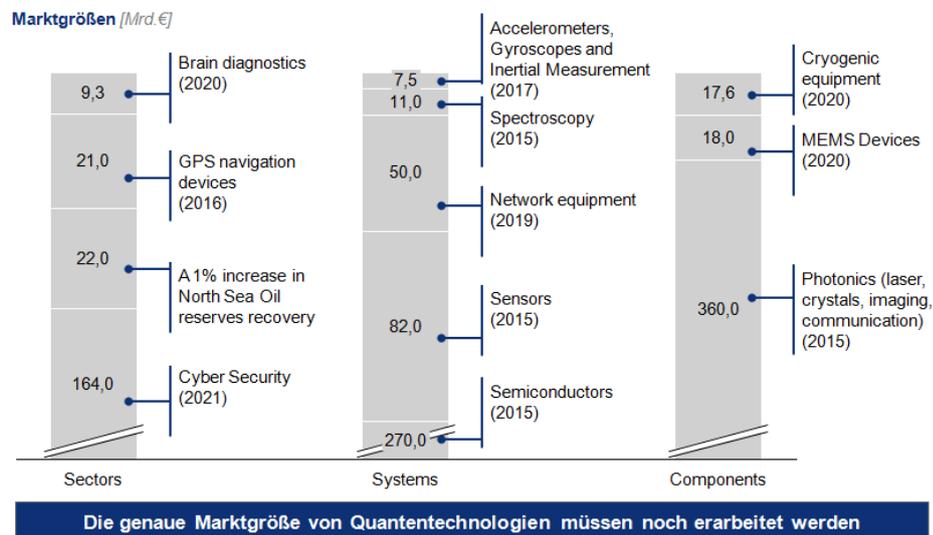


Abbildung 2: Quantentechnologien [1] werden Hochvolumenmärkte beeinflussen; welchen Marktanteil in den jeweiligen Segmenten erreichen können, muss aber noch erarbeitet werden.

Gründen werden dort zuerst die jeweiligen nationalen Forschungsgruppen finanziell unterstützt. Im Allgemeinen gibt es trotz der großen Anteile nicht-öffentlicher Forschung immer noch einen sehr offenen akademischen Kooperationsstil und die Bereitschaft sich über Ziele und Konzepte austauschen. Die Firmen in diesem Forschungs-Ökosystem werden als Partner eingebunden, und man erwartet eine ähnliche Offenheit bei den Unternehmen. Es ist aber zu erwarten, dass bei auflebendem kommerziellen und bei hoheitlichem Interesse sich mehr Zurückhaltung entwickeln wird.

Insbesondere in den USA und China werden über DARPA und DARPA-äquivalente Sponsoren gezielt Entwicklungsgruppen aufgebaut und unterhalten. Diese Bereiche werden national als „strategisch“ definiert. Sie sind zwar für die nationalen Anbieter wettbewerlich, aber oft national geschützt und haben keine eigene freie Marktdynamik.

- China hat über die letzten zehn Jahre technologisch deutlich aufgeholt und ist heute akademisch auf Augenhöhe mit den anderen führenden Wirtschaftsmächten. Insbesondere QT steht in China im Fokus des politischen Interesses und erlebt eine beispielhafte politische Unterstützung. Der Start des weltweit

ersten QKD-Satelliten in diesem Jahr hat zu einem erheblichen Imagegewinn des Feldes in China geführt, und es ist mit weiterer, großzügiger staatlicher Förderung zu rechnen. Insbesondere formen sich im akademischen Umfeld mit institutioneller Unterstützung zunehmend „halbkommerzielle“ Marktteilnehmer.

- Die USA besitzen eine exquisit aufgestellte Forschungslandschaft mit der inhaltlich und politisch führenden Rolle des National Institute of Standard (NIST), vertreten an zwei Standorten in den USA (Großraum Washington DC und Großraum Denver/Boulder), die Keimzelle einer starken akademischen und zunehmend auch industriellen Landschaft. Die industrielle Umsetzung wird deutlich von militärstrategischen Gesichtspunkten dominiert und entsprechend unterstützt. Interessante Förderverfahren (DARPA-Challenge etc.) führen in den USA zu einem zielgerichteten Aufstellen und Umsetzen eines Roadmap-Prozesses. So setzt auch die IARPA auf die Erforschung von Quanten-Annealing für harte kombinierte Optimierungsprobleme [1]. Als Reaktion auf das EU-Flagship zu QT planen die USA eine eigene erweiterte QT-Initiative nach europäischem Vorbild [4].

- In Großbritannien wird seit zwei Jahren die Quantentechnologie durch viele staatliche Träger unterstützt und das Land unter Beteiligung von akademischen und industriellen Kräften auf die zweite Quantenrevolution vorbereitet. Neben den inhaltlichen Arbeiten hat man die Initiative finanziell und strukturell unter Beteiligung der Forschung, der inneren und äußeren Sicherheitsstrategien, sowie der industriellen Umsetzung sehr nachhaltig und langfristig aufgestellt [5]. Es ist daher mit einer Reihe von neuen industriellen QT-Teilnehmern von dort in den nächsten Jahren zu rechnen.
- Japan, Singapur und Kanada haben seit Jahren eigene Programme, sowohl für die Forschung als auch für Raumfahrt-Anwendungen, aufgelegt.
- Es wurde im Mai 2016 nicht nur das QT-EU-Flagship ausgerufen, sondern weitere europäische Länder haben entsprechende nationale Förderinitiativen entweder schon begonnen [3, 4], angekündigt oder zumindest die Diskussion mit den nationalen Stakeholdern begonnen [Frankreich, Italien]. Darüber hinaus zeigt, wie oben erwähnt, auch die ESA durch gezielte Entwicklungsprogramme eine sehr starke Initiative in diesem Kontext.

In den letzten fünf Jahren sind in verschiedenen Ländern (einige wenige auf QT-Anwendungen spezialisierte) kommerzielle Firmen (z.B. D-Wave (CA), IonQ (US), Nvision (DE), IdQuantique (CH)) gegründet worden. Ziel ist meist die Entwicklung eines dedizierten QT-Anwendungssystems, das sich auf spezielle Anwendungsfälle (wie QC, QSM oder medizinische Diagnostik) fokussiert. Meistens sind diese Gründungen durch Risikokapital finanzierte Spin-offs von Universitäten oder staatlichen Forschungsgruppen, in den USA oder UK auch häufig finanziert über Militär- oder Raumfahrt-Aufträge [6].

1.4 DEUTSCHER MARKT UND DEUTSCHE FIRMAN

Da wir in Deutschland viele Arten der US-Forschungs- und Firmenfinanzierung nicht kennen, sieht die deutsche Ausgangslage deutlich anders aus. Ausgrün-

dungen fokussieren sich hier zumeist auf den konkret verfügbaren Wissenschaftsmarkt oder vereinzelt auch auf die Gesundheitstechnik (Healthcare). Bestehende Forschungsmärkte werden aus Deutschland global bedient, was deutscher QT damit eine gute Sichtbarkeit und Ausgangslage gibt.

Die breite deutsche Forschungs- und Technologie-Infrastruktur und deren enge Vernetzung mit den deutschen KMUs ist ein zentraler deutscher Wettbewerbsvorteil. Deutschland hat sich im Forschungsumfeld damit in der Vergangenheit einen respektablen Umsatzanteil von etwa 10% (geschätzt) an der globalen Labor-Quantentechnologie erarbeitet.

Insbesondere das Feld der Optischen Quantentechnologie [6] ist heute für die Forschungsumgebung ein gut eingeschwungenes und global vernetztes wirtschaftliches „Ökosystem“, das deutsche Unternehmen erfolgreich für sich nutzen (z.B. TOPTICA, Menlo Systems, PicoQuant, qtools, Qubiq, PCO, VACOM, etc.).

Darüber hinaus sehen wir folgende Partner in Deutschland im industriellen Umfeld als besonders wichtig an:

- Industrienaher Forschungsinstitute, die weltweit führende Technologie anbieten (z.B. GaAs-basierte Halbleiterlaser am Ferdinand-Braun-Institut (FBH), Fraunhofer HHI, GaN Halbleiter am Fraunhofer ISIT, Aufbau- und Verbindungstechnik, etc.)
- Photonik-on-the-Chip-Integration (PIC), Splitter, Modulatoren, Repeater, Verstärker, Sender (z.B. FBH, FhG-HHI mit Industrie)
- Firmen, die innovative Komponenten direkt auf Basis von Quanteneffekten entwickeln und mit komplexer Funktionalität integrieren (z.B. eagleyard, Innolume, nanoplus, ...)
- Firmen, die sich für Quantentechnologie interessieren und neue Produkte auf Basis von Quantentechnologie entwickeln (können) (z.B. Bosch, Siemens, TRUMPF, Airbus, OHB System, SpaceTech, Volkswagen, Zeiss, ...)
- Interessierte Finanzinvestoren mit langjähriger Erfahrung in der Startup-Finanzierung und im Aufbau von Elektronik/Halbleiter, Photonik und Medizintechnik-Startups (z.B. Wellington Partners, b-to-v Advanced Technology, Target Partners, HTGF, ...)

	Höchsten Investitionen ¹	Meisten Publikationen ²	Meist patentierte Applikationen ³	Gesamt
	1	2	1	1
	2	1	2	2
	3	3	6	3
	4	4	4	3
	8	5	4	5

Abbildung 3: Deutschland ist im internationalen Vergleich auf Platz 3 – allerdings nur auf Platz 6 bei den Patenten [1].

Quelle: ¹ Global developments in Quantum Technology Netherlands Ministry of Economic Affairs. ² Publication profiling of UK quantum technologies research EPSRC and Digital Science; April 2015. ³ Emerging Technologies: Quantum; Intellectual Property office; January 2016

In Abb. 3 wird die englische Wahrnehmung der deutschen QT-Position wiedergegeben [1]. Es wird nach Investitionen, wissenschaftlichen Publikationen und Patenten unterschieden. Deutschland nimmt dabei nach den USA und China eine europäisch-führende Position ein. Auffällig ist die relativ schwache Position im Bereich der patentierten Applikationen, was auf eine Überführungsschwäche von wissenschaftlichen Erkenntnissen in industriell geschützte Produkte hinweist.

Für die im vorherigen Abschnitt definierten QT-Felder geben wir im Folgenden eine detailliertere Marktab-schätzung an. Dabei wird differenziert in

- Marktreife und -größe,
- bestehende Marktdurchdringung und
- Chancen und Risiken für die deutsche Industrie.

2 Quantenkommunikation (QK)

Quantenkommunikation ist Informationsübertragung am Quantenlimit. Während beispielsweise bei einer herkömmlichen optischen Übertragung sehr viele Photonen über eine Glasfaser geschickt werden, um eine einzige ‚1‘ zu signalisieren, arbeitet die Quantenkommunikation mit wenigen, im Idealfall einem einzigen Photon.

Die derzeit wichtigste Anwendung der Quantenkommunikation ist die Quantenschlüsselverteilung (Quantum Key Distribution, QKD). Hier erstellen zwei Kommunikationspartner einen gemeinsamen und geheimen Schlüssel. Diese Schlüsselerstellung und Verteilung wird i.d.R. durch Austausch von Photonen bewerkstelligt, die Information z.B. in Form ihrer Polarisation tragen. In diesem Fall beruht die Sicherheit auf der Tatsache, dass die Messung der Polarisation durch einen Abhörer mittels statistischer Methoden nachweisbar ist. Die Verschlüsselung und der Versand der zu versendenden Informationen geschehen mit bisher bekannten Methoden. Der „Quantenanteil“ bezieht sich nur auf die gemeinsame Schlüsselerstellung.

Zur Quantenkommunikation bzw. deren Bausteinen zählt man auch die Quantenzufallszahlengeneratoren (Quantum Random Number Generator, QRNG), bei denen auf Basis des Nicht-Determinismus der Quantenprozesse echte Zufallszahlen generiert werden.

Neben der Informationssicherheit bietet die Informationsübertragung am Quantenlimit das Potential für Energieeinsparungen um mehrere Größenordnungen, insbesondere für kurze inter-chip oder auch intra-chip Verbindungen. Die Leistungsfähigkeit moderner Halbleiterchips ist heute vielfach durch die elektrischen Verbindungen vom und zum bzw. auch auf dem Chip begrenzt. Eine neue Generation von quantenlimitierten optischen Bauelementen mit drastisch reduzierten optisch aktiven Volumina kann Energieeffizienzen im atto-Joule-Bereich pro bit ermöglichen und damit die aktuellen Grenzen für intra- und inter-chip Verbindungen neu definieren.

2.1 MARKTREIFE UND -GRÖSSE

Die Quantenkommunikation (zusammen mit der Quantensensorik) ist das Feld mit dem größten Reifegrad im Bereich der QT. Das Konzept der Quantenschlüsselverteilung

verspricht bestmögliche Sicherheit bei der Schlüsselverteilung. Im Gegensatz zu klassischen Technologien zur Schlüsselverteilung erlaubt QKD echte Langzeitsicherheit, unabhängig vom technologischen und mathematischen Fortschritt. Aus technischer Sicht werden sich zunächst auf kurzen Distanzen (in der Größenordnung bis zu 100 km) die Schlüsselverteilung über Glasfaser (insbesondere mit dedizierter Faser für den Quantenkanal) und für längere Distanzen die Schlüsselverteilung mittels Satelliten etablieren. Praktische Umsetzungen des Prinzips werden aufgrund von Unzulänglichkeiten in der Implementierung dem Anspruch heute noch nicht voll gerecht. Die heutige Limitierung kommt hauptsächlich durch die Performance heutiger Komponenten (Spezialfasern, Laser, Einzelphotonenquellen, integrierte Lichtwellenleiter und Detektoren) zustande.

QKD-Geräte gibt es seit etwa einer Dekade im Markt. Die Märkte sind noch klein (max. einige zehn Geräte pro Jahr). Typische Kunden sind Banken, Regierungen (z.B. wurden die Schweizer Wahlen mittels QKD gesichert [7]) und vermutlich auch Geheimdienste und Streitkräfte. Für eine weitergehende Verbreitung der Technologie ist insbesondere eine bessere Integration von QKD in kommerzielle Kommunikationssysteme erforderlich. Momentan basiert der Schlüsselaustausch hauptsächlich auf glasfaser-basierten Systemen und ist hierdurch auf ≈ 100 km beschränkt. Um die mögliche Reichweite deutlich zu vergrößern, verfolgt man für die faserbasierte Kommunikation einen Ansatz, der die Aneinanderreihung von QKD-Verbindungen über sogenannte „trusted nodes“ vornimmt. Zusätzlich gibt es schon seit Jahren die Idee, über größere Distanzen den Schlüsselaustausch mittels Quanten-Repeater vorzunehmen [11]. Da dieser Ansatz sehr aufwendig ist, ist ergänzend hierzu in den letzten Jahren die Entwicklung der laserbasierten Freistrahlkommunikation verstärkt in den Fokus gerückt. Ziel ist es, große Strecken durch optische Kommunikation mittels Satelliten zu überbrücken. Seit nicht allzu langer Zeit investiert China sehr stark in QKD, insbesondere in die Satelliten-gestützte QKD und hat bereits einen entsprechenden Satelliten gestartet.

Optische Datenübertragung am Quantenlimit für kurze Distanzen zwischen Chips und auf dem Chip haben das Potential einen entscheidenden Engpass in der Weiterentwicklung von hochbitratigen digitalen Chips zu überwinden. Der adressierbare Markt ist ungleich größer als

viele andere spezifische Anwendungen der QT und hat damit ein sehr hohes kommerzielles Potential.

2.2 MARKTDURCHDRINGUNG

In Europa und China gibt es erste Spin-offs, aber auch größere Firmen, die schon erste Serienprodukte für Netzwerklösungen im Markt haben oder kurz vor dem Markteintritt stehen. Vorreiter ist wohl die Schweizer Firma ID Quantique in Genf (≈30 Mitarbeiter, 10 Mio € Umsatz). In China tritt eine Ausgründung der Arbeitsgruppen von Prof. Jianwei Pan unter dem Namen QuantumCTek prominent auf. Auch TOSHIBA UK forscht seit einigen Jahren in diesem Feld und scheint kurz vor dem Markteintritt zu stehen. Global gesehen ist es vor allem China, welches an der Kommerzialisierung dieser Technologie arbeitet.

Deutschland ist mit mehreren weltweit etablierten Systemherstellern für die faserbasierte Kommunikationstechnik (ADVA, Coriant, Nokia) in einer hervorragenden Position, QKD als integrierte Komponente von Telekommunikationssystemen zu etablieren. In Deutschland gibt es auch mehrere Forschungsgruppen, die Teil der weltweiten Spitzenforschung in diesem Bereich sind. Es gibt aber bis heute keine Firmen, die sich diesem Thema als Gesamtsystem annehmen. Andererseits gibt es jedoch mindestens zwei Firmen, die (teilweise in Zusammenarbeit mit lokalen Forschungsgruppen) Geräte bzw. Komponenten herstellen und vertreiben, welche sich für den Aufbau eines QKD-Systems nutzen lassen (PicoQuant Berlin, qtools München). Darüber hinaus sind weitere Spin-offs oder akademische Ausgründungen zu erwarten.

Hinsichtlich energieeffizienter optischer inter- und intrachip Verbindungen gibt es sehr gute Forschungsergebnisse aus Deutschland (KIT, HHI), und mit international führenden Halbleiterherstellern, wie z.B. Infineon, auch industrielle Partner, die entsprechende Fortschritte in der Forschung kommerzialisieren könnten.

2.3 CHANCEN UND RISIKEN

Verschlüsselte Daten können bereits heute großmaßstäblich abgespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt entschlüsselt werden, deshalb kann die Übermittlung von langzeit-strategischen Informationen mit Hilfe von QKD auch jetzt schon sehr sinnvoll sein. Die Entwicklung eines Quantencomputers mag noch zwei oder drei Jahrzehnte in der Zukunft liegen, aber sobald es gelingt, können ansonsten alle etablierten Verfahren zur sicheren Datenübertragung nachträglich gebrochen werden.

In Bereich QK ist daher rasches Handeln gefragt. Deutschland hat auf diesem Sektor hervorragende wissenschaftliche Alleinstellungsmerkmale und Kapazitäten, die heute noch von keinem anderen Land abgeworben wurden. Ziel muss es sein, diese gezielt in praktisch einsetzbare Produkte zu überführen und dadurch die aktuell noch verhaltene Annahme durch potentielle Kunden zu überwinden. Darüber hinaus muss das Vertrauen dieser Kunden durch starke politische Bekenntnisse zu diesen Verfahren unterstützt werden. Durch die Festlegung auf einheitliche Zielrichtungen zur Kommerzialisierung von z.B. in der deutschen Forschungslandschaft beheimateten Ansätzen könnten zielgerichtet Schlüsselkomponenten mit industriellem Standard entwickelt werden. Dadurch würden auch die Kosten für die Technologie reduziert und damit die Verbreitung unterstützt.

3 Quantensensorik und -metrologie (QSM)

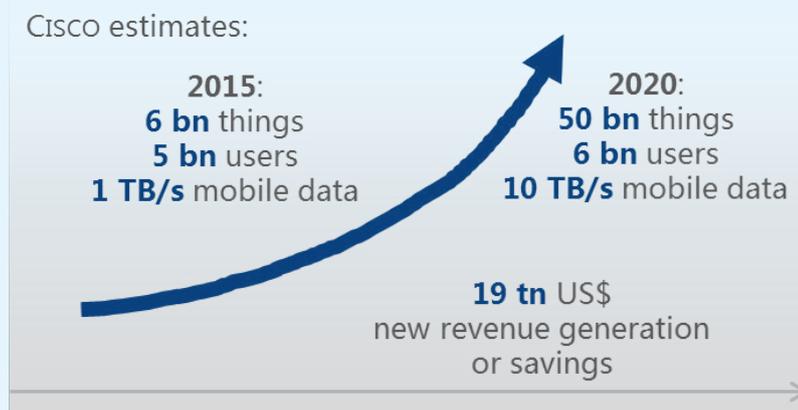
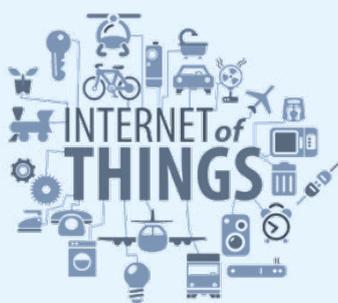
Quantensensoren machen sich Quanteneffekte zu Nutze, um physikalische Größen wie Frequenz, Beschleunigung, Rotationsraten, elektrische und magnetische Felder oder die Temperatur mit höchster relativer und absoluter Genauigkeit („accuracy“ und „precision“) zu messen. Quantenmetrologie erlaubt lokale, wiederholbar zuverlässige und robuste Kalibrierung und Messungen mit direktem Bezug auf atomar/fundamental ableitbare Standards.

3.1 MARKTREIFE UND -GRÖSSE

Der Markt für Sensoren ist riesig und wächst stetig (z.B. Weltmarkt für MEMS im Jahr 2016: 11 Mrd. US\$). Durch die Digitalisierung werden immer mehr Daten gesammelt und verarbeitet, insbesondere im industriellen Umfeld (Industrie 4.0) und im Internet of Things (IoT): zwei Entwicklungen, die in den nächsten Jahren zu einem gigantischen Marktpotential führen werden (s. Abb. 4). Es ist zu erwarten, dass die klassischen MEMS-basierten Sensoren in einigen Jahren durch Quantensensoren ergänzt werden. Aktuell sind Quantensensoren jedoch nicht robust genug für den Masseneinsatz, noch deutlich zu teuer und zu groß. Heute besteht daher nur ein Markt für hochpreisige oder strategische Nischenanwendungen, wie z.B.

- Medizintechnik (Atom-Magnetometer, NV-Zentren-basierte Magnetometer (z.B. für Lab-on-a-Chip), Spektroskopie / Spurengasanalyse, ...)
- Sicherheitstechnik (Gravimeter, Gyrometer, Spurengasanalyse, ...)
- (Indoor-)Navigation (Gravimeter, Gyrometer, Zeitmessung mit kompakten, robusten Atomuhren), Rückfallsysteme für GPS/Galileo, eventuell auch GPS/Galileo selbst (Satellitenavigation)
- Exploration von Lagerstätten, Geodäsie, Vulkanologie, Plattentektonik (Atom-Magnetometer, Gravimeter, Präzisionslängeninterferometer)
- Ultrapräzise Zeitreferenzen und Längenstandards und ihre Verbreitung (z.B. Phasenlinks über große Strecken zur Synchronisation von kritischen Infrastruktureinrichtungen)
- Satellitengestützte Erdbeobachtung und Wissenschaft (Gravimeter, Atomuhren, hochstabile Lasersysteme, ...)

Abbildung 4: Abschätzung der gesamten Marktgröße für das Internet of Things, was sehr stark auf integrierter Sensortechnik beruhen wird. Eine Ableitung des mit QT adressierbaren Marktes muss noch erfolgen.



3.2 MARKTDURCHDRINGUNG

Deutsche Firmen sind in der klassischen Sensorik traditionell sehr stark (z.B. ist Bosch Weltmarktführer in MEMS-basierter Inertialsensorik). Zunehmende Ansprüche an Genauigkeit und Driftstabilität erfordern in naher Zukunft einen Technologiesprung zur Quantensensorik. In vielen Bereichen wird die bisher nicht erreichten Fähigkeiten der QSM komplett neue Märkte erzeugen, in anderen Bereichen bestehende Märkte erweitern.

In Deutschland gibt es mehrere Forschungsgruppen, welche „leading edge“-Experimente zur Quantensensorik durchführen. Einige Sensortechnologien sind von der Industrie aufgegriffen worden und befinden sich in der Weiterentwicklung.

Für die Exploration von geologischen Lagerstätten oder die Bestimmung von lokaler Gravitation wird herkömmliche Technologie bereits angeboten, die aber sehr komplex zu bedienen ist und kein allgemeines kontinuierliches Mapping erlaubt, und von daher das vorhandene Marktinteresse nur unvollständig abbildet. Es werden zwar im Rahmen von nationalen Sicherheitsinteressen QSM-Systeme dieser Art kommerziell entwickelt und auch zum Teil kommerziell angeboten, die daraus entstehenden Produkte unterliegen aber einer Geheimhaltung oder erheblichen Marktbeschränkungen oder sind, da im Rahmen von Raumfahrtinitiativen entwickelt, für den allgemeinen Markt zu aufwändig und teuer.

3.3 CHANCEN UND RISIKEN

Chance: Ablösung bestehender ausgereifter Systeme mit zukünftig begrenztem Weiterentwicklungspotenzial (z.B. MEMS-Sensoren) durch Quantensensoren mit höherer Performance.

Risiko: Erreichen der in der Grundlagenforschung gezeigten Sensorleistungsmerkmale in miniaturisierten und kostengünstigen Systemen kann zu sehr langen Anlaufphasen führen.

4 Quantum-enhanced Imaging (QEI)

Quantum-enhanced Imaging (QEI) nutzt die Quanteneigenschaften des Lichtes um die optische Abbildung zu verbessern bzw. neue Abbildungsmodalitäten zu erreichen. Dort genutzte nichtklassische Lichtzustände erlauben es, sowohl das Rausch-Limit als auch das Auflösungs-Limit zu unterschreiten.

In der **Quanten Interferometrie** wird durch Interferenz von N-fach verschränkten Photonen eine um bis zu den Faktor N erhöhte Streifendichte erreicht. Eine darauf basierende **Quanten-Lithographie** erzielt ein um bis zu N-fach erhöhtes Auflösungsvermögen, d.h. sie unterbietet die optische Auflösungsgrenze um diesen Faktor. Eingesetzt als **quanteninterferometrischer Sensor** oder auch als **Quantenoptische Kohärenztomographie (QOCT)** wird eine bis zu N-fach erhöhte Sensitivität erzielt.

Ein anderes Beispiel ist das **Ghost Imaging**, bei dem mittels verschränkter Photonenpaare verschiedener Wellenlängen die Wechselwirkung mit dem Objekt und die Detektion voneinander getrennt werden können. Dann kann das Objekt z.B. mit Infrarotlicht beleuchtet und das Bild mit einer hochauflösenden im Sichtbaren empfindlichen Kamera aufgenommen werden. Die bild erzeugenden sichtbaren Photonen haben dann keine Wechselwirkung mit dem Objekt, ergeben aber durch die räumliche Korrelation mit den objekt-wechselwirkenden Photonen ein räumlich aufgelöstes Bild.

Die **Intensitäts-Interferometrie** (Hanbury-Brown-Twiss Effekt) nutzt die zeitlichen Korrelationen einzelner Photonen aus derselben (thermischen) Lichtquelle, um eine erhöhte Winkelauflösung einer entfernten thermischen Lichtquelle (z.B. Sterne) zu erzielen. **Squeezed light** schließlich ermöglicht es, das Schrotrauschen zu unterschreiten und damit auch bei niedrigen Photonenzahlen einen hohen Kontrast zu erzielen.

4.1 MARKTREIFE UND -GRÖSSE

Die verbesserte Sensitivität und Auflösung von Quantum-enhanced Imaging kann Einsatzgebiete u.a. in der Halbleiterfertigung (Quantenlithographie), Produktionsmesstechnik, Überwachungstechnik und medizinischer Diagnostik (QOCT) finden. Bedingt durch die Einzelphotonen-Sensitivität könnte auf ionisierende

Strahlung (Röntgenstrahlung) verzichtet werden und eine räumliche Abbildung z.B. mit Infrarotlicht erfolgen. Diese Trennung von Detektion und Objektwechselwirkung wäre auch für erdgebundene Überwachung, z.B. Messung durch Nebel oder Feuer, sehr nützlich.

Die dahinter stehenden Gesamtmärkte sind jeweils sehr groß und haben positive Prognosen (z.B. diagnostic imaging: 33.4 Mrd. \$ in 2020. Thermal imaging 11.2 Mrd. \$ in 2022), allerdings ist aktuell nicht vorherzusagen, welchen Anteil quantenoptische Systeme von diesem Markt gewinnen können.

4.2 MARKTDURCHDRINGUNG

Uns ist bisher kein marktgängiges Gerät in diesem Feld bekannt. Die vorgestellten Technologien befinden sich alle noch im Forschungsstadium.

4.3 CHANCEN UND RISIKEN

Eine deutlich verbesserte Bildgebung wird in vielen Bereichen zu Durchbrüchen führen. Mögliche Märkte sind die Biomedizin aber auch die Sicherheitstechnik. Deutschland hat in diesem Bereich sehr gut eingeführte Firmen (Zeiss, Leica, PicoQuant, PCO, etc.) die ihre Bildgebung in Zusammenarbeit mit Quellenherstellern deutlich verbessern könnten. Anwender wie die Bundesdruckerei (oder z.B. Gieseke & Devrient) könnten verbesserte Bildgebungsverfahren für neue Sicherheitsmerkmale nutzen. Durch die etablierten Firmen ist bereits ein Marktzugang gegeben, so dass eine Teiltechnologie – z.B. Einzelphotonenquellen) relativ schnell eingesetzt werden könnte – vorausgesetzt die notwendige Robustheit für den kommerziellen Einsatz ist vorhanden.

5 Quantencomputing und Simulation (QCS)

Im Unterschied zum klassischen digitalen Computer, bei dem die kleinste Einheit, das Bit, nur die Werte 0 oder 1 annehmen kann, verwendet der Quantencomputer sog. Qubits (Quantenbits). Qubits können gleichzeitig die Werte 0 und 1 annehmen. Man spricht hier von Superposition. Bei mehreren Qubits gibt es dann noch die Möglichkeit verschränkter Zustände. Ein klassischer Computer mit N Bits hat einen Zustandsraum mit 2^N Elementen, ein Quantencomputer mit N Qubits jedoch einen Zustandsraum mit 2^N Dimensionen, was einer beliebigen Kombination aller möglichen Zustände des klassischen Computers entspricht. Die Dynamik isolierter Quantensysteme ist linear, grob gesprochen kann ein Quantencomputer alle Funktionswerte einer Funktion gleichzeitig berechnen (Parallelität). Am Ende einer Berechnung muss jedoch eine Messung durchgeführt werden, die von allen möglichen Resultaten nur eines liefert. Die Herausforderung von Algorithmen für Quantencomputer ist es, Transformationen so durchzuführen, dass der Quantencomputer die Antwort auf eine Frage liefert. Ist eine Funktion gegeben, die an einer Stelle den Wert 1 hat und die sonst überall verschwindet, können wir nicht alle Funktionswerte herausfinden, sondern mit einem geschickten Algorithmus die Stelle, an der die Funktion den Wert 1 hat.

Es gibt verschiedene Technologien, Quantencomputer zu bauen. Das Qubit kann durch zweidimensionale Unterräume des Zustandsraums z.B. von supraleitenden Inseln mit einem Josephson-Kontakt (superconducting quantum interference device, SQUID) oder von Atomen/Ionen (in einer Falle) oder von Quantentöpfen oder durch die Polarisation eines Photons dargestellt werden. Die Qubits müssen zum einen stark von der Umgebung abgeschirmt werden, sonst zerstört die Dekohärenz den Quantenzustand unmittelbar. Zum anderen müssen sie aber während der Rechnung kontrolliert mit anderen Qubits und bei der Präparation und der Messung mit der Umgebung wechselwirken. Ohne eine Quantenfehlerkorrektur sind keine realistischen Rechnungen durchführbar. Bei der Quantenfehlerkorrektur werden rohe physikalische Qubits zu fehlerkorrigierten logischen Qubits zusammengefasst. Mit letzteren werden dann die Berechnungen durchgeführt.

Für die Konstruktion eines Quantencomputers existieren im Wesentlichen zwei Paradigmen. Beide sind Gegenstand der Forschung und Entwicklung:

- Quantengattermodell (Rechnung auf Quantenschaltkreisen)
- Adiabatisches Theorem (Rechnung über die Änderung des Energiepotentials z.B. durch Quanten-Annealing)

Es ist hier zu beachten, dass das Adiabatische Quantencomputing grundsätzlich polynomiell gleichwertig zum Quantengattermodell ist.

Bei bestimmten Anwendungen hat ein Quantencomputer im Vergleich zum klassischen Computer einen exponentiellen Vorteil. Bekannte Quantenalgorithmen sind z.B. Shor für die Primzahlzerlegung oder Grover für die Datenbanksuche. Die notwendige Hardware, auf der diese Algorithmen laufen können, existiert aber noch nicht oder ist noch im Forschungsstadium. Die Entwicklung von Quantenalgorithmen wird in den kommenden Jahren mit mehr Nachdruck betrieben mit dem Ziel, neue Anwendungsmöglichkeiten zu identifizieren. Generell scheint das Hauptaugenmerk der akademischen Community in Europa auf der „Hardware-Entwicklung“ zu liegen. Die gleichzeitige Entwicklung eines leistungsfähigen Software-Stacks ist aber mindestens genauso wichtig. Es wird flexible und möglichste Hardware-unabhängige Entwicklungstools, Runtime Betriebssysteme und kluge User Interface Innovation brauchen, um das Potential von QCs wirklich zu heben. Es muss signifikante Anstrengungen geben, um die Anwendungsseite deutlich zu stärken – nicht zuletzt weil auch in der klassischen Informationstechnologie Software-Unternehmen im Vergleich zu den Hardware-Anbietern eine deutlich größere kumulierte Marktkapitalisierung aufweisen, die das größere Profit-Potential von smarten (B2B wie auch B2C) Anwendungen reflektiert.

Mögliche Anwendungen sind:

- Mustererkennung, Maschinenlernen, Optimierungsprobleme, Suchalgorithmen
- Entwicklung von Materialien und Katalysatoren (durch Quantensimulation oder Berechnung der Eigenschaften von Materialien mittels eines Quantencomputers) und
- Unterstützung der Forschung und Entwicklung von Künstlicher Intelligenz.

Ein erstes Ziel in der Forschung könnte der Nachweis der „Quantum Supremacy“ sein, also ein Quantencomputer, der bestimmte Probleme schneller löst als der schnellste verfügbare klassische Computer. Bei einem Universalquantencomputer sind dafür etwa 50 (logische) Qubits nötig. Dieses Ziel könnte bereits in etwa fünf bis zehn Jahren erreicht werden. Für die nähere Zukunft wird die aktuelle Technologie schon massiv vorangetrieben, und es ist zu erwarten, dass weitere Geschwindigkeitssteigerungen über einen hybriden quantum-klassischen Ansatz an Bedeutung gewinnen.

In Bezug auf industrielle Optimierungsprobleme sind Adiabatische Quantencomputer bzw. Quanten-Annealing-Systeme heute schon sehr vielversprechend. Beim Adiabatischen Quantencomputer wird eine Berechnung durch die adiabatische Entwicklung eines Qubit-Systems implementiert. Das System wird im leicht herzustellenden Grundzustand (der niedrigste Energiezustand) eines Hamiltonian initialisiert. Danach wird das System adiabatisch entwickelt hin zum „Problem“-Hamiltonian, dessen Grundzustand dann die Lösung des Optimierungsproblems abbildet. Nach dem adiabatischen Theorem verbleibt das System (beschrieben durch einen sich über die Zeit verändernde Hamiltonian) im Grundzustand, solange die Entwicklung nur langsam genug stattfindet. Optimierungsprobleme – und damit die meisten Probleme im Maschinenlernen (zu welchen Mustererkennung, Natural Language Understanding, Prognosemodelle, Clustering, Computer Vision zählen) – können somit als Energiewertprobleme ausgedrückt werden. Das heißt, dass die Quantität, die minimiert werden soll (etwa der Unterschied vom aktuellen zum gewünschten Output des Algorithmus), als Energiefläche dargestellt wird. Der minimale Energiezustand (d.h. die optimale Lösung), den das System bei adäquater Problemrepräsentation immer finden kann, ist somit das Ergebnis eines Rechenvorgangs. Aktuelle, klassische Optimierungsalgorithmen versetzen uns schon jetzt in die Lage, eine Lösung zu finden. Allerdings ist der Quanten-Annealer Hardware und Algorithmus in einem und durch die Anwendung von Tunneling spielen lokale Minima keine Rolle: das Optimum wird immer gefunden. Das ist bei klassischen Algorithmen nicht der Fall. Zudem hängt die benötigte Zeit eines klassischen Algorithmus von den FLOPS der genutzten Hardware und der möglichen Parallelisierung des Algorithmus ab.

Ein Quanten-Annealer erlaubt, die Lösung instantan zu finden.

Auf Quanten-Annealern lassen sich also für die Industrie sehr interessante Probleme abbilden, Optimierungsaufgaben, Learning und stochastische Simulationen. Selbst das Primzahl-Problem kann mit dem Quanten-Annealern gelöst werden, allerdings mit einem anderen Algorithmus als dem Shor-Algorithmus.

5.1 MARKTREIFE UND -GRÖSSE

Einen Quantencomputer zu entwickeln ist eine sehr umfangreiche Aufgabe. Daher gibt es in Europa nur drei Organisationen, die ein solches Vorhaben angekündigt haben: das IBM Forschungslabor in Rüslikon (zusammen mit IBM in Yorktown Heights), Atos und QuTech in Delft. Eine solche Entwicklung ist ohne ein sehr großes technologisches Ökosystem nicht möglich. Notwendig sind u.a. Kryotechnologie (Mischkryostaten), Mikrowellentechnologie (Erzeugung, Messung, Multiplexen), Ionenfallen, magneto-optische Fallen, Vakuumtechnologie, hochpräzise Laser etc.

IBM hatte im Sommer 2016 einen Prototyp mit fünf Qubits über ein Online-Portal der Öffentlichkeit zur externen Nutzung zur Verfügung gestellt [8].

5.2 MARKTDURCHDRINGUNG

Die Marktdurchdringung ist natürlich lange nicht so stark wie beim klassischen Computer. Klassische IT-Firmen wie IBM, Intel, Google oder Microsoft sind aber in der Forschungs- bzw. Entwicklungsphase. Die kanadische Firma DWave Systems vertreibt ihr QC-Produkt jedoch schon kommerziell und hat gerade die 4. Generation ihres Quanten-Annealers mit über 2000 Qubits für Anfang 2017 angekündigt. DWave bietet dabei keinen Universalquantencomputer an, sondern eine auf Optimierungsprobleme spezialisierte Variante. DWave hat seine Rechner u.a. an Lockheed Martin, NASA/Google/USRA und das Los Alamos National Laboratory verkauft, wo diese bereits im Einsatz sind.

In den USA sind in den letzten Jahren eine Reihe von gate based QC Startups (zB IonQ, Rigetti Computing, etc) gegründet und finanziert worden, die ein breites Spektrum von Hardware-Ansätzen verfolgen (von vernetzten Ion Traps bis zu Halbleiter-basierten Ansätzen). Neugründungen im Bereich der „Anwendungen und Algorithmik“ sind bis jetzt allerdings selten.

5.3 CHANCEN UND RISIKEN

Das Feld des Quantencomputing steht noch am Anfang. Momentan verfolgte Strategien (wie z.B. weiterentwickelte Implementierungstechnologien für Festkörper, kompakte und zugängliche supraleitenden Qubits, Atome und Ionen in Fallen) könnten aber noch durch andere Ansätze abgelöst werden. Aus diesem Grunde ist es noch nicht wünschenswert, final auf bestimmte Technologien zu setzen, sondern man sollte die Möglichkeiten, die der Markt bietet, voll ausschöpfen.

Es ist aus Sicht des Fortschritts notwendig, großes Gewicht auf die Erforschung bestimmter Technologien zu setzen. Nur so kann die notwendige QC-Algorithmik erforscht und insbesondere Kriterien entwickelt werden, mit denen bewertet werden kann, welche der Technologien tatsächlich für die Implementierung eines Quantencomputers geeignet ist.

Nur wenn wir experimentell tatsächlich verifizieren, ob aktuell angebotene Quanten-Technologien halten, was von diversen Anbietern versprochen wird, können wir die vielversprechendste Technologie erkennen und verfolgen. Eine Entscheidung für oder gegen eine Technologie ohne vorangegangener Verifikation mittels real existierender Probleme (d.h. für die Industrie relevante Probleme) zu treffen, ist wissenschaftlich fragwürdig und wirtschaftlich nicht zu verantworten. Industrien mit einem hohen Bedarf an Berechnungen von Optimierungs- und Machine-Learning-Problemen (Prozessbeschreibungen, Autonomes Fahren, Flugroutenoptimierung, Internetdienste, Gen-Gen-Interaktionen etc.) haben ein großes Interesse an Quanten-Annealern, wie dem von DWave entwickelt.

Wichtig ist aber auch: der Fokus kann nicht nur auf der Entwicklung des Quantencomputers liegen. Der Schritt muss weiter gehen. Aus der Sicht des industriellen

Anwenders, der sich dieses neue Feld der Quantencomputer zu Nutzen machen möchte, ohne einen Quantencomputer erst selber zu entwickeln, ist es notwendig, hier frühzeitig in die bestehenden oder gerade entstehenden Produkte (kommerzielle oder akademische) zu investieren, um das nötige Wissen für den Gebrauch des Quantencomputers aufbauen zu können. Erst mit diesem Know-how können in Deutschland auf dem Quantencomputer basierende neue Produkte (Software, Hardware, Dienstleistungen) z.B. für Navigation, Logistik, Medizin, etc. entwickelt werden.

6 Quantum-Enabling Technologies (QeT)

Quantentechnologie in Forschungsanwendungen wird heute oft limitiert durch die verfügbare Labortechnologie, insbesondere deren Größe, Zuverlässigkeit, Stand- und Umweltempfindlichkeit. Dies gilt in besonderem Maße für Anwendungen in der Raumfahrt, die außergewöhnlichen Umweltbedingungen hinsichtlich mechanischer Lasten, Thermalumgebung, Strahlung und Gravitation unterliegen, und bei denen Zuverlässigkeit und Langlebigkeit die Machbarkeit treiben. Industrielles Engineering – kleiner, effizienter und kompakter – bedeutet auch robuster und betriebssicherer und liefert damit erst die Chance, die zunehmende Komplexität der notwendigen „Operationen“ einer Quantenmesstechnik oder eines Quantencomputers umzusetzen, oder auch überhaupt das Labor zu verlassen. QeT ist das technologische Rückgrat bei der Erforschung und Entwicklung der einzelnen Quantentechnologien. Teilweise beruht QeT ebenfalls auf dem Einsatz von Quantentechnologien (spezielle Lichtquellen, Einzelphotonen-Korrelationsdetektoren etc.), grundsätzlich neuen Materialien, oder sie stellen erheblich verbesserte Komponenten oder Systeme dar (Waveguides, Signalmodulatoren, Frequenzkammtechnik etc.). Erst solche Werkzeuge erlauben die zuverlässige Präparation, die Manipulation und das Auslesen von Quantensystemen.

6.1 MARKTREIFE UND -GRÖSSE

Über die letzten 20 Jahre hat sich in Deutschland aus der forschungsnahen Landschaft eine Vielzahl von meist kleineren bis mittleren Firmen etabliert, die an dem Investitionsanteil des vorher genannten Forschungsmarkts partizipieren. Wir schätzen, dass Investitionen in einem Umfang von ca. 100 bis 150 Mio. Euro im Jahr für Laborausstattung im Bereich der QT ausgegeben werden. Es handelt sich dabei z.B. um kompakte stabilisierte Lasersysteme, Einzelphotonen-Nachweiselektronik, Einzelphotonenquellen, Detektoren, sowie kundenspezifische Vakuum- und Beschichtungstechnologie, die für spezifische Laboranwendungen optimiert ist. Spezifikationsmäßig sind diese Systeme am technisch Machbaren, durch den sich sehr schnell wandelnden Markt aber mit sehr geringem Augenmerk auf Standzeit, Lebensdauer, Effizienz, Integrierbarkeit etc. entwickelt worden.

6.2 MARKTDURCHDRINGUNG

Wir glauben, dass in Zukunft viele neue Produkte und Anbieter für verschiedenste Spezialkomponenten benötigt werden. Dabei werden sehr anspruchsvolle Basistechnologien erforderlich sein, die sich aus der universitären Landschaft bei der Verfügbarkeit eines entsprechenden unternehmerischen Klimas entwickeln werden.

6.3 CHANCEN UND RISIKEN

Die Chancen für die deutsche Industrie in diesen Bereichen sind sehr gut. Neue Ausgründungen und Start-ups aus dem akademischen Umfeld können mit dem sich dynamisch entwickelnden Markt wachsen und auf Basis einer breiter eingesetzten Querschnittstechnologie auch Märkte außerhalb der QT adressieren. Aus den bereits etablierten Laborausstattungen können sich mit geringem wirtschaftlichem Risiko weitere marktrelevante QT-Systemanbieter entwickeln. Eine deutsche Stärke der QeT schafft für die größere Industrie interessante Alleinstellungsmerkmale auch für Entwicklung von Systemtechnologie mit allgemeiner Marktrelevanz.

Größtes Risiko ist ein im Vergleich zum internationalen Umfeld zu langsamer Transfer der sehr guten universitären Ausgangslage in nutzbare kommerzielle Produkte im Umfeld eines noch unklaren Marktumfeldes (und dem erforderlichen „Langen Atem“ der Start-ups/ KMUs). Hier ist eine konkrete Unterstützung dieses Transfers dringend erforderlich.

7 Im Rahmen von QUTEGA zu fördernde Technologien und Applikationen

Wir empfehlen die Förderung in Form von gezielt ausgesuchten Leuchtturmprojekten. Diese Leuchtturmprojekte müssen so gewählt werden, dass Felder besetzt werden, in denen sowohl die deutsche Wissenschaft als auch die deutsche Industrie weltweit führend ist. Die Durchführung dieser Leuchtturmprojekte sollte begleitet werden durch die gezielte Förderung von ausgewählten Quantum-Enabling Technologies, um die entsprechenden Zulieferketten zu sichern und mit deutschen Firmen zu besetzen.

7.1 QUANTENKOMMUNIKATION (QK)

Aufgrund der vergleichsweise hohen Reife von QKD haben viele Länder bereits einen deutlichen Entwicklungsvorsprung hinsichtlich industrieller Produkte. Im Gegensatz zu vielen Ansätzen, welche beim Schlüsselaustausch auf diskrete Variablen in Form von einzelnen Photonen setzen, ist Deutschland weltweit führend bei der Schlüsselverteilung mittels kontinuierlicher Variablen. Entsprechend besteht ein Nachholbedarf für die deutsche Industrie bei der Verwendung auch von Technologien mit dem Einsatz diskreter Variablen. Hier sollte ausgehend von den wissenschaftlichen Instituten das nötige Wissen in geeigneter Weise in die Industrie transferiert werden. Durch die gezielte Ausnutzung der „Alternativtechnologie“ für die Überbrückung von großen Distanzen mittels Satelliten-basierter Kommunikation könnte Deutschland sich für die QKD-Technologie an die Spitze der sicheren Informationstechnologie setzen. Für den zu fördernden Wissenstransfer aus den Instituten in die Industrie sollte die deutsche Wirtschaft sich breit aufstellen (Start-ups, neue Abteilungen in etablierten Unternehmen), ohne sich vorzeitig auf eine Technologie festlegen zu müssen.

Datenübertragung am Quantenlimit mit sehr kompakten optischen Strukturen steht derzeit noch ganz am Anfang einer möglichen Kommerzialisierung, bietet aber durch die schiere Größe des Halbleitermarktes beträchtliches kommerzielles Potential.

7.2 QUANTENSENSORIK UND -METROLOGIE (QSM)

Die Sensorik stellt an sich bereits einen sehr großen und stark wachsenden Markt dar. Den Treiber dafür stellen u.a. das Internet of Things (IoT) bzw. Industrie 4.0 und das autonome Fahren dar. Dadurch dass die Fähigkeiten der Sensoren stetig zunehmen, werden sich weitere neue Anwendungsgebiete erschließen. Durch eine Erweiterung und den Übergang von den klassischen Sensoren zu Quantensensoren wird eine weitere Verbesserung der Sensortechnik bis in den ultimativen Präzisions- und Empfindlichkeitsbereich erreicht. Deutschland hat grundsätzlich bereits eine starke Position in der Sensorik. Um diese auch in Zukunft nicht zu gefährden, muss die deutsche Industrie den rechtzeitigen Einstieg in die QSM schaffen. Dazu ist es sehr hilfreich, wenn nicht sogar notwendig, die grundlegende Weiterentwicklung von Konzepten für Quantensensoren zu Produkten mit Industriequalität zu fördern, da weiterhin erhebliche technologische und wirtschaftliche Risiken bestehen.

Für das autonome Fahren benötigt man z.B. Lösungen in der Inertial-Sensorik wie die GPS-freie Navigation für den Fall, dass das GPS-Satelliten-Signal nicht erreichbar ist oder ausfällt. Diese Lösungen könnten mittels hochgenauer Atomuhren oder hochgenauer Magnetometer realisiert werden. Notwendig sind aber auch driftstabile und ultrapräzise Drehraten- und Beschleunigungssensoren.

7.3 QUANTUM-ENHANCED IMAGING (QeI)

Wie bereits in Kapitel 5 ausgeführt, spielt die optische Abbildung in zahlreichen für Deutschland relevanten Märkten eine entscheidende Rolle. Naheliegende Vorteile durch Quantum-enhanced Imaging liegen im Bereich der 3D-Abbildung (QOCT), der Abbildung bei extrem niedrigen Intensitäten z.B. zur Vermeidung der Phototoxizität bei der Abbildung lebender Proben wie in der Entwicklungsbiologie, sowie in der Trennung von

Detektions- und Objektwechselwirkungslicht (insbesondere im Einsatz in der medizinischen Diagnostik). Entsprechend schlagen wir vor, aus dem Bereich Qel die Rauschunterdrückung und das Ghost Imaging vorrangig zu fördern. Wegen der notwendigen numerischen Verarbeitung der Bilddaten ergibt sich auch ein Zusammenhang zur digitalen Optik. Gefördert werden sollte daher die Entwicklung industrietauglicher robuster quantenoptischer Systeme – inklusive der digitalen Vor- und Nachverarbeitung. Die ersten Anwendungen werden wahrscheinlich in der biomedizinischen Forschung und Diagnostik liegen.

7.4 QUANTENCOMPUTING UND SIMULATION (QCS)

Essentielle Quanten-Werkzeuge für das Quantencomputing sind neben den Einzelphoton-Quellen mit hoher Rate ebenfalls phasentreue Atom-Licht- und Licht-Licht-Umsetzer, um die spezifischen Wellenlängen der verwendeten atomaren Systeme über konventionelle Lichtwellenleiter transportieren zu können. Bei der Verwendung größerer Strecken sind Quanten-Repeater oder „Entanglement“-Filter notwendig, die den Quantencharakter erhalten oder auffrischen. Effiziente und kompakte Lichtquellen werden heute in verschiedenen deutschen Forschungsgruppen parallel entwickelt, könnten aber auch in einem gemeinsamen Forschungsprojekt zusammen mit der Industrie angegangen werden.

Simulation von universellen Quantenfragestellungen mittels Quantensystemen ermöglicht wichtige, aktuell schlecht verstandene Probleme der Physik besser zu untersuchen. Etwa ist die Niedrigtemperaturphysik deshalb so schlecht verstanden, weil die darunterliegende Quantenphysik sehr komplex und auch auf Supercomputern nicht adäquat simuliert werden kann, wenn die Anzahl der Partikel über 42 geht. Auch Hochtemperatur-Supraleiter, deren Eigenschaften vermutlich auf dem kollektiven Verhalten von hunderten von Quantenpartikeln basieren, erfordern die Entwicklung von Quantensimulation.

Deutschland besitzt im Feld der Quantensimulation bereits eine starke akademische Position. Hierbei kom-

men sowohl geladene als auch neutrale Atomsysteme zur Anwendung. Insbesondere theoretische Probleme der Festkörperphysik scheinen uns mit diesen Ansätzen in naher Zukunft bearbeitbar zu sein. Ein Aufbau eines auch für nicht Fachleute zugänglichen Quantensimulators auf Basis von in Lichtfeldern gefangenen Atomen kann in kürzerer Zeit als Werkzeug für andere Zweige der Physik entwickelt werden. Sowohl die kollektive als auch die individuelle Adressierbarkeit einzelner Atome oder Ionen bedarf aber entsprechender noch zu entwickelnder kompakter und zuverlässiger Mikrowellen- und Lasertechnologie.

Applikationsseitig liegt der Fokus der Forschung auf der Entwicklung von Quantenalgorithmien, die komplexe Probleme lösen können, die mit klassischen Computern nicht lösbar sind. Darüber hinaus müssen aber Applikationen mit beiden Technologien – klassisch und quantum – arbeiten können. Diese Kombination existiert noch nicht und sollte gefördert werden, um hier den Anschluss nicht zu verlieren.

Für Applikationen, die auch Industriereife erreichen sollen, bedeutet das konkret die Förderung von

- Programmierparadigmen,
- Erforschung / Entwicklung von neuen Programmiersprachen / Compilern,
- APIs für bestehende Programmiersprachen,
- Hardwarezugriff (Cloud-Lösung, Rechenzentren etc.),
- Hardwareinteraktion (Netzwerk klassisch – quantum, Bussysteme etc.) und
- Quantenalgorithmien.

7.5 QUANTUM-ENABLING TECHNOLOGIES (QET)

Die Entwicklung von Quantum-Enabling Technologies hat direkte Marktbedeutung und strahlt deutlich über die QT hinaus auch auf andere Märkte aus. Nur wenn die basis-technologischen technischen Herausforderun-

gen der QeT überzeugend gemeistert sind, werden sich die genannten weiteren QT-Märkte öffnen.

Es sollte daher erreicht werden, dass es für jeden industriellen QUTEQA-Teilnehmer kommerziell Sinn macht, ohne große Infrastrukturinvestitionen einen Ausschnitt der Wertschöpfungskette abzubilden. Deutschland hat hervorragende Grundlagenentwicklung, aber nur sehr wenig Umsetzungskapazität in neu entstehenden Märkten.

Wir empfehlen das Erstellen einer allgemeinen und einer konkreten QT-Technologie-Roadmap, das Herunterbrechen auf Komponenten- und Submodulebene, die über gezielte Förderung (auch ohne heute bereits konkret bestehende Nachfragemärkte) technologisch umgesetzt wird. Die zu erarbeitenden Technologien können direkt heute bereits die experimentellen Arbeiten in den Laboren und der Umsetzung in Demonstratoren stark unterstützen und als Basistechnologie für die weitere Industrialisierung dienen.

Gefördert werden sollten insbesondere die Entwicklung von

- Spezialitäten-Halbleitern (DBR, DFB, ECDL, Quantenpunkte, Trapezverstärker, Halbleiter mit integrierter Funktionalität),
- Optischen Materialien und Spezialkomponenten (ultralow expansion-Materialien, Spezialfasern, nichtlineare Kristalle, neue Faraday-Materialien, optische Isolatoren, Koppler, HF-EOMS etc.),
- High-end Beschichtungstechnik (High-Finesse-Kavitäten, Kristall- und Chirp-Spiegel, super-Breitband-, rauscharm),
- Quellen- und Detektortechnologie (verschränkt, hochkohärent, hochinkohärent, superbreitbandig, neue Spektralbereiche, Einzelphotonen, Messtechnik für Wellenfronten, phasensensitiv, höchste Quanteneffizienz etc.), Datenverarbeitungs- und -vorverarbeitungselektronik (hohe Zeitauflösung, geringe Totzeiten, datendurchsatzoptimiert, parallelisiert, etc.),
- Lichtquellen mit Kohärenz/Linienbreite deutlich besser als 1 MHz, absolute Stabilitäten von Frequenzen im Bereich besser als 10^{-10} , Laser-Weißlichtquellen),

- Optische Frequenzkamm-Messtechnik, Optische Frequenzsynthesizer, phasenkontrolliertes Licht
- Optische Präzisionsaufbau- und Verbindungstechnik („Faktor 4“ anspruchsvoller als Telekom), Hybridmikroaufbauten, Baukastentechniken, Justierstrategien,
- Materialsynthese, z.B. Diamant oder andere Materialien mit zielgerichtet eingebrachten Fehlstellen, oder die Entwicklung von Supraleitersystemen für Qubits,
- integrierte Sub-Modulentwicklungen, optoelektronische Integration, miniaturisierte Spektroskopie-Aufbauten, kleine ultrastabile Referenz-Cavities, whispering gallery mode-Koppler komplexe Regelalgorithmen (z.B. selbstlernende Regler),
- Optische kompakte Aufbautechnik für sichtbare oder UV-Wellenlängen,
- Photonik on the Chip (PIC) Integration, Splitter, Modulatoren, Verstärker, Seeder,
- Technologie zu Nachweis und Manipulation von Einzelatomen (z.B. photonische Kristallfasern als Sensoren für quantisierte Zustände in Gasen und Festkörpern, Nanomechanik),
- Ultrapräzise Mikrowellentechnik bzw. -elektronik,
- Absolute Referenzen für Zeit, Frequenz, Länge, Masse, Ladung, Spannung als zugängliche oder kaufbare Infrastruktur und
- die Qualifikation von bestimmten Enabling Systems als funktionelle Bausteine in Raumfahrtanwendungen. Dazu gehören insbesondere optische Uhren (sowohl Cavities als auch Atomuhren), Frequenzkammtechnik sowie alle Bausteine für Lasermetrologie (Längenmessung, Spektroskopie, ...).

7.6 MÖGLICHE QT-LEUCHTTURMPROJEKTE

Die breitere Öffentlichkeit nimmt QT noch als „reinen Elfenbeinturm“ wahr. Dies kann nur durch erfolgreiche Technologiedemonstrationen im öffentlichen Bereich

(weiterentwickeltes GPS, Gravitationswellendetektor, Space Clock, etc.), aufgelöst werden.

Konkrete Ideen für Leuchtturm-Projekte könnten sein:

- Ein Quantensimulator mit Ionen, mit einer Art von Ion, oder sogar Ionenkombination
- Ein Quantensimulator auf Basis von Neutralatomen in optischen Gittern, auch dort nur eine Atomsorte oder eine Atomsortenkombination
- Eine optische Gitteruhr mit Neutralatomen für höchstpräzise Frequenzmessung (eine Spezies)
- Eine Ionenuhr mit einem Ion oder einer Ionenkombination als Kurzzeitstandard oder Frequenznormal
- Ein hochpräzises hoch-ortsauflösendes Magnetometer (Fehlstellen in Diamant, Gaszellen-basiert, etc.) für die Medizin-Forschung (neuartige Mensch-Maschine-Schnittstelle basierend auf Magnetoenzephalografie (lokal aufgelöste Hirn-Magnetfeldmessung, MKG)
- Hochpräzise Beschleunigungssensorik für Navigation im Nahbereich
- Hochpräzise Drehratensensorik
- Gravitationssensorik für die Geodäsie (Vulkanologen werden zu Kunden der QT-Wissenschaftler) etc.
- Optische Phasenmesstechnik für die Telekommunikation
- Kompakt integrierte QKD Sende- und Empfangsmodule für optische Linecards zur Aufrüstung von kommerziellen faserbasierten Transportsystemen
- Aufbau eines abhörsicheren Kommunikationsnetzes z.B. für Regierung, wichtige Institutionen, Finanzbranche
- Entwicklung von Quantensensoren für Weltraumanwendungen (quantenbasierte Inertialsensoren, ultrapräzise Uhren)
- Entwicklung von Anschauungsexperimenten echter Quanteneffekte für die Ausbildung an Universitäten, Hochschulen, Schulen und interessierten Laien (z.B. Quanten-Experimentierkasten)

Mit Hilfe der Leuchttürme sollte gleichzeitig ein Weg zur Standardisierung der Schnittstellen und die Schaffung von offen zugänglichen Referenzsystemen für die Community realisierbar sein.

Diese Leuchtturmlösungen werden großes Interesse im In- und im Ausland finden, wo man gerade in Technologiefolgeländern versucht, durch Ankauf funktionierender QT-Systeme, den Forschungsrückstand aufzuholen und zu belastbaren nationalen Referenzgeräten zu kommen. Idealerweise wählt man die konkreten Realisierungen so aus, dass die zu entwickelnden Teilkomponenten möglichst breit für weitere QT-Entwicklungen weiter einsetzbar sind. Damit kann Deutschland sich eine globale marktgetragene Führungsrolle bei der Etablierung der neuen QT-Ansätze erarbeiten.

8 Notwendige nächste Schritte für QT-Innovationen

Um QT in der kürzest möglichen Zeit erfolgreich aus dem Labor in den Markt zu bringen, empfehlen wir, nachfolgend skizzierte Maßnahmen zu ergreifen. Hierzu zählen neben der reinen Förderung von konkreten Entwicklungsanstrengungen auch die Steigerung des öffentlichen Interesses an diesen neuen Technologien und die gezielte Nachwuchsförderung.

8.1 FÖRDERUNG EINER BEREICHS- UND FUNKTIONSÜBERGREIFENDEN QT-KOMPENTENZ- UND AUSTAUSCHPLATTFORM

Zur Umsetzung empfehlen wir stark die **Einrichtung einer zentralen Kompetenzstelle für die Quantentechnologien**. In das Aufgabenspektrum sollten sowohl organisatorische und Planungsaufgaben als auch fachliche Begleitung, Koordination der QT-Veranstaltungen und das Verfassen von Dokumentationen und Veröffentlichungen fallen. Eine verständliche und nachhaltige Darstellung der Möglichkeiten von QT scheint uns insbesondere für politische und hoheitliche Entscheidungsträger wichtig.

Aus Sicht der Industrie könnte beispielsweise die Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) eine solche Rolle in idealer Weise übernehmen, da bei ihr viele der Basistechnologien technologisch bereits fachlich verankert sind. Insbesondere die Vermittlung zwischen hoheitlichen, akademischen und industriellen Interessen würde hier sehr gut angesiedelt sein.

Wir empfehlen die Schaffung einer öffentlich zugänglichen messtechnischen Infrastruktur für QT in D und die Einbindung der PTB in ähnlicher Weise wie das NIST oder das NPL zur „Qualitätssicherung“ und Standardisierung der Schnittstellen zwischen den Komponentenebenen der Roadmap im Rahmen eines vorhandenen oder neu zu schaffenden Instituts.

Um den Austausch zwischen Industrie, Wissenschaft und Kunden zu stärken, empfehlen wir die wiederkehrende Veranstaltung von QT-bereichsübergreifenden Workshops und Konferenzen, bei denen sowohl Ver-

treter aus Industrie (sowohl Herstellerindustrie als auch Kundenindustrie) und Wissenschaft teilnehmen. Ziel dieser Veranstaltung muss es sowohl sein, die aktuelle Wissenslücke zwischen Industrie und Wissenschaft zu schließen, als auch neue Anwendungsfelder sowohl für die Leuchtturmprojekte als auch für die einzelnen Elemente der Zulieferkette zu erschließen.

Sollte die PTB sich in diese Aufgabenfelder nicht hinein entwickeln wollen, käme auch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Frage, das sich auch seit vielen Jahren mit QT-Themen beschäftigt hat. Eine weitere Lösung ist natürlich auch die Einrichtung einer eigenen neuen Institution für diese Aufgaben.

8.2 FÖRDERUNG VON LEUCHTTURM-PROJEKTEN MIT KLARER QT-ROADMAP

Wir empfehlen die Erstellung und Pflege einer national-strategischen Roadmap, detailliert bis auf Subkomponentenebene. Diese Roadmap sollte in den ersten Jahren thematisch breit aufgestellt sein, aber sich zum Ende hin deutlich verschlanken und fokussieren. Dies dient sowohl der Koordination als auch der Identifikation und Entwicklung verschiedener Technologie- und Wertschöpfungsschritte über die ganze Lieferkette.

In der Roadmap enthalten sein sollte der Aufbau von Leuchtturm-Realisierungen über die nächsten fünf Jahre. Mutige QT-Systemlösungen sollten so über eine geförderte Auftragsvergabe an Firmen und in Zusammenarbeit mit Forschungsinstituten entwickelt werden.

In einem kontinuierlichen Prozess sollten einige wenige Experten mit sowohl wissenschaftlicher als auch industrieller Erfahrung auf dem jeweiligen Gebiet, und in Abstimmung mit der QT-Community, diese Roadmap pflegen und die Meilensteine und sich daraus ergebende Leuchtturmprojekte festlegen. Ein ähnlicher Prozess findet z.B. in den USA bei der DARPA [2] statt.

Die Förderung von Projekten sollte über mehrere Förderperioden stattfinden, für Submodule sogar bis zu TRL 6. Da man auch hoheitliche Themen mit einbeziehen sollte, geht eine solche Verankerung der QT über

das BMBF hinaus, so dass auch andere Ministerien eingebunden werden sollten. Hierzu ist eine klare und frühzeitige Koordination und Zuordnung der Förderung von Seiten der Politik (Ministerien) und der Referate von Nöten.

8.3 FÖRDERUNG VON NEUEM UNTERNEHMERTUM IM BEREICH QT

Hochschulen, kleine Firmen, Hochschulausgründungen etc. sind und bleiben auf absehbare Zeit die QT-Know-how- und Technologie-Treiber. Daher empfehlen wir, gezielt die Bereitschaft zur Gründung von Start-ups aus dem akademischen Bereich zu fördern. Folgende Maßnahmen können hierzu verwendet werden:

- Förderung von „Quanten-Inkubatoren“ oder zumindest eines „QT-Programms“ in bestehenden Inkubatoren
- Förderung von QT-Unternehmertum durch Finanzierungshilfen, erste Einnistung in Institute, Zugang zu Infrastruktur, Information und Koordination von Lieferketten
- Verpflichtung institutioneller Partner, akademische Infrastruktur für Startups zur Verfügung zu stellen, Schaffung von entsprechenden (akademischen) Belohnungsanreizen für die involvierten Personen und der Institute („Dienstleistungsbewusstsein“)
- Verpflichtung der institutionellen Partner, auch im Nachgang eines zeitlich befristeten Förderprogramms die Industriepartner mit Mustern und Kleinserien weiter zu versorgen
- Einrichtung eines QT-Entrepreneur-Studienmoduls, Stipendien/EXIST-Programme
- Schaffung einer nationalen Konferenz-Plattform für den QT-Austausch (z.B. für den Start als Teil der LASER World of Photonics in München, mittelfristig sollte hier jedoch eine eigenständige Veranstaltung etabliert werden)
- Verbesserung der IP-Situation: In der QT-Patentstatistik spielt Deutschland aktuell nur eine untergeord-

nete Rolle [Abb. 3]. Es sollte ein Anreiz geschaffen werden, dass Forschungsergebnisse auch patentiert werden, wenn eine wirtschaftliche Verwendung absehbar ist

Es gibt in Deutschland über alle Themenfelder hinweg gemessen an allen volkswirtschaftlichen Indikatoren (GDP, Einwohner, Forschungsausgaben etc.) zu wenig Venture Capital. Besonders schwierig ist die Situation aber gerade für Hardwarenahe Technologieunternehmen, wie sie für die meisten der in diesem Papier besprochenen Stoßrichtungen relevant wären. Auch im Rest Europas fließt das meiste Wagniskapital nach wie vor in Internet-basierte Dienstleistungen. Allerdings gibt es eine kleine Schar von Spezialisten, die teilweise seit 15-20 Jahren den Feldern Elektronik/Halbleiter und Photonik treu geblieben sind. Bei diesen Spezialisten gibt es durchaus eine Bereitschaft, sich auch vermehrt mit QT zu beschäftigen, auch wenn es für eine positive Investmententscheidung kaum relevant ist, ob im „engine room“ einer Technologie Quantenkohärenz-Effekte eine Rolle spielen oder nicht – am Ende des Tages fallen Investitionsentscheidungen auf Basis der positiven Einschätzung einer differenzierten schützba- ren Technologieposition und eines sich abzeichnenden Wachstumsmarktes. Diese wenigen (in Deutschland sicher weniger als 10) Spezialisten finden sich teilweise bei unabhängigen Finanzinvestoren, aber auch bei einigen der mittlerweile äußerst zahlreichen Corporate VCs. Wagniskapitalgeber arbeiten an der Schnittstelle zwischen universitärer bzw. industrienaher Forschung und deren Kommerzialisierung und kennen daher die Herausforderungen des mühsamen Wegs vom „lab sample“ zum „industriellen Produkt“ aus vielfacher eigener Anschauung. Es würde sich daher anbieten, in den Governance Strukturen eines zukünftigen Programmes fachlich qualifizierte und langjährig erfahrene Vertreter dieser Industrie in beratender Funktion mit einzubinden.

Klar muss aber auch sein, dass Venture Capital sich nur für einen Teil der absehbaren Unternehmensgründungen eignet – nämlich nur für jene Unternehmen, die einen wirklich rasch skalierbaren und wirklich großen Markt bearbeiten, und die von der Business Building Expertise (und dem Eigenkapital) eines Wagniskapitalgebers wirklich profitieren können.

8.4 FÖRDERUNG DER ENTSTEHUNG VON GESCHLOSSENEN QT-WERTSCHÖPFUNGSKETTEN

Die gewünschte nationale Umsetzung einer QT-Strategie erfordert die Identifikation und Umsetzung einer geschlossenen Wertschöpfungskette. In der ersten Phase des QT-Programms wird diese nicht rein industriell darstellbar sein, und es wird zu einer starken akademisch-industriellen Zusammenarbeit kommen müssen. Aus unserer Sicht sollte diese Wertschöpfungskette – da wo notwendig – auch international offen sein.

- Schaffung und Stärkung einer hochspezialisierten deutschen QT-Infrastruktur aus Instituten, Open Community, kleinen und mittleren Firmen (wo vorhanden, bereits heute zentraler deutscher Wettbewerbsvorteil)
- Schaffung von Zugang zu vorhandener Technologie-Infrastruktur an Instituten für Aufbau- und Verbindungstechnik, Mikrostrukturtechnik etc.
- Förderung von Foundry-Modellen für Mikrointegration, Aufbau- und Verbindungstechnik
- Assoziation von QT-Theoriegruppen an industrielle Aktivitäten
- Einführung von DARPA-artigen „Challenges“ oder Projektausschreibungen [10]
- Entwicklung von QT-Basistechnologien und einer „belastbaren Lieferkette“ aus den Instituten heraus für erste QT-Produkte
- Förderung von QT-Unternehmertum durch Finanzierungshilfen, erste Einnistung in Institute, Zugang zu Infrastruktur, Information und Koordination von Lieferketten

8.5 AUFBAU EINER ÖFFENTLICHEN NACHFRAGE NACH QT-TECHNOLOGIE

Wie bereits in unserer Marktanalyse beschrieben, ist zurzeit der größte Markt für QT durch öffentliche Nachfrage getrieben. Die Märkte in Deutschland sind heute noch rein akademisch. Raumfahrt, innere und äußere Sicherheit als Nachfragemärkte sind in Deutschland leider nicht koordiniert mit öffentlicher Forschungsförderung. Essentiell ist daher eine Koordination der QT-Forschungspolitik (BMBF) mit wirtschafts- (BMW) und sicherheitsstrategischen (BMI, BMVg) Fragestellungen wie bereits z.B. im Weissbuch 2016 (S. 132) explizit gefordert, und auch unter Einbeziehung der Raumfahrtforschung (DLR Institute) und des Raumfahrtmanagements. Die Einbindung der QT in ein zukünftiges nationales Sicherheitskonzept und damit das Heben der strategischen Interessen würde die finanziellen Möglichkeiten eines Programms und damit auch das Interesse der Industrie deutlich steigern.

Wir empfehlen den Aufbau einer öffentlichen QT-Nachfrage mit Ausschreibungen für integrierte QT-Systeme zum Verbleib bei Partnern (z.B. Hochschulkunden, die PTB, oder andere öffentliche Stellen). Nationale Forschungseinrichtungen, Hochschulen etc. sollten durch Bündelung von Interessen zu Nachfragern und Leitkunden bei der spezialisierten deutschen Industrie werden.

Forschungsinstitute tendieren wegen mangelnder Sachmittel dazu, kommerzielle Technologie immer wieder ineffizient mit ihren Personalmitteln neu zu entwickeln, anstatt vorhandene Ansätze zu kaufen oder mit der Industrie strategisch (Roadmap-Prozess) weiterzuentwickeln. Die Institute sollten in Zukunft integrierte und kompakte Systemlösungen mit industriellen Kooperationspartnern definieren und dort bestellen (Vorbild z.B. früheres Nexpresso/ACCORD-Programm der EU [11]). Dazu ist eine bessere Versorgung der Universitäten mit Investitionsmitteln, der Aufbau eines stärkeren Mittelbaus und mehr Projekt- und Ausstattungsmittel statt Doktorandengelder nötig.

Um Märkte außerhalb Deutschlands für die deutsche Industrie zu öffnen, sollte das BMBF auf die Tendenzen anderer nationaler QT-Programme sich aus industriepo-

lischen oder militärstrategischen Gründen abzuschot-
ten, einwirken. Hierzu benötigt es:

- Klarstellung des Grundlagencharakters des QT-
Programms
- Eigene Bereitschaft der Öffnung und internationalen
Zusammenarbeit erklären
- Einwirken auf Partner zur Aufgabe von nationalen
Vorbehalten für den Zugang für den Sicherheits-
markt, zumindest für kleine Firmen
- Einladungen an (inter-)nationale Forschungskom-
petenz, direkt mit Firmen zum Technologietransfer
zusammenzuarbeiten
- Möglichkeit der Kooperationen mit internationalen
Entwicklungspartnern
- Möglichkeit der Einbindung europäischer KMUs in
geförderte Vorhaben, so denn deren Kompetenzen
in Deutschland in absehbarer Zeit nicht aufgebaut
werden können

8.6 AUSBILDUNG UND QT- NACHWUCHSFÖRDERUNG

Die in verschiedenen Ländern angestoßenen QT-
Förderinitiativen führen bereits heute zu einer starken
Verengung des Personalmarktes für Quantentechnolo-
gen. Die Mobilität deutscher Absolventen, verbunden
mit den zeitlich früheren Aktivitäten anderer Länder hat
bereits zu einem starken Abfluss an Spezialisten in die
USA oder UK geführt.

Der Prozess sollte dringend umgekehrt werden, indem
der Markt für Absolventen und Wissenschaftliche
Mitarbeiter in Deutschland entsteht und entsprechend
Arbeitskräfte für die Wissenschaft ebenso wie für die
Industrie anzieht. In diesem Sinne sollte beispielsweise
lieber ein Quantencomputer in Deutschland entwickelt
als ein Rechner im Ausland eingekauft werden.

Physiker werden noch immer zu häufig einzig und allein
für eine akademische Karriere ausgebildet. Es fehlt
an Ingenieurskompetenz bei Physikern, aber auch an

Wissen über Quantentechnologien bei Ingenieuren. Wir
empfehlen daher:

- Einrichtung von Quantenengineering-Lehrstühlen
(z.B. in Berlin, Hannover, München)
- Lehrstühle für Quantencomputer als Teil der Infor-
matik und nicht nur der Physik
- Einrichtung von interdisziplinären Quantentech-
nologie-Studiengängen / Graduiertenkollegs an
deutschen Universitäten und Hochschulen (FH), die
sowohl physikalische, ingenieurtechnische als auch
informationstechnische Aspekte umfassen.
- Verstärkte Zusammenarbeit bei Ausbildungsab-
schnitten (Praktika, Bachelor- und Masterarbeiten
sowie Promotion) mit der Industrie, speziell auch
KMUs (inkl. Finanzierungsinstrumente). Schaffung/
Förderung der Möglichkeit von Vorlesungen durch
Dozenten aus der Industrie
- Schaffung von Akademie/Instituts-Mobilitätspro-
grammen nicht nur für Doktoranden (EU), sondern
auch für PostDocs oder Professoren; Industrie-
Sabbaticals
- Dezidierte Rückkehrprogramme für deutsche Quan-
tentechnologen aus dem Ausland
- Mehr personelle (temporäre) Durchlässigkeit zwi-
schen Akademie und Industrie auf Expertenebene in
beiden Richtungen

Zudem wird die Quantenphysik heute weitestgehend
theoretisch und somit fast ausschließlich mathematisch
gelehrt. Ein intuitiver Zugang, welcher eine gewisse
Vertrautheit mit den Phänomenen der Quanten-
mechanik schafft, wird dadurch nicht gefördert, die
Thematik bleibt abstrakt. Um diese Inhalte einer breiten
Öffentlichkeit zugänglich zu machen, empfehlen wir
die Förderung von Entwicklung und Verbreitung von
Lehrmitteln, die Quanteneffekte möglichst direkt zeigen
und einen spielerischen, phänomenologischen Umgang
mit der Quantenphysik erlauben.

Auch eine Ausstattung der verschiedenen Technikmu-
seen in Deutschland mit QT-relevanten Experimenten
und/oder einer publikumswirksamen (Wander-)Ausstel-
lung – verbunden mit einer Industrie- & Wissenschafts-
schau – kann das Bewusstsein in der Öffentlichkeit stär-

ken, was letztendlich auch zu einer besseren politischen Akzeptanz führen sollte und den Nachwuchs motiviert.

Im Fokus sollten dabei sowohl Universitäten und Hochschulen aller naturwissenschaftlich-technischen Studienfächer als auch weiterführende Schulen, Schülerforschungszentren und Schülerlaboren stehen. Neben der einfachen didaktischen Aufbereitung des Lehrstoffs muss hier ebenfalls die Entwicklung von geeigneten Quantenexperimentiersystemen vorangetrieben werden. Deutschland hat in den vergangenen zehn Jahren hierzu auf dem Gebiet der Didaktik und mit geeigneten marktreifen Experimenten erste Erfahrungen gesammelt, die weiter intensiviert werden sollten. Um nachhaltig eine Führungsrolle auf dem Gebiet der QT einzunehmen, halten wir es für notwendig, Wissen über die Quantenphysik möglichst früh und breit zu verteilen.

9 Referenzen

- [1] „The Quantum Age: technological opportunities; Government Office for Science,“ [Online]. Available: www.gov.uk/go-science.
- [2] „Übersicht der bisherigen und zukünftigen ESA-QT-Missionen auf dem QT-Workshop in Nordwijk (NL),“ 9 11 2016. [Online]. Available: <http://esaconferencebureau.com/2016-events/16c16/introduction>.
- [3] IARPA-Förderprogramme zu Quantum Enhanced Optimization (QEO). [Online]. Available: <https://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/qeo>.
- [4] „White House Report on Advancing Quantum Information Sciences: National Challenges and Opportunities,“ 07 2016. [Online]. Available: https://www.whitehouse.gov/sites/default/files/quantum_info_sci_report_2016_07_22_final.pdf.
- [5] „Beschreibung der UK Roadmap: “A roadmap for quantum technologies in the UK”,“ [Online]. Available: https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/470243/InnovateUK_QuantumTech_CO004_final.pdf.
- [6] „QuTech (Niederlande),“ [Online]. Available: <http://qutech.nl/>.
- [7] „QuBiz (Dänemark),“ [Online]. Available: <http://qubiz.dk/>.
- [8] „An Industry Perspective on How to Exploit Quantum Technologies; BAE Systems (UK),“ [Online]. Available: <https://connect.innovateuk.org/documents/11487824/18138538/Quantum+technologies+-+An+industrial+perspective.pdf/4898fef1-ec50-4446-bd17-7f4178dc4585>.
- [9] J. Stuhler, „Quantum Optics Route to Market”,“ TOPTICA, [Online]. Available: <http://www.nature.com/nphys/journal/v11/n4/full/nphys3292.html>.
- [10] „Spiegel,“ [Online]. Available: <http://www.spiegel.de/netzwelt/tech/quantenkryptografie-die-sicherste-datenleitung-der-welt-a-511087.html>.
- [11] „Quantum Repeater,“ [Online]. Available: <http://www.pro-physik.de/details/news/pro-phy10904news/news.html?laid=10904>.
- [12] „Heise,“ [Online]. Available: <https://www.heise.de/newsticker/meldung/IBM-Quantencomputer-aus-fuenf-Qubits-27667.html>.
- [13] „Defense Advanced Research Projects Agency,“ [Online]. Available: www.darpa.mil.
- [14] „Defense Advanced Research Projects Agency,“ [Online]. Available: www.darpa.mil.
- [15] „Nexpresso, ACCORD-Programm der EU,“ [Online]. Available: <http://www.nexpresso.eu/>.

Impressum

Herausgeber:

VDI Technologiezentrum GmbH
VDI-Platz 1
40468 Düsseldorf

Verantwortlich für den Inhalt:

Dr. Michael Förtsch
Dr. Wilhelm Kaenders
Dr. Max Riedel
Dr. Thomas Strohm
Dr. Michael Totzeck

Verfasser:

Dr. Michael Förtsch (TRUMPF), Dr. Wilhelm Kaenders (TOPTICA),
Dr. Max Riedel (Siemens), Dr. Thomas Strohm (Bosch), Dr. Michael
Totzeck (Zeiss), mit Unterstützung von: Dr. Andreas Bülter (PicoQuant
GmbH), Dr. Helmut Grieser (ADVA Optical Networking), Dr. Jasper
Simon Krauser (Airbus DS GmbH), Dr. Michael Mei (Menlo Systems
GmbH), Dr. Kai Voss (SpaceTech GmbH) Dr. Christian Seidel
(Volkswagen AG), Dr. Henning Weier (qutools GmbH), Norbert M.K.
Lemke (OHB System AG), Dr. Christian Reitberger (Wellington Partners;
b-to-v Advanced Tech).

Redaktion:

VDI Technologiezentrum GmbH

Gestaltung & Umsetzung:

ecosense – media & communication, Köln

Titelfoto:

© aquatarkus/Fotolia

Stand:

Düsseldorf, Januar 2017

