



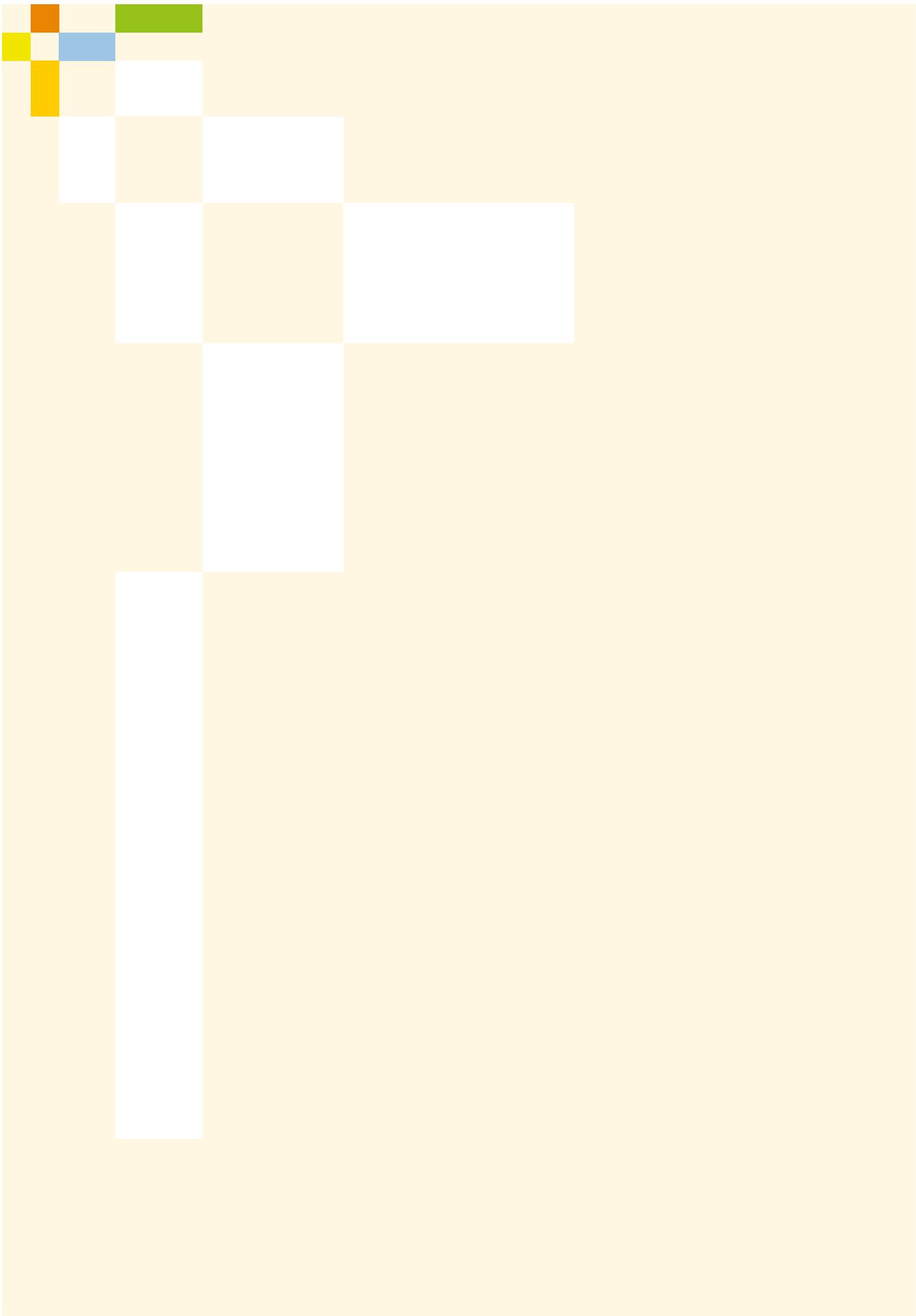
acatech IMPULS

Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation

Henning Kagermann, Florian Süssenguth,
Jörg Körner, Annka Liepold

 acatech

DEUTSCHE AKADEMIE DER
TECHNIKWISSENSCHAFTEN



acatech IMPULS

Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation

Henning Kagermann, Florian Süssenguth,
Jörg Körner, Annka Liepold



Die Reihe acatech IMPULS

In dieser Reihe erscheinen Debattenbeiträge und Denkanstöße zu technikwissenschaftlichen und technologiepolitischen Zukunftsfragen. Sie erörtern Handlungsoptionen, richten sich an Politik, Wissenschaft und Wirtschaft sowie die interessierte Öffentlichkeit. Impulse liegen in der inhaltlichen Verantwortung der jeweiligen Autorinnen und Autoren.

Alle bisher erschienenen acatech Publikationen stehen unter www.acatech.de/publikationen zur Verfügung.

Inhalt

Vorwort	5
Zusammenfassung	6
Interviewpartnerinnen und Interviewpartner	9
Mitwirkende	16
1 Auf dem Weg zu einem Quantenökosystem in Deutschland	17
1.1 Aufbau des Papiers	18
2 Physikalische Grundlagen der Quantentechnologien	19
2.1 Unterschiede zu Quantentechnologien der ersten Generation	19
2.2 Historische Entwicklung der Quantenforschung	20
3 Der Quantentechnologie-Standort Deutschland	22
3.1 Elemente der Quantenlandschaft Deutschlands	22
3.2 Quantenkompetenz	26
3.3 Stärken- und Schwächenprofil Deutschlands	29
4 Internationale Aktivitäten in den Quantentechnologien	30
4.1 Publikationen und Patente	30
4.2 Internationale Initiativen zur Förderung von Quantentechnologien	33
4.3 Vereinigtes Königreich – durch Agilität und Vernetzung zu einer Führungsrolle bei Quantentechnologien	38
5 Basistechnologien für die Anwendung von Quantentechnologien der zweiten Generation	40
5.1 Stand der Forschung und der kommerziellen Anwendung	40
5.2 Marktpotenziale und Wertschöpfungsketten	42
5.3 Technologische Souveränität	43
5.4 Stärken- und Schwächenprofil Deutschlands sowie aktuelle Chancen und Risiken	45



6	Quantensensorik, Quantenimaging und Quantenmetrologie	46
6.1	Stand der Forschung und der kommerziellen Anwendung	48
6.2	Marktpotenziale und Wertschöpfungsketten	49
6.3	Technologische Souveränität	52
6.4	Stärken- und Schwächenprofil Deutschlands sowie aktuelle Chancen und Risiken	53
7	Quantenkommunikation und Quantenkryptografie	54
7.1	Stand der Forschung und der kommerziellen Anwendung	55
7.2	Marktpotenziale und Wertschöpfungsketten	60
7.3	Technologische Souveränität	61
7.4	Stärken- und Schwächenprofil Deutschlands sowie aktuelle Chancen und Risiken	62
8	Quantencomputing	63
8.1	Stand der Forschung und der kommerziellen Anwendung	65
8.2	Marktpotenziale und Wertschöpfungsketten	70
8.3	Technologische Souveränität	74
8.4	Stärken- und Schwächenprofil Deutschlands sowie aktuelle Chancen und Risiken	75
9	Quantensimulatoren	76
9.1	Stand der Forschung und der kommerziellen Anwendung	77
9.2	Marktpotenziale und Wertschöpfungsketten	79
9.3	Technologische Souveränität	80
9.4	Stärken- und Schwächenprofil Deutschlands sowie aktuelle Chancen und Risiken	81
Anhang		82
	Anhang A: Quanten-Glossar	82
	Anhang B: Investitionen in Quantencomputing-Start-ups	83
	Anhang C: Ansätze zur Realisierung eines Quantencomputers	84
	Anhang D: Abbildungsverzeichnis	85
Literatur		86

Vorwort

Der Quantencomputer steht im Zentrum des öffentlichen und politischen Interesses, wenn über die nächste Generation der Quantentechnologien diskutiert wird. Auch wenn in der Debatte eine Tendenz dazu besteht, die praktische Einsetzbarkeit und Leistungsfähigkeit heutiger Quantencomputing-Ansätze zu überschätzen, haben jüngste Durchbrüche gezeigt, dass auf längere Sicht sehr wahrscheinlich mit einer Verwirklichung des disruptiven Potenzials dieses neuen Computertyps zu rechnen ist.

Neben dem Quantencomputer können zukünftig auch weitere neue, öffentlich aber vergleichsweise wenig diskutierte Quantentechnologien einen großen Einfluss auf unser Leben haben. Praxistaugliche Quantensimulatoren könnten schneller als der Quantencomputer realisierbar sein und damit früher als dieser in der Materialforschung eingesetzt werden, beispielsweise um effizientere und damit CO₂-sparende Katalysatoren für die Stickstofffixierung zu entwickeln. Abhörsichere Quantenkommunikation könnte zu einem zentralen Bestandteil unserer IT-Architektur werden. Nicht zuletzt könnte die Ausnutzung quantenmechanischer Effekte in neuartigen Sensoren diagnostische Verfahren zugleich präziser und für die Patientinnen und Patienten angenehmer machen.

Dieser acatech IMPULS nimmt daher eine umfassende Bestandsaufnahme der aktuellen wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklungen der einzelnen Quantentechnologien der zweiten Generation vor. Neben den mit ihnen einhergehenden Wertschöpfungspotenzialen diskutiert er auch ihre Implikationen für die technologische Souveränität des europäischen Binnenmarkts.

Dabei soll ein Bewusstsein dafür geschaffen werden, dass der Transfer quantenphysikalischer Erkenntnisse in konkrete Anwendungen höchst anspruchsvoll ist. Er setzt ein Quantentechnologie-Ökosystem mit der Expertise und Ausdauer voraus, den weiten Weg vom ersten Machbarkeitsnachweis im Labor bis hin zur praxistauglichen Innovation zu meistern. In Deutschland sind alle dafür nötigen Bausteine, insbesondere eine exzellente Forschungslandschaft, vorhanden. Um sie zusammenzufügen, bedarf es aber einer langfristigen konzertierten Anstrengung von Wissenschaft, Wirtschaft und Politik.

Die Deutsche Akademie der Technikwissenschaften möchte mit der vorliegenden Untersuchung zu einer sachlichen und vorausschauenden Debatte über die Quantentechnologien der zweiten Generation beitragen. Zu diesem Zweck wurde von der acatech Geschäftsstelle eine Vielzahl an Hintergrundgesprächen mit Expertinnen und Experten geführt. Die so gewonnenen Erkenntnisse wurden zu einer Darstellung der Faktoren verdichtet, die in den kommenden Jahren den internationalen Wettbewerb um die nächste Generation der Quantentechnologien bestimmen werden.

Die vorliegende Studie ist die überarbeitete Fassung eines Papiers, das mit Mitgliedern der Bundesregierung diskutiert wurde.

acatech dankt allen Mitwirkenden für ihr besonderes Engagement bei der Erstellung.

Prof. Dr. Dr.-Ing. E. h. Henning Kagermann
Vorsitzender des acatech Kuratoriums



Zusammenfassung

Die **Quantenphysik** wurde vor knapp 120 Jahren unter anderen durch Max Planck und Albert Einstein begründet. Ihre Erkenntnisse erlaubten eine deutlich genauere Beschreibung des Verhaltens von Licht und Materie in (sub-)atomaren Maßstäben. Dies schuf die **theoretische Basis** für weite Teile der **modernen Physik**.

Mit dem Laser, der Magnetresonanztomografie und Halbleitern prägen Technologien auf Basis der Quantenphysik bereits seit über einem halben Jahrhundert unser Leben. Mit den **Quantentechnologien der zweiten Generation** steht nun eine **Welle neuartiger Anwendungen** bevor, die gezielt quantenmechanische Effekte bei einzelnen oder wenigen Teilchen präzise kontrollieren.

Die aktuell meistdiskutierte neue Anwendung ist der **Quantencomputer**. Ihm wird das größte disruptive Potenzial zugesprochen. Es wird erwartet, dass er manche Probleme lösen kann, an denen heutige Supercomputer scheitern. Beispiele hierfür sind die Routenoptimierung autonomer Fahrzeugflotten zur Verringerung von Emissionen und Reisezeiten oder auch das Entschlüsseln chiffrierter Daten. Allerdings rechnen die meisten der befragten Expertinnen und Experten mit praktikabel einsetzbaren Quantencomputern erst **in voraussichtlich 5 bis 15 Jahren**.

Quantensimulatoren, eine Art analoge Quantencomputer, könnten bereits früher für die Lösung konkreter Probleme von Anwenderinnen und Anwendern eingesetzt werden. Mit ihnen lassen sich beispielsweise das chemische **Verhalten potenzieller medizinischer Wirkstoffe** modellieren sowie **neuartige Materialien** für effizientere Batterien oder energiesparendere Katalysatoren für chemische Prozesse designen.

Die Ausnutzung von Quanteneffekten erlaubt die Konstruktion physikalisch abhörsicherer Kommunikationsverbindungen. Eine solche **Quantenkommunikation** kann daher ein Baustein zukünftiger IT-Sicherheitsarchitekturen sein. Zudem werden aktuell **neue Formen der Verschlüsselung** entwickelt und geprüft, die auch durch einen Quantencomputer nicht gebrochen werden können.

Nicht zuletzt erlauben die Fortschritte in der Forschung die Entwicklung leistungsfähigerer **Sensoren, bildgebender Verfahren und Messinstrumente**. Mit ihnen könnten beispielsweise Hirnströme genauer erfasst, das Spektrum der Mikroskopie erweitert oder auch anhand von Schwankungen des Schwerkraftfelds unterirdische Strukturen vermessen werden.

Alle Quantentechnologien der zweiten Generation beruhen auf spezialisierten Komponenten wie Lichtquellen, Kühltechnik oder Halbleitern. Die **praktische Einsetzbarkeit** der neuen Quantentechnologien außerhalb der Labore hängt entscheidend davon ab, ob es gelingt, diese **Basistechnologien günstiger, robuster,**

Gut	●	●			
Mittel			●		●
Schlecht				●	
	Basistechnologien	Quantensensorik/ Quantenimaging/ Quantenmetrologie	Quantenkommunikation und -kryptografie	Quantencomputing	Quantensimulatoren

Abbildung 1: Gegenwärtige Position Deutschlands bei der Kommerzialisierung von Quantentechnologien im internationalen Vergleich (Quelle: eigene Darstellung)

kleiner und damit in für die Anwenderinnen und Anwender attraktive Systeme integrierbar zu machen.

Die Reifegrade der beschriebenen Quantentechnologiefelder sind unterschiedlich ausgeprägt, insgesamt befinden sie sich aber alle noch in einem **frühen Stadium**. Gewinne werden mit ihnen noch nicht erwirtschaftet und sie haben auch noch **keine ausgereiften Wertschöpfungsketten** gebildet. Die Forschenden und Unternehmen arbeiten gegenwärtig vor allem an Nachweisen der prinzipiellen Umsetzbarkeit der Erkenntnisse aus den Laboren in praxistaugliche Anwendungen. Über **Experimente, Wettbewerbe und Kleinserien** loten sie aus, in welchen Anwendungsszenarien sich die erwarteten Vorteile der Quantentechnologien tatsächlich realisieren lassen.

Mit ihren frühen Investitionen verfolgen Unternehmen und auch Staaten daher **kein kurzfristiges Gewinninteresse**. Sie versuchen vielmehr, **auf lange Sicht einen großen Kompetenzvorsprung** bei Schlüsseltechnologien in vielen für Deutschland und Europa hochrelevanten Wirtschaftszweigen und Industrien aufzubauen. Hinsichtlich der **gegenwärtigen Position Deutschlands** in diesem internationalen Wettbewerb zeichnen die für den vorliegenden Impuls durchgeführten Analysen und Experteninterviews ein gemischtes Bild (siehe Abbildung 1).

Die folgenden **zehn Kernthesen** fassen die zentralen Erkenntnisse der durchgeführten Bestandsaufnahme und die Einschätzung der möglichen Entwicklungspfade zusammen. Daraus werden Schlussfolgerungen für eine mögliche **weitere Positionierung Deutschlands** abgeleitet:

1. Die **deutsche Quantenforschung** an Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen hat eine lange Tradition und ist international **hoch angesehen**. Diese Stärke kann gezielt durch verstetigte **strategische Kooperationen** mit führenden Standorten innerhalb der **EU** und **weltweit** weiter ausgebaut werden. An vielen von diesen sind bereits heute Deutsche in Forschung und Entwicklung tätig, die hierfür aktiviert werden könnten.
2. Es gilt, **erfahrene Fachkräfte** durch **Weiterbildungen** „quantum-ready“ zu machen. Die **nächste Generation** Studierender, aber auch Auszubildender, beispielsweise in der Feinoptik, gilt es durch die Anpassung bestehender Angebote und neue Studiengänge zu „**Quantum Natives**“ zu machen. **Internationale Forschende** benötigen bessere **Karriere- und Bleibeperspektiven in Deutschland**, insbesondere nach der Promotion.
3. Die **Kommerzialisierung** von Quantentechnologien erfordert einen **längeren Atem**, um einen „Quanten-Winter“ (analog zu früheren KI-Wintern) zu vermeiden. Eine langfristige Fortsetzung und **Weiterentwicklung** der deutschen und europäischen Fördermaßnahmen und Strategieprozesse sind nicht nur für die Forschungseinrichtungen entscheidend, sondern können zudem das **Engagement der deutschen Unternehmen** auch während einer Phase schwacher Konjunktur aufrechterhalten.
4. **Grundlagen- und angewandte Forschung** müssen in diesem noch jungen Feld **enger als üblich zusammenarbeiten**. Dies erfordert nicht nur die wechselseitige Öffnung der Physik, der Ingenieurwissenschaften und weiterer Disziplinen für die jeweils anderen Fachkulturen. Es bedarf auch einer **frühzeitigen Einbindung der Wirtschaft**. Hierfür ist ein entsprechender unterstützter Kompetenz- und Erfahrungsaufbau notwendig.
5. Für alle Quantentechnologien der zweiten Generation gibt es in Deutschland eine **große Zahl potenzieller Anwender** aus vielen unterschiedlichen Branchen, für die Quantentechnologien einen logischen nächsten Qualitätsschritt darstellen können und die **zugleich attraktive Kooperationspartner für die Hersteller** entsprechender Anwendungen aus dem In- und Ausland sind.
6. Die **Vernetzung** der für sich jeweils oft sehr guten Forschenden, der ersten im Feld aktiven Unternehmen und auch der potenziellen Anwender zu einem **schlagkräftigen deutschen Ökosystem** steht bei den Quantentechnologien der zweiten Generation **noch am Anfang**. In der Folge **mangelt** es im internationalen Vergleich oft an **Koordination, Geschwindigkeit** und **kritischer Masse**.
7. Insbesondere bei den **Basistechnologien** und der quantenbasierten **Sensorik, Bildgebung und Metrologie** hat Deutschland eine **sehr gute Ausgangsposition**. Die Bereitstellung von **Produktions-, Test- und Validierungsumgebungen** kann KMU und Start-ups insbesondere bei Basis-komponenten und bei der Quantensensorik den Einstieg erleichtern. Im Bereich der Quantenkommunikation kann der **Staat als Vorreiter** Vertrauen in die Technologie schaffen und auf die Schaffung von Zertifizierungsmöglichkeiten und Standards hinwirken.
8. Die meisten befragten Expertinnen und Experten sehen das **eigentliche Wertschöpfungspotenzial des Quantencomputers** nicht in der Hardware, sondern in der durch ihn



ermöglichten nächsten Digitalisierungswelle in seinen Einsatzgebieten. Um die dafür nötigen **Algorithmen und Programme** zu entwickeln, benötigen deutsche Unternehmen und Forschende einen möglichst umfassenden, kontinuierlichen **Zugang zu Quantencomputing-Plattformen**, idealerweise bis hinunter zur Hardwareebene.

9. **Technologische Souveränität** im Quantencomputing kann Deutschland aber nur durch einen **deutschen oder zumindest europäischen Quantencomputerhersteller** erreichen.

Selbiges gilt für den Aufbau eigener Kapazitäten in der Quantenkommunikation.

10. Der Einstieg in den **Aufbau europäischer Quantencomputing-Hardwarekapazitäten** würde vielen Befragten zufolge die schnelle **Koordination** der bestehenden Kompetenzen und Infrastrukturen sowie einen baldigen **Schulterschluss mit anderen führenden EU-Staaten**, insbesondere Frankreich, den Niederlanden und Österreich, voraussetzen.

Interviewpartnerinnen und Interviewpartner

Danksagung

In Ergänzung zur Auswertung von Fachliteratur und anderen Studien haben die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter der acatech Geschäftsstelle für den vorliegenden Impuls mit 95 Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft explorative Experteninterviews durchgeführt. Ziel war es, ein aktuelles Stimmungsbild zu dem Entwicklungsstand und den Potenzialen der Quantentechnologien der zweiten Generation zu erhalten.

Die Gespräche wurden im Zeitraum von Juni bis Oktober 2019 telefonisch oder persönlich geführt und dauerten im Schnitt eine

Stunde. Um den explorativen Charakter der Befragungen zu unterstützen und auch die „leisen Töne“ einzufangen, wurde auf eine offene Gesprächsführung gesetzt. In der vorliegenden Studie wird ein Überblick über die zentralen in den Interviews geäußerten Einschätzungen und Positionen gegeben, womit aber nicht ausgeschlossen werden soll, dass einzelne Interviewpartnerinnen und -partner zu bestimmten Fragen andere Standpunkte vertreten.

Die genannten Funktionen der Interviewpartnerinnen und Interviewpartner beziehen sich auf den Zeitpunkt des jeweiligen Gesprächs. Zur Illustration einiger ausgewählter Kerngedanken der Befragten werden im Text hin und wieder den Interviews entnommene anonymisierte Zitate aufgeführt.

Die acatech Geschäftsstelle dankt im Namen des acatech Präsidiums allen Beteiligten sehr herzlich für ihre Bereitschaft zur Teilnahme an den Interviews!

Prof. Dr. Oliver Ambacher

Fraunhofer-Institut für angewandte Festkörperphysik (IAF)
Institutsleiter

Prof. Yoichi Ando, Ph. D.

Universität zu Köln
Lehrstuhl für Experimentelle Physik, Sprecher des Exzellenzclusters Materie und Licht für Quanteninformation (ML4Q)

Dr. Fabio Baruffa

Intel Deutschland GmbH
Technical Consulting Engineer

Prof. Dr. Rainer Blatt

Österreichische Akademie der Wissenschaften
Wissenschaftlicher Direktor Institut für Quantenoptik und Quanteninformation
Universität Innsbruck
Head of Quantum Optics and Spectroscopy Group, Institut für Experimentalphysik

Prof. Dr. Immanuel Bloch

Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ)
Direktor

Gustav Böhm

Daimler AG
Senior Engineer Strategic Technology Assessment

Dr.-Ing. Michael Bolle

Robert Bosch GmbH
Geschäftsführer, Chief Digital Officer und Chief Technology Officer

Prof. Dr. Kai Bongs

University of Birmingham
Director of UK Quantum Technology Hub for Sensors and Metrology



Dr. Thierry Botter	Airbus Defence and Space GmbH <i>Head of Airbus Blue Sky, Deputy-Head of Central Research & Technology</i>
Markus Braun	Jos Quantum GmbH <i>Gründer & Managing Director</i>
Dr.-Ing. Hans Brunner	Huawei Technologies Duesseldorf GmbH <i>Senior Research Engineer Quantum Communication and Computation Laboratory</i>
Prof. Dr. Johannes Buchmann	TU Darmstadt <i>Professur für Informatik und Mathematik</i>
Prof. Dr. Karsten Buse	Fraunhofer-Institut für Physikalische Messtechnik (IPM) <i>Institutsleiter</i> Universität Freiburg <i>Professur für Optische Systeme</i>
Prof. Dr. Tommaso Calarco	Forschungszentrum Jülich GmbH <i>Director Institute Quantum Information, Peter Grünberg Institute</i>
Prof. Dr. Ignacio Cirac	Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) <i>Direktor/Leiter der Abteilung Theorie</i>
Laura Converso	Accenture Research <i>Thought leadership Senior Principal</i>
Prof. Dr. Martin Dawson	Fraunhofer Centre for Applied Photonics (CAP) <i>Head of Centre</i> University of Strathclyde <i>Director of Research, Institute of Photonics</i>
Prof. Dr. Hansjörg Dittus	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) <i>Vorstand Raumfahrtforschung und -technologie</i>
Prof. Dr. Gabi Dreo Rodosek	Universität der Bundeswehr <i>Leitende Direktorin des Forschungsinstituts CODE</i>
Volker Eiseler	Universität der Bundeswehr <i>Geschäftsführer Forschungsinstitut CODE</i>
Christin Eisenschmid	Intel Deutschland GmbH <i>Geschäftsführerin</i>
Dr. Astrid Elbe	Intel Deutschland GmbH <i>Managing Director Intel Labs Europe</i>
Dr. Michael Förtsch	Q.ANT GmbH <i>CEO</i>

Jens Fuhrberg	Intel Deutschland GmbH <i>Government Affairs; Public Affairs</i>
Dr. Wolfgang Alexander Gehrke	Universität der Bundeswehr <i>Laborleiter Forschungsinstitut CODE</i>
Dr.-Ing. habil. Alfred Geiger	T-Systems Solutions for Research GmbH <i>Product Manager High-End-Computing (HEC)</i>
Dr. Marc Geitz	Telekom Innovation Laboratories <i>Innovation Architect</i>
Dr. Philipp Gerbert	Boston Consulting Group GmbH <i>Managing Director & Senior Partner</i>
Dr.-Ing. Christoph Glingener	ADVA Optical Networking SE <i>Chief Technology Officer</i>
Dr. Jürgen Groß	Robert Bosch GmbH <i>Executive Vice President Corporate Research</i>
Dr. Philipp Harbach	Merck KGaA <i>Head of In Silico Research</i>
Prof. Dr. Michael Hartmann	Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg <i>Lehrstuhl für Theoretische Physik II</i> Google Germany GmbH <i>Visiting Faculty</i>
Prof. Dr. Andreas Hintennach	Daimler AG <i>Abteilungsleiter RD/EBT (Zell-Technologie)</i>
Dr. Markus Hoffmann	Google Germany GmbH <i>Global Quantum Computing Practice Lead</i>
Prof. Dr.-Ing. Martin Hoffmann	Ruhr-Universität Bochum <i>Lehrstuhl für Mikrosystemtechnik</i>
Dr. Martin Hofmann	Volkswagen AG <i>Generalbevollmächtigter der Volkswagen AG Konzern IT</i>
Dr. Michael Holyński	University of Birmingham <i>Innovation Fellow, School of Physics and Astronomy</i>
Martin Jetter	IBM Deutschland GmbH <i>Senior Vice President & Chairman IBM Europe</i>



Prof. Dr. Henning Kagermann	acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften <i>Vorsitzender des acatech Kuratoriums / acatech Senator</i>
Prof. Dr. Khaled Karrai	attocube systems AG <i>Scientific Director</i>
Prof. Dr.-Ing. Anke Kaysser-Pyzalla	Technische Universität Braunschweig <i>Präsidentin</i>
Prof. Dr. Stefan Kück	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) <i>Abteilungsleiter Optik</i>
Dr. Thomas Kurth	Infineon Technologies AG <i>Head of Sensor Technology Development, Automotive Sensors</i>
Dr. Markus Leder	Daimler AG <i>Artificial Intelligence Researcher</i>
Tim Leonhardt	Accenture GmbH <i>Quantum Computing Incubation Lead ASGR</i>
Prof. Dr. Gerd Leuchs	Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts (MPL) <i>Direktor</i>
Dr. Manfred Lochter	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) <i>Referent</i>
Marius Loeffler	DIN e. V. <i>Innovationsmanager</i>
Dr. Sebastian Luber	Infineon Technologies AG <i>Director Technology & Innovation, Automotive Division</i>
Dr. Norbert Lütke-Entrup	Siemens AG <i>Head of Technology and Innovation Management Corporate Technology</i>
PD Dr. Christoph Marquardt	InfiniQuant <i>Teamleiter</i> Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts (MPL) <i>Forschungsgruppenleiter Quanteninformationsverarbeitung</i>
Prof. Dr. Florian Marquardt	Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts (MPL) <i>Direktor</i>
Dr. Michael Marthaler	HQS Quantum Simulations GmbH <i>Geschäftsführer</i>

Dr. Michael Mei	Menlo Systems GmbH <i>Geschäftsführer</i>
Prof. Dr. Dieter Meschede	Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn <i>Leiter der Forschungsgruppe Quantentechnologie</i>
Prof. Dr. Jürgen Mlynek	European Quantum Technology Flagship <i>Chair of the Strategic Advisory Board</i> Humboldt-Universität zu Berlin <i>Emeritus</i>
Dr. Christian Mrugalla	Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (BMI) <i>Referatsleiter Internationale Cybersicherheit und Cybersicherheitsforschung</i>
Prof. Dr. Rainer Müller	Technische Universität Braunschweig <i>Abteilungsleiter Physik und Physikdidaktik</i>
Stephan Nachtigall	Technische Universität Braunschweig <i>Referent für Wissenschaftspolitik</i>
Prof. Dr. Stuart Parkin	Max-Planck-Institut für Mikrostrukturphysik <i>Direktor</i>
Momtchil Peev, Ph. D.	Huawei Technologies Duesseldorf GmbH <i>Project Leader of the Quantum Communication Project</i>
Prof. Dr. Martin Plenio	Universität Ulm <i>Direktor des Instituts für Theoretische Physik</i> NVISION IMAGING Technologies GmbH <i>Co-Founder</i>
Dr. Thomas Pöppelmann	Infineon Technologies AG <i>Senior Staff Engineer Security Architecture and Cryptography Research</i>
Prof. Dr. Markus Reiher	ETH Zürich <i>Professur für Theoretische Chemie</i>
Dr. Christian Reitberger	btoV Partners Industrial Tech Fund <i>Partner</i>
Prof. Dr. Gerhard Rempe	Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) <i>Direktor</i>
Dr. Stephan Ritter	TOPTICA Photonics AG <i>Application Specialist Quantum Technologies</i>
Dirk Schapeler	BAYER LLC <i>Vice President Digital</i>



Prof. Dr. Martin Schell	Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut HHI <i>Institutsleiter</i>
Dr. Benjamin Scherer	Endress+Hauser Process Solutions (DE) GmbH <i>Project Manager Innovative Sensorics</i>
Prof. Dr. Wolfgang Schleich	Universität Ulm <i>Leiter des Instituts für Quantenphysik</i>
Dr. Frank Schlie	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) <i>Referatsleiter Quantensysteme; postdigitale Computer</i>
Bernd Schlömer	Bundesministerium für Verteidigung (BMVg) <i>Referent für Forschungsangelegenheiten Cyber Defence</i>
Dr. Berthold Schmidt	TRUMPF Lasertechnik GmbH <i>CTO Lasertechnik</i>
Prof. Dr. Andreas Schütze	Universität des Saarlandes <i>Lehrstuhl für Messtechnik</i>
PD Dr. Uwe Siegner	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) <i>Abteilungsleiter Elektrizität</i>
Dr. Jörn Stenger	Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) <i>Mitglied des Präsidiums</i>
Prof. Dr. Michael Totzeck	Carl Zeiss AG <i>Fellow</i>
Prof. Dr. Günther Tränkle	Ferdinand-Braun-Institut (FBH), Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik <i>Institutsdirektor</i>
Dr. Nils Trautmann	Carl Zeiss AG <i>Senior Manager Innovation Quanten Technology Group</i>
Prof. Dr. Andreas Tünnermann	Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik (IOF) <i>Institutsleiter</i> Friedrich-Schiller-Universität Jena <i>Direktor Institut für Angewandte Physik</i>
Prof. Dr. Klaus von Klitzing	Max-Planck-Institut für Festkörperforschung <i>Emeritus</i>
Prof. Dr. Andreas Waag	TU Braunschweig <i>Institutsleiter Halbleitertechnik</i> <i>Sprecher QuantumFrontiers-Cluster</i>

Prof. Ian Walmsley, Ph. D.	Imperial College London <i>Provost</i>
Prof. Dr. Stephanie Wehner	TU Delft <i>Professor in Quantum Information and Roadmap Leader Quantum Internet and Networked Computing</i>
Prof. Dr. Matthias Weidemüller	Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg <i>Forschungsgruppenleiter Quantum Dynamics of Atomic and Molecular Systems</i>
Dr. Walter Weigel	Huawei Technologies Duesseldorf GmbH <i>VP & CSO European Research Institute</i>
Dr. Horst Weiss	BASF SE <i>Vice President Digitalization Advanced Materials & Systems Research, Data Sciences</i>
Prof. Dr. Roland Wiesendanger	Universität Hamburg <i>Leiter der Forschungsgruppe Rasterelektromethoden</i>
Prof. Dr. Frank Wilhelm-Mauch	Universität des Saarlandes <i>Professur für Theoretische Physik</i>
Dr.-Ing. Torsten Wipiejewski	Huawei Technologies Duesseldorf GmbH <i>Business Development Manager Hardware and Engineering Department</i>
Ingolf Wittmann	IBM Deutschland GmbH <i>Technical Director, Leader of IBM Q Ambassadors EMEA, CTO & Leader of HPC Europe</i>
Prof. Dr. Jörg Wrachtrup	Universität Stuttgart <i>Leiter des 3. Physikalischen Instituts</i>
Dr. Matthias Ziegler	Accenture GmbH <i>Emerging & Growth – ASGR & Europe Lead / Technology Incubation Global Lead Accenture Technology Innovation & Ecosystem</i>
Prof. Dr. Artur Zrenner	Universität Paderborn <i>Head of Center for Optoelectronics and Photonics Paderborn (CeOPP)</i>

Des Weiteren wurde ein Hintergrundgespräch mit dem BMWi geführt.



Mitwirkende

Gesamtleitung

- Prof. Dr. Henning Kagermann, Vorsitzender des acatech Kuratoriums

Inhaltliche Mitarbeit

- Dr. Reinhard Ploss, Infineon Technologies AG
- Prof. Dr. Martin Stratmann, Max-Planck-Gesellschaft

Inhaltliche Begleitung und Review

- Prof. Dr. Dr. Andreas Barner, Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft
- Dr. Martin Bruder Müller, BASF SE
- Gabi Grützner, micro resist technology GmbH
- Prof. Dr. Jörg Hacker, Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina
- Prof. Dietmar Harhoff, Ph. D., Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerb
- Reiner Hoffmann, Deutscher Gewerkschaftsbund
- Dr. Marion Jung, ChromoTek GmbH
- Prof. Dr. Anke Kayser-Pyzalla, Technische Universität Braunschweig
- Prof. Dr. Renate Köcher, Institut für Demoskopie Allensbach
- Harald Krüger, BMW AG
- Prof. Dr. Reimund Neugebauer, Fraunhofer-Gesellschaft
- Prof. Dr. Günther Schuh, e.GO Mobile AG
- Stefan Vilsmeier, Brainlab AG
- Dr. Anna-Katharina Wittenstein, Wittenstein SE

Redaktionelle Mitarbeit

- Dr. Christoph Ettl, Max-Planck-Gesellschaft
- Dr. Tim Gutheit, Infineon Technologies AG

Konzeption, Text und Interviews

- Florian Süssenguth, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Jorg Körner, acatech Geschäftsstelle
- Dr. Annka Liepold, acatech Geschäftsstelle

Mit Unterstützung durch

- Dr. Patrick Pfister, acatech Geschäftsstelle
- Jan Fischer, acatech Geschäftsstelle
- Stefan John, acatech Geschäftsstelle
- Silke Liebscher, acatech Geschäftsstelle
- Elisabeth Paul, acatech Geschäftsstelle

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wird mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen 16PLI7003 gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

GEFÖRDERT VOM



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

1 Auf dem Weg zu einem Quantenökosystem in Deutschland

Die **Quantenphysik** wurde vor knapp 120 Jahren unter anderen durch Max Planck und Albert Einstein begründet. Ihre Erkenntnisse erlaubten eine deutlich genauere Beschreibung des Verhaltens von Licht und Materie in (sub-)atomaren Maßstäben. Dies schuf die **theoretische Basis** für weite Teile der **modernen Physik**. Diese Revolution der wissenschaftlichen Disziplin und die darauf aufbauende Grundlagenforschung führten in der Folge auch zu praktischen technologischen Anwendungen wie dem Laser, Halbleitertechnologien oder der Magnetresonanztomografie. Seit mehr als einem halben Jahrhundert prägen diese Technologien unser Leben und haben **viele neue Wirtschaftszweige** hervorgebracht.

Mit den **Quantentechnologien der zweiten Generation** steht nun eine **Welle neuartiger Anwendungen** bevor, die gezielt quantenmechanische Effekte bei einzelnen oder wenigen Teilchen präzise kontrollieren. Diese Innovationen werden üblicherweise in vier **Technologiefelder** eingeteilt: **quantenbasierte Sensorik, Imaging und Metrologie; Quantenkommunikation und -kryptografie; Quantencomputing** sowie **Quantensimulatoren**.

Sie alle sind zudem bei den benötigten Komponenten auf **Basistechnologien** angewiesen.

Deutschland und allgemein **Europa** können **exzellente Grundlagenforschung** in allen genannten Technologiefeldern vorweisen. Zugleich nehmen die für den vorliegenden Impuls befragten Expertinnen und Experten wahr, dass auch im Bereich der Quantentechnologien die als „**European Paradox**“ bekannte **Schwäche beim Transfer** sehr guter wissenschaftlicher Leistungen in **konkrete Innovationen** im internationalen Vergleich zu befürchten ist, wenn nicht erfolgreich gegengesteuert wird.¹ Die relative Position Deutschlands im internationalen Wettbewerb um die Überführung von Forschungsergebnissen in konkrete, marktaugliche Anwendungen bewerten die befragten Expertinnen und Experten **aktuell** wie in Abbildung 1 dargestellt.

Die aktuellen deutschen und europäischen Initiativen adressieren diese Ausgangslage und eine Reihe identifizierter Schwachstellen: Das **Rahmenprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ der Bundesregierung** sowie das **EU Quantum Flagship** fördern nicht nur die bereits aktiv Forschenden. Sie zielen zudem auf eine gesteigerte Sichtbarkeit und Attraktivität der Quantentechnologien in Deutschland und der EU ab und senden wichtige Signale an die Industrie (Hersteller und auch potenzielle Anwender), diesen Zukunftsmarkt frühzeitig mitzudenken.² Interessierte Unternehmen werden dabei aktiv in die Vorhaben eingebunden.

Gut	●	●			
Mittel			●		●
Schlecht				●	
	Basistechnologien	Quantensensorik/ Quantenimaging/ Quantenmetrologie	Quantenkommunikation und -kryptografie	Quantencomputing	Quantensimulatoren

Abbildung 1: Gegenwärtige Position Deutschlands bei der Kommerzialisierung von Quantentechnologien im internationalen Vergleich (Quelle: eigene Darstellung)

1 | Vgl. EU-KOM 1995.

2 | Vgl. BMBF 2018; High-Level Steering Committee 2017.



Mehrere deutsche Forschungseinrichtungen haben zudem **Kooperationen mit Google beziehungsweise IBM** geschlossen, um in Entwicklung und Forschung tätigen Menschen einen **Zugang zu den Quantencomputing-Plattformen** dieser amerikanischen Hersteller zu ermöglichen. Dieser ist für die **Entwicklung von Algorithmen und Software** und damit Wertschöpfung auf Basis des Quantencomputers entscheidend. Damit ist nach Ansicht der Befragten ein erster wichtiger Schritt getan, die Position Deutschlands in diesem Technologiefeld zu verbessern. Ein **europäischer Anbieter für Quantencomputing-Hardware** fehlt hingegen weiterhin.

Eine erfolgreiche Kommerzialisierung der Quantentechnologien zweiter Generation bietet insgesamt **große Potenziale für Wertschöpfung** im Hochtechnologieland Deutschland. Präzise **Marktabschätzungen** für Quantentechnologien der zweiten Generation sind zum jetzigen frühen Zeitpunkt allerdings sehr **schwierig**.³ Neben der Optimierung bestehender Produkte und Dienstleistungen erwarten die befragten Expertinnen und Experten auch das Entstehen **vollkommen neuer Anwendungsmöglichkeiten** und damit einhergehend **neuer Märkte**. Allgemein gehen sie von einem langsamen Aufwachsen der Märkte aus, in denen **hochspezialisierte Nutzer**, wie Forschungseinrichtungen und Entwicklungslabore, die **ersten Kunden** sein werden, mit denen die Anwendungen dann weiterentwickelt und breiteren Nutzergruppen zugänglich gemacht werden können.

Auch wenn bereits einige wenige erste Produkte auf dem Markt erhältlich sind, betonen die Expertinnen und Experten, dass Quantentechnologien allgemein einen **langen Atem in Forschung und Entwicklung** voraussetzen. Dies betrifft sowohl die weitere Grundlagenforschung als auch die Umsetzung in alltags-taugliche, außerhalb spezialisierter Labore nutzbare Produkte. Die **aktuell verfügbaren Produkte** werden zudem in **Handarbeit** hergestellt, die **Serienfertigung** hoher Stückzahlen liegt noch **in weiter Ferne**.

Ein **agiles Quantentechnologie-Ökosystem** ist die Grundvoraussetzung für die Realisierung der hohen Wertschöpfungspotenziale

für **Deutschland**. Hier sehen die meisten Befragten jedoch noch einen **deutlichen Entwicklungsbedarf**. In der Schaffung einer **Plattform zum Austausch der Stakeholder und zu ihrer Koordination** sehen sie daher einen wichtigen möglichen Beitrag, den die Politik leisten könnte. Neben den **Forschungseinrichtungen** und **FuE-aktiven Unternehmen** wären hier auch potenzielle und tatsächliche **Anwender, Investoren** sowie die **Öffentlichkeit** ein-zubindende Stakeholder.

1.1 Aufbau des Papiers

Das nächste Kapitel führt kurz in die **physikalischen Grundlagen** der Quantentechnologien ein, bevor Kapitel 3 den Quantentechnologie-**Standort Deutschland** beleuchtet. Kapitel 4 nimmt anschließend eine **internationale Einordnung** vor, wobei das UK National Quantum Technologies Programme als Beispiel für die agile Vernetzung und Herausbildung eines Quantentechnologie-Ökosystems genauer vorgestellt wird. Die Kapitel 5 bis 9 vertiefen folgende Technologiefelder:

- **Basistechnologien für Quantentechnologien** (Kapitel 5)
- **Quantensensorik/Quantenimaging/Quantenmetrologie** (Kapitel 6)
- **Quantenkommunikation und Quantenkryptografie** (Kapitel 7)
- **Quantencomputing** (Kapitel 8)
- **Quantensimulatoren** (Kapitel 9)

Auf eine allgemeine Einführung und Illustration denkbarer **Einsatzszenarien** folgt jeweils der aktuelle **Stand der Forschung und der Entwicklung** kommerzieller Anwendungen. Darauf aufbauend werden Einschätzungen zu **Marktpotenzialen** sowie der zu erwartenden Auswirkungen auf **Wertschöpfungsketten** und die **technologische Souveränität** Deutschlands und Europas vorgenommen. Ein Überblick über die feldspezifischen **Stärken und Schwächen Deutschlands** sowie die sich daraus ergebenden Chancen und Risiken für den Standort schließt die Kapitel jeweils ab.

2 Physikalische Grundlagen der Quantentechnologien

Die **quantenmechanischen Effekte**, die die Grundlage für Quantentechnologien bilden und im atomaren und subatomaren Bereich stattfinden, **unterscheiden sich stark von der klassischen Physik** (Newtonsche Mechanik, Elektrodynamik, Thermodynamik). Deswegen hatte selbst Einstein seinerzeit Schwierigkeiten, die Implikationen der Quantenmechanik zu akzeptieren. Inzwischen ist die Quantenmechanik aber die **Hauptsäule der modernen Physik**. Sie bildet die Grundlage zur Beschreibung der Phänomene der Atomphysik, der Festkörperphysik sowie der Kern- und Elementarteilchenphysik.

Nachfolgend werden die **Unterschiede** zwischen der **ersten** und der **zweiten Generation** der Quantentechnologien sowie **grundlegende Effekte** erklärt. Weitere zentrale Begrifflichkeiten werden im Quanten-Glossar (siehe Anhang A) erläutert.

2.1 Unterschiede zu Quantentechnologien der ersten Generation

Wurden bei Quantentechnologien der **ersten Generation Quanteneffekte noch passiv** genutzt, basierend auf **vielen Teilchen** (zum Beispiel bei der Supraleitung), beruhen Quantentechnologien der **zweiten Generation** darauf, dass **Quantenzustände aktiv generiert** werden, basierend auf **wenigen beziehungsweise einzelnen Teilchen**. Bei Quantentechnologien der zweiten Generation steht der kontrollierte Quantenzustand einzelner oder

Quantentechnologien der ersten Generation⁴

Laser: Seit den 1960er Jahren kommen Laser in der industriellen Fertigung, der Forschung sowie im Alltag zum Einsatz. Sie werden zur Entfernungsmessung, bei Schneid- und Schweißwerkzeugen, dem Auslesen optischer Speichermedien (CDs, DVDs etc.) bis hin zum Laserskalpell im medizinischen Einsatz verwendet. Der physikalische Effekt, der hinter der Lasertechnologie steckt, wird als stimulierte Emission bezeichnet. Dieser Effekt sorgt für die Lichtverstärkung und ist namensgebend: **Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**.

Halbleitertechnologien: Elektronische Halbleiter-Bauelemente sind die wichtigsten aktiven Bestandteile elektronischer Schaltungen, die beispielsweise in der Nachrichtentechnik, der Leistungselektronik und in Computersystemen eingesetzt werden. Ein Quantenpunkt ist eine auf Halbleitermaterial realisierte nanoskopische Materialstruktur. Da ihre Form, ihre Größe sowie die Anzahl von Elektronen in ihr beeinflusst werden können (anders als bei Atomen), ist es möglich, dadurch die elektronischen und optischen Eigenschaften von Quantenpunkten maßzuschneidern.

Satellitennavigation: Der Zeittakt bei Atomuhren wird aus der charakteristischen Frequenz von Strahlungsübergängen

der Elektronen freier Atome, wie zum Beispiel Caesium, abgeleitet. Die daraus resultierende Präzision von Atomuhren liegt bei weniger als einer Sekunde Ungenauigkeit auf einen Zeitraum von 130 Millionen Jahren. Die Standortbestimmung durch Galileo oder GPS basiert auf mit Atomuhren ausgestatteten Satelliten, die fortwährend ihre Position und ein Zeitsignal senden. Beim Empfängergerät kann durch die Auswertung von mindestens vier Satellitendatensätzen der eigene Standort bis auf wenige Meter exakt berechnet werden.

Magnetresonanztomografie: Die Magnetresonanztomografie (MRT) ist ein bildgebendes Verfahren. Es wird hauptsächlich in der medizinischen Diagnostik eingesetzt, um Struktur und Funktion der Gewebe und Organe im Körper darzustellen. Physikalisch basiert die MRT auf den Prinzipien der Kernspinresonanz. Hier macht man sich die Tatsache zunutze, dass die Atomkerne von Wasserstoff (Protonen) einen Eigendrehimpuls (Spin) und damit verknüpfte magnetische Eigenschaften besitzen. Zuerst werden die Atomkerne im untersuchten Gewebe angeregt und anschließend, nach dem Abschalten des Magnetfelds, die unterschiedlich langsame Wiederausrichtung der Spins gemessen, die je nach Gewebe variiert und die Grundlage der dreidimensionalen Bildgebung darstellt.

4 | Kurzbeschreibungen auf Basis der ausführlicheren Wikipediabeiträge.



gekoppelter Systeme im Fokus von Anwendungen, das heißt seine gezielte Generierung, seine kohärente Kontrolle und nachfolgende Abfrage.⁵

Der Begriff **Quantentechnologien der zweiten Generation** – in **Abgrenzung** zu Quantentechnologien der ersten Generation – wird in diesem Papier wie von der Politik in den verschiedenen Rahmenprogrammen eingeführt verwendet.⁶ Die Bezeichnung „Generation“ bei Quantentechnologien besitzt keine sehr hohe Trennschärfe: Die **Übergänge zwischen erster und zweiter Generation sind teils fließend** und klare Einordnungen nicht immer möglich. Auch in diesem Impuls werden wichtige Anwendungen mitberücksichtigt, die in den Übergangsbereich fallen.

Quantentechnologien der ersten Generation kommen in vielen tagtäglichen Anwendungen unserer **modernen Wissens- und Industriegesellschaft** zum Einsatz, auch wenn vielen Nutzern oftmals nicht bewusst ist, dass quantenmechanische Effekte hinter den Technologien stehen. „Quantentechnologien der ersten Generation“ bietet einen Überblick über ausgewählte Beispiele für Quantentechnologien der ersten Generation.

2.2 Historische Entwicklung der Quantenforschung

Die **Quantenphysik** wurde zu **Beginn des 20. Jahrhunderts** unter anderen durch Max Planck begründet. An der weiteren Entwicklung war die deutschsprachige Wissenschaft mit Forschern wie Albert Einstein, Werner Heisenberg oder Erwin Schrödinger wesentlich beteiligt. Die deutschsprachigen Forscher lieferten wichtige Beiträge in der theoretischen (und später auch in der angewandten) Physik.

Einer der Gründe, warum der praktische Nachweis von quantenmechanischen Phänomenen so schwierig war, ist die

Besonderheit, dass sich **Quantensysteme anders verhalten, wenn sie** im Rahmen von Experimenten **beobachtet werden**. Die **„Beobachtung“** ist dabei ein **technischer Vorgang**, der durch angebrachte Messinstrumente stattfindet. Der Beobachtungsprozess beeinflusst das Experiment, Beobachter und Versuchsobjekt sind nicht immer klar zu trennen.

An den „neuen“ Quantentechnologien, die darauf beruhen, dass Quantensysteme sowie einzelne Quanten zunehmend vollständig kontrolliert und angestrebte Quanteneffekte aktiv generiert werden können, **wird seit etwa 20 Jahren geforscht**. Dadurch werden **theoretisch beschriebene Effekte** (siehe „Überblick über die wichtigsten quantenmechanischen Effekte“), wie „verschränkte“ Quanten, die über beliebige Distanzen über eine „spukhafte Fernwirkung“ (Einstein) miteinander verbunden bleiben, und Systeme, die mehrere Zustände gleichzeitig einnehmen können, wie etwa „Schrödingers Katze“, die im Gedankenexperiment (wenn keine Beobachtung durchgeführt wird) gleichzeitig tot und lebendig ist, **praktisch nutzbar gemacht**.

Vertiefende Erläuterungen über die Grundprinzipien der Quantenmechanik sowie die Grundlagen der Quantentechnologien bieten unter anderem **folgende Publikationen**:

- Bruß, D.: *Quanteninformation: Turingmaschine, Komplexität, Superposition, Verschränkung, No-cloning-Prinzip, Bell'sche Ungleichung, Quantenteleportation, Quantenkryptographie, Quantencomputer, Quantenalgorithmen, Quantenspiele*, Frankfurt am Main: Fischer Verlag, 2003.
- Dürr, D. und Lazarovici, D.: *Verständliche Quantenmechanik: Drei mögliche Weltbilder der Quantenphysik*, Berlin: Springer Spektrum, 2018.
- Feynman, R.: *The Feynman Lectures on Physics*, Boston: Addison Wesley, 1989.
- Susskind, L. und Friedman, A.: *Quantum Mechanics: The Theoretical Minimum*, London: Penguin, 2015.

5 | Vgl. VDI Technologiezentrum GmbH 2017.

6 | Vgl. BMBF 2018; High-Level Steering Committee 2017.

Überblick über die wichtigsten quantenmechanischen Effekte

Überlagerung: Zustände sind klassisch eindeutig bestimmt, zum Beispiel sind Schalter an oder aus. Die Informatik bezeichnet einen solchen zweiwertigen Zustand als Bit (0 und 1). In der Quantentechnologie gibt es hingegen sogenannte Qubits. Sie können auch jede Überlagerung der Zustände 0 und 1 einnehmen (sogenannte **Superposition**), der genaue Wert entsteht erst im Verlauf einer Messung.⁷ Berühmt wurde in diesem Zusammenhang das Gedankenexperiment von „Schrödingers Katze“.⁸ Die Möglichkeit der Verarbeitung linearer Überlagerungen bildet die Grundlage für quantenmechanische Anwendungen. **Qubits** stellen somit die Basis für **Quantencomputing** dar. Nach Angaben der befragten Expertinnen und Experten werden Überlagerungszustände bereits heute genutzt.

Unschärferelationen: Dieses von Heisenberg beschriebene Phänomen der Quantenmechanik besagt, dass es Größen gibt, die nicht gleichzeitig mit beliebiger Genauigkeit messbar sind; so lassen sich Ort und Geschwindigkeit eines Teilchens nicht gleichzeitig exakt bestimmen.⁹ Misst man den Ort eines Teilchens, so führt diese Messung zu einer Unschärfe in seiner Geschwindigkeit und umgekehrt. Dabei müssen die komplementären Größen auch zusammen keinem deterministischen Wert entsprechen (Kopenhagener Deutung), das heißt, man kann nicht durch genauere Messung eines Wertes den anderen näher bestimmen. Dieser Effekt wird in der **Quantenkryptografie** für die sichere Übertragung von Informationen genutzt.

Verschränkung: Die Möglichkeit, Zustände auch in Systemen mehrerer Teilchen zu überlagern, ist die Voraussetzung für die Verschränkung von Objekten.¹⁰ Demnach können zwei oder mehr Teilchen auf bestimmte Weise miteinander verbunden sein, auch über große Distanzen hinweg. Die Wahrscheinlichkeit ihrer Zustände ist dann nicht mehr voneinander unabhängig, sondern durch eine gemeinsame Wellen- bzw. Wahrscheinlichkeitsfunktion beschrieben.¹¹ Die gezielte Nutzung von verschränkten Zuständen ist ein zentraler Gegenstand der zweiten Generation von Quantentechnologien, etwa bei der Entwicklung von **Quantencomputern**, aber auch bei bestimmten Methoden der **Quantenkryptografie**. Zukünftig werden verschränkte Zustände wesentlich an Bedeutung gewinnen.

Vielteilcheneffekte: Gleichartige Quantensysteme sind ununterscheidbar und können nicht einzeln markiert werden. Quantenteilchen besitzen zudem mit dem Spin eine charakteristische innere Eigenschaft, für die es in der makroskopischen Welt keine Entsprechung gibt. Teilchen mit sogenanntem halbzahligen Spin werden als Fermionen (zum Beispiel Protonen, Neutronen, Elektronen), mit ganzzahligem Spin als Bosonen (zum Beispiel Photonen) bezeichnet.¹² Insbesondere bei sehr tiefen Temperaturen verhalten sich Teilchensysteme aus Fermionen grundlegend anders als solche aus Bosonen. Die dann auftretenden Vielteilcheneffekte sind für zahlreiche magnetische Eigenschaften sowie die Supraleitung von Materialien verantwortlich und können daher für **Simulationen** und das **Design neuer Materialien** genutzt werden. Auch Vielteilcheneffekte werden zukünftig an Bedeutung gewinnen.

7 | Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2015.

8 | Vgl. Schrödinger 1935.

9 | Vgl. Heisenberg 1927.

10 | Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2015.

11 | Vgl. Spektrum der Wissenschaft 2017.

12 | Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2015.



3 Der Quantentechnologie-Standort Deutschland

Deutschland verfügt über eine gute Ausgangslage. Es hat eine gut aufgestellte Forschungslandschaft und Unternehmen mit Erfahrung in der Weiterentwicklung und Integration von Spitzentechnologie-Komponenten. Auch vonseiten der Industrie besteht das Interesse, Anwender von Quantentechnologien zu werden. Es ist wichtig, auch zukünftig für gut ausgebildete Fachkräfte in ausreichender Zahl zu sorgen und der Bevölkerung den Mehrwert von Quantentechnologien zu vermitteln.

Deutschland befindet sich in einer **sehr guten Ausgangslage**, um die anstehende **Quantenrevolution mitzugestalten** und von ihr zu profitieren. Wesentliche Punkte für diese gute Ausgangsposition sind:

- Hervorragende Forschung in Spitze und Breite
- Starke Stellung bei Basistechnologien (zum Beispiel Speziallaserherstellung)
- Vielzahl von Großunternehmen und KMU mit Anwendungsbedarf für Quantentechnologien
- Strategische Sichtbarkeit durch EU Quantum Flagship und Rahmenprogramm der Bundesregierung
- Hochqualifizierte Fachkräfte

3.1 Elemente der Quantenlandschaft Deutschlands

Deutschland verfügt über sehr gute Forschung in der Spitze und Breite an Universitäten sowie an außeruniversitären Forschungseinrichtungen. Das Quantentechnologien-Rahmenprogramm der Bundesregierung hat zu einer deutlichen Steigerung der Sichtbarkeit des Technologiefelds beigetragen.

Dennoch sind die Transferaktivitäten hin zu konkreten kommerziellen Anwendungen weiterhin ausbaufähig.

Quantentechnologien der zweiten Generation in der Wissenschaft

Sowohl mehrere Universitäten als auch mehrere Institute der außeruniversitären Forschungsorganisationen (Max-Planck-Gesellschaft, Helmholtz-Gemeinschaft inklusive Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Leibniz-Gemeinschaft, Fraunhofer-Gesellschaft) leisten **exzellente Forschung** im Bereich der Quantentechnologien der zweiten Generation. Dabei haben sich unter anderem in den Regionen Ulm/Stuttgart/Freiburg, München/Nürnberg/Erlangen, Braunschweig/Hannover, Jena sowie in Nordrhein-Westfalen **Forschungsschwerpunkte mit jeweils mehreren Institutionen** etabliert.

Die **Vernetzung der deutschen Forschungseinrichtungen** untereinander wird von Expertinnen und Experten zum Teil als **noch ausbaufähig** beschrieben. Große Verbünde, wie Q.Link.X (siehe Kapitel 7.1) oder QUILT, ein Verbund unter Leitung der Fraunhofer-Gesellschaft zur Erforschung von quantenbasierten Bildgebungsverfahren, sind bisher noch eher die Ausnahme.

Mit der **Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB)** verfügt Deutschland zudem über ein metrologisches Institut von internationalem Rang, an dem in den nächsten Jahren das **Quantentechnologie-Kompetenzzentrum (QTZ)** aufgebaut werden soll (siehe Kapitel 6.1).¹³

Die wichtige Rolle der Quantentechnologien in der **universitären Forschungslandschaft** spiegelt sich auch darin wider, dass sich **7 von 57 im Jahr 2018 ausgewählten Exzellenzclustern** mit Quantentechnologien im weiteren Sinn befassen (siehe Abbildung 2). Die fünf Erstgelisteten haben sich darüber hinaus zur besseren Vernetzung zu einer „Quantum Alliance“ zusammengeschlossen.¹⁴ Es gibt zudem erste Ausgründungen, die aus universitären Quantentechnologie-Forschungsprojekten entsprungen sind.

Ein Beleg für die hohe Qualität deutscher Forschung im Bereich Quantentechnologien ist auch die größte Zahl der eingeworbenen Projekte und die höchste Fördersumme aus dem 7. Forschungsrahmenprogramm der EU und Horizon2020 (siehe Abbildung 3).

¹³ | Vgl. BMBF 2019a.

¹⁴ | Vgl. Quantum Alliance 2019.

Name	Antragsteller/Beteiligte Institutionen
Materie und Licht für Quanteninformation (ML4Q)	Uni Köln, Uni Aachen, Uni Bonn, Forschungszentrum Jülich, Uni Düsseldorf
Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST)	LMU, TU München, Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ), Deutsches Museum, Bayerische Akademie der Wissenschaften Walther-Meißner-Institut für Tieftemperaturforschung
QuantumFrontiers-Licht und Materie an der Quantengrenze	Uni Hannover, Uni Braunschweig, Laser Zentrum Hannover e. V. (LZH), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik (Albert-Einstein-Institut) Standort Hannover, Uni Bremen Fachgebiet Strömungsmechanik Zentrum für angewandte Raumfahrttechnologie und Mikrogravitation (ZARM)
Komplexität und Topologie in Quantenmaterialien (CT. QMAT)	Uni Würzburg, TU Dresden, Helmholtz-Zentrum Dresden-Rossendorf (HZDR), Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden (IFW) e. V., Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe, Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme, Bayerisches Zentrum für Angewandte Energieforschung e. V. (ZAE Bayern)
CUI: Advanced Imaging of Matter	Uni Hamburg, Helmholtz-Zentrum Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY), Max-Planck-Institut für Struktur und Dynamik der Materie, European XFEL GmbH
STRUKTUREN: Emergenz in Natur, Mathematik und komplexen Daten	Uni Heidelberg, Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS), Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA), Zentralinstitut für Seelische Gesundheit, Max-Planck-Institut für Kernphysik
Cyber-Sicherheit im Zeitalter großskaliger Angreifer (CASA)	Uni Bochum, TU München Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik Lehrstuhl für Theoretische Informationstechnik, Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik, TU Braunschweig, Uni Duisburg-Essen

Abbildung 2: Exzellenzcluster mit Bezug zu Quantentechnologien der zweiten Generation in der jüngsten Runde der Exzellenzstrategie (Quelle: eigene Darstellung basierend auf DFG 2019)

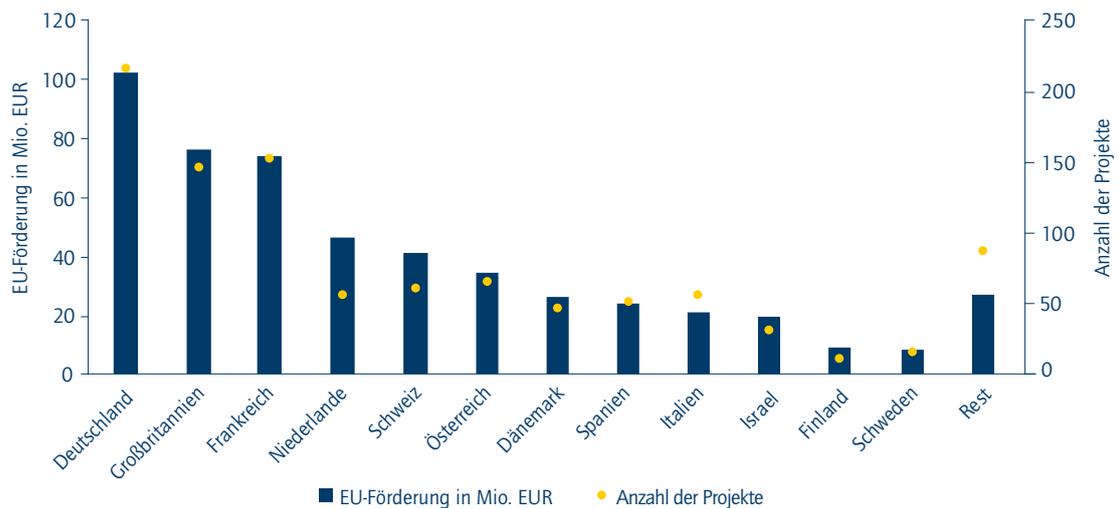


Abbildung 3: EU-Quantentechnologie-Förderung im 7. Rahmenprogramm und Horizon2020 nach Land (Quelle: Birch 2018)



Quantentechnologien der zweiten Generation in der Wirtschaft

Deutschland hat traditionell eine **starke Position** im Bereich der **Lasertechnik**. Auch für die **hochspezialisierten Laser und Photonenquellen**, die für viele Quantentechnologien wichtige **Basistechnologien** darstellen, gibt es bereits **deutsche KMU**, die eine **starke Stellung auf dem Weltmarkt** innehaben (zum Beispiel TOPTICA oder Menlo Systems). In den Bereichen **Mikroelektronik und Materialwissenschaften** sowie bei den für Quantentechnologien essenziellen Labor- und Ausrüstungstechniken sind deutsche Unternehmen ebenfalls gut aufgestellt. Diese Position gilt es zu stützen und weiter auszubauen.

„Quantentechnologien passen zur Unternehmenskultur in Deutschland.“

Große Unternehmen aus Deutschland, wie BASF, Bayer, BMW, Bosch, Daimler oder VW, gehören zu den Pionieren bei der **Erprobung von Quantensimulationen und Quantencomputern** zur Lösung von Problemstellungen in der Materialforschung oder bei Optimierungsproblemen.¹⁵ Diese Erfahrungen im Umgang mit den sich noch entwickelnden Technologien könnten langfristig einen Markt Vorteil darstellen. Auch in der **Sensortechnik und Bildgebung** sind deutsche Firmen, wie Bosch, Siemens oder Zeiss, aber auch spezialisierte KMU in einer guten Position, um bei quantenbasierten Produkten eine wichtige Rolle auf dem Weltmarkt zu spielen.

Die **größte Lücke** bei den deutschen Aktivitäten sehen Expertinnen und Experten bisher **im Bereich Quantencomputing**. Hier wird die Entwicklung zurzeit vor allem von nordamerikanischen Technologiekonzernen und Start-ups dominiert. Um die bereits entstandene Entwicklungslücke schließen zu können, bedarf es

großer Anstrengungen. Die aktuell laufenden Projekte und geplanten Kooperationen mit US-Herstellern sind ein erster wichtiger Schritt, jedoch reichen sie noch nicht aus (siehe auch Kapitel 8).

Obwohl es Fördermaßnahmen des BMBF, wie etwa „Enabling Start-up – Unternehmensgründungen in den Quantentechnologien und der Photonik“, gibt, bewerten Expertinnen und Experten die **Start-up-Landschaft** in Deutschland insgesamt als **noch unterentwickelt** und berichten von einem Mangel an **Wagnis- und vor allem Wachstumskapital**. Zudem beschreiben sie, dass Fördersummen und Laufzeiten vieler staatlicher Programme **nicht auf die Bedürfnisse von „Deep Tech“-Start-ups zugeschnitten** sind, da diese hohe Infrastrukturkosten und lange Entwicklungszyklen haben. Als Alternative oder Ergänzung zur finanziellen Förderung kann der **Zugang zu Forschungs- und Entwicklungsinfrastrukturen sowie zu IP** an Universitäten oder anderen Forschungseinrichtungen ein wichtiger Erfolgsfaktor für Start-ups sein. Eine mögliche Anlaufstelle hierfür im Bereich Quantenoptik bietet das BMBF-geförderte Quantum Photonics Labs (QPL) am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena.

Bei der Betrachtung des gesamten Innovationssystems stellt der **Transfer** von Forschungsergebnissen in Anwendungen eine **Schwäche Deutschlands** dar. Expertinnen und Experten führen dies unter anderem auf etablierte **wissenschaftliche Anreizsysteme** in Deutschland zurück, in denen die Weiterentwicklung von Laborprodukten hin zu robusten, skalierbaren Produkten nicht ausreichend akademisch honoriert und deswegen oftmals nicht verfolgt wird. Eine Möglichkeit der **Überwindung dieses „Tals des Todes“ bei Ausgründungen** ist die Weiterentwicklung von Forschungsergebnissen im Rahmen von **praxisbezogenen Wettbewerben**, die Wissenschaftlerinnen, Wissenschaftler und Unternehmen zusammenbringen (siehe „Durch Quanten-Challenges schneller vom Labor zur Anwendung“).

15 | Vgl. Atos 2018; BMW 2019; Daimler 2018; Kühn et al. 2019; QuSoft 2019.

Durch Quanten-Challenges schneller vom Labor zur Anwendung

Mehrere Unternehmen versuchen, Forscherinnen und Forscher über **Wettbewerbe** für Ansätze zur Lösung von Problemstellungen in der jeweiligen Branche zu gewinnen. Mit diesen Wettbewerben sollen zudem eine **Vernetzung der Communities** und vor allem auch ein **Abgleich** zwischen den **Bedarfen der Industrie** und dem **Technologieangebot aus der Forschung** erreicht werden.

Die Ausgestaltung der Rahmenbedingungen liegt bei den Unternehmen, was eine **agile und zielgerichtete** Gestaltung der Challenges, maßgeschneidert auf die eigenen Entwicklungsziele, ermöglicht. Hierbei kann eine **Win-win-Situation** entstehen: Unternehmen werden auf **Talente** mit Interesse an einem der eigenen Forschungsschwerpunkte aufmerksam, und für Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler können Challenges eine Möglichkeit zur Überbrückung des „Tals des Todes“ bieten, indem sie in Kooperation mit erfahrenen Entwicklungsingenieurinnen und -ingenieuren **eine Idee aus dem Labor in die Kommerzialisierung überführen**.

- **Zeiss** hat Ende September 2019 eine „**Quantum Sensing & Imaging Challenge**“ ausgerufen. In den drei Bereichen **Medizintechnik, Mikroskopie und industrielle Messtechnik** beschreibt Zeiss je zwei zentrale Problemfelder, in denen quantenbasierte Lösungsansätze für qualitative Verbesserungen gesucht werden. So werden beispielsweise Ansätze für eine bessere Gewebedifferenzierung, Möglichkeiten zur Erkennung und Visualisierung neuronaler Signale sowie Wege zur Entwicklung hochpräziser industrieller Lokalisierungsverfahren gesucht. Teilnehmen können Einzelpersonen sowie Teams aus aller Welt; Einsendeschluss ist der 31.03.2020. Die Prämierung der besten Ideen findet im Frühjahr 2020 statt. Die **Gewinnerinnen und Gewinner** werden einerseits mit einem **Preisgeld** ausgezeichnet und bekommen andererseits die Chance, ihre **Idee im Rahmen eines Workshops**

im Zeiss Innovation Hub weiterzuentwickeln. Zeiss sieht sich dabei als Mittler zwischen Forschung und Anwendung und hofft, die bereits angelaufene Quantenforschung im eigenen Haus noch weiter auszubauen.¹⁶

- **Airbus** hat bereits im Januar 2019 im Rahmen der globalen „**Airbus Quantum Computing Challenge**“ **fünf Problemfelder** der Luftfahrt und Flugphysik ausgeflaggt. Die Aufgabenstellungen weisen **unterschiedliche Komplexitätsgrade** auf und reichen von der einfachen Steigflugoptimierung bis hin zur komplexeren Optimierung des Designs für den Flügelkasten. Forscherinnen und Forscher sind aufgerufen, Lösungen zur komplexen **Optimierung und Modellierung des gesamten Flugzeuglebenszyklus** unter Einsatz neu verfügbarer Rechenkapazitäten auf Quantenbasis vorzuschlagen und zu entwickeln.¹⁷ An dem Wettbewerb können Studierende, Doktoranden, Forschende, Start-ups und Fachleute aus dem Bereich Quantencomputing teilnehmen. Die **Gewinnerinnen und Gewinner** erhalten **Hardwarezugang** sowie die Möglichkeit, ihre Ideen in **Zusammenarbeit mit Airbus-Branchenexpertinnen und Experten** bis zur Marktreife zu entwickeln.¹⁸
- **Rigetti Computing** hat 2018 zu einem Quantencomputing-Wettbewerb aufgerufen: Das US-amerikanische Unternehmen bietet 1 Million USD für das Erbringen des Nachweises eines Quantenvorteils auf einem Cloud-Quantencomputer (siehe auch Kapitel 8).¹⁹
- Das **National Institute of Standards and Technology (NIST)** hat 2017 die „**Post-Quantum Cryptography Challenge**“ ausgerufen. Ziel ist die Findung **einheitlicher Post-Quanten-Kryptografie-Standards**, die robuste Sicherheit bieten und auch von der Community mitgetragen werden. Die Challenge ist ein zweistufiger Prozess: Die erste Runde ist bereits abgeschlossen, in der zweiten Runde werden die aktuell noch verbleibenden 26 Algorithmen getestet und konnten bis November 2019 öffentlich kommentiert werden. Die Siegeralgorithmen sollen 2020 bekannt gegeben werden. Der Wettbewerb war international für Einzelpersonen und Teams ausgeschrieben.²⁰

16 | Vgl. Zeiss 2019.

17 | Vgl. Airbus 2019b.

18 | Vgl. Airbus 2019a.

19 | Vgl. Rigetti Computing 2018.

20 | Vgl. NIST 2017.



Quantentechnologie-Rahmenprogramm der Bundesregierung

Im Jahr 2018 hat die **Bundesregierung** ein **Rahmenprogramm** für die Quantentechnologien der zweiten Generation vorgestellt, das zum Ziel hat, bestehende Aktivitäten zu bündeln, zu stärken und auszuweiten sowie für einen schnelleren **Transfer von der Grundlagenforschung zur Marktreife** zu sorgen. Es ist bis 2022 mit einem Gesamtfördervolumen von 650 Millionen EUR ausgestattet.²¹

Das Konsortium QuNET ist ein Beispiel für eine große Initiative (Fördervolumen 165 Millionen EUR), die hieraus erwachsen ist und zum Ziel hat, eine Infrastruktur für sichere Quantenkommunikation zu entwickeln (siehe Kapitel 6.1).

Zudem werden auch **drei neue DLR-Institute im Bereich Quantentechnologien** aufgebaut: das Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik in Hannover und Bremen, das DLR-Institut für Quantentechnologien in Ulm und das DLR-Galileo-Kompetenzzentrum in Oberpfaffenhofen. Die **Unterstützung der Wirtschaft beim Transfer von Forschungsergebnissen** in die Anwendung soll im Fokus dieser Institute stehen. Für die nächsten vier Jahre ist eine Finanzausstattung von rund 210 Millionen EUR vorgesehen, womit sich die **Gesamtförderersumme**, die die Bundesregierung für den Bereich Quantentechnologien ausgibt, im Zeitraum des Rahmenprogramms auf **860 Millionen EUR** beläuft.

„Eine bessere Vernetzung ist Voraussetzung für Erfolg.“

Die Bewertungen der Expertinnen und Experten bezüglich des Zuschnitts und des Starts des Quantentechnologie-Rahmenprogramms fallen unterschiedlich aus. Insgesamt begrüßen sie jedoch die **erhöhte Sichtbarkeit des Themas** durch die Veröffentlichung des Rahmenprogramms und beobachten ein **verstärktes Interesse von Industrieseite**, bei Quantentechnologien der zweiten Generation aktiv zu werden. Dennoch wünschen sie sich, dass die **Verzahnung zwischen Wissenschaft und Wirtschaft** noch stärker gefördert wird. Einige Expertinnen und Experten bewerten die Kriterien für Transferaktivitäten bei Förderanträgen als noch nicht ausreichend transparent.

Für die **Entwicklung eines Nachfolgeprogramms** sollte frühzeitig ein **Strategieprozess gestartet werden**. Liegt der Fokus des

aktuellen Quantentechnologie-Rahmenprogramms darauf, Wissenschaft auf Anwendungen und Märkte auszurichten, sollten nach Meinung von Expertinnen und Experten im Rahmen des Folgeprogramms **konkrete Anwendungsprojekte identifiziert und strukturiert werden**. Dafür notwendig ist die aktive Einbindung von Forschungseinrichtungen und Unternehmen in den Strategieprozess. Eine zentral zu klärende Frage dabei ist nach Meinung der Befragten, wie die Projektförderung zukünftig aufgestellt sein muss, um auch Anwender bestmöglich einzubinden.

3.2 Quantenkompetenz

Momentan ist die **Verfügbarkeit von Fachkräften in Deutschland im Allgemeinen gut, an Schnittstellen zwischen Disziplinen jedoch noch ausbaufähig**. **Universitäre und außeruniversitäre Bildungsangebote zu Quantentechnologien müssen daher erweitert werden**. **Aktuell sind in der Bevölkerung allgemein Offenheit, aber auch Nichtwissen über Quantentechnologien zu verzeichnen**. **Um auf der positiven Grundhaltung aufzubauen, sollte der Mehrwert von Quantentechnologien anschaulich kommuniziert werden**.

Die **Fachkräftesituation in Deutschland ist derzeit größtenteils gut**. Es werden vor allem hervorragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler ausgebildet, die auch im Ausland sehr gefragt sind. Diese Abwanderung, insbesondere zu zahlungskräftigen Firmen in den USA, könnte mittelfristig ein Problem darstellen. Mittelfristig ist auch mit einem **Anstieg des Bedarfs an Fachkräften** mit Kenntnissen in Quantentechnologien zu rechnen, für den rechtzeitig vorgesorgt werden muss. Dies betrifft nicht nur reine Physiker, sondern gerade auch Ingenieurinnen. Vor allem Expertinnen und Experten aus Unternehmen berichten heute bereits teilweise von **Schwierigkeiten, die nötigen „Bindestrich-Experten“, wie Quanten-Ingenieure oder Quanten-Informatikerinnen, für die Weiterentwicklung von Anwendungen bis zur Marktreife zu finden**.

Demzufolge sind **neue Masterstudiengänge wie „Quantum Engineering“** wichtige Ansätze, um diesen Bedarf an Fachkräften künftig decken zu können. Solche Angebote bestehen zum Beispiel an der Universität des Saarlandes und an der TU München bereits und sind an der TU Braunschweig/ LU Hannover

21 | Vgl. BMBF 2018.

geplant. Zudem sollte nach Meinung der Befragten das **Grundverständnis für Quantenphysik**, etwa im Rahmen eines **Nebenfaches**, in unterschiedlichen Studiengängen **stärker verankert werden**. Um internationalen **Zugriff auf die besten Köpfe** zu haben, sollte für Unternehmen das **Anwerben internationaler Fachkräfte vereinfacht werden**. Zudem sollte vor allem für **ausländische Studierende** nach erfolgreichem Abschluss des Studiums beziehungsweise der Promotion der Übertritt in ein Arbeitsverhältnis in Deutschland erleichtert werden.

„Die Wissenschaftler, die ins Ausland gehen, sind schwer wieder zurückzubekommen.“

Mitglieder des **Quantum Flagship der EU** haben die Notwendigkeit einer **Stärkung der Ausbildung im Bereich Quantentechnologien** erkannt und fordern in einem Strategiepapier den Ausbau von Studienmöglichkeiten und didaktische Weiterentwicklungen, die Weiterbildung industrieller Fachkräfte und ein verstärktes Einbinden der Quantenphysik in Schullehrpläne.²²

Deutschland ist auf europäischer Ebene bei der Entwicklung von „Quantum Education“-Programmen federführend. Im **Bereich der Schule** sehen Expertinnen und Experten den wichtigsten **Bildungsauftrag** darin, Schülerinnen und Schülern zu vermitteln, wie stark **Quantenphysik unser Weltbild verändert** hat.

„Zu Quanten 2.0 gehört auch Quantenlehre 2.0.“

Im Bereich Quantentechnologien gibt es nur eine **sehr geringe Zahl weiblicher Absolventinnen**. Diesem massiven Ungleichgewicht der Geschlechter, der große Teile des MINT-Sektors betrifft, muss mit entschiedenen und langfristigen Aktionen entgegen gewirkt werden. Zudem lässt sich auch das **Phänomen der „leaky pipe“** beobachten, das heißt, dass von den Frauen, die ein Studium mit Schwerpunkt im Bereich Quantentechnologien wählen, nur ein **sehr geringer Prozentsatz in höhere akademische Positionen** gelangt.

Das **EU Quantum Flagship und auch Schweizer Aktivitäten** im Bereich der Quantentechnologien beinhalten deshalb konkrete Schritte, um **Frauen in diesem Bereich sichtbarer** zu machen und **besser zu fördern**. So werden unter anderem Networking

Events speziell für Frauen veranstaltet, auf Frauenquoten bei Konferenzpanels geachtet sowie Angebote für Schülerinnen geschaffen, um deren Interesse an MINT-Fächern im Allgemeinen und Quantentechnologien im Besonderen zu wecken.²³

Wichtig ist jedoch nicht nur die Ausbildung zukünftiger Fachkräfte, sondern auch die **kontinuierliche Fort- und Weiterbildung der bereits Beschäftigten**. Erfahrene Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter müssen **durch das Angebot entsprechender Schulungen „quantum-ready“** für zukünftige neue Arbeitsprozesse im Unternehmen gemacht werden. Sie tragen dieses Wissen dann auch als **Multiplikatoren** weiter in ihre Unternehmen. Das Quantentechnologie-Kompetenzzentrum an der PTB ist eine mögliche Anlaufstelle für entsprechende Fort- und Weiterbildungsangebote (siehe auch Kapitel 6.1).

Gesellschaftliche Auswirkungen der Quantentechnologien

Eine britische **Studie** belegt, dass generell **Offenheit und wenig Ängste beziehungsweise Skepsis gegenüber Quantentechnologien** in der Bevölkerung **zu verzeichnen sind**. Die größten **Hoffnungen** liegen auf den Quantentechnologien, die einen direkten **gesellschaftlichen Mehrwert** bieten, zum Beispiel bei neuen Diagnoseverfahren in der Medizintechnik. Die größte **Sorge** der Bevölkerung hingegen ist, dass die neuen **Technologien** im Rahmen ihrer Entwicklung **privatisiert** werden und dann **nicht mehr beziehungsweise nur teuer zugänglich sind**. Britische Bürgerinnen und Bürger erwarten eine militärische Nutzung, sorgen sich aber darüber nicht zusätzlich.²⁴ Befragte Expertinnen und Experten schätzen diese Studienergebnisse größtenteils auch als für Deutschland zutreffend ein, mit Ausnahme der **militärischen Nutzung**. Hier ist nach Meinung der Befragten in Deutschland tendenziell **eine kritischere Bewertung durch die Bevölkerung** (als in Großbritannien) zu erwarten.

Die **Auswirkungen des Quantencomputings** könnten Ängste schüren, auch wenn aktuell die Faszination überwiegt. Zum einen ist das Bedrohungsszenario zu nennen, dass mit einem Quantencomputer potenziell **derzeitig verwendete Verschlüsselungsmethoden obsolet werden** und Kommunikation ohne großen Aufwand entschlüsselt werden kann (siehe auch „Post-Quanten-Kryptografie“, Seite 60). Quantencomputer haben zum anderen das Potenzial, die **Leistungsfähigkeit von Künstlicher Intelligenz und Machine Learning nochmals deutlich zu erhöhen** (siehe Kapitel 8). Das wiederum kann **bestehende Ängste**

22 | Vgl. Quantum Flagship 2019.

23 | Vgl. NCCR-QSIT 2018; Quantum Flagship 2019.

24 | Vgl. EPSRC 2019.



in Bezug auf diese Ansätze, etwa vor einem potenziellen Verlust des Arbeitsplatzes, **nochmals verstärken**.

Bei unzureichender Aufklärung der Bevölkerung kann es zu einem **Misstrauen gegenüber Quantentechnologien im Allgemeinen** kommen, weil die zugrunde liegenden **Eigenschaften der Quantenmechanik** so fremdartig und **mit unserer täglichen Erfahrung nur schwer in Einklang zu bringen** sind.²⁵ Deswegen betonen auch einige Expertinnen und Experten die Wichtigkeit von „Quantum Education“ für die gesamte Bevölkerung.

Eine weitere Gefahr, die von einigen Befragten genannt wurde, ist, dass Quantentechnologien durch den **Verkauf von esoterischen Produkten mit angeblichen Quanteneffekten** (zum Beispiel „Quantenwasser“ oder „Quantenkristalle“) in Verruf geraten könnten und das **Vertrauen und die Akzeptanz der Bevölkerung**, etwa beim Einsatz von Quantensensoren in der Medizintechnik, **verloren** gehen.

Ängsten sollte mit einer **offenen und sachlichen Argumentation** begegnet werden, die die **Befürchtungen der Bürgerinnen und Bürger ernst nimmt**. Für den Aspekt der Kommunikationssicherheit lässt sich beispielsweise aufzeigen, dass es bereits jetzt Verschlüsselungsmethoden gibt, die vor Angriffen des

Quantencomputers sicher sind. Auf jeden Fall sollte die Kommunikation vor allem den **Mehrwert in den Vordergrund stellen**, der sich durch Quantentechnologien bietet, etwa **verbesserter Katastrophenschutz, Kommunikationssicherheit** oder ein **vertieftes Verständnis von Krankheiten**. Auch die Möglichkeit der **Entwicklung komplett neuartiger Materialien** bietet einen Gewinn für Verbraucherinnen und Verbraucher.

Nach Einschätzung der befragten Expertinnen und Experten hat sich in den letzten Jahren die mediale **Verfügbarkeit und Qualität populärwissenschaftlicher Informationen** über die Themen „Quantenphysik“ und „Quantentechnologien“ bereits **deutlich verbessert** und insgesamt zu einer **besseren Sichtbarkeit und zu mehr Verständnis des Themenfelds** in der Bevölkerung geführt. Auf diese Grundlage gilt es aufzubauen, um auch zukünftig eine sachliche Auseinandersetzung mit dem Thema sicherzustellen.

Für den **Arbeitsmarkt** erwarten Expertinnen und Experten unmittelbar **keine großen Auswirkungen**. Durch Quantentechnologien werden **keine Arbeitsplätze bedroht**, vielmehr werden zunächst in geringem Maße **neue Arbeitsplätze, vor allem für hochqualifizierte Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmer**, entstehen.

25 | Vgl. Vermaas 2017.

3.3 Stärken- und Schwächenprofil Deutschlands

Die unten stehende Tabelle gibt eine allgemeine Übersicht über Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken für den Standort Deutschland über die verschiedenen Technologiefelder der Quantentechnologien hinweg. Ein spezieller Überblick über

Stärken und Schwächen sowie daraus resultierende Chancen und Risiken in den einzelnen Technologiefeldern folgt am Ende der jeweiligen Kapitel.

Stärken

- Herausragende universitäre und außeruniversitäre Forschungsinstitutionen mit guten technischen Möglichkeiten und Infrastrukturen
- Gut ausgebildete und aktuell in ausreichender Zahl verfügbare Fachkräfte
- Viele potenzielle Anwender aus unterschiedlichen Branchen in räumlicher Nähe zu Forschungs- und Entwicklungsstandorten und potenziellen Start-ups
- Erhöhte Aufmerksamkeit in Politik und Wirtschaft

Schwächen

- Unzureichende Vernetzung zwischen den einzelnen Wissenschafts-Communities
- Erst in Ansätzen Schwerpunktbildung zur Erreichung kritischer Masse an Akteuren und Kompetenzen für erfolgreichen Transfer
- Oftmals fehlende Konzepte zur Nutzung/Industrialisierung von Forschungsergebnissen
- Transfer hemmendes Anreizsystem der Wissenschaft
- Wenige große Unternehmen mit signifikanten Investitionen in neue Quantentechnologien
- Geringe Gründungsaktivität, unter anderem aufgrund Wagniskapitalmangels sowie unzureichender Fördersummen für „Deep Tech“-Gründungen
- Niedrige Zahl an Patentanmeldungen

Chancen

- Vernetzung der bislang verstreuten Kompetenzen in Wissenschaft und Wirtschaft zu einem Quantentechnologie-Ökosystem
- Fortsetzung kontinuierlicher und langfristiger Forschungsförderung begleitend zum Aufwachsen erster Märkte
- Sicherstellung einer breiten Fachkräftebasis durch schnell etablierte Aus- und Weiterbildungsangebote
- Staat als Vorreiter, zum Beispiel über innovative Beschaffung
- Früher Abgleich der Bedarfe der deutschen Industrie und der Leistungsprofile neuer Quantentechnologien
- Führende Entwicklung von Software und Dienstleistungen durch Nähe und enge Kooperation mit potenziellen Anwendern

Risiken

- Verpassen einer internationalen Spitzenposition und Gefährdung technologischer Souveränität aufgrund unzureichender Bündelung relevanter Akteure für den Transfer zur Marktreife
- Zu kurze Zeithorizonte oder zu früher Abbruch von Fördermaßnahmen (zum Beispiel „Quanten-Winter“ als Folge enttäuschter, durch Hype übersteigerter Erwartungen)
- Hürden für europäische Anbieter durch starke Patente, (De-facto-)Normen und Standards aus China und USA
- Abwanderung von Wertschöpfung und Fachkräften in Ausland mit schneller reifenden Ökosystemen



4 Internationale Aktivitäten in den Quantentechnologien

Deutschland produziert eine hohe Zahl hochwertiger Fachpublikationen, aber nur sehr wenige Patente bei den Quantentechnologien. Die internationalen Anstrengungen zur Entwicklung von Quantentechnologien wurden in den letzten Jahren deutlich verstärkt. Viele Länder haben nationale Strategien aufgelegt oder erarbeiten diese zurzeit. Deutschland befindet sich bei der Grundlagenforschung und beim Umfang der eingesetzten Mittel in einer guten Position. Die unterschiedlichen Ansätze verschiedener Länder, um Quantentechnologien durch Schwerpunktbildung und Bündelung von Kompetenzen zur Marktreife zu bringen, können Anschauungsbeispiele für Deutschland sein.

In den letzten Jahren haben sich die **internationalen Investitionen**, die in die Entwicklung von Quantentechnologien fließen, **deutlich erhöht**. Dies betrifft sowohl **staatliche Forschungsförderungsprogramme** (siehe Kapitel 4.2) als auch **Firmengründungen**. Abbildung 4 zeigt diesen Anstieg und die globale Verteilung von erfolgreichen Finanzierungsrunden zwischen 2012 und 2018. Dabei haben nicht nur Höhe und Zahl der Investitionen zugenommen, sondern diese verteilen sich auch zunehmend breiter über die **verschiedenen Felder der Quantentechnologien**. Kritisch ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass **keine deutsche Firma** in diesem Zeitraum Kapital in einer Größenordnung eingeworben hat, um berücksichtigt zu werden.²⁶

4.1 Publikationen und Patente

Zahl und Qualität einschlägiger deutscher Forschungspublikationen sind im internationalen Vergleich sehr gut. Allerdings wird von Deutschland und anderen EU-Ländern nur eine geringe Zahl an

Quantentechnologie-Patenten angemeldet, wohingegen in den USA und China aggressive Patentstrategien verfolgt werden. Dies kann zu strategischen Hindernissen und Ungleichgewichten beim Marktzugang führen.

Die gute Position Deutschlands in der Forschung zu Quantentechnologien lässt sich anhand der **Quantität und Qualität der wissenschaftlichen Publikationen** belegen. In beiden Bereichen liegt Deutschland in der **internationalen Spitzengruppe** (siehe Abbildung 5).

Bei der **absoluten Zahl der Publikationen** zwischen 2012 und 2016 belegt **Deutschland Rang 3** hinter China und den USA. Wenn man die Publikationen der 28 EU-Mitgliedstaaten zusammenzählt, liegt **die EU** bei der Gesamtzahl allerdings noch **deutlich vor China und den USA**.

Beim Anteil der Publikationen, die zu den 10 Prozent meistzitierten gehören (als **Maß für Qualität**), liegt **Deutschland auf Rang 5** zwar hinter Österreich, der Schweiz, den Niederlanden und dem Vereinigten Königreich, aber **deutlich über dem weltweiten Durchschnitt**. Chinesische Publikationen hingegen liegen bezüglich der Qualität nur im Mittelmaß. Der Anteil US-amerikanischer Publikationen, die zu den 10 Prozent meistzitierten gehören, befindet sich über dem EU-Durchschnitt, aber etwas unter dem Anteil in Deutschland.²⁷

Eine Analyse der Co-Autorenschaften der Publikationen zeigt zudem, dass die **deutsche Wissenschaft international sehr gut vernetzt** ist und Publikationen mit deutscher Beteiligung oft besonders hohe Zitationsraten erreichen.²⁸

Patente

Verglichen mit ihrer Stärke bei den wissenschaftlichen Publikationen liegen **Deutschland und Europa** bei der Anmeldung von **Patenten** im Bereich der Quantentechnologien der zweiten Generation **eindeutig zurück**.

Vor allem aus den **USA und China** wird eine **deutlich höhere Zahl an Patenten angemeldet**. Expertinnen und Experten zufolge ist dies zum einen auf staatlich beförderte (China) beziehungsweise von Privatunternehmen betriebene (USA) **aggressive Patentierungsstrategien** zurückzuführen. Zum anderen würden dort Patente auch für Entwicklungen mit nur geringer Schöpfungshöhe vergeben. Dies dürfe aber nicht den Eindruck

26 | Vgl. Gibney 2019.

27 | Vgl. Bornmann et al. 2019.

28 | Vgl. ebd.

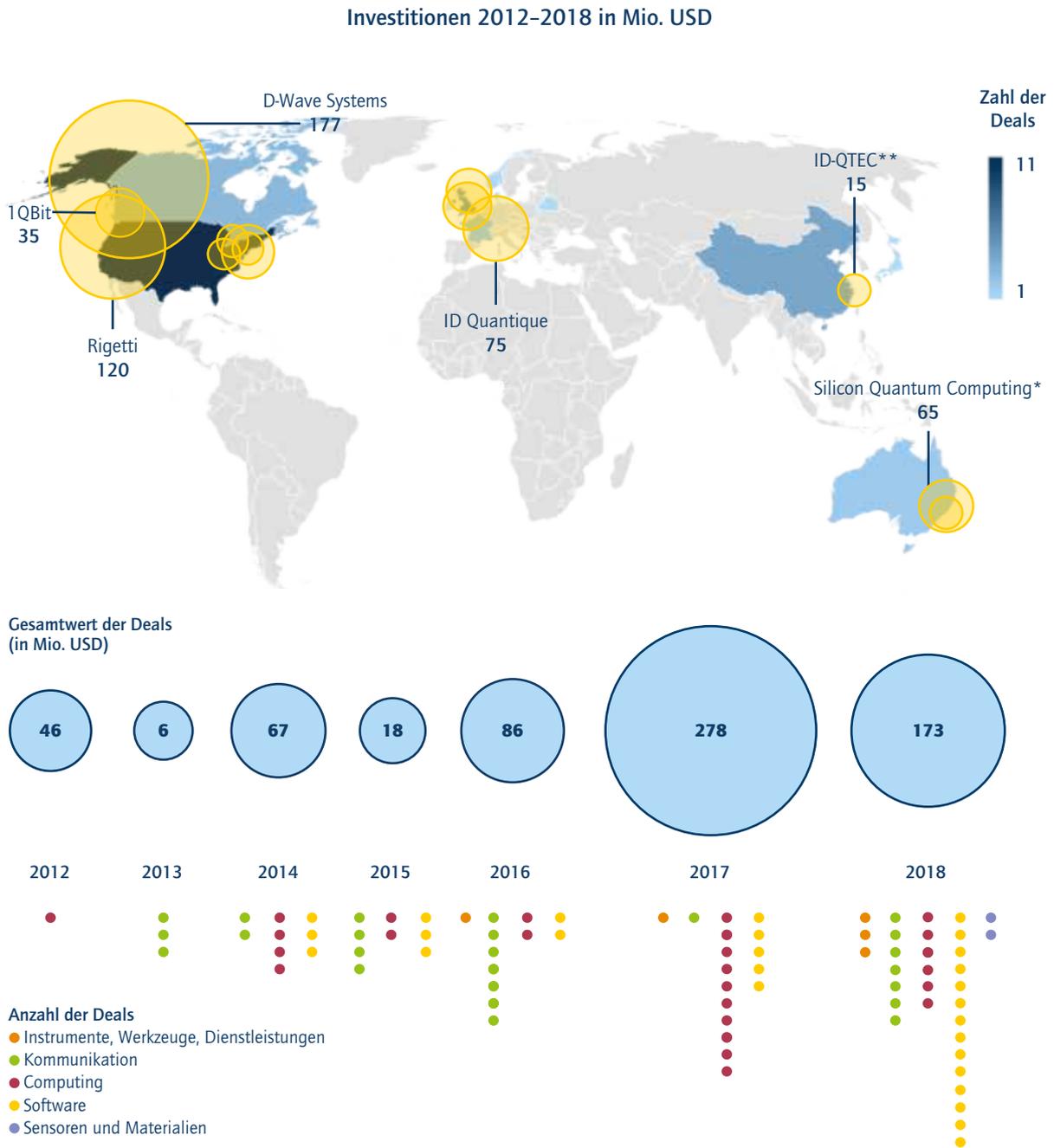


Abbildung 4: Investitionen in Quantentechnologie-Unternehmen (2012–2018) (*) Enthält einen Beitrag der australischen Regierung in unbekannter Höhe zuzüglich zu privaten Investitionen. (**) China investiert große Summen in die Kommerzialisierung von Quantentechnologien, insbesondere in Quantenkommunikation. Allerdings gibt es kaum Informationen bezüglich der konkreten Investitionen und deren Höhe bei einzelnen Unternehmen (Quelle: Gibney 2019).

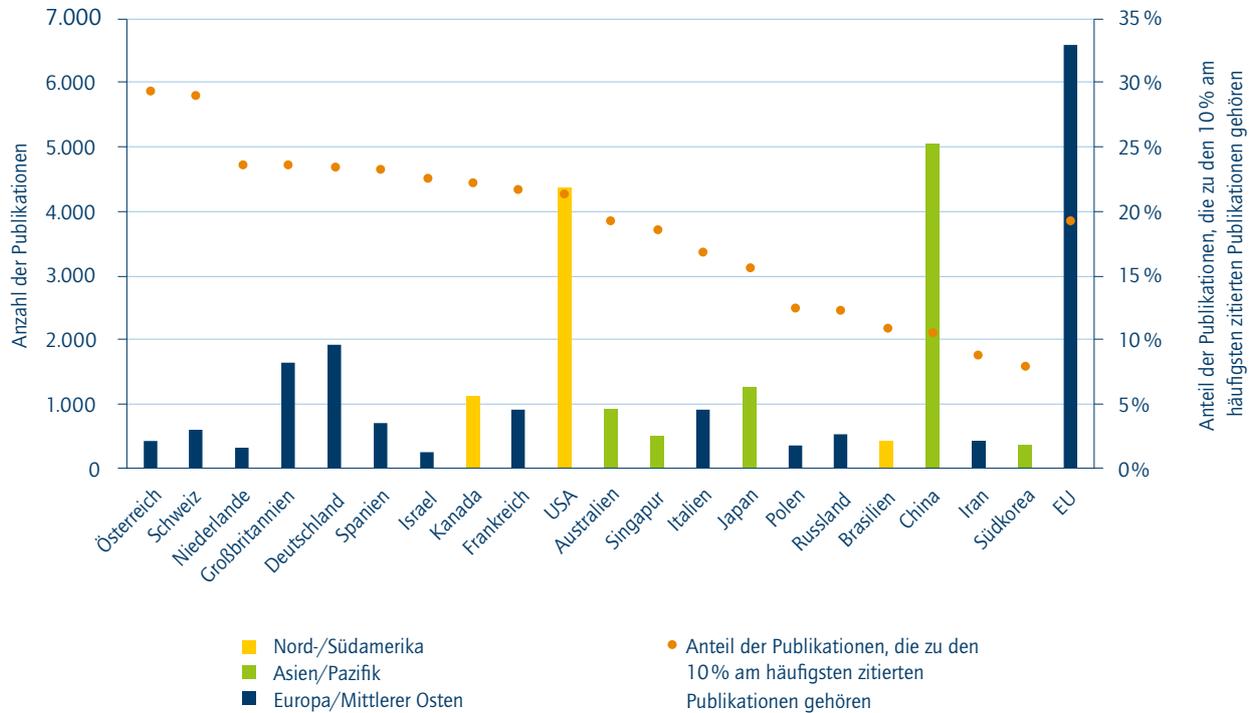


Abbildung 5: Gesamtzahl der Publikationen und Anteil der viel-zitierten Publikationen im Bereich Quantentechnologien nach Ländern (2012–2016) (Quelle: Bornmann et al. 2019)

erwecken, als könnten diese Patente kein strategisches Hindernis für europäische Wettbewerber darstellen.

Bei Patenten zu Quantencomputing sind die USA der Spitzenreiter, wohingegen China bei Quantum Key Distribution (QKD) (Verfahren der Quantenkryptografie, siehe Kapitel 7) und Kaltatominterferometrie (genutzt unter anderem bei Quantensensorik und -metrologie) führend ist (siehe Abbildung 6). **Europa** weist in allen Bereichen einen **signifikanten Rückstand** zu den jeweils Führenden auf. **Deutschland** liegt im Bereich **Quantencomputing nur auf Rang 8** und bei **QKD nur auf Rang 6**. Innerhalb der EU werden aus dem Vereinigten Königreich (Quantencomputing und -kommunikation) beziehungsweise aus Frankreich (Kaltatominterferometrie) mehr Patente angemeldet.²⁹

Eine Analyse der Top 35 der Anmeldeinstitutionen und -firmen in den Bereichen Quantencomputing und QKD zeigt zudem, dass darunter **keine deutschen Institutionen oder Firmen** zu finden sind.³⁰

Das **Anreizsystem in der Wissenschaft** trägt zur geringen Anmeldequote für Patente in Europa und Deutschland bei, da Patentanmeldungen bei Berufungs- und Bewertungsverfahren im Gegensatz zu Publikationen nur in geringem Umfang in die Bewertung einfließen. **Anpassungen der Berufungs- und Auswahlkriterien** sowie der **Förderinstrumente**, die den Stellenwert von Patenten als wichtigen **Beitrag zum Wissens- und Technologietransfer** von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern besser berücksichtigen, können einen Beitrag leisten, dies zu ändern.

Teilweise gibt es auch Stimmen, die betonen, dass **zu extensive Patentierung Innovation hemmen** kann. Nichtsdestotrotz mahnt ein großer Teil der Expertinnen und Experten angesichts der **internationalen Dynamik** eine verstärkte **Förderung von Patentierungsaktivitäten** in Deutschland und Europa an, um keine zu großen strategischen Nachteile zu riskieren.

Zudem berichten einige Befragte, dass der **Zugang zu geistigem Eigentum**, das aus gemeinsamen Forschungsprojekten entstanden

29 | Vgl. Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerb 2019.

30 | Vgl. EU-KOM 2019c.

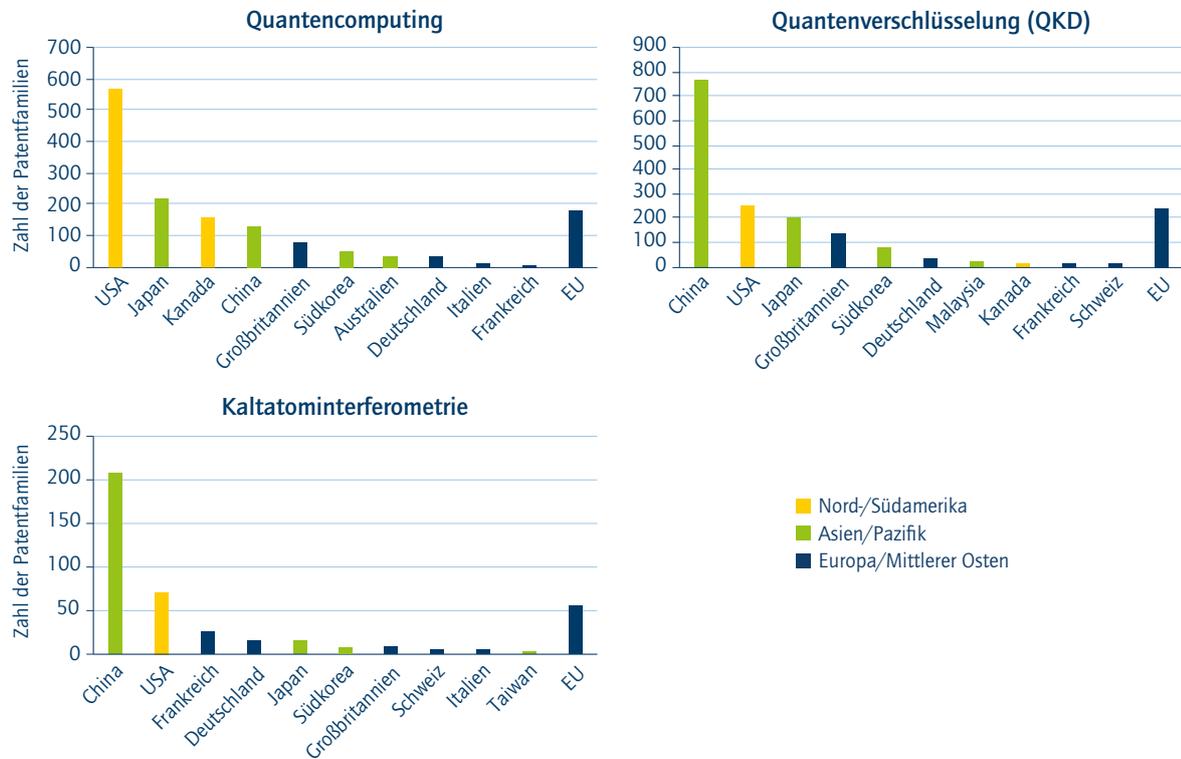


Abbildung 6: Zahl der angemeldeten Patentfamilien nach Ursprungsland des Anmelders für die Bereiche Quantencomputing, Quantenverschlüsselung (QKD) und Kaltatominterferometrie (angewandt in quantenbasierter Sensorik/Metrologie; Stand: August 2019. Quelle: Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerb 2019)

ist, für beteiligte Firmen oder folgende Ausgründungen von Universitäten und anderen Forschungseinrichtungen teilweise **sehr restriktiv gestaltet** wird. Je nach Einrichtung bestehen hier bezüglich **Rahmenbedingungen und Kosten deutliche Unterschiede**, die die Planbarkeit für Unternehmen erschweren.

4.2 Internationale Initiativen zur Förderung von Quantentechnologien

Viele Länder haben mittlerweile gezielte Programme zur Förderung von Quantentechnologien aufgelegt. Dabei fällt auf, dass einige kleinere europäische Länder in diesem Feld sehr erfolgreich sind. Deutschland sollte von deren Erfolgsfaktoren, wie zum Beispiel Schwerpunktbildung oder zentrale Koordination, lernen und gezielt Kooperationen eingehen.

Das verstärkte internationale Interesse an der Entwicklung von Quantentechnologien der zweiten Generation schlägt sich in einer **Vielzahl nationaler und regionaler Programme** und Initiativen nieder. Diese unterscheiden sich zum Teil deutlich im Fokus und in der Finanzausstattung.

Einen Überblick über die Initiativen in ausgewählten Ländern bietet Abbildung 7.

Gerade auch **kleinere Staaten** sind im Bereich Quantentechnologien **erfolgreich**, wie nicht zuletzt die guten Positionen der Niederlande, der Schweiz und Österreichs beim Einwerben europäischer Fördergelder und beim Anteil vielzitatierter Publikationen belegen (siehe Abbildungen 3 und 5). Eine nähere **Betrachtung der Erfolgsfaktoren** dieser Länder kann für Deutschland lohnend sein.



	EU	USA
Beginn	2017	2018
Fördervolumen	1 Mrd. EUR / 10 Jahre	1,2 Mrd. USD / 5 Jahre
Schwerpunkte/ Besonderheiten	<p>Alle vier Bereiche abgedeckt, aber Schwerpunkt eher auf Grundlagenforschung, Quantensensorik und -imaging sowie Quantenkommunikation</p> <p>Paneuropäische Dimension sowie die Vernetzung der relevanten Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft im Vordergrund</p> <p>Wird durch weitere europäische und nationale Förderlinien ergänzt</p>	<p>Fokus: Quantencomputing und Quanteninformationstechnologie</p> <p>Koordinationsstelle im Weißen Haus</p>
	China	Vereinigtes Königreich
Beginn	-	2014
Fördervolumen	Ca. 10 Mrd. EUR (genauer Umfang unklar)	Ca. 600 Mio. GBP / 10 Jahre
Schwerpunkte/ Besonderheiten	<p>Breit angelegtes Programm mit besonderen Schwerpunkten auf Quantenkommunikation und -kryptografie sowie Quantencomputing</p> <p>Aufbau des National Laboratory for Quantum Information Science</p> <p>Enge Verzahnung zwischen militärischer und ziviler Forschung</p>	<p>Vier Quantum Hubs als Verbünde von Universitäten und Unternehmen mit Themenfokus (siehe Kapitel 4.3)</p> <p>Enge Einbindung von Industrie, um zielgenaue Entwicklung und schnelle Markteinführung zu fördern</p>
	Australien	Japan
Beginn	-	2018
Fördervolumen	> 80 Mio. EUR (nur aus Bundesmitteln)	180 Mio. EUR / 10 Jahre
Schwerpunkte/ Besonderheiten	<p>Vier Fokuszentren: Centres for Engineered Quantum Science (EQUS), Exciton Science, Future Low-Energy Electronics Technologies (FLEET), Quantum Computation and Communication Technology (CQC2T)</p> <p>Zusätzliche Mittel vom Verteidigungsministerium (Next Generation Technologies Fund)</p> <p>Dezierte und umfängliche Quantenstrategie in Planung</p>	<p>QLEAP als Mischung aus Quantentechnologie- und Photonikforschung mit vier Schwerpunkten:</p> <p>Supraleitender Quantencomputer und begleitende Grundlagenforschung, Festkörperquantensensoren, Laserforschung und Attosekunden-Lasertechnologien und deren Anwendung</p>
	Kanada	Niederlande
Beginn	-	2015 (nur QuTech Delft, Nationale Agenda Quantentechnologien)
Fördervolumen	> 680 Mio. EUR (1 Mrd. CAD) für den Zeitraum 2006–2016	> 250 Mio. EUR / 10 Jahre für das QuTech Delft (inklusive Beiträge der Industrie)
Schwerpunkte/ Besonderheiten	<p>Themenkonferenzen, um Nutzen der Quantentechnologien für einzelne Industriesektoren aufzuzeigen (z. B. für den Rohstoffsektor)</p> <p>Starkes Interesse des Militärs (Cybersecurity, Quantensensorik und -computing)</p> <p>Schulung und Rekrutierung von Highly Qualified Personnel (HQP) als wesentliche Priorität</p>	<p>QuTech Delft: Zusammenarbeit der TU Delft und der niederländischen Organisation für angewandte wissenschaftliche Forschung (TNO)</p> <p>Fokus: Quantencomputing und Quanteninternet</p> <p>Gemeinsames Know-how-Zentrum mit Industriepartnern (Intel und Microsoft bei Quantencomputing)</p>

	Schweiz	Österreich
Beginn	2011	2016
Fördervolumen	ca. 52 Mio. EUR (57 Mio. CHF) / 10 Jahre (nur für NCCR QSIT – Quantum Science and Technology, keine nationale Strategie)	32,7 Mio. EUR / 5 Jahre (Ramp-up-Phase des nationalen FuE-Förderprogramms für Quantenforschung und -technik)
Schwerpunkte/ Besonderheiten	Hohe Grundausstattung der Forschenden National Centre of Competence in Research (NCCR) QSIT – Quantum Science and Technology in Zürich Fokus: Quantensensorik, Quantensimulation, Quanteninfor- mation- und kommunikation, Engineered Quantum States	Aufbau von Kooperationen österreichischer Wissenschaft- lerinnen und Wissenschaftler in europäischen und internationalen Initiativen Transfer der FuE-Ergebnisse in Wertschöpfung und Entwicklung von Demonstratoren Weiterentwicklung der FuE-Infrastruktur im Bereich Quantentechnologie

Abbildung 7: Übersicht über Förderprogramme für Quantentechnologien der zweiten Generation (Quelle: eigene Darstellung basie- rend auf Australian Government Department of Defence 2018, Australian Research Council 2019, BCG 2017, 2018c, Canada NRC 2017, Executive Office of the President of the United States 2018, Foreign Affairs 2018, High-Level Steering Committee 2017, Knight/ Walmsley 2019, ÖBMWFW 2017, Quantum Delta Nederland 2019, QuTech 2015, Raymer/Monroe 2019, Riedel et al. 2018, Riedel et al. 2019, Roberson/White 2019, Sussman et al. 2019, FNSNF 2019, Yamamoto et al. 2019, Zhang et al. 2019)

QuTech in Delft (Niederlande)

Die **Niederlande** haben mit dem Quantentechnologie-Hotspot **QuTech in Delft** eine **Spitzenposition** im Bereich **Quanten- computing und -kommunikation** in Europa inne.

Das QuTech wird von der TU Delft und der niederländischen Or- ganisation für Angewandte Naturwissenschaftliche Forschung (TNO) getragen und betreibt **missionsgeleitet** Forschung zur Entwicklung eines **Quantencomputers und des Quanteninter- net**. Dabei haben die Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler das klare Ziel, entlang einer **Roadmap auf konkrete Anwendungen** hinzuarbeiten.

Allein von Regierungsseite wird das QuTech zwischen 2015 und 2025 mit 135 Millionen EUR gefördert.³¹ Hinzu kommen **Koope- rationen mit zwei großen US-Tech-Konzernen** im Bereich Quan- tencomputing (Intel und Microsoft). Im Umfeld des QuTech hat sich durch diese **Bündelung von Expertise, Ressourcen und Ak- tivitäten** bereits ein **Netzwerk aus KMU und Ausgründungen**, die gezielt über Inkubatorprogramme gefördert werden, gebil- det, das intensiv an Forschung und Entwicklung mitwirkt.³²

Innsbruck (Österreich)

Österreich, mit den beiden **Schwerpunkten Wien und Inns- bruck**, hat sich ebenfalls zu einem Zentrum der weltweiten **Spitzenforschung** in den Quantentechnologien entwickelt. Ex- pertinnen und Experten berichten, dass ein entscheidender Fak- tor hierbei das **frühzeitige Erkennen der Bedeutung** der Quantentechnologien seitens der österreichischen Regierung war. Entsprechend wurden **führende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler** nach Österreich geholt beziehungsweise im Land gehalten, um die herum sich erfolgreiche Arbeitsgruppen ansiedelten. Insbesondere die Forschung zum Bau eines **Quantencomputers auf Basis von Ionenfallen** (siehe auch „Ver- schiedene Ansätze zur Umsetzung eines Quantencomputers“, Seite 67) hat internationales Spitzenniveau und zur Gründung eines **Start-ups zur Kommerzialisierung** der Technologie geführt (Alpine Quantum Technologies).³³

Die **Rahmenbedingungen zur Gründung von Unternehmen** in Österreich werden allerdings als ähnlich schwierig wie in Deutschland beschrieben, und auch die **Höhe der staatlichen Forschungsfördersummen** stellt **keinen Standortvorteil** dar.

31 | Vgl. QuTech 2015.

32 | Vgl. Birch 2018.

33 | Vgl. Alpine Quantum Technologies 2019.



Zürich (Schweiz)

Ein weiterer Hotspot der Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien liegt in **Zürich**. Die **ETH** als hochrangige Forschungsuniversität auf Bundesebene beherbergt seit 2011 ein Nationales Forschungskompetenzzentrum zu Quantentechnologien, was die **lokale Vernetzung der Forschungsgruppen** befördert und die **Sichtbarkeit für potenzielle Industriepartner** erhöht.

Die größeren **Freiheitsgrade** bei der Wahl der Forschungsschwerpunkte und die **großzügige Grundfinanzierung** werden von Expertinnen und Experten als ein entscheidendes Merkmal für die Attraktivität des Forschungsstandorts Schweiz genannt. Zudem ziehen die guten Rahmenbedingungen mit **planbaren Karrierepfaden und klaren Aufenthaltsbedingungen** sowie die **hohe Lebensqualität** hervorragende Forscherinnen und Forscher aus der ganzen Welt an.³⁴

Des Weiteren betreibt **IBM ein großes Forschungszentrum in Zürich**, an dem auch an Quantentechnologien, vor allem an Quantencomputing, geforscht wird. Dieser Standort ist historisch gewachsen und besteht bereits seit 1956. Mit ID Quantique (Quantenkommunikation) und Qunami (Quantensensorik) haben sich auch außerhalb Zürichs **Startups** in der Schweiz etabliert, wobei bei ID Quantique zu beachten ist, dass mittlerweile die südkoreanische SK Telecom Mehrheitseigner ist.

EU – Quantentechnologien als Flagship-Initiative

Auf europäischer Ebene wurden im Jahr 2017 Quantentechnologien als **drittes Flagship-Projekt** im Rahmen von Horizon2020 benannt und mit einem Gesamtfördervolumen von **über 1 Milliarde EUR** über zehn Jahre ausgestattet. Allerdings äußerten einige Befragte die Befürchtung, dass die Finanzierung des Flagship im zukünftigen Finanzrahmen der EU noch nicht final sichergestellt ist.

Das Ziel ist es, durch **Bündelung europäischer Kompetenz** in Wissenschaft und Industrie die **Spitzenposition europäischer Forschung** zu wahren, eine **europäische Quantenindustrie** aufzubauen und die **Marktentwicklung** zu fördern.

Dabei werden Projekte aus allen Bereichen der Quantentechnologien der zweiten Generation berücksichtigt und **Meilensteine für die einzelnen Technologiebereiche** anvisiert. So sollen beispielsweise im Bereich Quantenkommunikation in drei Jahren günstige und leistungsfähige QKD-Geräte sowie die Grundlagen

für einen Quantenrepeater entwickelt werden. Als langfristiges Ziel (zehn Jahre) sollen die Voraussetzungen für ein europäisches Quanteninternet geschaffen werden.³⁵

„Deutschland ist ein wichtiger Pfeiler und Partner im europäischen Quantum Flagship.“

Deutsche Institutionen und Unternehmen spielen eine zentrale Rolle im EU Quantum Flagship. So sind **deutsche Partner an 19 von 20 bislang angelaufenen Projekten beteiligt**. Bei vier Projekten liegt die Leitung bei einem der deutschen Beteiligten.

Ein wichtiger positiver Aspekt, der über die Förderung einzelner exzellenter Projekte hinausgeht und von Expertinnen und Experten hervorgehoben wird, ist das **Herausbilden einer engmaschig vernetzten Community** für Quantentechnologien. Sowohl der Konsultations- und Findungsprozess vor dem Start des Flagship als auch die **Governance-Strukturen** werden von einigen Expertinnen und Experten gelobt. Es sei gelungen, die führenden **Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler eng einzubinden, Industrievertreterinnen und -vertreter zu involvieren** und gleichzeitig schlank genug zu bleiben, um ein **agiles und flexibles Handeln** zu ermöglichen. Andere Expertinnen und Experten werfen dem Flagship hingegen **mangelnde Transparenz** bei der Entscheidungsfindung und **unklare Kriterien** für den konkreten Anwendungsbezug der einzelnen Projekte vor.

Weitere Kritikpunkte sind eine **zu geringe Finanzausstattung** mit Blick auf die Förderdauer und Zahl der geförderten Projekte sowie die Tatsache, dass potenziellen Kapitalgebern, zum Beispiel aus dem Wagniskapitalbereich, zu wenig Gehör geschenkt wurde. Diese hätten ihre Expertise für Strategien zur Stimulation von Gründungen und zum Aufwachsen junger Unternehmen nicht einbringen können.

Neben dem Flagship fördert auch der **European Research Council** in hohem Maße **exzellente Grundlagenforschung** im Bereich Quantentechnologie.³⁶

Quanteninitiativen in anderen Ländern

In **China** stehen Quantentechnologien schon lange im Fokus der Forschungsstrategie und nehmen auch im aktuellen Fünfjahresplan einen Platz unter den **zehn wichtigsten Technologiesektoren**

34 | Vgl. NCCR-QSIT 2018; Swiss National Science Foundation 2019; FNSNF 2019.

35 | Vgl. High-Level Steering Committee 2017; Quantum Flagship 2019; Riedel et al. 2019.

36 | Vgl. ERC 2019.

ein. Besonders im Bereich **Quantenkommunikation** hat China mit der ersten erfolgreichen Übertragung eines Quantenschlüssels über einen Satelliten und dem Aufbau eines QKD-gestützten Kommunikationsnetzes **bedeutende Durchbrüche erzielt**. In den letzten 20 Jahren sind chinesischen Angaben zufolge von staatlicher Seite rund 987 Millionen USD investiert worden.³⁷

Genaue Zahlen zur laufenden staatlichen Förderung für Quantentechnologien in China sind nur selten öffentlich zugänglich. Für die nächsten Jahre gehen einige Expertinnen und Experten davon aus, dass China **fast 10 Milliarden EUR in Quantentechnologien investieren** wird; 3 Milliarden EUR sollen nur dem Aufholen im Bereich Quantencomputing gewidmet sein.³⁸ Diese Zahlen sind jedoch umstritten.

Allein in den Aufbau des **National Laboratory for Quantum Information Science** sollen 1 Milliarde EUR fließen. Auch Alibaba hat angekündigt, einen Teil seiner geplanten FuE-Ausgaben in Höhe von 15 Milliarden USD in Quantencomputing investieren zu wollen. Ein besonderer Fokus chinesischer Aktivitäten liegt auch auf militärisch nutzbaren Quantentechnologien.³⁹

Expertinnen und Experten sehen die **klarere Zieldefinition und stringenterer Umsetzung** als komparative Stärke Chinas. Zudem würden über das „1.000 Talente“-Programm gezielt **ausländische Spitzenkräfte angeworben**, während gleichzeitig auch im **Ausland** exzellent **ausgebildete** chinesische Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler zurückkehren.

Die **USA** haben, wohl auch als Reaktion auf die verstärkten Aktivitäten in der EU und in China, im Jahr 2018 eine **Nationale Quanteninitiative** ins Leben gerufen. Diese soll die staatliche Förderung der Quantentechnologien fokussieren und stärken und über einen Zeitraum von fünf Jahren ein Volumen von 1,2 Milliarden USD umfassen.⁴⁰ Ein **National Quantum Coordination Office im Weißen Haus** ist dabei für die Abstimmung der

Aktivitäten zuständig. Darüber hinaus sind auch der militärische und geheimdienstliche Sektor in Form von DARPA und IARPA sehr aktiv.⁴¹

Zusätzlich sind besonders im Bereich Quantencomputing in den USA sehr **große Investitionen von Technologiekonzernen** wie Google, IBM, Intel oder Microsoft sowie eine große Zahl leistungsfähiger Startups zu verzeichnen. Um die Kommerzialisierungsaktivitäten besser zu steuern, wurde zudem ein Quantum Economic Development Consortium unter Leitung des National Institute of Standards and Technology (NIST) ins Leben gerufen.⁴²

Australien tätigt ebenfalls seit längerer Zeit signifikante Investitionen in Quantentechnologien, insbesondere im **Bereich Quantencomputing**. Es gibt Bestrebungen, eine umfassende Quantenstrategie zu entwickeln.⁴³ Auch in **Frankreich** hat eine Expertenkommission Anfang 2020 Vorschläge für eine nationale Strategie vorgelegt.⁴⁴

Deutschland nimmt mit der Verabschiedung des Rahmenprogramms im Jahr 2018 im internationalen Vergleich durchaus eine Vorreiterrolle ein.

Internationale Kooperationen bei Forschungsvorhaben

Deutschland als Standort für Quantentechnologien könnte von einem **engeren Austausch** und gegebenenfalls verstärkten Kooperationen – auch **mit außereuropäischen Partnern** – profitieren, insbesondere im Fall komplementärer Stärken.

Einige Expertinnen und Experten äußern in diesem Zusammenhang den Wunsch, dass sowohl die deutschen Ministerien als auch die EU klarer festlegen sollten, unter welchen Bedingungen **Unternehmen und Institutionen aus Nicht-EU-Staaten** an Förderprogrammen teilnehmen dürfen.

37 | Vgl. EU-KOM 2019a; Foreign Affairs 2018; Zhang et al. 2019.

38 | Vgl. BCG 2018c.

39 | Vgl. Center for New American Security 2018.

40 | Vgl. Raymer/Monroe 2019.

41 | Vgl. DARPA 2013; DARPA 2019; IARPA 2019.

42 | Vgl. NIST 2018.

43 | Vgl. Roberson/White 2019.

44 | Vgl. Forteza et al. 2020.



4.3 Vereinigtes Königreich – durch Agilität und Vernetzung zu einer Führungsrolle bei Quantentechnologien

Das nationale Quantentechnologie-Programm des Vereinigten Königreichs war eines der ersten seiner Art. Es zielt auf die Entwicklung konkreter Anwendungen und Produkte durch das frühzeitige Einbinden von Partnern aus der Wirtschaft ab. In der Folge hat sich ein Ökosystem aus Forschungseinrichtungen, neuen und etablierten Anbietern sowie potenziellen Nutzern gebildet, dessen Stärke sich aber bislang nur bedingt in Patenzahlen und noch nicht in marktreifen Anwendungen widerspiegelt.

Das **Vereinigte Königreich** war eines der ersten Länder, das 2013 eine **dezidierte nationale Strategie** für Quantentechnologien („UK National Quantum Technologies Programme (NQTP)“) vorlegte.⁴⁵

Interessant ist hierbei der Vergleich zur Entwicklung in Deutschland: Im Vereinigten Königreich vergingen von den **ersten gezielten Diskussionen** über ein Quantentechnologie-Programm **in der wissenschaftlichen Community** bis hin zur **Verabschiedung des Programms** im Parlament **nur zwei bis drei Jahre**. Dabei ging die Initiative klar von den Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern aus.

In Deutschland dauerten die **Abstimmungsprozesse** innerhalb der **wissenschaftlichen Community** **deutlich länger**. So vergingen mehr als drei Jahre von einem ersten Entschluss zur Befassung mit dem Thema bis zur Veröffentlichung eines Positionspapiers der Union der deutschen Akademien der Wissenschaften.⁴⁶ Daran schloss im Regierungsauftrag der QUTEGA-Prozess an, bevor dann im Jahr 2018 das Rahmenprogramm der Bundesregierung verabschiedet wurde.⁴⁷

Das NQTP, das nach einer **ersten Phase von 2014 bis 2019** jetzt in die **zweite Phase bis 2024** übergeht, fußt auf **zwei Säulen**: Zum einen gibt es vier „**Quantum Hubs**“ mit

Themenschwerpunkten, die an der **Schnittstelle zwischen universitärer und Anwendungsforschung** liegen, zum anderen werden Mittel über **Innovate UK für die industriennahe Entwicklung** bereitgestellt.

*„Im Vereinigten Königreich war der Mut da, vornewegzu-
gehen.“*

Das NQTP war in der **ersten Phase mit rund 270 Millionen GBP** ausgestattet. Für die **zweite Phase** werden **nochmals 235 Millionen GBP** für das Programm allgemein und **94 Millionen GBP für die Quantum Hubs** bereitgestellt. Das Gesamtvolumen von Regierungsseite beläuft sich somit auf etwa **600 Millionen GBP über zehn Jahre**.⁴⁸

Grundlagenforschung ist im NQTP **nicht vorgesehen**, sondern wird aus anderen Töpfen finanziert. Der Fokus soll klar auf der **Entwicklung von Anwendungen und marktreifen Produkten** liegen.

Über einen **Wettbewerbsprozess** wurden die vier Quantum Hubs mit folgenden **thematischen Schwerpunkten** ausgewählt:

- Quantum Sensors and Metrology (unter Federführung der Universität Birmingham)
- Quantum Enhanced Imaging (unter Federführung der Universität Glasgow)
- Networked Quantum Information Technologies (unter Federführung der Universität Oxford)
- Quantum Communications Technologies (unter Federführung der Universität York)

Zusätzlich zum bereits bestehenden Hub zu Quanteninformatik wird in enger Verbindung mit diesem in der zweiten Phase des NQTP auch noch ein **nationales Zentrum für Quantencomputing** aufgebaut. Expertinnen und Experten geben allerdings zu bedenken, dass die bislang für dieses Zentrum veranschlagten Mittel nicht ausreichen werden, um einen Quantencomputer mit mehreren Hundert Qubits zu realisieren.

Jeder Hub wird **von einer Universität geleitet** und bindet **weitere Universitäten und Industriepartner** mit ein. Zu den

45 | Vgl. Knight/Walmsley 2019.

46 | Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2015.

47 | Vgl. BMBF 2018.

48 | Vgl. Innovate UK and the Engineering and Physical Science Research Council 2015; UK Research and Innovation 2018; 2019a.

eingebundenen Partnern zählen unter anderem auch das Fraunhofer Centre for Applied Photonics in Glasgow und das deutsche Telekommunikationsunternehmen ADVA Optical Networking.

In der Verwendung der ihnen zur Verfügung stehenden Mittel können die Quantum Hubs relativ **autonom und flexibel** agieren. Allerdings setzen alle auf eine nochmalige **Fokussierung der Aktivitäten** innerhalb des Themenfelds und die Etablierung von **Flaggschiffprojekten**, um die Sichtbarkeit vor allem für die potenziell interessierte Industrie zu erhöhen. Einige Expertinnen und Experten heben hervor, dass dieser Ansatz zwar **Opportunitätskosten** mit sich bringe, allerdings sehr zur **Bildung eines Markenkerns** und erhöhter **Identifikation der Community** beitrage.

Die thematische Trennung der **vier Hubs** sorgt dafür, dass diese **nicht untereinander im Wettbewerb** stehen und sich gemeinsam für den Quantentechnologie-Standort Vereinigtes Königreich einsetzen.

Der **Transfer** von Forschung zu industrieller Anwendung soll in **drei Wellen** stattfinden: In der ersten Welle werden parallel zur wissenschaftlichen Forschung **erste Prototypen entwickelt**. In der zweiten Welle werden über den Industry Strategy Challenge Fund die **Weiterentwicklung und Erprobung von Prototypen** gefördert sowie mögliche **Anwendungs- und Marktpotenziale analysiert**. Ein Beispiel hierfür ist ein quantenbasierter Gravitationsensor zur Untergrundanalyse bei Bauvorhaben.⁴⁹ Die letzte Welle ist die **Überführung in die industrielle Anwendung**, bei der die britische Regierung zusätzlich zu ihrer Förderung auch einen erheblichen Einsatz von Unternehmensseite einfordert („matched funding“).⁵⁰ In den Hubs wird der Transfer auch durch einen einfachen **Zugang zu Infrastrukturen und geistigem Eigentum** für beteiligte Unternehmen befördert.

Als wichtigen Faktor benennen Expertinnen und Experten die **frühzeitige Einbindung aller relevanten Akteure**, insbesondere auch der Unternehmen. Dazu gehören sowohl **Hersteller von Basistechnologien** und potenzielle **Hersteller von Produkten**, die Quantentechnologien der zweiten Generation nutzen, als auch mögliche **Anwender** solcher Produkte und Dienstleistungen, deren **Feedback direkt in Entwicklungsprozesse** konkreter

Anwendungen einfließt. Um ihre Beteiligung wird gezielt bei **regelmäßigen Showcase Events** geworben, bei denen große Teile der jeweiligen Communities zusammenkommen, Flaggschiffprojekte präsentieren und den Austausch mit interessierten Industrievertretern suchen.

„Die Idee ist, dass Wissenschaftler sich hier nicht nur ihre Fördergelder abholen und dann wieder in ihren Laboren verschwinden.“

Durch diese **kontinuierlichen Aktivitäten**, die von Anfang an in **Projektbudgets** eingeplant waren, nähert man sich nach zunächst zögerlichem Interesse von Industrieseite mittlerweile einer **kritischen Masse** an potenziellen Kooperationspartnern und Anwendern an. Zudem sind im Umfeld der Quantum Hubs bereits einige **Start-ups** entstanden, deren Gründung im Vereinigten Königreich traditionell eine größere **Unterstützung von Universitätsseite** erfährt als in Deutschland.

Nach Einschätzung von Expertinnen und Experten hat sich im Vereinigten Königreich durch dieses **enge Zusammenspiel** der Beteiligten und das geschickte **Setzen von Anreizen** trotz schlechterer Ausgangsposition als in Deutschland eine **lebendigere und vor allem enger vernetzte Quantencommunity** gebildet. Diese arbeitet **agil und flexibel** daran, Quantentechnologien aus dem Labor in den Markt zu bringen.

Trotz des Aufbaus eines **leistungsfähigen Quantenökosystems** musste allerdings auch das Vereinigte Königreich eine **Abwanderung führender Köpfe**, zum Beispiel im Bereich Quantencomputing zur Gründung eines Start-ups im Silicon Valley, hinnehmen.⁵¹ Zudem geben Expertinnen und Experten zu bedenken, dass auch bis zum **Ablauf der zweiten Phase** im Jahr 2024 trotz des Industriefokus nur **wenige Entwicklungen tatsächlich Marktreife** erreicht haben werden. Des Weiteren ist die **Patentierungsaktivität** im internationalen Vergleich bislang **gering**, auch wenn das Vereinigte Königreich **innerhalb der EU** in zwei von drei Bereichen **eine Führungsposition** einnimmt (siehe Abbildung 6).

49 | Vgl. UK Research and Innovation 2019b.

50 | Vgl. UK Research and Innovation 2018.

51 | Vgl. Financial Times 2019.



5 Basistechnologien für die Anwendung von Quantentechnologien der zweiten Generation

Deutsche Firmen, insbesondere KMU, haben im Hinblick auf Basiskomponenten, sogenannte Quantum Enabling Technologies, zum Teil führende Marktpositionen inne. Aktuell ist der Markt noch vor allem auf Laborausrüstung und Kleinserien beschränkt, wird aber weiter wachsen. Bei einzelnen Komponenten kann der Bedarf zurzeit nicht aus Deutschland oder Europa gedeckt werden. Miniaturisierung und Verringerung der Störanfälligkeit sind die größten Herausforderungen. Die Schaffung von Testumgebungen und Reallaboren kann die Entwicklung zur Praxistauglichkeit vorantreiben.

Trotz vollkommen unterschiedlicher Anwendungsfelder der vier Bereiche der Quantentechnologien der zweiten Generation basieren allesamt auf **dem Ausnutzen und der Kontrolle individueller Quantenzustände**. Deshalb gibt es **technologische Basiskomponenten** (Quantum Enabling Technologies; QET), wie spezialisierte Laser und Photonenquellen, halb- oder supraleitende Spezialmaterialien oder auch spezielle Kühltechniken, um Temperaturen von wenigen Millikelvin, also knapp über dem absoluten Nullpunkt, zu erreichen, die in verschiedenen Feldern zum Einsatz kommen (für ausgewählte Beispiele siehe „Einsatzszenarien für Basistechnologien“).

Die großen Fortschritte in den Quantentechnologien der letzten Jahrzehnte wurden gerade auch durch Durchbrüche im Bereich der QET ermöglicht. Dennoch kommt der **weiteren Entwicklung der QET zentrale Bedeutung** bei der Erreichung der Marktreife von Quantentechnologien zu.

In Deutschland haben sich bereits **einige Spezialhersteller** unter anderem durch **Ausgründungen** im Umfeld von Universitäten und Forschungsinstituten entwickelt. Sie nehmen besonders bei Speziallasern und Lichtquellen auch auf dem

internationalen Markt eine **Führungsrolle** ein. Als etabliertes Unternehmen ist TRUMPF in diesem Bereich aktiv, während beispielsweise TOPTICA und Menlo Systems bei der Speziallaserherstellung, PicoQuant bei Einzelphotonendetektoren oder Kiutra und attocube bei der Kühltechnik aufstrebende KMU sind.

5.1 Stand der Forschung und der kommerziellen Anwendung

Die größten aktuellen Herausforderungen liegen darin, die Komponenten durch Miniaturisierung, Verringerung der Störanfälligkeit und Senkung der Kosten reif für den Einsatz in größeren Märkten und außerhalb von Laborumgebungen zu machen. Einen Beitrag hierfür können Leuchtturmprojekte leisten, die Kompetenzen in Forschung und Entwicklung mit den konkreten Anforderungen der Anwender und Nutzer zusammenbringen.

Bei den QET sind viele **Grundlagen für die Anwendung in Quantentechnologien** der zweiten Generation **bereits geschaffen**. Sie ermöglichen das **gezielte Ausnutzen von Quanteneffekten** sowie die **Steuerung und Auslesbarkeit** der jeweiligen Prozesse. Zum Teil sind diese Komponenten bereits von kommerziellen Anbietern erhältlich.

Vereinfacht kann die QET in drei Felder unterteilt werden:⁵²

- **Quantenkompatible Datenerfassung, schnelle Elektronik und Kryotechnik:** Datenverarbeitungselektronik – hohe Zeitauflösung, geringe Totzeiten, datendurchsatzoptimiert, parallelisiert etc. – einschließlich Software, kompakte Kryokühler und Magnetkryokühler etc.
- **Laser, Detektoren, Quellen und Schnittstellen:** Einzelphotonen, verschränkte Photonen, hochkohärent, hochinkohärent, neue Spektralbereiche, insbesondere für die effiziente Wechselwirkung mit Atomen etc.
- **Materialien, Bauelemente und quantentechnologische Geräte:** Topologische Materialien für das Quantencomputing, effiziente Systeme und Verfahren zur Fixierung, Positionierung und Implantierung einzelner Atome, Ionen oder Moleküle, Vakuumtechnik, optische Präzisionsaufbau- und

52 | Vgl. QUTEGA 2017.

Verbindungstechnik, Hybridmikroaufbauten, integrierte Lösungen und Baukastentechniken, Prozessierung von supra-leitenden Schichten, Verbindungshalbleitern oder Diamanten für quantentechnologische Anwendungen etc.

Herausforderungen

Bislang wurde für viele Basistechnologien **nur ein proof-of-concept** im Labor erbracht; für den **Einsatz außerhalb** dieser

geschützten Bedingungen sind sie bisher **ungeeignet**. Um die Quantentechnologien der zweiten Generation aus dem Labor in die breite Anwendung zu bringen, sind die **Miniaturisierung der Komponenten** und in vielen Fällen die **Verringerung der Störanfälligkeit** entscheidende Faktoren. Diese Verbesserungen dürfen aber **keinesfalls auf Kosten der Funktionalität und Sensibilität** gehen. Vielmehr gilt es, auch in diesem Bereich **weitere Fortschritte** zu erzielen und darüber hinaus eine **Reduktion der Kosten** zu erreichen.

Einsatzszenarien für Basistechnologien

Stickstoff-Fehlstellen(NV)-Zentren in Diamanten – durch winzige Fehler zu mehr Genauigkeit: Stickstoff-Fehlstellen-Zentren sind **Punktdefekte in einem Diamanten**. Ein Stickstoffatom (N) ersetzt dabei den Gitterplatz eines Kohlenstoffatoms mit benachbarter Leerstelle (V). Dadurch entsteht an dieser Stelle zuverlässig ein Quantenzustand, der **sehr sensibel** gegenüber winzigsten Veränderungen des umgebenden **Magnet- oder elektrischen Felds**, gegenüber **Mikrowellenstrahlung** oder gegenüber **Licht** ist. Ein entscheidender Vorteil von **NV-Zentren in Diamanten** ist, dass diese Quanteneigenschaften auch **bei Raumtemperatur nutzbar** sind.

Ein Sensor, der auf solchen NV-Zentren in Diamanten basiert, ist in der Lage, Veränderungen in Magnetfeldern, etwa bei einer **Kernspinresonanzmessung**, wie sie **in der Medizin** eingesetzt wird, mit **deutlich höherer räumlicher Auflösung** zu messen, als dies mit klassischen Sensoren möglich wäre. Doch nicht nur in der Sensorik finden NV-Zentren Anwendung. Sie können auch eine Rolle in der **Quantenkryptografie** oder als zentraler Baustein eines **Qubits für einen Quantencomputer** spielen. Außerdem eignen sie sich als **Einzelphotonenquelle**.

Photonenquellen – Quanten auf Knopfdruck: Die Quantentechnologien der zweiten Generation beruhen auf dem gezielten Ausnutzen und Ansteuern von **Quantenzuständen bei einzelnen oder einer kleinen Zahl an Teilchen**. In vielen Ansätzen sind die Teilchen, auf die es ankommt, **Photonen**. Herkömmliche Lichtquellen und Laser emittieren immer mehrere Photonen in nicht genau quantifizierbaren Zeitabständen. So entsendet eine handelsübliche Glühbirne etwa 10^{20} Photonen pro Sekunde.

Einzelphotonenquellen hingegen können **einzelne Photonen mit definierten Quantenzuständen** und in **definierten**

Zeitabständen emittieren. Einzelphotonenquellen sind daher wahre **Vielseitigkeitskünstler** im Bereich der Quantentechnologien. Sie können in allen Bereichen von **Sensorik/Imaging/Metrologie** über **Quantenkommunikation**, wo sie für den **Austausch von Quantenschlüsseln (QKD)** genutzt werden können, bis hin zu **Quantencomputing und -simulation** zum Einsatz kommen.

Quellen, die zuverlässig **verschränkte Photonenpaare** produzieren (für das Phänomen der Verschränkung siehe „Überblick über die wichtigsten quantenmechanischen Effekte“, Seite 21), erfüllen ebenfalls wichtige Aufgaben in verschiedenen Bereichen der Quantentechnologie. Sie können zur mikroskopischen Bildgebung, ohne mit dem untersuchten Objekt zu interagieren („ghost imaging“), in der **Quantenkommunikation** und ebenfalls beim **Quantenschlüssel-austausch** genutzt werden.

Kryo-Elemente – Quantentechnologien im Tieftiefkühl-schrank: Viele Quantentechnologien nutzen den Umstand, dass Materie bei **extrem niedrigen Temperaturen** (sehr nahe am absoluten Nullpunkt von $-273,15\text{ °C}$) andere spezielle Eigenschaften aufweist. So beruhen verschiedene Ansätze zum Bau von **Quantencomputern und Quantensimulatoren** sowie auch experimentelle Ansätze für einen **Quantenrepeater** auf dem Phänomen der **Supraleitung**, das bei bestimmten Materialien erst bei solch niedrigen Temperaturen auftritt.

Um diese Temperaturen zu erreichen, werden sogenannte **Kryostaten** verwendet, die meist flüssiges Helium als Kühlmittel nutzen. Die besondere Schwierigkeit beim Einsatz von Kryostaten in der Quantentechnologie besteht darin, dass sie **keinen Einfluss auf die sehr störanfälligen Quantenzustände**, die der jeweiligen Technologie zugrunde liegen, nehmen dürfen.



Das Ziel ist es, „**schlüsselfertige**“ **Produkte und Komponenten** herzustellen, die Anbieter von Quantentechnologien einfach beziehen und ohne großen eigenen Anpassungsaufwand in ihren Produkten verwenden können.

Doch nicht nur im ingenieur- und materialwissenschaftlichen Bereich sind weitere Fortschritte nötig, um Quantentechnologien marktreif zu machen. Gerade für Quantencomputing ist auch die Entwicklung von **Algorithmen und Softwarekomponenten für Steuerelemente** eine Kernkomponente.⁵³

Ein **mögliches Leuchtturmprojekt**, das von Expertinnen und Experten vorgeschlagen wurde, sind konzertierte Anstrengungen im Bereich **integrierte Mikrooptik**. In solch einem Verbund könnte die Miniaturisierung optischer Elemente für Quantentechnologien auf Chipgröße vorangetrieben werden, ähnlich wie dies im Bereich Quantenkommunikation im Verbundprojekt UNIQORN derzeit angestrebt wird. Für diese Technologie wird ein **großer Bedarf** gerade auch im Bereich Quantensensorik und imaging prognostiziert.

In vielen Bereichen sind weitere **ingenieurtechnische Entwicklungspfade für QET** vorgezeichnet. Dennoch darf nicht unterschätzt werden, welche neuen Impulse und Entwicklungsschübe auch weiterhin von der **theoretischen und experimentellen Grundlagenforschung** ausgehen können (beispielsweise Materialien mit supraleitenden Eigenschaften bei Raumtemperatur).

Standards und Normen

Da die QET bereits in Forschung und Entwicklung genutzt werden und auch bei zukünftig kommerziell verfügbaren Produkten zum Einsatz kommen werden, steht für sie auch die Etablierung von **Standards und Normen** an. In diesem Bereich gilt es, frühzeitig aktiv zu werden, um sicherzustellen, dass **deutsche und europäische Interessen** (wie zum Beispiel Ausgestaltung der Normen nahe an bestehenden deutschen Produktspezifikationen) bei internationalen Normierungsprozessen berücksichtigt werden.

Einige Expertinnen und Experten geben allerdings zu bedenken, dass sich viele deutsche Unternehmen gerade durch ihren Fokus auf speziell **an Kundenwünschen ausgerichteten Produktspezifikationen** bei hoher Produktqualität Marktanteile sichern. Eine zu **starre Ausformung** von Normen und Standards könnte

in diesem Marktsegment **eher hinderlich** sein. Eine frühzeitige enge **Einbindung der deutschen Quantencommunity** in die Abstimmungsprozesse des **DIN**, das bereits initiales Scouting im Bereich Quantentechnologien betreibt, kann dazu beitragen, hier eine sinnvolle, schrittweise Herangehensweise zu finden.

5.2 Marktpotenziale und Wertschöpfungsketten

Die Bedeutung von Quantum Enabling Technologies als kritische Komponenten am Anfang der Wertschöpfungsketten für die verschiedenen Bereiche der Quantentechnologien zweiter Generation darf nicht unterschätzt werden. Insbesondere deutsche KMU sollten ihre gute Ausgangsposition in diesem Gebiet nutzen, um entscheidende Positionen in den internationalen Wertschöpfungsketten zu besetzen. Hierzu müssen sie befähigt werden, die letzten nötigen Entwicklungsschritte zur Markt- und Serienreife zu bewältigen.

Zurzeit finden die QET noch vor allem **als Laborausüstung** Verwendung. Bei den Herstellern handelt es sich daher meist um **Spezialhersteller**, die vor allem in **Manufakturbetrieb und Kleinserienfertigung** arbeiten. Die Größenordnung der Investitionen in solche Laborausüstung wurde für **Deutschland auf rund 100 bis 150 Millionen EUR** jährlich geschätzt.⁵⁴ Durch die zunehmenden Aktivitäten – auch infolge des Quantentechnologien-Rahmenprogramms der Bundesregierung – dürfte dieses **Marktsegment beständig wachsen** und **neue Kundensegmente** dürften hinzukommen.⁵⁵

Für den Bereich der **Photonenquellen als QET** (spezialisierte Laser sowie Einzel- und Paarphotonenquellen) sieht eine Studie des **britischen Quantenprogramms** das Marktvolumen von **10 Millionen GBP im Jahr 2017** auf über **60 Millionen GBP im Jahr 2022** wachsen.⁵⁶ Sollten deutsche Großunternehmen, die in den Bereichen Sensortechnik und Mikroskopie/Bildgebung aktiv sind (unter anderem Bosch, Siemens oder Zeiss), vermehrt auf Quantentechnologie setzen, ist zu erwarten, dass der **entsprechende Markt in Deutschland größer ausfallen** dürfte.

53 | Vgl. VDI Technologiezentrum GmbH 2017.

54 | Vgl. VDI Technologiezentrum GmbH 2017.

55 | Vgl. BMBF 2018.

56 | Vgl. Gooch & Housego et al. 2018.

Auch wenn der Markt für QET im Vergleich zu den oben genannten Zahlen **mittelfristig deutlich wachsen** dürfte, werden QET immer nur einen **kleinen Teil der gesamten Wertschöpfung** im Bereich Quantentechnologien ausmachen.

„Bei den Quantum Enabling Technologies werden sowohl Marktpotenziale für deutsche Firmen als auch nützliche Entwicklungen für andere Sektoren abfallen.“

Weitere Marktpotenziale sehen Expertinnen und Experten darin, dass bei der Entwicklung von QET auch Produkte anfallen, die **außerhalb des engen Bereichs der Quantentechnologien** selbst genutzt werden können, wie zum Beispiel spezialisierte Laser oder Einzelphotonendetektoren. Letztere können etwa in der biomedizinischen Forschung bei der DNA-Sequenzierung und in der Mikroskopie, bei Tomografiemethoden in der Medizin oder bei der Geländevermessung verwendet werden, ohne dass dabei Quantentechnologien der zweiten Generation zum Einsatz kommen.

Die Marktpotenziale, die sich dadurch erreichen lassen, sind nicht einfach zu beziffern. Es ist jedoch davon auszugehen, dass dies für einige Anbieter ein **wichtiges Standbein** sein kann, insbesondere solange der Markt für Quantentechnologien noch relativ klein ist.

Wertschöpfungsketten

Die QET stehen qua Definition oft **am Anfang der Wertschöpfungsketten** in den jeweiligen Feldern der Quantentechnologien zweiter Generation. Die spezialisierten Komponenten für Quantentechnologien werden zurzeit meist von **Spezialanbietern in KMU oder Start-ups** hergestellt, die häufig **in Deutschland angesiedelt** sind und den globalen Markt bedienen.

Expertinnen und Experten berichten allerdings, dass viele Hersteller aus Branchen, die am Rande für Quantentechnologie relevant sind, etwa die Elektrotechnik, **Quantentechnologien noch nicht als potenziellen Markt erkannt** haben. Daher müssen einige Komponenten derzeit noch von den Produzenten quantentechnologischer Geräte selbst adaptiert werden, da sie nicht mit den benötigten Spezifikationen am Markt verfügbar sind.

Da es momentan nur einen kleinen Markt für Quantentechnologien gibt, ist **nicht garantiert**, dass sich das entwickelnde

Ökosystem von Spezialherstellern von selbst trägt, bis die erforderliche Entwicklungsarbeit in den QET geleistet ist. Um in die **Weiterentwicklung der QET zur Marktreife** investieren zu können, brauchen Anbieter **fortlaufende Umsätze**, wie sie beispielsweise durch Nachfrage aus dem Forschungsbereich durch **kontinuierliche Investitionen und langfristige Förderprogramme** generiert werden könnten. So könnte zum einen das sogenannte **„Tal des Todes“ überbrückt** werden, das sich zwischen der Entwicklung von Prototypen im Rahmen einer Forschungsförderung und den letzten Schritten hin zum marktfertigen Produkt erstreckt. Gleichzeitig werden auch Voraussetzungen dafür geschaffen, dass deutsche Unternehmen zukünftig an diesen **Gliedern der Wertschöpfungskette teilhaben** können.

„Um weiter in die Entwicklung von Enabling Technologies investieren zu können, sind Unternehmen auf eine stetige Nachfrage angewiesen. Hier kann der Staat durch kontinuierliche Investitionen unter die Arme greifen und Brückenbauer sein.“

Aktivitäten an **Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen**, wie dem Transferzentrum Digital Innovation Hub Photonics am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena, können dazu einen wichtigen Beitrag leisten. Die **Förderlinie des BMBF** für die Entwicklung von Schlüsselkomponenten, die auf eine Kooperation von **exzellenten Forschungseinrichtungen** im Bereich Quantentechnologien mit den **Herstellern von Schlüsselkomponenten** abzielt, setzt hier bereits entsprechende Anreize.⁵⁷

5.3 Technologische Souveränität

Quantum Enabling Technologies sind ein wichtiger Bestandteil zum Erhalt der technologischen Souveränität. Die gute Position Deutschlands in diesem Bereich sollte **gewahrt und ausgebaut** werden. Zurzeit besteht eine **nur geringe Gefahr von Abhängigkeiten bei Rohstoffen und Einzelkomponenten**.

Die QET werden **kritische Komponenten für die Wertschöpfung** in den einzelnen Feldern der Quantentechnologien sein. **Deutschland** ist hier in einer guten Position, diese



Schlüsselstelle in den internationalen Wertschöpfungsketten mit starken Unternehmen zu besetzen.

„Man kann einen Quantencomputer im Prinzip komplett mit Komponenten aus Deutschland bauen.“

Allerdings sollten die meisten **hochentwickelten Industriestaaten** dazu in der Lage sein, selbst in diesem Bereich eine **relevante Industrie aufzubauen**, was in Teilen auch schon geschieht. Dies zeigt zum Beispiel Großbritannien mit den im Umfeld des National Quantum Technology Programme entstehenden oder wachsenden Firmen.

Für **einzelne Bereiche** geben Expertinnen und Experten an, dass ehemals vorhandene **Wertschöpfung und Expertise** aus Deutschland **abgewandert** sind. Dies betrifft auch den akademischen Bereich, etwa durch den Abbau oder die Nicht-Wiederberufung von Lehrstühlen im Bereich Kühltechnik.

So wird **Ultravakuumtechnik** heute oft aus China bezogen, während im Bereich **modernster Kühlanlagen**, wie sie für das Quantencomputing genutzt werden, britische und finnische Firmen führend sind. Sollte sich hier die **Nachfrage nach qualitativ**

hochwertigen und hochpreisigen Produkten verstärken, könnte es attraktiv sein, auch in diesen Bereichen hierzulande **wieder Kapazitäten aufzubauen**. Dies gilt auch für in ihrer Verfügbarkeit durch Exportkontrollen eingeschränkte Komponenten.

Es gibt einzelne Berichte, dass es bei Hardwarekomponenten von Quantencomputern **teilweise zu Lieferengpässen** kommt, da die Anbieter aufgrund des begrenzten Marktes noch keine etablierte Industriefertigung für diese Produkte betreiben.⁵⁸

Expertinnen und Experten sehen bei den **Ausgangsprodukten** für QET **keine große Gefahr von strategischen Abhängigkeiten und Rohstoffengpässen**. Zwar werden **einfache Komponenten** wie Standardlinsen, Klebstoffe oder Gehäuse oft **aus dem (asiatischen) Ausland** bezogen, doch ist dies vor allem aus Kostengründen der Fall und nicht, weil deutsche Hersteller nicht in der Lage wären, diese selbst zu produzieren. Bei **spezialisierten Produkten** (Speziallinsen, Spezialklebstoffe etc.) hingegen wird die **hohe Qualität deutscher oder europäischer Hersteller** bevorzugt. Nur bei **einzelnen Komponenten** wie nicht-linearen Kristallen für den Bau von spezialisierten Lichtquellen wird von einigen Expertinnen und Experten bedauert, dass sie **nicht mehr auf deutsche Hersteller zurückgreifen** können. Aber auch hier wäre das nötige Know-how für eine Fertigung in Deutschland noch vorhanden.

5.4 Stärken- und Schwächenprofil Deutschlands sowie aktuelle Chancen und Risiken

Eine spezielle Übersicht über Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken für den Standort Deutschland bei **Basistechnologien** für die Anwendung von Quantentechnologien der

zweiten Generation erfolgt hier. Für eine allgemeine Übersicht über die verschiedenen Technologiefelder der Quantentechnologien hinweg siehe Kapitel 3.3.

Stärken

- KMU-Basis mit Fokus auf Enabling Technologies (in Photonik, Mikroelektronik, Mikroskopie)
- Gute Verfügbarkeit spezialisierter Laborausstattung und von Komponenten aus Deutschland/Europa, die in Spitzenforschung benötigt werden
- Fundierte Erfahrung deutscher Industrie und Forschungseinrichtungen bei für Kommerzialisierung entscheidenden Prozessen wie Miniaturisierung und Systemintegration von Komponenten

Schwächen

- Noch sehr vom akademischen Markt abhängige Nachfrage
- Geringe Verfügbarkeit von Komponenten, die ohne weiteren Entwicklungsaufwand bereits alle Anforderungen für den Einsatz außerhalb des Labors erfüllen
- Kleine Firmengrößen und Förderstrukturen als Hürden für eigene Entwicklungsaktivitäten

Chancen

- Gute Ausgangslage zur Besetzung von Schlüsselstellen in internationalen Wertschöpfungsketten
- Bereitstellung von Produktions- und Testumgebungen für KMU und Start-ups
- Erhalt der technologischen Souveränität bei zentralen Komponenten
- Spill-over-Effekte bei Komponentenentwicklungen in angrenzende Technologiebereiche

Risiken

- Abhängigkeiten von Importen bei einzelnen Komponenten (zum Beispiel aktuell von China bei nicht-linearen Kristallen)
- Ungelöstes „Henne-Ei-Problem“ bei Marktentwicklung: ohne Komponenten keine Produzenten neuer Quantentechnologien, ohne Produzenten keine Nachfrage nach Komponenten beziehungsweise Komponentenentwicklung
- Verlust akademischer Wissensbasis durch mangelnde Verankerung in Forschungseinrichtungen (zum Beispiel Kühltechnik, Kristallzucht)



6 Quantensensorik, Quantenimaging und Quantenmetrologie

Deutschland hat eine starke Ausgangsposition in der quantenbasierten Sensorik, Bildgebung und Metrologie. Quanteneffekte können neue Grade der Empfindlichkeit und Genauigkeit sowie komplett neue Messverfahren ermöglichen. Erste Produkte sind bereits kommerziell erhältlich, weitere stehen kurz vor dem Markteintritt. In diesem Feld sind hohe sekundäre Wertschöpfungspotenziale in vielen Branchen zu erwarten.

Das am **weitesten entwickelte Technologiefeld** der Quantentechnologien zweiter Generation umfasst die Bereiche Quantensensorik, Quantenimaging und Quantenmetrologie. Es gibt **bereits erste Produkte** auf dem Markt, und nach Einschätzung von Expertinnen und Experten werden in den kommenden Jahren vor allem in den Bereichen Sensorik und Metrologie und in 5 bis 15 Jahren im Bereich Imaging weitere Anwendungen kommerzialisiert werden können (siehe „Einsatzszenarien für quantenbasierte Sensorik/Imaging/Metrologie“).

In der **Quantensensorik** kann durch die Nutzung von Quanteneffekten eine **bislang ungeahnte Empfindlichkeit und Genauigkeit** erreicht werden. Dadurch kann beispielsweise die Messung von Massen und Strömen wesentlich verbessert werden.⁵⁹

Das Ziel bei **Quantenimaging** besteht darin, durch Einzelphotonenquellen **verbesserte Abbildungsverfahren**, vor allem bei Lebzellen, zu erreichen. Darüber hinaus werden komplett **neuartige Beobachtungsverfahren** wie das **Ghost Imaging** möglich, bei dem eine indirekte Bildgebung in bisher nicht zugänglichen Wellenlängenbereichen stattfinden kann. Ferner kann es auf einem Chip integriert werden und bietet vielversprechende Möglichkeiten für Anwendungen in den Bereichen Kommunikation, Fernerkundung und ultraschnelle Spektroskopie.⁶⁰

Neudefinition des internationalen Einheitensystems

Seit 1790 gibt es ein einheitliches System zur Festlegung von Größen und Maßen. Über die Jahrhunderte hinweg wurde das **internationale Einheitensystem (SI)** stetig präzisiert, blieb aber von physischen Referenzobjekten wie dem Urkilo oder dem Urmeter abhängig. Im **Mai 2019** wurde das SI **auf Basis quantenbasierter Messmöglichkeiten neu definiert** und vollständig von den physischen Referenzobjekten entkoppelt. Quantenphysik spielte hierbei eine wichtige Rolle, denn für die Neudefinition wurde unter anderem das **Plancksche Wirkungsquantum** herangezogen.⁶¹ Die vier Einheiten Kilogramm, Mol, Ampere und Kelvin sind nun basierend auf Werten von Naturkonstanten definiert.

Die **Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)** in Braunschweig ist als das nationale Metrologieinstitut zuständig für die Umsetzung des SI in Deutschland. Sie war bei der Neudefinition des SI, unter anderem durch experimentelle Versuche im Vorfeld, **maßgeblich beteiligt**.

Die Neudefinition der SI-Einheiten und damit des Messwesens ist von großer volkswirtschaftlicher Bedeutung. Sie verspricht aufgrund der deutlichen **Vereinfachung des Eichprozesses** zusätzliches **Wertschöpfungspotenzial** für den deutschen **Maschinen- und Anlagenbau**.

Bei der **Quantenmetrologie** basieren viele der zu erwartenden praktischen Anwendungen auf **präziserer Zeitmessung**. Diese bildet die Grundlage für IKT-Technologien und Ortungssysteme, die aufgrund der höheren Messgenauigkeit quantenbasierter Zeitmessung noch exakter werden.⁶²

Neben der Zeit können auch andere Größen mit Quantenansätzen präziser gemessen werden. Diese Eigenschaft wurde zur Neudefinition des internationalen Einheitensystems genutzt (siehe „Neudefinition des internationalen Einheitensystems“). Quantenelektronische Effekte bilden dabei oftmals die Grundlage für Messungen verschiedenster Größen.

59 | Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2015.

60 | Vgl. PhotonicsViews 2016.

61 | Vgl. PTB 2019; Siegner/Göbel 2019.

62 | Vgl. EU-KOM 2017.

Die **Quantenelektronik** ist ein Technologiefeld an der Grenze zwischen Quantentechnologien der ersten und der zweiten Generation. Da die Weiterentwicklung jedoch stetig vorangetrieben wird, so zum Beispiel die **Miniaturisierung von Einzelsystemen** oder die **vereinfachte Bedienbarkeit**, wird die Quantenelektronik auch zukünftig eine wichtige Rolle spielen. Die Quantenelektronik leistet einen wesentlichen Beitrag für

die Qualitätsinfrastruktur, sprich das Zusammenspiel aller Bestandteile der Standardisierung, des Normen- und Messwesens, der Zertifizierung und der Prüfdienstleistungen. **Hochpräzise und einheitliche Messungen** können inzwischen **größtenteils elektronisch** durchgeführt werden, etwa das präzise Messen von sehr kleinen oder sehr großen Massen per Spannung.⁶³

Einsatzszenarien für quantenbasierte Sensorik/ Imaging/Metrologie

Vermeidung von Bauverzögerungen: Bei knapp 40 Prozent aller Baustellen kommt es zu Verzögerungen und/oder Mehrkosten, da **unklar ist, was unter der Erdoberfläche vorzufinden sein wird**. Mit klassischen Sensoren können Messungen vorgenommen werden, jedoch werden sie nur selten verwendet, da ihr Einsatz sehr zeitintensiv und die Aussagekraft der Messergebnisse begrenzt ist. **Quantenbasierte Sensoren** zur unterirdischen Vermessung sind **10 bis 100 Mal schneller und doppelt so genau** wie nicht-quantenbasierte Sensoren.⁶⁴ Mit einer besseren Vorkenntnis der Untergrundbeschaffenheit können beispielsweise **die Dauer von Straßenbauarbeiten verkürzt** und so **unnötige Staus vermieden** werden.

Schonendere und präzisere Diagnosen: Zur Diagnose von Erkrankungen werden oft Magnetfelder gemessen, die von Strömen im menschlichen Körper herrühren, zum Beispiel Gehirnströme durch Magnetoenzephalografie (MEG) oder Herzströme durch Magnetokardiografie (MKG). Die Untersuchung in den heutigen, großen und oft beengenden Geräten ist für die Patientinnen und Patienten eine zusätzliche Belastung. Dies soll sich durch den Einsatz von **auf optisch gepumpten Magnetometern (OPMs) basierenden Sensoren** ändern.⁶⁵ Sie erlauben die Entwicklung **kleiner, mobiler Dioden**, die den Patientinnen und Patienten direkt angelegt werden können und ihre Bewegungsfreiheit deutlich weniger einschränken. Da OPMs, anders als etwa „Superconducting Quantum Interference Device (SQUID)“-basierte Messgeräte, bei Raumtemperatur funktionieren, fällt der Einsatz von großen Kryostaten weg, und

die Technologie kann in „MEG-Helmen“ miniaturisiert umgesetzt und direkt an die Patientinnen und Patienten angelegt werden. Durch den direkten Kontakt liefern sie genauere Messergebnisse, gerade bei Patientengruppen wie zum Beispiel Frühgeborenen, deren Körperbau stark von dem eines durchschnittlichen Erwachsenen abweicht. Neben dem diagnostischen Einsatz erhofft man sich durch die Nutzung in der Forschung auch ein **besseres Verständnis neuronaler Erkrankungen**, wie Alzheimer, und dadurch Fortschritte bei der Versorgung der Patientinnen und Patienten.⁶⁶ Zur Weiterentwicklung dieser Technologie wird im Rahmen des EU Quantum Flagship das Projekt macQsimal gefördert.⁶⁷

Einfach handhabbare, hochpräzise Uhren: Zur Messung von Höhenunterschieden in der Geodäsie oder zur Synchronisation von Netzwerken mit hochgenauen Frequenzstandards (Satellitennavigation, wie GPS und Galileo, Computersysteme, Radioteleskope) werden höchstpräzise Uhren benötigt. Sie sind also für das **reibungslose Funktionieren unserer Infrastruktur** entscheidend, aber oftmals komplex zu bedienen und störungsanfällig. Im Rahmen des vom BMBF bis 2020 geförderten Projekts „Optische Einzelionen-Uhr für Anwender“ (opticlock) wird deshalb ein Demonstrator einer **dauerbetriebsfesten kompakten optischen Uhr** entwickelt. Diese neueste Generation von höchstpräzisen Uhren basiert auf optischen Übergängen in neutralen Atomen oder geladenen Ionen. Prototypen erreichen heute Genauigkeiten, die einer Gangabweichung von etwa einer Sekunde über das Alter des Universums entsprechen. Die von „opticlock“ entwickelte Uhr soll auch außerhalb spezialisierter Labors funktionieren und von Nichtwissenschaftlerinnen und Nichtwissenschaftlern **leicht zu bedienen** sein.⁶⁸

63 | Vgl. Chaste et al. 2012.

64 | Vgl. UK National Quantum Technology Hub Sensors and Metrology 2018.

65 | Vgl. Boto et al. 2018.

66 | Vgl. BMBF 2017b; FieldLine Inc. 2019.

67 | Vgl. macQsimal 2019.

68 | Vgl. opticlock 2019.



Zusammenfassend lässt sich sagen, dass man sich durch den Einsatz von Quantentechnologie im Bereich Sensorik, Imaging und Metrologie **Verbesserungen in mehreren Leistungsdimensionen** – mittelfristig auch zu Kosten, die mit heute in Serienfertigung befindlichen Produkten vergleichbar sind – erhofft, vor allem

- genauere Auflösung,
- höhere Messgenauigkeit,
- bessere Diagnostikmöglichkeiten,
- Abbildungsverfahren basierend auf lichtärmeren Quellen sowie
- insgesamt kompaktere Produkte.

6.1 Stand der Forschung und der kommerziellen Anwendung

Deutschlands inner- und außeruniversitäre Forschungslandschaft in diesem Technologiefeld ist stark aufgestellt. Zudem ist im Bereich Quantensensorik, Quantenimaging und Quantenmetrologie ein vergleichsweise großes Interesse und Engagement für Forschung und Entwicklung in der Industrie zu verzeichnen. Förderlich ist zudem die räumliche Nähe von Forschungsgruppen zu potenziellen Anwendern aus unterschiedlichsten Branchen.

Deutschland gehört international zu den führenden Standorten für die Forschung an und die Entwicklung von quantenbasierter Sensorik, Imagings und Metrologie. Es besteht eine **enge Verzahnung** zwischen der **Grundlagenforschung an Universitäten** und **außeruniversitären Forschungseinrichtungen** wie der **PTB**, dem **DLR** sowie **Fraunhofer-** und **Max-Planck-Instituten**, etwa im Exzellenzcluster Quantum Frontiers – Licht und Materie an der Quantengrenze in Braunschweig und Hannover. Die Zahl der Publikationen in den Bereichen Quantensensorik und Quantenmetrologie ist zwischen 2010 und 2016 stark angestiegen.⁶⁹

Im Rahmen der Hightech-Strategie 2025 ist geplant, an der PTB ein **Quantentechnologie-Kompetenzzentrum (QTZ)** aufzubauen, sofern die dafür notwendige personelle Ausstattung

gewährleistet werden kann. Dessen wichtigstes Ziel ist die Unterstützung der Wirtschaft beim Transfer von Forschungsergebnissen aus dem Bereich der Quantentechnologien in die Anwendung.⁷⁰ Ziel ist unter anderem ein **Angebot an Fort- und Weiterbildungen**. Außerdem sollen **Start-ups** im Bereich Quantentechnologien bei der Prototypentestung beziehungsweise Weiterentwicklung von Prototypen **unterstützt werden**. Basierend auf der Kernkompetenz der PTB liegt der Fokus des QTZ auf dem Bereich quantenbasierte Metrologie, geht jedoch noch darüber hinaus: Zum Beispiel **können unterschiedliche Gerätschaften**, sowohl aus den Quantentechnologien als auch aus dem Bereich der Basistechnologien, etwa Einzelphotonenquellen, -detektoren oder Speziallaser, zukünftig in der PTB **ausgemessen und charakterisiert werden**.

Erste Sensorik-Anwendungen werden auch im **Fraunhofer-Leitprojekt Q-Mag** entwickelt. Freiburger Fraunhofer-Institute arbeiten zusammen mit der Universität Stuttgart und Industrievertretern (zum Beispiel Intel und Siemens Healthineers) an NV-Diamant-Technologien zur hochauflösenden Messung kleinster Ströme und Magnetfelder, etwa zur Detektion von Gehirnströmen in der Medizintechnik oder zur Messung des Erdmagnetfelds in der Geodäsie.

Allgemein positiv hervorzuheben ist das vergleichsweise rege Engagement der Industrie in diesem Quantentechnologiefeld (siehe auch „Durch Quanten-Challenges schneller vom Labor zur Anwendung“ auf Seite 25). Unternehmen betonen die **Wichtigkeit, frühzeitig** in die **FuE** einzusteigen, um die **Marktführerschaft zu verteidigen** und selbst **IP zu generieren**. Unter den großen deutschen FuE-intensiven Unternehmen engagieren sich vor allem **Bosch, Siemens, TRUMPF und Zeiss aktiv**, mit einem Fokus auf ihren jeweiligen Geschäftsfeldern. So legt Zeiss zum Beispiel den Schwerpunkt auf Quantenimaging, mit Blick auf Mikroskopie als mögliches Anwendungsfeld. Darüber hinaus gibt es in Deutschland **erste kleinere Unternehmen**, wie Q.ANT oder NVISION IMAGING Technologies, die sich primär auf quantenbasierte Anwendungen fokussieren. Eine frühzeitige Einbeziehung der Industrie in öffentlich geförderte Vorhaben, beispielsweise über projektbegleitende Industrieausschüsse, kann nach Meinung der Expertinnen und Experten generell die **Passung** zwischen der **Ausrichtung der Entwicklungsanstrengungen** und den **Industriebedarfen** verbessern.

Die Expertinnen und Experten sprechen sich dafür aus, **Test- und Validierungsstrukturen für Quantensensoren in Deutschland** aufzubauen, damit diese im direkten Vergleich mit aktuell

69 | Vgl. Bornmann et al. 2019.

70 | Vgl. BMBF 2019a.

verfügbaren Sensoren getestet werden können. Dadurch könnten potenzielle Anwender in **konkreten Einsatzszenarien** prüfen, ob quantenbasierte Sensorik- und Imaging-Anwendungen ihre Anforderungen besser als klassische Ansätze erfüllen. Das QTZ an der PTB könnte mit der nötigen finanziellen und personellen Ausstattung diese Lücke perspektivisch schließen.

„Im Bereich Quantensensorik gibt es einen relativ geraden Weg vom jetzigen Entwicklungsstand hin zu einem Produkt; die Roadmap ist sehr gut definiert, technische Probleme sind klar identifiziert.“

Beim Übergang von der Grundlagen- in die anwendungsorientierte Forschung sollte möglichst früh darauf geachtet werden, dass sich die **benötigten Bauteile kostengünstig und in Serie fertigen lassen** und unter realistischen Bedingungen sicher funktionieren.⁷¹ Der im Labor erreichte Quantenzustand muss auch im alltäglichen Einsatz zuverlässig kontrollierbar und stabil sein. Darüber hinaus muss die einfache **Integration von Sensoren in größere Systeme gewährleistet sein**.⁷² Da NV-Zentren in Diamanten, anders als andere Ansätze, bei Raumtemperatur funktionsfähig sind, weist dieser Ansatz eine besonders hohe Attraktivität auf, weil keine Kühlung gewährleistet werden muss.

Ausgewählte Einsatzmöglichkeiten

Nachfolgend werden Anwendungsfelder aufgeführt, für die sich die Expertinnen und Experten den größten Nutzen des Einsatzes quantenbasierter Verfahren erhoffen. In einigen Bereichen gibt es bereits marktreife Anwendungen, die meisten Einträge stellen allerdings als realistisch bewertete Zielvisionen für Nutzungsmöglichkeiten dar.

Quantensensoren:

- **Bodenschätze:** Verbesserte Erkundung unterirdischer Rohstoffvorkommen
- **Bauwesen:** Abbildung unterirdischer Strukturen vor Tiefbaubeginn
- **Frühwarnsysteme für Naturkatastrophen:** Gravitationsmessung von Magmabewegung in aktiven Vulkanen
- **(Mikro-)Elektronik:** Inspektion durch Oberflächen hindurch, zum Beispiel Auffinden von Fehlern bei Schaltkreisen

71 | Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2015.

72 | Vgl. Zeiss 2018.

73 | Vgl. AMA 2019.

Quantenimaging:

- **Medizintechnik:** Gewebedifferenzierung, zum Beispiel wichtig zur Krebserkennung
- **Forschung:** NV-Zentrum-Mikroskopie zur lichtarmen Abbildung, wichtig vor allem bei Lebzellen
- **Ghost Imaging:** Möglichkeit der Abbildung von Objekten in bisher nicht zugänglichen Wellenlängenbereichen, beispielsweise für Mikroskopie-Anwendungen oder auch im Satelliten-/GPS-Bereich
- **Nachweis neuronaler Signale:** Verbessertes Verständnis neuronaler Krankheiten (wie Alzheimer) anhand besserer Nachweisverfahren und genauere Auflösung der Signale

Quantenmetrologie:

- **Navigation:** Hochgenaue inertielle Ortungs- und Navigationssysteme, Unabhängigkeit von satellitenbasierter Navigation; Uhren für Navigationssatelliten wie GPS oder Galileo
- **IT-Technik:** Verbesserung der Signalverarbeitung und dadurch schnellere Informationsübermittlung anhand von neuen, hochsensiblen optischen Atomuhren

6.2 Marktpotenziale und Wertschöpfungsketten

Das größte Wertschöpfungspotenzial liegt nicht in den Märkten für quantenbasierte Sensoren oder Atomuhren selbst, sondern in den verschiedenen Branchen, die diese nutzen werden, zum Beispiel der Bau- oder der IKT-Branche. Erste Anwendungen sind vor allem im hochwertigen Sensoren- beziehungsweise Imagingmarkt zu erwarten, also in für Deutschland sehr relevanten Marktsegmenten.

Es ist nicht davon auszugehen, dass Quantensensoren komplett neue Märkte generieren werden, jedoch **werden Sensoren in vielen volkswirtschaftlich relevanten Märkten Anwendung finden**. Der Markt für Sensorik und Messtechnik wächst rasant. Zwischen 2009 und 2019 (Prognose) ist der Umsatz um 240 Prozent gestiegen. Damit liegen Sensorik und Messtechnik deutlich oberhalb des bundesweiten Wachstumstrends.⁷³



Quantensensoren zählen dabei zu den **hochklassigen Sensoren**. Diese sind ein **für die deutsche Industrie besonders relevantes Marktsegment**, da viele deutsche Hersteller auf die Produktion modernster Hochleistungssensoren spezialisiert sind, die sich durch ihre Leistungsfähigkeit und nicht durch einen möglichst niedrigen Stückpreis gegenüber der Konkurrenz behaupten müssen.

Erste Schätzungen bezüglich des **Marktes für Quantensensoren belaufen sich auf 1,3 Milliarden USD in 2023** und gehen von einem **Wachstum auf 2,2 Milliarden USD bis 2028** aus.⁷⁴ Der UK Quantum Technology Hub Sensors and Metrology geht sogar davon aus, dass es einen Markt von **jährlich 4 Milliarden GBP** (etwa 4,5 Milliarden EUR) für Quantensensoren geben wird.⁷⁵

Einen Überblick über die erwartete Dauer bis zur Marktreife bietet der **Hype-Zyklus** in Abbildung 8 für die Bereiche Quantensensorik und Quantenmetrologie.

Bei den Anwendungen wird das größte Wertschöpfungspotenzial **nicht in den jeweiligen Märkten selbst liegen, sondern in den Branchen**, in denen die **Wertschöpfung durch den Einsatz**

dieser Technologien gesteigert werden kann. Der UK Quantum Technology Hub Sensors and Metrology hat versucht, den potentiellen Anteil von Quantensensorik/Imaging/Metrologie an unterschiedlichen Wirtschaftszweigen aufzuzeigen (siehe Abbildung 9). Viele Expertinnen und Experten sind jedoch der Meinung, dass die **sekundäre Wertschöpfung** aktuell nicht belastbar zu beziffern ist.

Quantenbasierte Medizintechnik ist inzwischen nicht mehr aus Krankenhäusern und Arztpraxen wegzudenken, so zum Beispiel die Kernspintomografie (siehe auch „Quantentechnologien der ersten Generation“ auf Seite 19). Expertinnen und Experten erwarten **in der Medizintechnik die disruptivsten Durchbrüche im Technologiefeld quantenbasierte Sensorik/Imaging/Metrologie**. Dabei sind vor allem auch **qualitative Durchbrüche, wie neue Mikroskopie- und Diagnoseverfahren**, zu erwarten. So ist beispielsweise davon auszugehen, dass die oben beschriebenen **miniaturisierten MEG-Verfahren perspektivisch Teile des aktuell auf 5,8 Milliarden USD geschätzten Marktes für Kernspintomografen einnehmen werden**.⁷⁶ Durch die Einführung platzsparender Geräte können diese den Patientinnen und Patienten auch in mehr Praxen zur Verfügung gestellt werden.

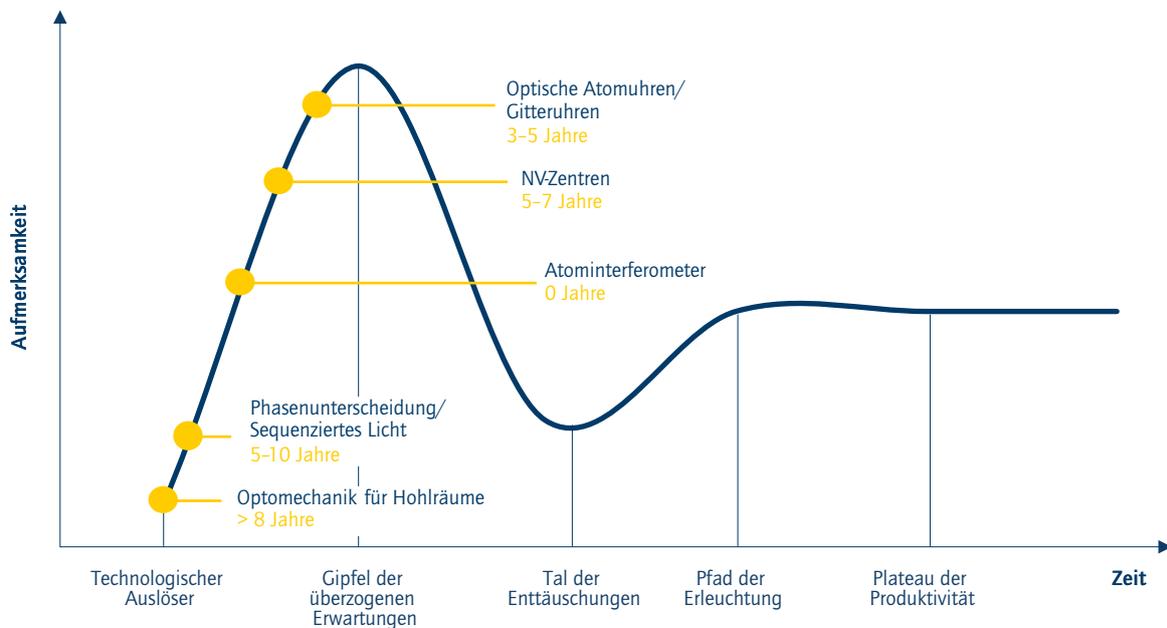


Abbildung 8: Hype-Zyklus Quantenmetrologie und Quantensensorik (Quelle: Zeiss 2018)

74 | Vgl. Inside Quantum Technology 2018.

75 | Vgl. UK National Quantum Technology Hub Sensors and Metrology 2018.

76 | Vgl. UK National Quantum Technology Hub Sensors and Metrology 2018.

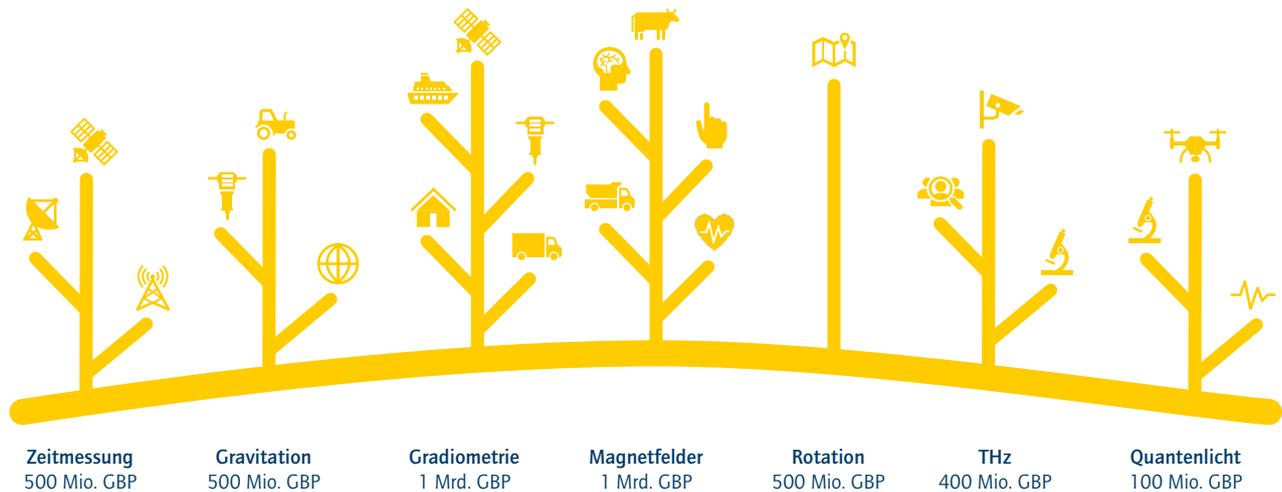


Abbildung 9: Potenzielles Wertschöpfungsvolumen für unterschiedliche Anwendungen in den Bereichen quantenbasierter Sensorik/Imaging/Metrologie (Quelle: eigene Darstellung basierend auf UK National Quantum Technology Hub Sensors and Metrology 2018)

Die Möglichkeit, durch Quantensensoren **Einblicke in den Boden zu erhalten, ohne bohren oder graben zu müssen**, bewerten Expertinnen und Experten als besonders marktwirtschaftlich relevant. Der dadurch generierte wirtschaftliche Mehrwert (zum Beispiel Vermeidung von Verzögerungen bei Aushubarbeiten auf Baustellen) überschreitet bei Weitem das Marktpotenzial der Quantensensoren selbst. **Es sind bereits Pionierprodukte auf dem Markt erhältlich**, etwa erste Gravitationsmesser für Bauunternehmen.⁷⁷ Aktuell liegt der Kostenpunkt für entsprechende Sensoren laut Expertinnen und Experten bei rund 100.000 EUR. Bei einer skalierten Produktion der Sensoren ist jedoch mit einem deutlichen Preisrückgang und dadurch mit vielseitigeren Einsatzmöglichkeiten zu rechnen, die aktuell finanziell noch nicht rentabel sind.

„Bei Sensorik sind Quick-wins in Nischenmärkten möglich, aber der Massenmarkt ist noch weit entfernt.“

Quantenelektronik kann in den Bereichen IKT und Maschinenbau einen wichtigen Beitrag zur Wertschöpfung leisten. So können zukünftig **wartungsarme**, quantenbasierte Spannungsmessgeräte in elektrischen Netzwerken eingesetzt werden. Diese **Geräte können kontinuierlich betrieben** werden und haben gegenüber heutigen Geräten den Vorteil, dass sie nicht in regelmäßigen Abständen nachgeeicht beziehungsweise

nachjustiert werden müssen, was Unternehmen **Zeiteinsparungen** ermöglicht. Zudem bieten berechenbare SI-Werte die Sicherheit, dass der korrekte Wert stets direkt im System kalibriert wird und inkorrekte Werte aufgrund von Eichfehlern ausgeschlossen werden können.

„Das Eich- und Messverfahren wird sich aufgrund von berechenbaren quantenbasierten SI-Standards komplett verändern.“

Laut Schätzungen von Expertinnen und Experten sind **5 bis 8 Prozent des Bruttoinlandsprodukts unmittelbar und mittelbar von Navigation abhängig**. Präzisere satellitenbasierte sowie satellitenunabhängige Standortbestimmungsverfahren sind damit wichtige Anwendungen in einem für Deutschland sehr relevanten Wirtschaftszweig. In der **Quantenmetrologie** wird durch quantenbasierte **ultrapräzise Zeitbestimmung die Standortbestimmung** noch weiter verfeinert werden. Es wird erwartet, dass **quantenbasierte Navigationshilfen** vor allem im **High-End-Segment** zum Einsatz kommen werden.

Großes **Wertschöpfungspotenzial bietet dies für das automatisierte Fahren**: Hier werden die möglichst genaue Standortbestimmung und Kenntnisse über das Umfeld, in dem sich das



Fahrzeug bewegt, eine wichtige Rolle für den Erfolg der Technologie spielen.⁷⁸

„Daumenregel: Die neue Technologie muss eine Größenordnung besser als die etablierten sein.“

Geschäftsmodelle von Start-ups spiegeln den noch frühen Stand der Märkte wider. So bringt ein deutsches Start-up Kundinnen und Kunden den Mehrwert von Quantensensoren über **Mietmodelle** näher: Kunden erhalten Quantensensoren, die sie in ihren konkreten Nutzungskontexten testen können. Wird das Produkt weiterentwickelt, werden die gemieteten Sensoren **automatisch durch die neue Sensorgeneration ersetzt**. Einerseits können Kundinnen und Kunden so ohne großes Risiko die neue Technologie austesten, andererseits kann das Start-up einen **Kundenstamm aufbauen** und für die Weiterentwicklung der eigenen Technologie von den Kundenerfahrungen lernen.

Ähnliche Geschäftsmodelle sind nach Meinung von Expertinnen und Experten auch für anvisierte **quantenbasierte Imagingverfahren**, wie zum Beispiel NV-Zentren-Mikroskope, denkbar. Erste Anwender werden voraussichtlich Spitzenforschungseinrichtungen sein; **in Kollaboration mit Erstanwendern** werden die **Produkte dann für einen breiteren Markt weiterentwickelt**.

Die Expertinnen und Experten betonen, dass es wichtig ist, **die noch notwendige Engineering-Leistung nicht zu unterschätzen**. Um von proof-of-principle zur kommerziellen Anwendung zu kommen, müssen **Robustheit und Verlässlichkeit** unter alltäglichen Einsatzszenarien sichergestellt, die Integration und **Miniaturisierung der Komponenten** erreicht und Preissenkungen aufgrund **skalierbarer Produktion** realisiert werden. Bis zur kommerziellen Massenfertigung ist der Weg jedoch weit, und selbst aktuell marktreife Produkte sind meist noch Einzelanfertigungen aus Manufakturproduktion.

6.3 Technologische Souveränität

Bei Einzelkomponenten besteht eine sehr geringe Gefahr der Abhängigkeit von Produzenten außerhalb Europas.

Nach Einschätzung der Expertinnen und Experten besteht in den Bereichen quantenbasierter Sensorik, Imaging und Metrologie nur eine **geringe Gefahr für die technologische Souveränität Deutschlands**, da nicht zu erwarten ist, dass es hier bei Basis- oder Schlüsselkomponenten zu kritischen Abhängigkeiten von Produzenten außerhalb Europas kommen wird.

78 | Vgl. UK National Quantum Technology Hub Sensors and Metrology 2018.

6.4 Stärken- und Schwächenprofil Deutschlands sowie aktuelle Chancen und Risiken

Eine spezielle Übersicht über Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken für den Standort Deutschland bei **Quantensensorik, Quantenimaging und Quantenmetrologie**

erfolgt hier. Für eine allgemeine Übersicht über die verschiedenen Technologiefelder der Quantentechnologien hinweg siehe Kapitel 3.3.

Stärken

- Beginnende Exploration der Einsatz/Kommerzialisierungspotenziale durch industrielle Anbieter (unter anderem durch Ausgründungen, interne Teams, Wettbewerbe)
- Starke Firmenbasis in Photonik, Mikroelektronik, Mikroskopie, Medizintechnik und Sensorik
- Hohe Kompetenzen in Metrologie sowie Sensorik in Luft- und Raumfahrt

Schwächen

- Verhaltene Nachfrage der deutschen Industrie nach ersten verfügbaren Produkten
- Fokus von Forschung und Entwicklung oftmals auf prinzipieller Machbarkeit, weniger auf von Anwendern geforderten Leistungsprofilen

Chancen

- Erhalt der Leitanbieterschaft in leistungsstarken, hochpreisigen Marktsegmenten durch schnellen Transfer (zum Beispiel über Verbundprojekte, praxisorientierte Testräume, Wettbewerbe)
- Erschließung sekundärer Wertschöpfungspotenziale durch frühzeitigen Einsatz in für Deutschland wichtigen Branchen (zum Beispiel Bau, Medizintechnik und IKT)
- Zeitnahe Demonstration des konkreten Mehrwerts neuer Quantentechnologien für die Menschen, etwa im Bereich der Medizin

Risiken

- Förderung von Entwicklung vorbei an tatsächlichen Bedarfen potenzieller Anwender
- Abwanderung von Wertschöpfung und Fachkräften aufgrund mangelnder Risikobereitschaft deutscher Unternehmen bei der Erprobung früher Anwendungen
- Unterschätzung der marktwirtschaftlichen Relevanz des Quantentechnologiefelds Sensorik, Imaging und Metrologie durch zu starken Fokus auf Quantencomputing



7 Quantenkommunikation und Quantenkryptografie

Quantenkommunikation ermöglicht abhörsichere Kommunikation über Glasfaser, Luft und Satellit. Quantenkryptografie stellt Verfahren zur Erzeugung und zum Austausch von kryptografischen Schlüsseln zur Absicherung des Kommunikationsverkehrs bereit. In Deutschland und Europa werden aktuell erste Quantenkommunikationsinfrastrukturen geplant und errichtet, deren Hauptnutzer vor allem Regierungen und Unternehmen mit hochsensiblen Daten sein werden. Mit dem Quantenrepeater fehlt bislang noch eine wichtige Schlüsselkomponente.

Quantenkommunikation ist eine **abhörsichere Kommunikationsform**. Dafür werden verschränkte Photonenpaare oder Einzelphotonen genutzt, da sich diese mit vergleichsweise geringem Aufwand erzeugen und übertragen lassen. Dass sich **Quanteninformation** nicht wie klassische Information einfach verstärken lässt, **erschwert die Übertragung** über sehr weite Strecken, macht es aber physikalisch **unmöglich, sie unbemerkt abzuhören**.⁷⁹

Die Sicherheit in der Kommunikation ist für Verbraucherinnen und Verbraucher, Unternehmen und die Politik gleichermaßen von zentraler Bedeutung.⁸⁰ Im Unterschied zu gebräuchlichen kryptografischen Verfahren **basiert die Sicherheit** auf Quantenbasis jedoch auf unserem Verständnis **physikalischer Naturgesetze und nicht auf mathematischen Berechnungen**, wie zum Beispiel dem Faktorisieren von Produkten großer Primzahlen.⁸¹

In der Kryptologie bezeichnet ein Schlüssel eine Information, die einen kryptografischen Algorithmus mit einem Parameter

versieht und ihn so steuert. Die **Quantenkryptografie** stellt auf dieser Basis beweisbar **sichere Verfahren zur Erzeugung und Verteilung solcher Schlüssel** bereit. Eine mögliche Anwendungsform ist die Quantum Key Distribution (QKD).⁸²

Das „**No-Cloning-Theorem**“ besagt, dass ein unbekannter Quantenzustand nicht perfekt kopiert werden kann, und bildet die Grundlage dafür, dass **Quantenkryptografie grundsätzlich sicherer ist als klassische Kryptografie**.⁸³ Dadurch unterscheidet sich die Verarbeitung von Quanteninformation grundlegend von der klassischen Informationsverarbeitung. Dies hat weitreichende Konsequenzen, beispielsweise kann **kein „Quanten-Backup“** erstellt werden.

Da die **Quantenverschlüsselung auf Naturgesetzen** basiert, ist es physikalisch unmöglich, unbemerkt „mitzuhören“. Jede Interaktion von außen führt zu einer Störung des fragilen Quantenzustands, die einen **externen Eingriffsversuch verrät**. Das Verfahren ist sogar dann sicher, wenn ein „Lauscher“ beliebige Verfahren einsetzen darf, auch einen Quantencomputer.⁸⁴

Post-Quanten-Kryptografie bezeichnet bereits existierende klassische Verschlüsselungsverfahren, die **Daten vor dem zukünftigen Zugriff durch Quantencomputer absichern** können. Die Verschlüsselungsverfahren dafür sind jedoch nicht quantenbasiert, sondern es werden komplexe neue Aufgaben entwickelt, deren Problemstruktur (noch) nicht durch Quantencomputer gelöst werden kann. Dies ist notwendig, da Quantencomputer zukünftig die derzeit am weitesten verbreitete, auf Primfaktoren basierende Verschlüsselung (RSA-Standard) brechen könnten. Aufgrund der jüngsten Fortschritte bei der Entwicklung von Quantencomputern geht in einer Umfrage mittlerweile die **Hälfte der Expertinnen und Experten von einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent oder höher** aus, dass dies in den nächsten 15 Jahren der Fall sein wird.⁸⁵

Zwar ist Post-Quanten-Kryptografie keine quantenbasierte Form der Kommunikation; da es sich aber um ein Kryptografieverfahren handelt, das Daten vor der möglichen Entschlüsselung durch Quantencomputer schützt, wird es in diesem Kapitel in „Post-Quanten-Kryptografie“ behandelt (Seite 60).

79 | Vgl. MPG 2019.

80 | Vgl. High-Level Steering Committee 2017.

81 | Vgl. BMBF 2018.

82 | Vgl. ETSI 2018.

83 | Vgl. MIT Technology Review 2019a; MPG 2019.

84 | Vgl. Bruß 2003; Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2015.

85 | Vgl. Global Risk Institute 2019.

Einsatzszenarien für Quantenkommunikation

Der wichtigste Mehrwert quantenbasierter Kommunikation und Kryptografie ist die **gesteigerte Sicherheit beim Datenaustausch**. So können **sensible Daten**, zum Beispiel bei Banken, Versicherungen, im Gesundheitssystem sowie bei kritischen Infrastrukturen, **zukünftig noch besser geschützt werden**. Dabei gibt es unterschiedliche Kanäle, die für den quantengesicherten Datenaustausch genutzt werden können.

- **Glasfaser:** Quantenkryptografisch verschlüsselte Daten können wie herkömmliche Daten per Glasfaser transportiert werden. Aktuell wird dies in QKD-Netzwerken praktiziert. Da Photonen nach einer gewissen Distanz „verloren“ gehen, können die Daten in der Glasfaser nur bis **maximal etwa 100 Kilometer** Distanz übertragen werden beziehungsweise müssen gegenwärtig entsprechend **in regelmäßigen Abständen an „trusted nodes“** (= vertrauenswürdigen Knotenpunkten) ent- und wieder verschlüsselt werden, was weiterhin einen Angriffspunkt darstellt.
- **Auf gerader Linie durch die Luft:** Zur Übertragung bedarf es nicht unbedingt einer festen Leitung. Das DLR erbrachte 2015 den Nachweis, dass eine quantenkryptografisch gesicherte **Datenübertragung** zwischen einer **stationären Bodenstation** und einem **fliegenden Objekt** möglich ist. Die per Laser erzeugten Photonen mit den zu übertragenden Daten wurden durch die Atmosphäre gesendet.⁸⁶
- **Satellit:** Analog zur Übertragung an ein fliegendes Objekt wird die verschlüsselte **Information per Laser an einen Satelliten** übertragen. Dort wird sie dann ent- und wieder verschlüsselt, um sie an eine andere Bodenstation oder einen anderen Satelliten weiterzuleiten. Die nötige Infrastruktur und Technologie dafür wird in Deutschland unter anderem im Rahmen des CUBE-Verbundprojekts entwickelt (siehe Abschnitt „Quantenkommunikationsinfrastruktur“).

7.1 Stand der Forschung und der kommerziellen Anwendung

Im Bereich der Quantenkommunikation gibt es bereits erste kommerzielle Produkte, beispielsweise QKD-Anwendungen; es bedarf jedoch noch weiterer Anstrengungen bei der großflächigen Umsetzung. Staatlich geförderte Projekte, wie QuNET, Q.Link.X und EuroQCI, treiben in Deutschland und Europa unter Beteiligung von Forschungseinrichtungen und Industrievertretern den Ausbau der Quantenkommunikationsinfrastruktur voran.

In der **Quantenkryptografie** gibt es **erste kommerzielle Anwendungen für durch Quantenschlüsselaustausch gesicherte Kommunikation** (für mehr Informationen siehe „Quantum Key Distribution“). Zudem gibt es Post-Quanten-Kryptografie-Verfahren, die bereits existierende Daten vor dem potenziellen zukünftigen Zugriff eines Quantencomputers schützen können (siehe „Post-Quanten-Kryptografie“, Seite 60).

Durch den **Einsatz integrierter Optik**, beispielsweise Wellenleiterchips, Glasfaserkabel oder optisch gekoppelter Netzwerke, wurde die Erzeugung der **Quantenzustände effizienter und deren Qualität besser**. Gleichzeitig wurde auch die Miniaturisierung der für den Aufbau komplexerer Quantennetze benötigten Komponenten vorangetrieben.⁸⁷

Insgesamt ist **Quantenkommunikation** aber in einigen Bereichen noch ein **Grundlagenforschungsthema**. Bisher ist das Prinzip des Informationsaustauschs über **Quantenteleportation** (anstatt über ein optisches Signal) nur theoretisch beschrieben. Diese beruht auf dem Verschränkungseffekt und würde eine direkte, abhörsichere Übertragung von Information über weite Distanzen ermöglichen.⁸⁸

Es ist beabsichtigt, Quantentechnologien in **Raumfahrtanwendungen** zukünftig gezielt in einem eigenen Institut des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Ulm zu erforschen.⁸⁹ Darüber hinaus gehört das **DLR** zu den weltweit führenden Forschungseinrichtungen im Bereich der laserbasierten Quantenkommunikation durch den Freiraum. Der Vorteil

86 | Vgl. DLR 2015.

87 | Vgl. Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2015.

88 | Vgl. Bruß 2003.

89 | Vgl. Braxmeier et al. 2018.



dieser Methode ist die hohe Datenrate bei der Übertragung. Momentan laufen mehrere Initiativen zur **Entwicklung satellitenbasierter Quantenschlüsselverteilung**.⁹⁰ Dazu gehört auch das durch das BMBF bis 2020 geförderte Verbundprojekt „Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sat (QUBE)“. Es verfolgt das Ziel, Hardware für eine weltweite, abhörsichere Kommunikation mittels Satelliten zu entwickeln. Die technologische Plattform bilden kostengünstige Kleinstsatelliten, sogenannte Cube-Sats, die mit miniaturisierten, weltraumtauglichen Quantenkommunikationskomponenten bestückt werden (BMBF 2017c).

Die **Zahl der Publikationen** im Bereich Quantenkommunikation und Quantenkryptografie ist von 2000 bis 2016 **deutlich angestiegen**⁹¹ (siehe Abbildung 10). **In Europa** sind neben **Deutschland** besonders die **Niederlande**, hier vor allem die TU Delft, und **Österreich**, hier vor allem das Austrian Institute of Technology und die Universität Wien, führend in der Forschung

zu Quantenkommunikation. Global betrachtet ist **China besonders stark** in der Forschung und Umsetzung von Quantenkommunikation.

Von den **großen deutschen Unternehmen** erforschen und entwickeln unter anderen die **Deutsche Telekom, Infineon** und **SAP** aktiv Anwendungen für Quantenkommunikation, -kryptografie und/oder Post-Quanten-Kryptografie. Die **Deutsche Telekom hat im Oktober 2018 bekannt gegeben**, im Rahmen einer strategischen Cross-Investment-Vereinbarung mit SK Telecom (Südkorea) **in das Schweizer Quantenkryptografie-Unternehmen ID Quantique zu investieren**.⁹² Infineon hat **Post-Quanten-Kryptografie** auf einem **kontaktlosen Sicherheitschip** implementiert. Dadurch können zum Beispiel sensible Ausweisdokumente vor dem zukünftigen Zugriff eines Quantencomputers geschützt werden.⁹³

Darüber hinaus gibt es in Deutschland auch erste **Start-ups**, wie **InfiniQuant** (Erlangen), das sich auf Quanten-Kryptografie

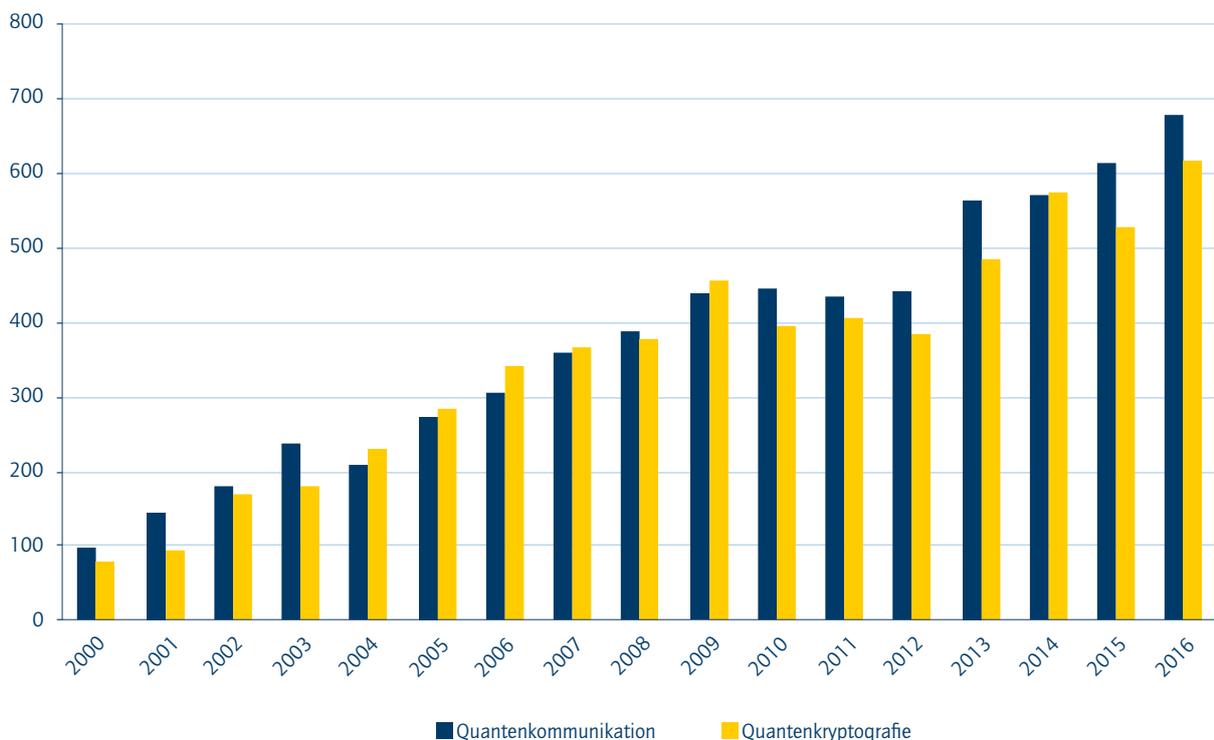


Abbildung 10: Gesamtzahl der Publikationen im Bereich Quantenkommunikation/-kryptografie (2000–2016) (Quelle: Bornmann et al. 2019)

90 | Vgl. DLR 2019.

91 | Vgl. Bornmann et al. 2019.

92 | Vgl. Deutsche Telekom AG 2018.

93 | Vgl. Infineon Technologies AG 2017.

spezialisiert hat, oder **QuantiCor Security** (Darmstadt), dessen Fokus auf Post-Quanten-Kryptografie liegt.⁹⁴ In Europa ist ID Quantique (Schweiz) das aktuell führende Unternehmen im Bereich der Quantenkryptografie.

Quantenrepeater: wichtiger bislang fehlender Baustein

Da der verschränkte Quantenzustand von Photonen fragil ist, liegt die **maximale Übertragungsweite aktuell bei 300 bis 400 Kilometern** durch die Luft und bei 100 Kilometern in der Glasfaser. Damit Informationen darüber hinaus transportiert werden können, muss das Signal teleportiert werden.

Ziel ist es daher, einen **Quantenrepeater** zu entwickeln, der die Signale abhörsicher teleportieren kann. Welche technischen Ansätze hierbei zum Ziel führen können, wird aktuell noch in der Grundlagenforschung erörtert. Dazu wurde unter anderem 2018 in Deutschland das **Verbundprojekt Q.Link.X** durch das BMBF initiiert. Mit einer Fördersumme von etwa 15 Millionen EUR sollen Erforschung und Umsetzung eines Quantenrepeaters vorangetrieben werden.⁹⁵

Ein Quantenrepeater ist laut Expertinnen und Experten mit einem auf wenigen Qubits basierenden Quantencomputer zu vergleichen. Das größte **Problem** stellt die **Speicherung von Photonen** dar, auf denen die Information transportiert wird. Anders als beim Schlüsselaustausch durch QKD über trusted nodes, wo Information ent- und wieder verschlüsselt wird, soll bei einem Quantenrepeater die **Information ohne Entschlüsselung weiterteleportiert** werden. Dadurch soll die Information von Anfang bis Ende verschlüsselt und dadurch vor externen Abhörversuchen besser geschützt bleiben.

„Die Speicherung von Photonen ist ein wichtiges noch zu lösendes Grundlagenforschungsproblem.“

Über den **Reifegrad des Quantenrepeaters** herrscht Uneinigkeit in der Quantencommunity. So gehen einige Expertinnen und Experten davon aus, dass in ein bis zwei Jahren ein proof-of-concept im Labor erbracht werden kann und die Kommerzialisierung danach eine Engineering-Frage von einigen wenigen Jahren ist. Andere Expertinnen und Experten sind skeptischer: Für sie ist noch

nicht klar ersichtlich, wie die Quantenteleportation per Repeater genau ablaufen soll, und sie bewerten die Roadmap des EU Quantum Flagship, die vom Machbarkeitsbeweis eines Quantenrepeaters in drei bis fünf Jahren ausgeht, als viel zu optimistisch.

Quantenkommunikationsinfrastruktur

Als Basis für Quantenkommunikation ist entsprechende technische Infrastruktur vonnöten. Da Quantenkommunikation **nur teilweise auf klassischen Kommunikationsinfrastrukturen aufbauen** kann (so ist das bestehende Glasfasernetz beispielsweise nur bedingt nutzbar, da Quanten-Relaisstationen, wie trusted nodes oder zukünftig Quantenrepeater, alle maximal 100 Kilometer fehlen), müssen **zusätzliche Quantenkommunikationsinfrastrukturelemente** eingerichtet werden.

Das **Konsortium QuNET** wurde 2019 unter Federführung der Fraunhofer-Gesellschaft gegründet. Es vereint weitere Partner aus Wissenschaft und Industrie, darunter die Max-Planck-Gesellschaft, das DLR, die Deutsche Telekom, Rohde & Schwarz, 1&1 sowie ADVA. Ziel ist zunächst die **Errichtung einer Quantenkommunikationsinfrastruktur**, um innerhalb der Einrichtungen des Bundes Daten sicher austauschen zu können. Dabei sollen die Partner der Initiative die **physikalischen und technischen Voraussetzungen** schaffen, die dann als Modell für eine deutsche Infrastruktur der Quantenkommunikation dienen können. Diese soll auch für das Fernziel, den Aufbau eines Quantennetzes, wegweisend sein. Die Förderung beträgt insgesamt **165 Millionen EUR** in drei Phasen.⁹⁶

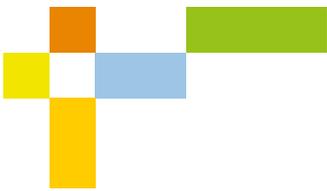
Auf europäischer Ebene haben im Juni 2019 die sieben EU-Mitgliedstaaten Belgien, Deutschland, Italien, Luxemburg, Malta, Niederlande und Spanien die Deklaration zum Aufbau einer europäischen Quantenkommunikationsinfrastruktur im Rahmen des **EuroQCI-Projekts** (QCI = Quantum Communication Infrastructure) unterzeichnet.⁹⁷ Im Juli 2019 schlossen sich auch Ungarn, Portugal und Polen dem Projekt an. Ziel ist die Erstellung einer Roadmap bis Ende 2020, die zusammen mit dem OPEN-QKD-Testbed den Grundstein für den **Aufbau einer europäischen sicheren Kommunikationsinfrastruktur** auf Quantenbasis in den nächsten zehn Jahren legt. In Anbetracht der großen chinesischen Anstrengungen sowie der hohen amerikanischen Investitionen ist der Aufbau einer europäischen Antwort nach Meinung von Expertinnen und Experten ein wichtiger Schritt zur Sicherung von Europas technologischer Souveränität.

94 | Vgl. InfiniQuant 2019; QuantiCor Security 2019.

95 | Vgl. BMBF 2019b; Q.Link.X 2019; Universität Bonn 2019.

96 | Vgl. Fraunhofer-Gesellschaft 2019a; MPG 2019.

97 | Vgl. Digital Assembly 2019; EU-KOM 2019.



Auch das 16 internationale Partner umfassende Projekt „**UNIQRN** – Affordable Quantum Communication for Everyone: Revolutionizing the Quantum Ecosystem from Fabrication to Application“, gefördert durch das EU Quantum Flagship, verfolgt das Ziel, **Schlüsselkomponenten für zukünftige Quantenkommunikationssysteme** zu entwickeln. Im Rahmen von UNIQRN sollen Quantentechnologien mithilfe photonischer Integration **miniaturisiert** und für Anwender als **System-on-Chip-Lösungen** nutzbar gemacht werden.⁹⁸

Quanteninternet

Als langfristige **Vision** von mehreren Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, dem QuNET-Konsortium und dem EU Quantum Flagship wird der Aufbau eines **Quanteninternet** oder „**Web Q.0**“ zur weltumspannenden sicheren Übertragung von quantenverschlüsselten Informationen angestrebt.⁹⁹ Darüber hinaus sind weitere Anwendungen, wie die Uhrensynchronisation sowie die Zusammenschaltung einzelner Quantencomputer für eine höhere Gesamtrechenleistung oder eine digitale Quantensignatur, denkbar.¹⁰⁰

Im Herbst 2019 ist es einer internationalen Forschungsgruppe in München gelungen, über ein **supraleitendes Kabel** eine abhörsichere **Quantenkommunikation** in einem lokalen Netzwerk zu **realisieren**. Von den Forscherinnen und Forschern wird dies selbst **als wichtiger Schritt hin zu einem Quanteninternet gewertet**. Die im Versuchsaufbau überbrückte Distanz beträgt 35 Zentimeter.¹⁰¹

„Das Quanteninternet wird in der näheren Zukunft erst mal nur ein ‚add-on‘ und kein vollständiger Ersatz des klassischen Internet sein.“

Nach Meinung der Expertinnen und Experten wird das Quanteninternet auf **absehbare Zeit jedoch nur als ein Zusatz zum klassischen Internet** für spezielle Verwendungszwecke (sensible Kommunikation, Hochrechenleistung) fungieren und wird dieses nicht vollständig ersetzen.

Es ist darauf hinzuweisen, dass der **Begriff „Quanteninternet“** in der Quantencommunity **umstritten** ist. Auch wenn das EU Quantum Flagship sowie einige Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler dieses als Fernziel der Quantenkommunikation benennen, hinterfragen andere Expertinnen und Experten, was damit überhaupt gemeint sei, und sehen darin eher einen „Wort-Hype“ beziehungsweise eine Leerformel.

Quantum Key Distribution (QKD)

Bei QKD handelt es sich um eine **quantenbasierte Form der Generierung und Verteilung zufälliger, geheimer Schlüssel**, wobei die Schlüssel über Quantenkommunikationsinfrastruktur ausgetauscht werden. Die damit verschlüsselten Inhalte werden jedoch weiterhin über einen zweiten, klassischen Kanal übertragen, etwa im normalen Datenstrom eines Glasfaserkabels oder Satelliten, und zusätzlich „klassisch“ verschlüsselt (siehe Abbildung 11). QKD-Kommunikation ist also eine **hybride Kommunikationsform**: Der Schlüsselaustausch findet auf Quantenbasis statt, die sonstigen Inhalte werden weiterhin klassisch übertragen. Dieses Verfahren führt zu einem sehr hohen Grad an Kommunikationssicherheit.

„Das QKD-Netz in China ist eine organisatorische Meisterleistung, aber konzeptionell keine Neuarbeit.“

Die ersten terrestrischen **QKD-Netze** wurden in Suffolk (UK), Boston (USA) und Wien (Österreich) errichtet; aktuell ist die Verbreitung jedoch **in China am weitesten fortgeschritten**.¹⁰² Dort wurde zwischen den Metropolregionen Peking und Shanghai, über Jinan und Hefei, ein über 2.000 Kilometer langes QKD-Netzwerk aufgebaut. Aufgrund der maximalen Übertragungslänge der Quantenzustände von rund 100 Kilometern in der Glasfaser müssen diese an **trusted nodes** entschlüsselt und wieder verschlüsselt werden, um weitergeleitet werden zu können. Zwischen Peking und Shanghai gibt es 32 trusted nodes.¹⁰³ Diese Punkte sind potenzielle Angriffsstellen für externe „Lauscher“.

98 | Vgl. Fraunhofer HHI 2018.

99 | Vgl. MPG 2019; Quantum Flagship 2019; Wehner et al. 2018.

100 | Vgl. Birch 2018; TU Delft Quantum Vision Team 2019.

101 | Vgl. Bayerische Akademie der Wissenschaften 2019; Schmidt et al. 2018.

102 | Vgl. Zhang et al. 2018.

103 | Vgl. MIT Technology Review 2019a.

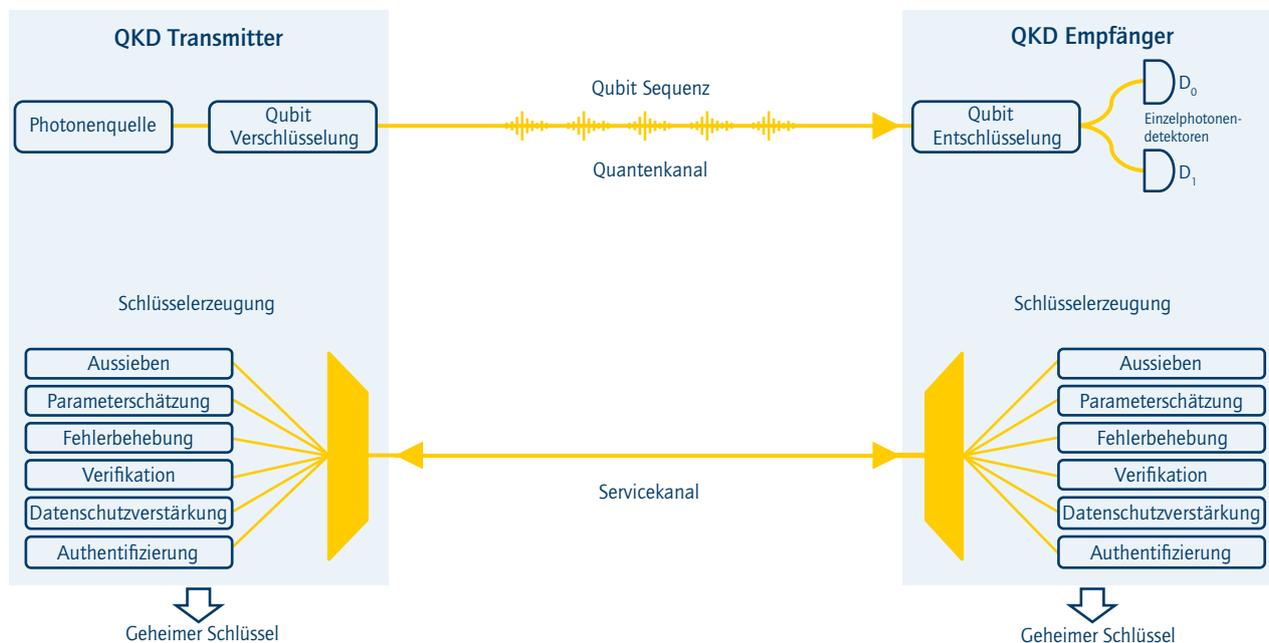


Abbildung 11: Schematische Darstellung einer QKD-gesicherten Kommunikation (Quelle: eigene Darstellung basierend auf ETSI 2015)

Im **August 2016** hat China den quantenbasierten **Satelliten „Micius“** gestartet. Es gelang Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern, erfolgreich einen Schlüsselaustausch per Satellit zwischen China und Österreich durchzuführen und dadurch einen sicheren Kommunikationskanal aufzubauen. Der Satellit fungierte dabei als „trusted node“. Die so über QKD verschlüsselte Videokonferenz wurde dann über eine normale Internet-Verbindung geführt.¹⁰⁴

In Europa wird seit September 2019 für drei Jahre im Rahmen des von der EU mit 17 Millionen EUR geförderten Projekts **OPENQKD** eine **Testumgebung für QKD aufgebaut**. Beteiligt sind **Forscherinnen und Forscher sowie Industriepartner aus 13 Mitgliedstaaten**, die gemeinsam konkrete Anwendungsfälle austesten und regionale QKD-Infrastrukturen aufbauen werden.¹⁰⁵ Daraus erhofft man sich Erkenntnisse, die zur Verbesserung der Funktionalität von QKD-Netzwerken führen sollen, ebenso wie das Heranreifen eines Ökosystems für QKD-Infrastruktur in Europa. Deutsche Projektpartner sind die Deutsche Telekom, das DLR, Rohde & Schwarz sowie ADVA Optical Networking.

Darüber hinaus sollen auch im Rahmen des „EU Quantum Flagship“-Projekts **CiViQ** flexible und kostengünstige Lösungen für **QKD-Netzwerke** mit dem Ziel der **Integration in bestehende Kommunikationsnetzwerke** entwickelt werden.¹⁰⁶

„Der Quantenschlüsselaustausch ist eine zentral wichtige Technologie, da er nachhaltige Sicherheit bietet.“

Obwohl derzeit etliche Initiativen im Bereich QKD-Kommunikation vorangetrieben werden, geben Expertinnen und Experten zu bedenken, dass es wichtig ist, **Erwartungsmanagement** zu betreiben. Klarzustellen ist, dass **QKD** nicht bald jede zukünftige Kommunikation sichern, sondern **vorerst nur in den relevantesten Bereichen** eingesetzt werden wird. Da die per QKD übertragbare Datenrate eingeschränkt ist, werden nur begrenzte Anwendungsmöglichkeiten realisiert werden können.

104 | Vgl. FAZ 2017.

105 | Vgl. EU-KOM 2019b.

106 | Vgl. CiViQ 2019.



Post-Quanten-Kryptografie

Als eine disruptive Folge der Einführung von Quantentechnologien der zweiten Generation wird die Gefahr gesehen, dass **Quantencomputer** in der Lage sein werden, **aktuelle Verschlüsselungsprotokolle in kürzester Zeit zu überwinden**. Dadurch wären derzeit verschlüsselte Daten nicht mehr sicher. Dies gilt für alle gegenwärtig eingesetzten Varianten der Public-Key-Kryptografie (RSA, Diffie-Hellman, ElGamal, ECIES, DSA, ECC).

Doch die Expertinnen und Experten mahnen aus zweierlei Gründen zur Ruhe: Erstens seien Hacker-Angriffe auch zukünftig weiterhin eine Frage der Kosten und des Aufwands, weswegen es sicherlich **keinen „Doomsday des Internet“** geben werde, an dem auf einmal alle aktuell verschlüsselten Daten durch Hacker offengelegt werden.

Zweitens gebe es **bereits heute Möglichkeiten, um Datenbestände** für dieses zukünftig zu erwartende Ereignis **zu wappnen**: Mit der sogenannten **Post-Quanten-Kryptografie** werden Daten mit Protokollen verschlüsselt, die selbst für Quantencomputer (auf absehbare Zeit) nicht zu entschlüsseln sind.¹⁰⁷ Dafür wird eine neue, komplexere Problemklasse als Verschlüsselungstechnologie verwendet.

Erste Lösungen sind bereits getestet und Produkte kommerziell verfügbar. So werden etwa Faktorisierungsprobleme durch andere Verfahren, wie mathematische Gitter, hashbasierte oder codebasierte Algorithmen, ersetzt.¹⁰⁸ In einer offenen und kompetitiven Ausschreibung versucht das **NIST** derzeit, **international einheitliche und sichere Standards** für Post-Quanten-Kryptografie-Algorithmen zu entwickeln (siehe auch „Durch Quanten-Challenges schneller vom Labor zur Anwendung“ auf Seite 25).

Aktuell zeigen hauptsächlich **Regierungsbehörden Interesse** an Post-Quanten-Kryptografie sowie Unternehmen, die mit hochsensiblen Daten arbeiten, so zum Beispiel **Banken**.¹⁰⁹ Die allgemeine Nachfrage von Unternehmen bleibt jedoch überschaubar, solange keine Zertifizierungsverfahren bestehen.

In dem 2019 gestarteten Projekt **QuantumRISC** soll die **Absicherung eingebetteter Systeme durch PQK-Verfahren** weiter vorangetrieben werden. Den Schutz der Systeme vor möglichen zukünftigen Angriffen durch Quantencomputer bereits heute mitzudenken, ist deshalb notwendig, da Komponenten, die aktuell in Geräten verbaut werden, oftmals über Jahrzehnte im Einsatz sein werden. Ein Fokus des mit 2,9 Millionen EUR auf drei Jahre ausgestatteten Projekts liegt auf der **Absicherung von Fahrzeugen der Zukunft**.¹¹⁰

7.2 Marktpotenziale und Wertschöpfungsketten

Die Investitionen in den Aufbau einer Quantenkommunikationsinfrastruktur sind groß, der Markt für Komponenten ist ein Wachstumsmarkt. Über die zu erwartende Größe des Quantenkommunikationsnetzwerks, ob Nischenanwendungen oder neue Standardsicherung von Kommunikation, sind sich die Expertinnen und Experten jedoch uneinig. Durch den Aufbau staatlich geförderter Infrastrukturen soll ein „Pull“-Effekt für industrielle Anwender entstehen.

Die **Schätzungen der Marktpotenziale für sichere Kommunikation auf Quantenbasis gehen weit auseinander**. Dies ist auf die unterschiedlichen Einschätzungen unter Expertinnen und Experten zurückzuführen, wie weitreichend die Verbreitung von Quantenkommunikation zukünftig sein wird. So wird am unteren Ende der Skala der Markt für Quantenkommunikation ab 2020 von Deloitte grob auf **mehrere Millionen USD jährlich** geschätzt.¹¹¹ Schätzungen der EU-Kommission hingegen gehen von einem Markt von über **1 Milliarde EUR jährlich ab 2020** aus, mit einem jährlichen Zuwachs von 20 Prozent.¹¹² Der MarketsandMarkets-Bericht „Quantum Cryptography Market by Component – Global Forecast to 2023“ beziffert den globalen **Markt für Quantenkryptografie 2018 auf 101 Millionen USD** und rechnet mit einem Wachstum des Marktes **bis 2023 auf 506 Millionen USD**.¹¹³

107 | Vgl. Buchmann et al. 2017.

108 | Vgl. BMBF 2017a; Stebila/Mosca 2017.

109 | Vgl. Inside Quantum Technology 2019a.

110 | Vgl. BMBF 2019c; Fraunhofer SIT 2019.

111 | Vgl. Deloitte 2018.

112 | Vgl. EU-KOM 2016.

113 | Vgl. Markets and Markets 2019.

Mit der zunehmenden Digitalisierung wird das Thema **Cyber-sicherheit** zukünftig noch weiter an Bedeutung gewinnen. Dies betrifft aber nicht nur den notwendigen Schutz der Kommunikation zwischen Einzelpersonen, sondern auch die **Kommunikationssicherheit zwischen Systemen** und für Anwendungen im **Internet der Dinge**. Durch quantenbasierte Sicherung der Daten wird **Wirtschaftsspionage** Hackern **deutlich erschwert**, und sensible **Firmen- und Kundendaten** können besser geschützt werden. Im Bereich Industrie 4.0 können auch Produktionsverfahren besser vor äußeren Zugriffen geschützt werden.

Anwendungen für QKD sind seit einiger Zeit kommerziell für **spezifische Nischenmärkte verfügbar**. Zu den typischen Kunden zählen aktuell Banken und Regierungen.¹¹⁴ Mit dem **perspektivischen Ausbau** der Quantenkommunikationsinfrastruktur in Deutschland werden Übertragungen über **größere Entfernungen** möglich werden, was den Markt für quantenbasierten Datenaustausch für zusätzliche Anwendungen öffnen wird.

Im Falle der erfolgreichen Entwicklung eines **Quantenrepeaters** schätzen Expertinnen und Experten den **Umsatz** damit auf **über 800 Millionen USD bis 2026**.¹¹⁵ Hier besteht für Deutschland die Chance, eine wichtige Schlüsseltechnologie für die Wertschöpfungskette der Quantenkommunikationsinfrastruktur zu besetzen.

Durch den **Aufbau staatlicher Quantenkommunikationsinfrastrukturen** und **politische Vorgaben** für Sicherheitsbestimmungen besteht die **Möglichkeit**, frühzeitig die **Entwicklung von Komponenten und Produkten in Deutschland und Europa zu fördern** und dadurch den Einstieg für hiesige kommerzielle Anwender zu erleichtern. Geförderte Konsortien und Projekte, die Industriepartner von Anfang an miteinbeziehen, wie zum Beispiel bei OPENQKD oder QuNET, können hierfür wichtige Grundsteine legen.

Um das Heranwachsen einer industriellen Basis aktiv zu fördern und innovative KMU in die Wertschöpfungskette miteinzubeziehen, führt das DLR bei satellitenrelevanten Quantentechnologien **qualifizierte Auftragsvergaben** durch.¹¹⁶

7.3 Technologische Souveränität

Die **Verfügbarkeit eines europäischen Quantensatellitennetzes** sowie **Quantenrepeaters** ist aus Gründen der **technologischen Souveränität** wünschenswert. **Klare Standards und Normen für Anwendungen** sind wichtig, **um Vertrauen bei Anwendern und damit Märkte zu schaffen**.

Abhörsichere Satellitenkommunikation ist essenziell. Perspektivisch soll nach den Plänen des EU Quantum Flagship ein **europäisches Quantensatellitennetz** (gegebenenfalls zusammen mit den USA) aufgebaut werden (Quantum Flagship 2019). Dies wäre ein wichtiger Beitrag zur **technologischen Souveränität Europas**, ebenso wie ein **Quantenrepeater** aus europäischer Herstellung.

Die Expertinnen und Experten weisen darauf hin, dass im Bereich Quantenkommunikation und kryptografie **Zertifizierung** eine elementare Rolle spielen muss, damit **international einheitliche Standards** gelten und eine Interoperabilität sichergestellt ist. Zudem schafft dies Vertrauen für Anwenderinnen und Anwender. Deswegen sind die zuständigen deutschen Akteure, wie die PTB, das BSI und das DIN, national, etwa im Projekt QuNET, sowie auch international, beispielsweise im European Metrology Network for Quantum Technologies (EMN-Q), in Gremien zur Standardisierung und Zertifizierung eingebunden.¹¹⁷

114 | Vgl. Deutscher Bundestag 2018.

115 | Vgl. Inside Quantum Technology 2019b.

116 | Vgl. BMBF 2018

117 | Vgl. EURAMET 2019.



7.4 Stärken- und Schwächenprofil Deutschlands sowie aktuelle Chancen und Risiken

Eine spezielle Übersicht über Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken für den Standort Deutschland bei **Quantenkommunikation und Quantenkryptografie** erfolgt hier. Für eine

allgemeine Übersicht über die verschiedenen Technologiefelder der Quantentechnologien hinweg siehe Kapitel 3.3.

Stärken

- Gut ausgestattete Konsortien zum Aufbau einer Quantenkommunikationsinfrastruktur
- Engagement deutscher Akteure bei der gegenwärtigen Entwicklung internationaler Standards und Normen für Post-Quanten-Kryptografie

Schwächen

- Zögerliche Nutzung erster Anwendungen, unter anderem durch das Fehlen etablierter Standards und Zertifizierungsmöglichkeiten
- Rückstand bei ambitionierten Infrastrukturprojekten (vor allem im Vergleich zu China)

Chancen

- Entwicklung eines marktreifen Quantenrepeaters als Schlüsselkomponente in der Wertschöpfungskette
- Staat als Vorreiter, zum Beispiel bei der Beschaffung, um auf höhere Sicherheitsstandards für Bürgerinnen und Bürger sowie Unternehmen hinzuwirken

Risiken

- Verlust technologischer Souveränität bei Angewiesenheit auf nicht-europäische Ausrüster
- Unzureichende oder überzogene Investitionen aufgrund hoher Unklarheit über zu erwartende Größe und Relevanz des Quantenkommunikationsmarktes
- Etablierung heterogener nationaler statt international einheitlicher Standards (vor allem in China)
- Patentierung zentraler Post-Quanten-Kryptografieverfahren (aktuell: frei nutzbare Verfahren)

8 Quantencomputing

Das Quantencomputing bietet große disruptive Potenziale und allgemein Marktpotenziale für viele Anwendungsgebiete, besitzt gleichzeitig aber einen sehr langen Entwicklungshorizont. Nordamerikanische Technologiefirmen und Start-ups bestimmen aktuell die Entwicklung. Europäische Akteure spielen nur eine nachgeordnete und oft auf Grundlagenforschung oder Software- und Komponentenentwicklung beschränkte Rolle. Die Verfügbarkeit von Quantencomputing-Hardware ist eine Frage der europäischen und deutschen technologischen Souveränität.

Das **Quantencomputing** gehört zu den komplexesten Quantentechnologien und bringt nach Meinung vieler Expertinnen und Experten das **höchste disruptive Innovationspotenzial** mit sich.

Der Quantencomputer basiert auf **Quantenbits (Qubits)** und ist dadurch theoretisch **klassischen, digitalen Computern** in der Rechenleistung **überlegen**. Quantenbits nutzen die quantenmechanischen Phänomene der Überlagerung und Verschränkung (siehe auch „Überblick über die wichtigsten quantenmechanischen Effekte“, Seite 21). Dadurch lässt sich theoretisch ein **hoher Grad an Parallelisierung** der Rechenoperationen erreichen, der **für klassische Computer unmöglich** ist. Da von vielen Expertinnen und Experten das Erreichen einer physikalischen Grenze für die bisherige kontinuierliche Steigerung der Rechenleistung klassischer Rechner (Moore's Law) erwartet wird, werden **große Hoffnungen in den Quantencomputer** gesetzt.

„Die Quantentechnologien der zweiten Generation werden vor allem eine Evolution bringen. Nur beim Quantencomputer ist es vorstellbar, dass es zu einer kleinen Revolution kommt.“

Im Gegensatz zu einem Quantensimulator (siehe Kapitel 9) ist ein Quantencomputer theoretisch universell einsetzbar. Das heißt,

man kann ihn **für verschiedene Problemklassen** programmieren (zum Beispiel Optimierung, Faktorisierung oder unstrukturierte Suche). Insbesondere für **Faktorisierungsprobleme** ist dabei eine **exponentielle Geschwindigkeitssteigerung** im Vergleich zum klassischen Computer möglich.¹¹⁸ Für den Bereich der **Simulation von Molekülen** können Quantencomputer ebenfalls in neue Dimensionen vordringen: So sind für die Modellierung der chemischen Wechselwirkungen eines relativ einfachen Moleküls wie **Koffein** bei einem **klassischen Computer 10⁴⁸ Bits** nötig; diese Zahl entspricht 10 Prozent der Gesamtzahl an Atomen auf der Erde. Ein Quantencomputer könnte die gleiche Simulation hingegen möglicherweise mit **nur 160 Qubits** durchführen.¹¹⁹

Relevante **Anwendungen** sind zum Beispiel in den Industriesektoren **Chemie, Materialproduktion, Pharmazie, Energie, Metall, Logistik, Luftfahrt, Mobilität und Finanzen** zu erwarten.¹²⁰ Für ausgewählte Einsatzszenarien siehe „Einsatzszenarien für Quantencomputer“ (Seite 64).

Dem Quantencomputer wird darüber hinaus zugetraut, heute aufkommenden Schlüsseltechnologien wie **Künstlicher Intelligenz und Maschinellem Lernen** nochmals einen deutlichen Leistungsschub zu versetzen. Quantencomputer können auch in **großen, komplexen und unstrukturierten Datenmengen** Muster und Verbindungen erkennen. Dadurch werden sie einige Anwendungen überhaupt erst ermöglichen, zum Beispiel das Erkennen von Objekten in der Umgebung beim **autonomen Fahren** oder das Finden medizinisch relevanter **Zusammenhänge in Genomdaten** von Patientinnen und Patienten.¹²¹

„Es ist falsch, zu denken, dass der Quantencomputer der Supercomputer wird, der alles besser kann. Die Vorteile werden vor allem in einigen speziellen Problembereichen spürbar sein.“

Prinzipiell erwarten Expertinnen und Experten aber auch, dass sich mittel- und langfristig **weitere Anwendungsfelder für Quantencomputer** entwickeln werden, die **jetzt noch nicht vorhersehbar sind**. Einige skeptischere Stimmen sind dagegen der Meinung, dass auch auf lange Sicht **Quantencomputer nur bei spezialisierten Fragestellungen** eingesetzt werden, analog zu heutigen Hochleistungsrechnern.

118 | Vgl. BCG 2018b; BSI 2019.

119 | Vgl. Financial Times 2018.

120 | Vgl. BCG 2018b; BCG 2018c; 2019.

121 | Vgl. BCG 2018c; Marr 2017; Mohseni et al. 2017; Quantum Flagship 2019.



Einsatzszenarien für Quantencomputer

Materialwissenschaften – leistungsfähigere Batterien durch neue Materialien: Die Herausforderung des Klimawandels verlangt nach einer **Verkehrswende** hin zu einem höheren Anteil elektrischer Fahrzeuge. Essenziell zur Weiterentwicklung von elektrischen Fahrzeugen sind **bessere Batterien**, die eine höhere Leistung mit kürzeren Ladezeiten und längerer Lebensdauer verbinden.

Die **Simulation komplexer neuer Materialien**, die in Batterien verwendet werden können, und ihrer Reaktionenseigenschaften **übersteigt die Leistungsfähigkeit klassischer Supercomputer**. Quantencomputer hingegen können die **Eigenschaften neuer Materialien potenziell vorhersagen**, weshalb vermehrt auch deutsche Automobilhersteller mit Quantencomputing experimentieren.

Verkehr und Logistik – Staus vermeiden und Wegstrecken verkürzen: Sowohl beim **Management von Verkehrsflüssen** auf Schienen und Straßen als auch in vielen Bereichen der **Logistik** trifft man auf Varianten des „**Travelling salesman**“-**Problems**: Wenn man eine optimale Route mit mehreren Zwischenhalten berechnen will, steigt die Zahl der Möglichkeiten kombinatorisch an, und man erreicht schnell Größenordnungen, bei denen selbst ein **Hochleistungscomputer Jahrzehnte bis zu einer Lösung** brauchen würde.

Ein Quantencomputer, der große Zahlen möglicher Routen parallel berechnen kann, macht diese Probleme lösbar. Dadurch könnten Verkehrsflüsse effizienter gelenkt und somit **Staus vermieden** sowie **ideale Routen mit maximaler Effizienz** berechnet werden, zum Beispiel für die Paketbotin oder den Lagerhausarbeiter.

Medizin – Wechselwirkungen zwischen Krankheiten vorhersehen: Eine große Herausforderung der Medizin ist der Umgang mit oftmals **nicht vorhersagbaren Komplikationen**, wenn eine Patientin beziehungsweise ein Patient mehr als eine Krankheit hat (Multimorbidität). Zum einen erschweren die Wechselwirkungen die **Diagnose der einzelnen Krankheiten**, zum anderen werden Therapieansätze

komplexer, da beispielsweise verschiedene **Medikamente unerwünschte Wechselwirkungen** eingehen.

Prinzipiell könnte eine **tiefgreifende Analyse bestehender Patientendaten** Aufschluss über solche möglichen Wechselwirkungen geben. Die komplexen klinischen Datensätze der Patientinnen und Patienten mit ihrer Vielzahl an verschiedenen Parametern können jedoch **nicht durch „Machine Learning“-Ansätze auf klassischen Computern analysiert** werden. Auf **Quantencomputing gestütztes Machine Learning**, das die Vorteile des Quantencomputers bei der unstrukturierten Suche nutzt, kann diese Probleme überwinden und so zu **besseren Diagnose- und Therapieergebnissen** beitragen.

Finanzmärkte – Portfolios schnell optimieren und Risiken minimieren: Eine starke und sichere Finanzindustrie ist ein wichtiger Baustein eines wettbewerbsfähigen Wirtschaftsstandorts. Bei der Entwicklung **strukturierter Finanzprodukte** stellt sich die Herausforderung, einzelne **Forderungen aus einem Gesamtportfolio** zu selektieren. Hierbei sind mehrere Kriterien, wie die Gesamtsumme der selektierten Forderungen oder Restlaufzeiten, zu berücksichtigen. Daraus ergibt sich ein **kombinatorisches Problem**, das es zu optimieren gilt.

Die Forschungs- und Entwicklungseinheit der Commerzbank-Gruppe ist dieses Problem mit einem **Quantenannealer** (siehe „**Verschiedene Ansätze zur Umsetzung eines Quantencomputers**“, Seite 67) angegangen und hat dabei einen **signifikanten Performancevorteil** erreicht.

Doch lassen sich Finanzprodukte mit Quantencomputing nicht nur schneller optimieren, auch die mit ihnen verbundenen **Risiken können besser analysiert** werden. Dies kann einen Beitrag zu **sichereren und stabileren Finanzprodukten** leisten.

Prinzipiell können Quantencomputer auch für alle **Einsatzszenarien der Quantensimulation** (siehe „**Einsatzszenarien für Quantensimulatoren**“, Seite 77) verwendet werden.

Beim Quantencomputing besteht auch die Gefahr, dass durch den derzeitigen Hype **überzogene Erwartungen** bezüglich Leistungsfähigkeit und vor allem der Zeithorizonte, ab wann Quantencomputer tatsächliche Vorteile mit sich bringen, geweckt werden. Expertinnen und Experten mahnen ein **realistisches Erwartungsmanagement** an, um zu verhindern, dass beim Ausbleiben schneller Erfolge Ernüchterung einsetzt und es zu einem **Quanten-Winter**, also einem übermäßigen Rückgang von Entwicklungs- und Förderaktivitäten, kommt.

8.1 Stand der Forschung und der kommerziellen Anwendung

Trotz großer Fortschritte können Quantencomputer noch nicht zum Lösen kommerziell relevanter Fragestellungen genutzt werden. Dies könnte allerdings in den nächsten Jahren für bestimmte Optimierungsaufgaben oder Simulationen möglich werden. Die weitere Skalierung und Verbesserung der Qualität der Recheneinheiten stellen die größten Herausforderungen dar. Auch im Bereich Algorithmen und Software besteht noch Entwicklungsbedarf.

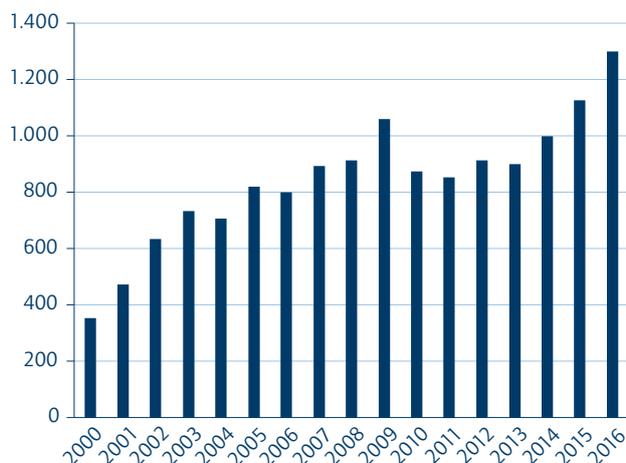
In den letzten Jahren wurden **bedeutende Fortschritte** bei der **Entwicklung von Quantencomputern** erzielt. Ein Indiz hierfür ist die Entwicklung der **Publikationszahlen**: Nach einer nur minimalen Zunahme zwischen 2003 und 2013 sind sie seitdem **rasant gestiegen** (siehe Abbildung 12). Deutschland liegt bei der Zahl der Publikationen im Zeitraum 2012 bis 2016 weltweit auf Rang 3 hinter den USA und China.¹²² Hierzu trägt die Vielzahl **exzellenter Forscherinnen und Forscher** bei, die an deutschen Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen arbeiten.

Hinzu kommen kontinuierlich Meldungen aus dem Ausland über **neue Rekorde bezüglich Zahl und Qualität der Qubits**, die experimentelle Plattformen zur Verfügung stellen.¹²³

Diese Erfolgsmeldungen dürfen jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass sich die Technologie noch **in einem frühen Stadium** befindet und gerade erst über einen proof-of-concept hinaus ist. Das nächste technische Ziel war, einen **„Quantenvorteil“** oder **„Quantenüberlegenheit“** („Quantum Supremacy“) nachzuweisen; das heißt, ein Problem mit einem Quantencomputer zu lösen, das ein **klassischer Computer gar nicht oder nur deutlich langsamer** lösen kann.

Ein **Team von Google** hat in einer Veröffentlichung im Oktober 2019 erstmals einen solchen **Quantenvorteil** nachgewiesen. Der

Gesamtzahl der Publikationen im Bereich Quantencomputing



Publikationen im Bereich Quantencomputing nach Ländern (2012-2016)

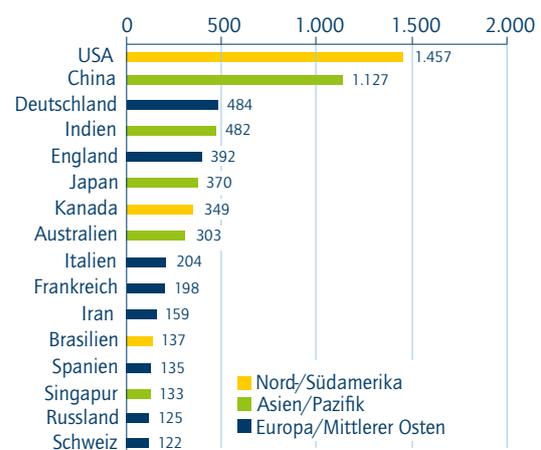


Abbildung 12: Zahl der Publikationen im Bereich Quantencomputing; Übersicht nach Ländern berücksichtigt nur Publikationen im Zeitraum 2012-2016 (Quelle: Bornmann et al. 2019)

122 | Vgl. Bornmann et al. 2019.

123 | Vgl. BCG 2018b; BCG 2018a; BSI 2019; MIT Technology Review 2018a; 2018b.



Quantencomputer von Google hat ein spezifisch **auf seine Fähigkeiten zugeschnittenes Problem** in **3 Minuten und 20 Sekunden** berechnet, während der zurzeit leistungsfähigste **klassische Supercomputer** dafür laut Googles Berechnungen **10.000 Jahre** benötigt hätte.¹²⁴ IBM gibt allerdings an, dass die Berechnung des Problems mit ihrem Hochleistungsrechner Summit nur zweieinhalb Tage statt 10.000 Jahre in Anspruch nehmen würde und somit Quantum Supremacy im strengeren Sinne nicht erreicht worden sei.¹²⁵

Die Befragten sehen diesen Quantenvorteil zwar als bedeutenden **technologischen Meilenstein**, dieser stelle aber **nur einen ersten Schritt** zum universellen Quantencomputer, der für eine Vielzahl relevanter Anwendungsfälle eingesetzt werden kann, dar.

Zur Verwirklichung des Quantencomputers und der Herstellung von Qubits gibt es **verschiedene Plattformen** (siehe „Verschiedene Ansätze zur Umsetzung eines Quantencomputers“, Seite 67, und Anhang C).¹²⁶

Am weitesten fortgeschritten sind zurzeit die Ansätze mit **supraleitenden Schaltkreisen oder Ionenfallen**. Allerdings

weisen diese beiden Plattformen auch die größeren technischen Hürden auf, wenn sie auf eine größere Qubitzahl skaliert werden sollen. Diese beiden Ansätze sind noch sehr **anfällig für Störungen der empfindlichen Quantensysteme**. Ein **wesentlicher Teil der Rechenleistung** muss deshalb zur **Fehlerkorrektur** verwendet werden. Je nach Qualität der Qubits könnten mehrere Hundert Qubits zur Korrektur eines einzelnen „rechnenden“ Qubits nötig sein. Eine **vollumfängliche Fehlerkorrektur** ist daher mit den derzeitigen Qubitzahlen **noch nicht möglich**. Daher spricht man bei diesen Plattformen auch von **Noisy Intermediate-Scale Quantum Devices (NISQ)**.¹²⁷

„Noch weiß niemand, welche Plattform sich beim Bau des Quantencomputers durchsetzen wird.“

Nichtsdestotrotz gehen Expertinnen und Experten mittlerweile davon aus, dass sich auch **mit diesen NISQ-Systemen schon relevante Anwendungen** umsetzen lassen werden, insbesondere in der Quantensimulation zum Beispiel von Molekülen oder chemischen Prozessen sowie in der physikalischen Grundlagenforschung.¹²⁸

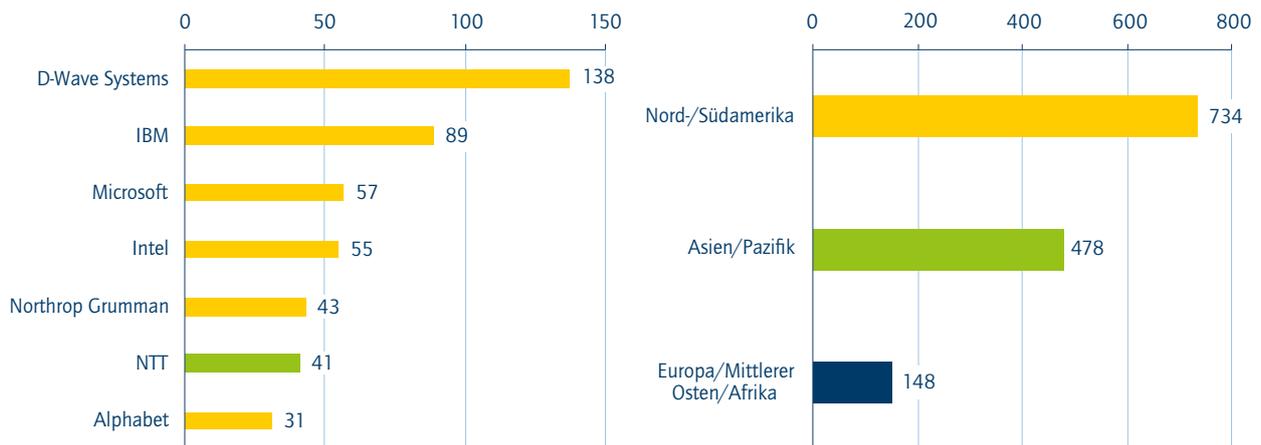


Abbildung 13: Zahl angemeldeter Patentfamilien im Bereich Quantencomputing nach Anmelder (Stand 2017) (Quelle: BCG 2018c)

124 | Vgl. Arute et al. 2019.

125 | Vgl. IBM 2019a.

126 | Für eine vertiefte Analyse des Stands der Entwicklung bei den verschiedenen Ansätzen zur Realisierung eines Quantencomputers sind die Studie des Bundesamtes für Sicherheit in der Informationstechnik sowie die Publikation der National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine zu empfehlen (vgl. BSI 2019; Grumbling/Horowitz 2019).

127 | Vgl. BCG 2018b; BCG 2018c; Preskill 2018; QUTEQA 2017; Quantum Flagship 2019.

128 | Vgl. Brooks 2019; Kühn et al. 2019; Preskill 2018.

Verschiedene Ansätze zur Umsetzung eines Quantencomputers

- **Supraleitende Schaltkreise:** Supraleitende Materialien leiten Strom ohne Widerstand und können bei geeigneter Konstruktion des Schaltkreises einen Quantenzustand bilden, wofür allerdings ultraniedrige Temperaturen benötigt werden. Die Entwicklung dieses Ansatzes ist am weitesten fortgeschritten und wird von den meisten kommerziellen Anbietern genutzt. Sie erreichen zurzeit eine Größenordnung von etwa 50 Qubits.
- **Ionenfallen:** Dieser weniger verbreitete Ansatz basiert auf ionisierten Atomen in einem Vakuum. Die Qubits sind langlebiger als bei supraleitenden Schaltkreisen, dafür sind die Reaktionszeiten bei Steuerungsvorgängen deutlich langsamer. Die besten Geräte verfügen zurzeit über rund 20 Qubits.
- **Photonik:** Dieser Ansatz basiert auf verschränkten Photonen aus Einzelphotonenquellen und hat den Vorteil, dass er bei Raumtemperatur funktioniert und modular aufgebaut ist. Allerdings steht die Entwicklung dieses Systems noch am Anfang.
- **Halbleiter oder Quantenpunkt:** Diese Ansätze versprechen leicht skalierbar zu sein und bauen auf etablierte Konstruktionsweisen aus der Halbleitertechnik auf. Allerdings benötigen sie ebenfalls ultraniedrige Temperaturen, und es sind noch grundlegende Hürden beim Herstellungs- und Konfigurationsprozess im notwendigen Nanomaßstab zu überwinden.

- **Topologische Quantencomputer:** Dieser Ansatz basiert auf exotischen Teilchen wie Majorana-Fermionen oder Anyonen und ist am weitesten von einer Realisierung entfernt. Aufgrund einer theoretisch deutlich geringeren Fehleranfälligkeit und einer leichteren Skalierbarkeit gegenüber anderen Quantensystemen gilt der Ansatz dennoch als vielversprechend.

Andere Ansätze

Quantenannealer (adiabatischer Quantencomputer): Der unter anderem von D-Wave verfolgte Ansatz ist kein Quantencomputer im eigentlichen Sinne, da er nur für bestimmte Problemstellungen (Optimierungsprobleme) geeignet ist. Dafür bedarf er keiner Fehlerkorrektur im gleichen Maße wie andere Ansätze und kann bereits jetzt kommerziell genutzt werden. Ob und bei welchen Fragestellungen mit einem Quantenannealer ein „Quantenvorteil“ erreicht werden kann, ist allerdings umstritten.

Quantencomputer-Emulator: Zur Entwicklung von Quantenalgorithmen und -software wird auch auf Ansätze gesetzt, bei denen Qubits und ihr Verhalten auf einem klassischen Rechner simuliert werden. Ein bekannter Anbieter in diesem Bereich ist Atos. Auch Fujitsu bietet einen „Digital Annealer“ an, der wiederum eine Emulation eines Quantenannealers ist.

Uneinigkeit besteht bei den Expertinnen und Experten darüber, ob sich **eine Plattform** mittelfristig als überlegen durchsetzen wird oder ob zukünftig **verschiedene Plattformen** für unterschiedliche Anwendungsgebiete genutzt werden.¹²⁹

Die Entwicklung des Quantencomputers hat, angetrieben durch die großen Marktpotenziale, die in der Technologie gesehen werden (siehe Kapitel 8.2), mittlerweile das rein akademische Umfeld verlassen. Die **Haupttreiber** sind hierbei vor allem die großen Technologiefirmen aus Nordamerika, wie **IBM, Microsoft, Google, Intel und Amazon**. Jedoch hat sich eine große und **wachsende Zahl Start-ups** in diesem Feld etabliert, die zum einen im Bereich Software und Dienstleistungen aktiv sind, aber,

wie Rigetti und D-Wave, zum Teil auch eigene Hardware entwickeln (siehe Abbildung 16 und Anhang B).

In Europa ist die Quantencomputing-Landschaft hingegen noch **eher akademisch geprägt**. Hotspots in anderen europäischen Ländern bestehen in den **Niederlanden (Delft), der Schweiz (Zürich), Österreich (Innsbruck), Schweden (Chalmers) und Finnland (Espoo)** (siehe auch Kapitel 4.2). Mit Ausnahme von Alpine Quantum Technologies (Österreich) und IQM (Finnland) bewegen sich die **wenigen vorhandenen europäischen Start-ups** ausschließlich in den Bereichen Software- und Dienstleistungsentwicklung sowie Komponentenherstellung. Europäische **Großunternehmen** sind bislang in der Hardwareentwicklung **nicht aktiv**.



Der exakte **Entwicklungsstand chinesischer Ansätze**, ob von Staatsseite oder von Firmen wie Alibaba und Huawei, lässt sich laut Expertinnen und Experten nur **schwer einschätzen**. Sie gehen allerdings davon aus, dass die großen Investitionen auch dort in **den nächsten Jahren zu signifikanten Durchbrüchen** führen werden.

Die starke Stellung nordamerikanischer Akteure spiegelt sich auch in der **Zahl der Patente** wider, die im Bereich Quantencomputing angemeldet sind (siehe Abbildung 13).

Teile der Quantencomputing-Community sind Expertinnen und Experten zufolge noch von einem **Gemeinsinn und Geist des akademischen Austauschs** geprägt. Ein Grund hierfür ist sicherlich, dass die Firmen, die an der Entwicklung des Quantencomputers arbeiten, ein **starkes gemeinsames Interesse** haben, diesen zur Marktreife zu bringen. In diesem Fall verfügten sie dann über einen **fast uneinholbaren Vorsprung** bei Technologie und Expertise gegenüber Wettbewerbern, die sich nicht an Forschung und Entwicklung beteiligt haben.

„Zurzeit profitieren noch alle von der Kooperation im Bereich Quantencomputing. The tide lifts all boats.“

Mit **zunehmender Marktreife** ändert sich dies allerdings, und der Wettbewerbsgedanke tritt stärker in den Vordergrund. Zudem sind einige Akteure bereits jetzt sehr **restriktiv bei Kooperationen und im Umgang mit geistigem Eigentum**.

Quantencomputing in Deutschland

In Deutschland lag der Fokus lange Zeit vor allem auf der **Grundlagenforschung**, und so haben sich für die **verschiedenen Quantencomputing-Plattformen** starke Forschungsgruppen an Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen gebildet (siehe Anhang C).

Hinzu kommen mittlerweile auch Initiativen, um die **Anwendungsentwicklung durch das Bereitstellen von Quantencomputing-Hardwareplattformen** voranzutreiben. So sind das Forschungszentrum Jülich und die Universität Saarbrücken maßgeblich im „EU Quantum Flagship“-Projekt **OpenSuperQ** involviert, das zum Ziel hat, einen **europäischen Quantencomputer** mit bis zu 100 supraleitenden Qubits zu bauen.¹³⁰ Darüber

hinaus sind das **Forschungszentrum Jülich mit Google und D-Wave** sowie die **Universität der Bundeswehr in München mit IBM** Kooperationen eingegangen.¹³¹

„Die deutsche Industrie ist beim Thema Quantencomputing äußerst zögerlich.“

Die im September 2019 verkündete Kooperation zwischen der **Fraunhofer-Gesellschaft und IBM**, die von der Bundesregierung unterstützt wird, stellt eine tiefere Stufe der Zusammenarbeit dar. Im Rahmen dieser Kooperation soll erstmals ein physischer **Quantencomputer in Deutschland** in einem IBM-Rechenzentrum in Ehningen bei Stuttgart aufgebaut werden. Unter Leitung der Fraunhofer-Gesellschaft wird ein neues nationales Kompetenzzentrum zu Quantencomputing etabliert, an dem interessierten Anwendern **aus Wissenschaft und Wirtschaft** die Nutzung des Quantencomputers ermöglicht wird. Ein deutlicher Fokus soll dabei auf der Entwicklung von **konkreten Anwendungen und Quantenalgorithmen** liegen. Eine weitere Besonderheit der Kooperation ist, dass die Nutzungsbedingungen nach **deutschem und europäischem Datenschutzrecht** gestaltet werden sollen. Dadurch bestünde für Nutzer und Anwender Rechtssicherheit bei Fragen des geistigen Eigentums und der Nutzung sensibler Unternehmensdaten.¹³²

Vonseiten der **deutschen Industrie** sind **noch keine Aktivitäten** zu verzeichnen, sich an der Entwicklung eines Quantencomputers zu beteiligen oder diese selbst federführend voranzutreiben.

Herausforderungen

Während einige Forscherinnen und Forscher lange Zeit äußerst skeptisch waren, ob ein Quantencomputer mit Fehlerkorrektur und signifikanter Rechenleistung überhaupt realisierbar ist, ist die **große Mehrheit** mittlerweile der Überzeugung, dass es **vollfunktionsfähige, fehlerkorrigierte Quantencomputer** geben wird.

Über den Zeithorizont, wann diese verfügbar sein werden, kann allerdings nur spekuliert werden. Ein **Zeitraum von 20 bis 30 Jahren** wird allerdings als **deutlich realistischer** betrachtet als 10 Jahre. Die Expertinnen und Experten sind sich einig, dass man **hohe Risiken eingehen** und über einen **langen Atem verfügen** muss, wenn man Durchbrüche beim Quantencomputing erzielen möchte.

130 | Vgl. OpenSuperQ 2018.

131 | Vgl. Forschungszentrum Jülich 2019; Forschungszentrum Jülich 2019; IBM 2018.

132 | Vgl. Fraunhofer-Gesellschaft 2019b.

Bis es so weit ist und eine große Bandbreite praktischer Probleme mit Quantencomputern gelöst werden kann, müssen allerdings noch einige **Herausforderungen in Forschung und Entwicklung** bewältigt werden. So müssen **effiziente Methoden zur Fehlerkorrektur** gefunden werden, um die Rechenleistung der Qubits auch tatsächlich nutzen zu können. Parallel dazu muss auch die **Fehleranfälligkeit der Quantencomputer gesenkt** werden, was zum einen über **stabilere Qubits**, zum anderen über **bessere Methoden der Abschirmung** von Umwelteinflüssen erreicht werden kann.

„Wenn man die heutigen Maschinen einfach nur zu einer Million Qubits hochskaliert, die man für Fehlerkorrektur benötigt, braucht man eine ganze Halle, um den Quantencomputer unterzubringen.“

Bei der **Skalierung von Hardware und Kontrollsystemen** (Erhöhung der Qubitanzahl, Vereinfachung der Systemkomponenten) sowie der gleichzeitigen **Miniaturisierung der Komponenten** stellen sich weitere technische Herausforderungen, die gemeinert werden müssen. Auch **Fortschritte in der Kühltechnik oder der Temperaturtoleranz der Qubits** können für einzelne Plattformen von Bedeutung sein.¹³³

Die Expertinnen und Experten sehen auch die Entwicklung **zuverlässiger und einfach konfigurierbarer Schnittstellen zu klassischen Computern** als wichtiges Element an. Einige Fachleute sind der Meinung, dass dies auch der erste Bereich sei, der für die **Etablierung von Standards und Normen** infrage kommt. Andere Expertinnen und Experten sind hingegen der Ansicht, dass es für Normen und Standards im Allgemeinen bei Quantencomputern noch viel zu früh sei oder dass wahrscheinlich De-facto-Standards durch die schnellsten Anbieter gesetzt werden.

Generell bedarf es für die Entwicklung des Quantencomputers eines engen **Zusammenspiels von theoretischen und experimentellen Ansätzen**, und sie profitiert von **Fortschritten bei den zugrunde liegenden Basistechnologien** (siehe Kapitel 5). Bei allen Plattformtechnologien sind sowohl **Fragen der Grundlagenforschung** als auch **Engineering-Probleme** noch zu lösen,

wobei sich der **Reifegrad** der verschiedenen Ansätze **deutlich unterscheidet**.¹³⁴

Für eine Entwicklung hin zur **kommerziellen Produktion** von Quantencomputern **fehlt in Europa oder Deutschland** derzeit zudem noch ein Akteur, der die Rolle des **Systemintegrators** übernehmen könnte, um die vorhandene Forschungsexpertise mit industriellem Know-how zusammenzubringen.

Algorithmen

Die **ersten Quantenalgorithmen**, die entwickelt wurden und den **größten Geschwindigkeitsvorteil** versprechen, wie Shor-Algorithmus¹³⁵, sind auf einen **fehlerkorrigierten Quantencomputer** angewiesen. Sie funktionieren **nicht auf den NISQ-Plattformen**, die zurzeit verfügbar sind.

Mittlerweile gibt es auch Quantenalgorithmen, die **robuster gegenüber Fehlern sind** und trotzdem bereits einen Fortschritt gegenüber klassischen Systemen, zum Beispiel bei der Simulation von quantenchemischen Systemen, versprechen.¹³⁶ Dennoch ist die **Entwicklung von weiteren Algorithmen** entscheidend, um Quantencomputer mit wenigen Qubits schon **in naher Zukunft** für die Lösung relevanter Probleme einsetzen zu können.¹³⁷ Dazu gehören auch Algorithmen, die selbst zur Fehlerkorrektur beitragen.¹³⁸

Prinzipiell lässt sich **Algorithmen- und Dienstleistungsentwicklung** auch über die zurzeit verfügbaren **Cloud-Angebote**, etwa von Rigetti, Google und IBM, oder durch die Nutzung von **Quantencomputing-Emulatoren** (siehe „Verschiedene Ansätze zur Umsetzung eines Quantencomputers“, Seite 67) vorantreiben. Dennoch sind die Expertinnen und Experten der Ansicht, dass sich mit einem **direkteren Zugriff auf die Hardwarekomponente** insbesondere im noch frühen Entwicklungsstadium **schneller Fortschritte** erzielen ließen. Zudem gilt es, auch Fragen der **Wahrung geistiger Eigentumsrechte** sowie die **Sicherheit sensibler Anwenderdaten** bei der Nutzung dieser Angebote zu beachten.

Die Forschung an Quantenalgorithmen hat auch Algorithmen hervorgebracht, die auf klassischen Supercomputern eingesetzt werden können, sogenannte **quanten-inspirierte Algorithmen**.

133 | Vgl. Cao et al. 2019; Kühn et al. 2019; Peruzzo et al. 2014.

134 | Vgl. BCG 2018c; BCG 2018b; Quantum Flagship 2019.

135 | Vgl. Shor 1997.

136 | Vgl. Cao et al. 2019; Kühn et al. 2019; Peruzzo et al. 2014.

137 | Vgl. BCG 2018c; Quantum Flagship 2019.

138 | Vgl. QUTEQA 2017.



Diese bieten effiziente Lösungswege zum **Vergleich von Molekülen oder für Optimierungsaufgaben**.¹³⁹

Die Entwicklung des Quantencomputers und entsprechender Algorithmen sorgt auch für Herausforderungen im Bereich **Kommunikationssicherheit**. So ist der Shor-Algorithmus in der Lage, die derzeitige, auf Primfaktoren basierte **Verschlüsselung** (sogenannter **RSA-Standard**) **in kurzer Zeit zu brechen**.¹⁴⁰ Dies hat potenziell massive Auswirkungen auf Schutz und Geheimhaltung von Daten, da nicht nur zukünftige Kommunikation auf diese Weise angegriffen werden könnte, sondern auch bereits **existierende Daten nachträglich entschlüsselt** werden könnten.¹⁴¹ Führende Expertinnen und Experten schätzen die **Wahrscheinlichkeit** dafür, dass ein Quantencomputer hierzu in der Lage sein wird, auf **über 50 Prozent in den nächsten 10 bis 20 Jahren** (siehe auch „Post-Quanten-Kryptografie“, Seite 60).¹⁴²

8.2 Marktpotenziale und Wertschöpfungsketten

Für den Quantencomputer wird mittel- und langfristig ein Marktpotenzial von bis zu dreistelligen Milliardenbeträgen prognostiziert. Durch die vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten entlang der Wertschöpfungskette ist zudem ein sehr großes sekundäres Wertschöpfungspotenzial vorhanden. Es entsteht zurzeit weltweit ein Ökosystem aus Hard- und Software- sowie Mischanbietern. Deutsche und europäische Firmen fehlen jedoch vor allem im Hardwarebereich.

Von allen Quantentechnologien der zweiten Generation besitzen Quantencomputer mit Abstand das **größte theoretische Marktpotenzial**. Gleichzeitig bestehen allerdings auch noch die größten Hürden bis zur Anwendung, was **belastbare Marktabschätzungen fast unmöglich** macht. Demzufolge sind die nachfolgenden Zahlen mit einer gewissen Skepsis zu betrachten.

In einer Studie wird **im optimistischen Szenario** davon ausgegangen, dass sich ab 2030 ein signifikanter Markt entwickeln wird, der rasant auf **57 Milliarden USD im Jahr 2035** und **295 Milliarden USD im Jahr 2050** wachsen wird (siehe Abbildung 14). Im **konservativeren Szenario** werden die Durchbrüche, die zu großem Marktwachstum führen, erst für einen späteren Zeitpunkt (2040) angenommen. Allerdings wird auch dann ein starkes Wachstum von **6 Milliarden USD auf 263 Milliarden USD innerhalb von zehn Jahren** prognostiziert.¹⁴³

In anderen Studien reichen die Schätzungen für die **kurz- bis mittelfristige Marktentwicklung** von **0,5 Milliarden USD im Jahr 2023** über **5 bis 10 Milliarden USD** im Zeitraum 2020 bis 2025 bis hin zu **23 Milliarden USD im Jahr 2025**.¹⁴⁴

Konservativere Schätzungen gehen davon aus, dass langfristig das Marktpotenzial für **Quantencomputing-Hardware** die derzeitige Größe des **Marktes für Supercomputer (50 Milliarden USD)** nicht übersteigen wird und dass in **absehbarer Zukunft** (in den 2020er Jahren) der Markt für **NISQ-Quantencomputer mehrere 100 Millionen USD** betragen wird.¹⁴⁵ Eine andere relevante Vergleichsgröße könnte auch der weltweite Servermarkt sein, der im Jahr 2018 ein Volumen von 86 Milliarden USD hatte.¹⁴⁶

Die **möglichen Wertschöpfungssteigerungen**, die sich **Anwendern** durch den Einsatz von Quantencomputern zum einen durch **Kosteneinsparungen**, zum anderen durch **Umsatzsteigerungen** bieten, werden mit **2 bis 5 Milliarden USD** in den nächsten **3 bis 5 Jahren**, **25 bis 50 Milliarden USD** in den nächsten 10 Jahren und **450 bis 850 Milliarden USD** bei Entwicklung eines vollkommen fehlerkorrigierten Quantencomputers (**länger als 20 Jahre**) beziffert. Da die Fortschritte, die mit Quantencomputern beispielsweise in der Materialentwicklung erzielt werden können, **keine graduellen Verbesserungen, sondern qualitative Sprünge** darstellen, werden sich die **Frühadaptierer** unter den Anwendern **einen Marktvorteil sichern** können.¹⁴⁷

Für die **Pharmaindustrie in den USA** berechnet eine spekulative Studie, dass mithilfe von Quantensimulationen, auf Quantencomputing gestützten Machine Learning-Ansätzen und

139 | Vgl. Accenture 2018.

140 | Vgl. Shor 1997.

141 | Vgl. Richter 2018.

142 | Vgl. Global Risk Institute 2019.

143 | Vgl. BCG 2018b.

144 | Vgl. Homeland Security Research 2017; Markets and Markets 2017; Market Media Research 2019; Persistence Market Research 2017.

145 | Vgl. Deloitte 2018.

146 | Vgl. Counterpoint Research.

147 | Vgl. BCG 2019.

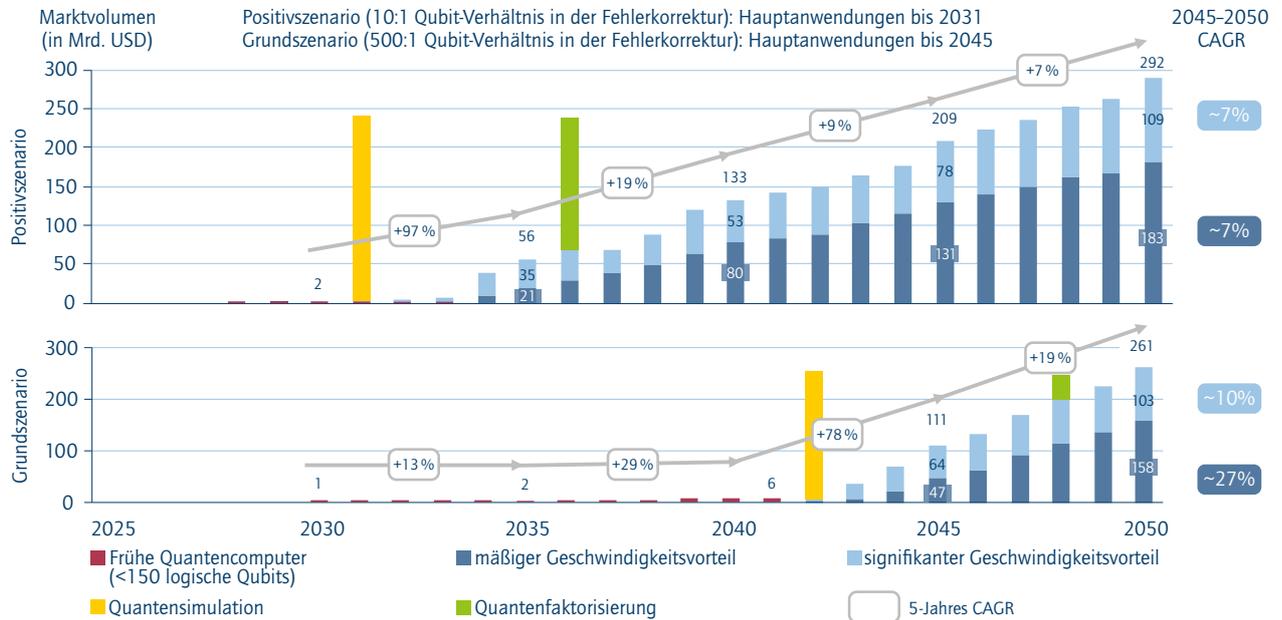


Abbildung 14: Projizierte Entwicklung des Marktpotenzials für Quantencomputer (2025-2050) mit Grund- und Positivszenarios (Quelle: BCG 2018b)

Optimierungslösungen Verbesserungen in der **Auswahl von Kandidaten** für die Medikamentenentwicklung und im **Design der klinischen Studien** erzielt werden können. Dadurch können dann **bessere Medikamente mit höherem Marktanteil** entwickelt werden. Die erwartete **Zeitersparnis** bei der Entwicklung beträgt **20 Prozent**, und es wird von einer **Verdoppelung der Zulassungsrate** der entwickelten Medikamente ausgegangen. Das berechnete **Wertschöpfungsvolumen dieser Verbesserungen wird mit 150 bis 300 Milliarden USD** angegeben. Angenommen, Pharmaunternehmen sind bereit, 10 Prozent dieses Volumens als Ausgaben für das zugrunde liegende Quantencomputing zu investieren, betrage der **Markt allein für diesen Sektor 15 bis 30 Milliarden USD**.¹⁴⁸

Wie Quantencomputer an **verschiedenen Gliedern der Wertschöpfungskette in der Chemieindustrie** eingesetzt werden könnten, veranschaulicht Abbildung 15.¹⁴⁹

Wertschöpfungskette

Die **Wertschöpfungskette** beim Quantencomputing umfasst **mehrere Ebenen** und reicht von **Hardware und Kontrollsystemen** über **Software** bis hin zu **Dienstleistungen** (siehe Abbildung 16). Die großen Technologiefirmen versuchen hierbei, die ganze Bandbreite für Verbraucherinnen und Verbraucher abzudecken. Startups (mit einigen Ausnahmen wie Rigetti oder D-Wave) konzentrieren sich eher auf einzelne Glieder der Wertschöpfungskette oder Spezialanwendungen.¹⁵⁰

Die Expertinnen und Experten gehen davon aus, dass in absehbarer Zeit das Modell „**Quantencomputing-as-a-Service**“ **vorherrschend** sein wird, wie es zurzeit zum Beispiel schon von IBM umgesetzt wird, und nur die allerwenigsten Anwender erwägen werden, einen eigenen Quantencomputer anzuschaffen.¹⁵¹

148 | Vgl. BCG 2018b.

149 | Vgl. McKinsey & Company 2019.

150 | Vgl. BCG 2018c.

151 | Vgl. IBM 2019b; IBM 2019.



Wertschöpfung	Chemikalienentwicklung	Produktentwicklung	Lieferkette	Produktion	Marketing
Zeithorizont der Verwirklichung	Frühe „Killer-Applikation“	Frühe „Killer-Applikation“	Ausgereiftes Quantencomputing	Potenziell frühe Anwendung	Ausgereiftes Quantencomputing
Verwendeter Quantencomputing-Ansatz	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Quantensimulation ▪ Optimierung ▪ Quanten-KI 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Quantensimulation ▪ Optimierung ▪ Quanten-KI 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimierung 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Quantensimulation ▪ Optimierung ▪ Quanten-KI 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Optimierung ▪ Quanten-KI
Beispiele für zukünftige Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Geringerer Laboraufwand beim Entwickeln von Molekülen und Feststoffen mit spezifischen Eigenschaften ▪ Verwendung von Computern, um die Form von Proteinen zu definieren und verbesserte aktive Inhaltsstoffe herzustellen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Entdeckung verbesserter Rezepturen durch Modellierung des Effekts von Inhaltsstoffen auf Prozesse oder des Verhaltens komplexer Mischungen 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verwendung von Quantencomputern zur kostensparenden Optimierung von Lieferketten und Logistik 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verbesserung des Ertrags bei gleichzeitiger Reduktion von Abfallprodukten durch besseres Verständnis der Reaktionen und Entdeckung neuer Katalysatoren ▪ Verwendung von Quantenalgorithmien zur Optimierung komplexer Prozesse im Wärme- und Massetransport 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Verwendung von Quanten-KI zur Verbesserung von B2B und B2C Kundenbeziehungen

Abbildung 15: Potenzielle Anwendungen für Quantencomputer entlang der Wertschöpfungskette in der Chemieindustrie (Quelle: McKinsey & Company 2019)

Dabei fahren einige Hersteller einen **zweigleisigen Ansatz**: Zum einen bieten sie die leistungsstärksten Varianten der Quantencomputer in **exklusiven Entwicklungsvereinbarungen** an, bei denen die Ergebnisse und Entwicklungen proprietär genutzt werden können. Zum anderen stellen sie auch Quantencomputer in einer „**Open Source**“-Umgebung zur Verfügung, sodass alle Entwicklungen der ganzen Community zugutekommen.

Dadurch bilden sich Anwendernetzwerke, die maßgeblich dazu beitragen, dass sich kleine **Quantencomputing-Ökosysteme** entwickeln, die den Herstellern einerseits bei der **Weiterentwicklung des Quantencomputers**, der Systemumgebung sowie der Software- und Anwendungsebene helfen und andererseits langfristig den **Grundstock des Kundenstamms** darstellen.

Zudem sehen viele Expertinnen und Experten Quantencomputer vor allem in der Rolle von **Co-Prozessoren in Hybridsystemen mit klassischen Computern**. Ihre Rechenleistung kommt nur dann zum Einsatz, wenn es um spezifische Problemstellungen geht, bei denen der Quantencomputer Vorteile bringt.

Die Produktion der **Hardware** wird daher zumindest **mittelfristig eher ein Nischenmarkt** bleiben und sich der **größere Teil der Wertschöpfung** aus dem Bereich **Software und Dienstleistungen** speisen.

Dass große Hoffnungen in das Marktpotenzial des Quantencomputing gesetzt werden, zeigen auch die sehr hohen und kontinuierlich steigenden **Investitionen in internationale Start-ups**, die sowohl den Software- beziehungsweise Dienstleistungsbereich als auch den Hardwaresektor abdecken (siehe Abbildung 16 und Anhang B).¹⁵²

„Wenn die Technologie kommt, braucht man Quantencomputing, um konkurrenzfähig zu sein.“

In **Deutschland** hat sich bisher nur eine **kleine Start-up Community** gebildet (beispielsweise mit Heisenberg Quantum Simulations in Karlsruhe oder JoS Quantum in Frankfurt). Dies liegt zum einen an den allgemein **schwierigen Bedingungen für Start-ups** (mangelndes Kapital, fehlende Gründermentalität) und zum anderen am **Fehlen nennenswerter Aktivitäten zur Entwicklung von Quantencomputing-Hardware** in Deutschland. Um sich potenziell Anteile am attraktiven Software- und Dienstleistungssegment zu sichern, sind deutsche Unternehmen daher zurzeit auf **Kooperationen mit Hardwareherstellern aus dem Ausland** angewiesen.

152 | Vgl. BCG 2018c; Gibney 2019.

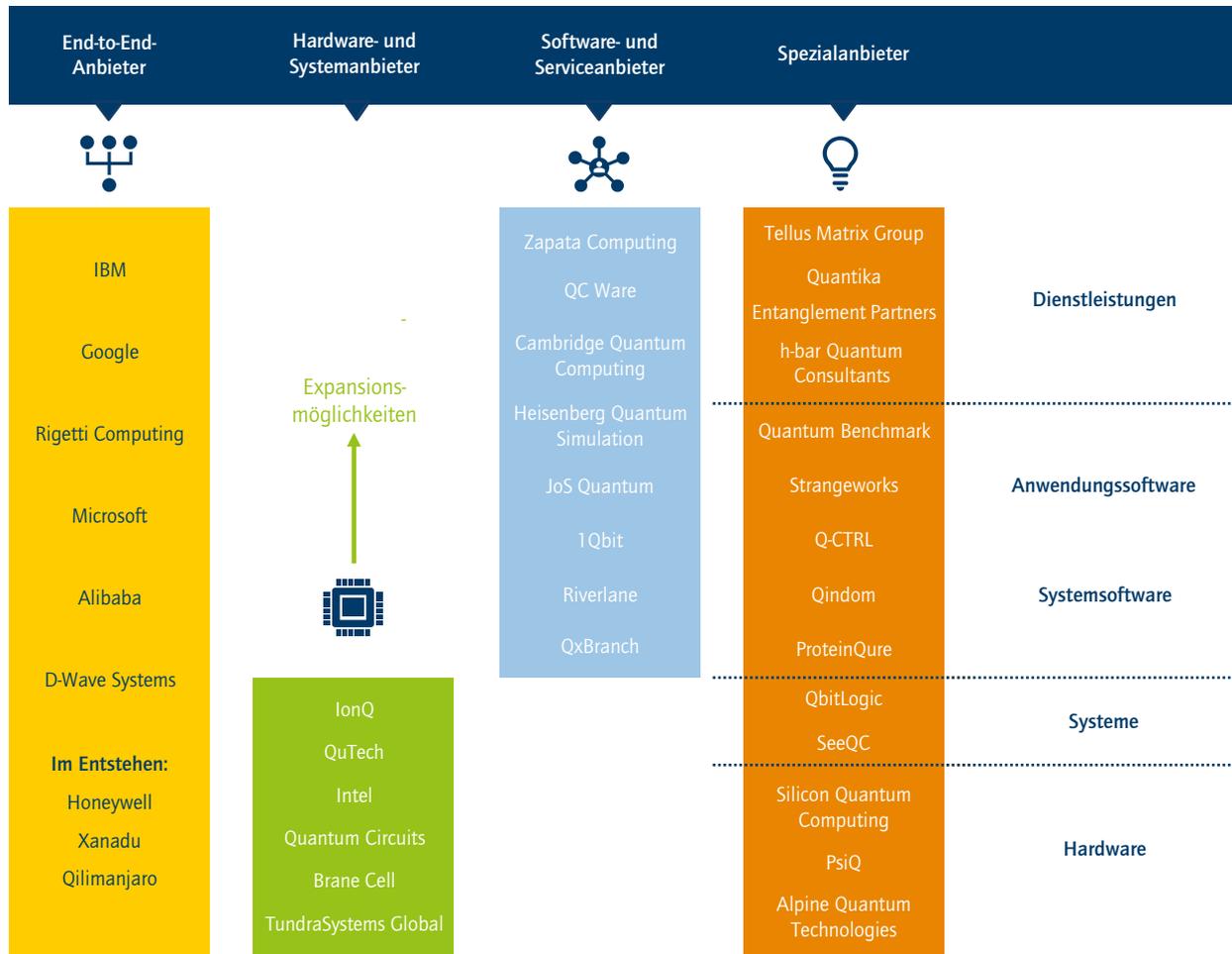


Abbildung 16: Wertschöpfungssegmente im Quantencomputing-Ökosystem (Quelle: eigene Darstellung basierend auf BCG 2018c)

Auf Anwenderseite sind auch in Deutschland in den letzten Jahren **große Industrieunternehmen in diversen Branchen** (zum Beispiel BASF, Bayer, BMW, Bosch, Daimler, Merck, Volkswagen) **Kooperationen mit Technologiefirmen**, die Quantencomputer oder Softwareanwendungen entwickeln, eingegangen.¹⁵³ Zwar liefern diese Kooperationen aufgrund der noch begrenzten Leistungsfähigkeit der Quantencomputer derzeit **noch kaum direkt wirtschaftlich verwertbare Resultate**, sie bieten aber eine wichtige Plattform, um frühzeitig **Erfahrungen mit der neuen Technologie** zu sammeln. So können die Firmen **Expertise aufbauen** und sind gerüstet für den Zeitpunkt, ab dem der Einsatz von Quantencomputern wirtschaftlich nutzbare Vorteile bringt.

Bislang befinden sich **deutsche Unternehmen noch nicht in einer guten Position**, um an der **Wertschöpfung im Quantencomputing** teilzuhaben. Um die Herausforderungen bei der Entwicklung des Quantencomputers und entsprechender Anwendungen bewältigen zu können und das **volle Potenzial** der Technologie zu realisieren, müssen **Kompetenzen in drei Bereichen** aufgebaut werden:

- Hardware
- Software und Algorithmen
- Methodik zur Implementierung von Problemstellungen und zur Nutzbarmachung der Ergebnisse

153 | Vgl. BASF 2019; BMW 2019; Daimler 2018; Merck 2019; QuSoft 2019; Volkswagen AG 2017.



Die **verstärkten Bemühungen** im Bereich Quantencomputing in Deutschland, wie die von der Fraunhofer-Gesellschaft und IBM geplante Quantencomputing-Plattform, können durch einen **niedrigschwiligen und unbürokratischen Zugang** für Anwender und Entwickler zumindest bei den beiden letztgenannten Punkten einen Beitrag leisten.

Zum Aufbau von Kompetenzen im **Bereich Quantencomputing-Hardware** bedürfte es allerdings Anstrengungen, die über die laufenden und geplanten Projekte hinausgehen.

8.3 Technologische Souveränität

Der Zugang zu Quantencomputern wird in Zukunft zentral für die technologische Souveränität Deutschlands und Europas sein. Zurzeit verfügen Deutschland und Europa noch nicht über die Kapazität, eigene Hardware zu produzieren.

Bei den Potenzialen des Quantencomputing für **signifikante Wettbewerbsvorteile in deutschen Kernindustrien** ist es essenziell, dass Deutschland möglichst **uneingeschränkt Zugang zu dieser Schlüsseltechnologie** erhält.

Daher kann die derzeitige **Abhängigkeit von ausländischen Partnern** aufgrund **fehlender eigener Hardwarekapazitäten** für deutsche und europäische Unternehmen potenziell ein Problem darstellen. In Zeiten **volatiler Handelsbeziehungen** kann nicht mehr kategorisch ausgeschlossen werden, dass europäische und somit auch deutsche Firmen vom Import bestimmter Produkte und Komponenten ausgeschlossen werden. In diesem Fall wären ohne eigene Kapazitäten bei der Quantencomputing-Hardware die **technologische Souveränität** und die Fähigkeit Europas **bedroht**, an der gesamten darauf basierenden Wertschöpfung zu partizipieren, auch im Bereich Software und Dienstleistungen.

Der Zugang zu Quantencomputing-Anwendungen über **Cloud-Dienste**, die zum größten Teil über **nicht-europäische Server** laufen, wird von einigen Expertinnen und Experten **kritisch** gesehen, da dadurch der **Schutz des geistigen Eigentums** der Entwickler von Quantencomputing-Software, von **Geschäftsgeheimnissen** oder auch von **personenbezogenen Daten gefährdet** sein könne.

Die vom Bundeswirtschafts- und Bundesforschungsministerium vorgestellten Entwürfe für einen **europäischen Cloud-Dienst** („Gaia-X“) könnten hier Lösungsansätze bieten und beziehen Quantencomputing als ein mögliches Einsatzfeld bereits mit ein.¹⁵⁴ Auch die Pläne, bei der Kooperation von IBM und der Fraunhofer-Gesellschaft auf die Einhaltung europäischer Datenschutzrichtlinien zu setzen, tragen diesen Bedenken Rechnung.¹⁵⁵

154 | Vgl. BMWi/BMBF 2019.

155 | Vgl. Fraunhofer-Gesellschaft 2019b.

8.4 Stärken- und Schwächenprofil Deutschlands sowie aktuelle Chancen und Risiken

Eine spezielle Übersicht über Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken für den Standort Deutschland bei **Quantencomputing** erfolgt hier. Für eine allgemeine Übersicht über

die verschiedenen Technologiefelder der Quantentechnologien hinweg siehe Kapitel 3.3.

Stärken

- Viele international tätige deutsche Spitzenforschende/Spitzenforschende mit deutscher Ausbildung
- International konkurrenzfähige Grundlagenforschung zu allen aktuell erprobten technologischen Plattformen für Quantencomputer sowie Quanteninformationstheorie
- Interesse führender deutscher Großunternehmen (zum Beispiel aus Automobil-, Chemie-, Pharma-industrie, Finanzbranche) an Anwendungsmöglichkeiten

Schwächen

- Keine Quantencomputing-Hardwareentwicklung in Deutschland
- Kein uneingeschränkter Hardwarezugang bei Kooperationen mit ausländischen Herstellern von Quantencomputern
- Keine mit Google, IBM oder Microsoft vergleichbaren Investitionen der deutschen Wirtschaft

Chancen

- Bündelung bestehender Kompetenzen zur Schaffung deutscher/europäischer Hardwarebasis
- Sicherstellung einer öffentlich für Wissenschaft und Unternehmen zugänglichen Quantencomputing-Plattform
- Aufbau von Kompetenzen durch Kooperationen deutscher Akteure mit internationalen Vorreiterunternehmen an Standorten innerhalb Deutschlands
- Dauerhafte Wettbewerbsvorteile für First-Mover-Anwender
- Führende Entwicklung von Software und Dienstleistungen durch Nähe und enge Kooperation mit potenziellen Anwendern

Risiken

- Verlust technologischer Souveränität ohne deutschen/europäischen Quantencomputer
- Verwundbarkeit zukünftiger quantencomputer-basierter Wertschöpfungsketten durch gefährdeten Zugang zu deren Hardwarebasis, beispielsweise in der Finanzwirtschaft sowie in der Chemie-, Pharma-, Logistik- oder Automobilindustrie
- Nachteile bei Softwareentwicklung ohne direkten Zugang zur Hardware
- De-facto-Standardsetzung vor allem durch US-amerikanische Großunternehmen
- Abwandern der Spitzenkräfte



9 Quantensimulatoren

Quantensimulatoren als „analoge Quantencomputer“ können für einige Problemstellungen, etwa in der Materialforschung, der Hochenergiephysik oder der Chemie, ähnliche Vorteile bringen wie Quantencomputer. Der Entwicklungshorizont bis zu wirtschaftlich relevanten Anwendungen wird dabei als deutlich kürzer eingeschätzt. Deutsche Forscherinnen und Forscher sind in diesem Gebiet weltweit führend. Bisher gibt es noch keine Firmen, die sich der Entwicklung kommerzieller Quantensimulatoren widmen. In diese Lücke könnten deutsche oder europäische Anbieter stoßen.

Quantensimulatoren¹⁵⁶ nutzen **Quanteneffekte**, um das Verhalten eines Quantensystems, das man vorhersagen möchte, durch ein anderes Quantensystem, das man besser kontrollieren und auslesen kann, darzustellen (siehe Abbildung 17). Sie können daher als „**analoge**“ Versionen von **Quantencomputern** (für Erläuterungen zu Quantencomputern siehe Kapitel 8) betrachtet werden, müssen allerdings spezifisch für jeden Simulationszweck eigens kalibriert werden.¹⁵⁷ Ein **Vorteil gegenüber universellen Quantencomputern** ist, dass sie wesentlich **leichter herzustellen** sind, da weniger Feinkontrolle über jede einzelne Komponente erforderlich ist.

Einen weiteren **Ansatz neben Quantensimulator und Quantencomputer** stellt der sogenannte **Quantenannealer** dar, den unter anderem die Firma D-Wave aus Kanada anbietet. In der Praxis können Quantenannealer bisher nur für eine Problemklasse, **Optimierungsprobleme**, verwendet werden. Sie lassen sich aber in diesem Rahmen für verschiedene Fragestellungen programmieren, was sie von einem reinen Quantensimulator

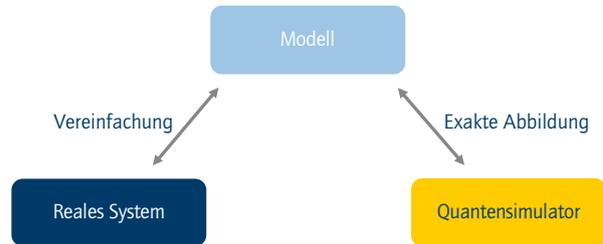


Abbildung 17: Schematische Darstellung des Prinzips der Quantensimulation (Quelle: eigene Darstellung basierend auf Berke 2014)

unterscheidet (siehe auch „Verschiedene Ansätze zur Umsetzung eines Quantencomputers“, Seite 67). Die kurz- und mittelfristigen **Erfolgsaussichten** dieses Ansatzes, Vorteile bei der Bearbeitung wirtschaftlich relevanter Fragestellungen zu bringen, werden von Expertinnen und Experten **unterschiedlich optimistisch bewertet**.

Insbesondere in der **Materialforschung und der Hochenergiephysik** (etwa bei komplexen Gleichungen, Synthese von Materialien, Supraleitfähigkeit) gibt es eine Reihe von Gebieten, bei denen selbst Supercomputer Schwächen zeigen, da die Berechnung der zugrunde liegenden Quantensysteme zu komplex ist. Da **Quantensimulatoren** aber den **gleichen Gesetzmäßigkeiten** wie die **zu untersuchenden Systeme** unterliegen, können sie diese speziellen physikalischen und chemischen Fragestellungen bearbeitbar machen.¹⁵⁸

Mittel- und langfristig erhoffen sich die Expertinnen und Experten mit Quantensimulationen **Durchbrüche** in der **Energiespeicherung und -verteilung, Arzneimittel- und Batterieforschung** oder der **Entwicklung neuer energiesparender Katalysatoren** (siehe Anwendungsbeispiele „Einsatzszenarien für Quantensimulatoren“).

156 | Die Verwendung der Begriffe Quantensimulation und Quantensimulatoren ist nicht einheitlich. Die Simulation eines Quantencomputers beziehungsweise der ihm zugrunde liegenden Qubits mit einem klassischen Computer kann auch zur Entwicklung von Algorithmen und Softwareanwendungen für Quantencomputing verwendet werden. Dies wird in einigen Fällen als Quantensimulation und entsprechende Plattformen als Quantensimulatoren bezeichnet. Von Expertinnen und Experten wird hierfür allerdings der Begriff Quantencomputer-Emulator bevorzugt (siehe „Verschiedene Ansätze zur Umsetzung eines Quantencomputers“, Seite 67). In diesem Abschnitt werden die Begriffe Quantensimulation und Quantensimulator nur verwendet, um die Simulation eines Quantensystems durch ein anderes Quantensystem zu bezeichnen (eben durch einen analogen Quantensimulator oder einen Quantencomputer).

157 | Vgl. Feynman 1982; High-Level Steering Committee 2017.

158 | Vgl. Eisert et al., 2017; Bloch 2018.

Einsatzszenarien für Quantensimulatoren

CO₂-Einsparung bei der Düngerproduktion: Die künstliche Herstellung von Dünger ist aufgrund ihres hohen Energiebedarfs für **2 bis 3 Prozent des weltweiten CO₂-Ausstoßes** verantwortlich. Der Hauptgrund dafür ist, dass zur Fixierung des Stickstoffs für den Dünger das sehr **energieintensive Haber-Bosch-Verfahren** angewandt werden muss. Supercomputer sind bislang an der Entwicklung **effizienter Katalysatoren** für diesen Prozess aufgrund der Komplexität der zugrunde liegenden Quanteneigenschaften der Materialien gescheitert. Quantensimulatoren versprechen hier **Durchbrüche durch die genaue Simulation der Reaktions-eigenschaften** potenzieller Kandidatenmoleküle wie Ferredoxin. Ließe sich die Energieintensität der Stickstofffixierung durch Ergebnisse von Quantensimulationen senken, würde dies einen wichtigen Beitrag zur **Vereinbarkeit von Ernährungssicherheit und Klimaschutz** bedeuten.

Schnellere Medikamentenentwicklung: Die Entwicklung neuer Medikamente ist **zeitaufwendig und teuer**. So liegen die Entwicklungskosten für ein neues Medikament oft bei mehreren Milliarden Euro. Heute können die **Interaktionen potenzieller Medikamente mit den Zielmolekülen** im Körper mit klassischen Supercomputern nur beschränkt vorhergesagt werden. Unter mehreren Tausend untersuchten Molekülen kommen am Ende nur einige wenige tatsächlich als Medikament infrage. Mit Quantensimulatoren lassen sich die relevanten quantenmechanischen Eigenschaften der Moleküle potenziell besser modellieren. Dies **beschleunigt die Auswahl guter Kandidatenmoleküle** für die klinische Entwicklung. Jeder Effizienzgewinn in der Medikamentenentwicklung trägt dazu bei, dass **mehr neue Medikamente**, gerade auch für bisher nicht oder nur schwer behandelbare Krankheiten, entwickelt werden können und diese **schneller zu den Patientinnen und Patienten** kommen.

Es gilt allerdings zu beachten, dass sich diese Beispielanwendungen auch mit **Quantencomputern** verwirklichen lassen.

9.1 Stand der Forschung und der kommerziellen Anwendung

Das Gebiet der Quantensimulation hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt, wobei deutsche Forschungsgruppen international eine Spitzenposition einnehmen. Dennoch ist es noch nicht möglich, mit den derzeitigen Quantensimulatoren wirtschaftlich relevante Fragen zu beantworten. Kernherausforderungen für die weitere Entwicklung sind die Skalierung zu größeren Quantensystemen und die gleichzeitige Vereinfachung der Bedienung.

Die **Forschung im Gebiet der Quantensimulationen** hat sich in den letzten zehn Jahren rasch weiterentwickelt und **große Fortschritte** erzielt. Dies belegt auch die rasante **Zunahme wissenschaftlicher Publikationen** in diesem Bereich (siehe Abbildung 18).¹⁵⁹

Es befinden sich derzeit **mehrere Plattformen für Quantensimulatoren** in der Entwicklung, die sich zum Teil mit den Grundkonzepten verschiedener Ansätze bei den Quantencomputern überschneiden:

- Ultrakalte gefangene Ionen
- Ultrakalte atomare oder molekulare Quantengase in optischen Gittern („Lattices“)
- Systeme aus supraleitenden Elementen und Resonatoren im Mikrowellenbereich
- Polaritonen- und Photonen-Kondensate, zum Beispiel in Halbleiter-Nanostrukturen
- Quantenpunkt-Netzwerke
- Photonische Plattformen aus diskreten optischen Elementen oder auch photonischen Gittern und Kristallen

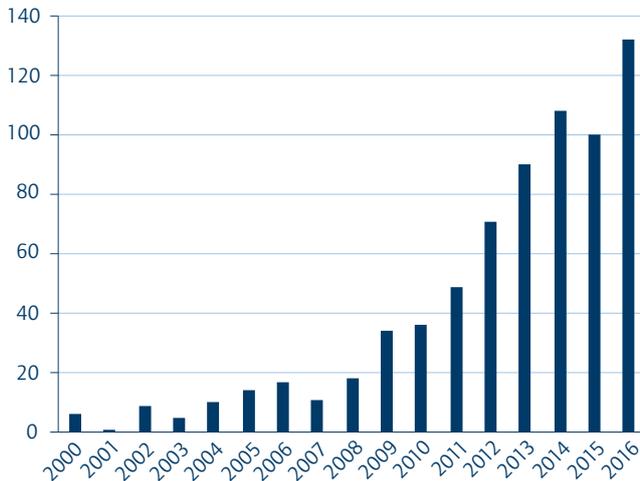
Die verschiedenen Plattformen haben **individuelle Stärken und Schwächen** und unterscheiden sich zum Beispiel bezüglich der Größe der simulierbaren Quantensysteme oder der Problemstellung, für die sie am besten geeignet sind.¹⁶⁰ Die Expertinnen und Experten gehen davon aus, dass auch mittel- und langfristig diese **Vielfalt der Plattformen aufgrund der unterschiedlichen Anwendungsprofile** erhalten bleiben und sich nicht ein einziges System durchsetzen wird.

159 | Vgl. Bornmann et al. 2019.

160 | Vgl. QUTEGA 2017.



Gesamtzahl der Publikationen im Bereich Quantensimulation



Publikationen im Bereich Quantensimulation nach Ländern (2012–2016)

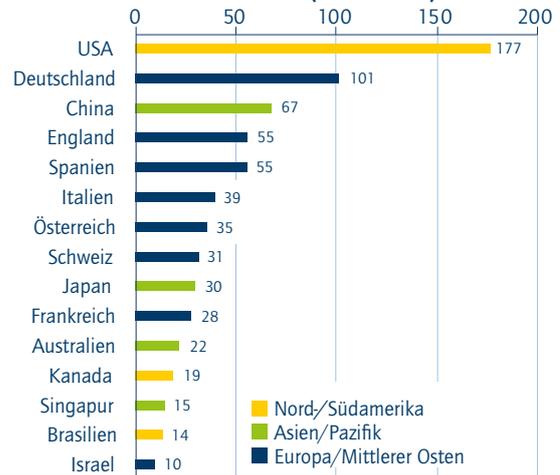


Abbildung 18: Zahl der Publikationen im Bereich Quantensimulation; Übersicht nach Ländern berücksichtigt nur Publikationen im Zeitraum 2012–2016 (Quelle: Bornmann et al. 2019)

Experimente mit noch sehr kleinskaligen Quantensimulatoren haben deren **grundlegende Anwendbarkeit** auf Probleme aus dem Bereich des **Quantenmagnetismus** oder der **Quantenchemie bereits belegt**.¹⁶¹

Die **Forscherinnen und Forscher in Deutschland** gehören im Bereich der Quantensimulationen zur **Weltspitze** (siehe auch Rang 2 bei Publikationen, Abbildung 18). Dementsprechend sind auch bei den Projekten zur Quantensimulation **im EU Flagship deutsche Institute federführend** beteiligt. Ein Beispiel ist PASQuanS (Programmable Atomic Large-Scale Quantum Simulation), das vom MPI für Quantenoptik geleitet wird. Es hat zum Ziel, die Leistung der momentan existierenden Quantensimulationsplattformen um den Faktor 10 bis 50 zu steigern und so einen „Quantenvorteil“ (siehe Kapitel 8.1) bei relevanten Fragestellungen zu erreichen.¹⁶²

„Viele der Fragestellungen, die im Zentrum der Anwendung eines Quantencomputers stehen, kann man auch mit einem Quantensimulator beantworten. Und das bereits deutlich früher.“

Herausforderungen

Bislang sind Quantensimulatoren **noch reine Laborexperimente**, mit denen vor allem Fragen aus der Grundlagenforschung in der Physik adressiert werden. Bevor mithilfe von Quantensimulation tatsächlich relevante Probleme gelöst werden können, bedarf es einer **Verbesserung der Feinkontrolle und Auslesbarkeit** bei gleichzeitiger **Erweiterung der Rechenkapazität** der Quantensysteme.

Die **größte ingenieurtechnische Herausforderung** für eine Kommerzialisierung ist die **Vereinfachung der Bedienbarkeit**. Derzeit müssen Quantensimulatoren noch nach jeder einzelnen Simulation **rekalibriert** werden, wozu es **umfangreicher Fachkenntnisse** bedarf. Insbesondere wenn der Quantensimulator für **verschiedene Fragestellungen** genutzt werden soll, geht dies mit einer **aufwendigen Rekonfiguration** der Hardware einher. Außerdem muss an der **Miniaturisierung** der benötigten Komponenten gearbeitet werden, wenn diese nicht nur in Forschungslaboren zum Einsatz kommen sollen.

Bereits angelaufene Projekte, wie PASQuanS, können einen Beitrag leisten, diese **Brücken von proof-of-concept hin zu**

161 | Vgl. Argüello-Luengo et al. 2018; Spektrum der Wissenschaft 2018.

162 | Vgl. MPQ 2018.

proof-of-value zu schlagen, und binden potenzielle Anwender mit ein, um relevante Anwendungsbeispiele zu identifizieren.¹⁶³

Eine weitere Herausforderung bei der Anwendung von Quantensimulatoren ist die **Überprüfung**, ob eine Quantensimulation **vertrauenswürdige Ergebnisse** liefert, wenn sie für Berechnungen verwendet wird, an denen klassische Supercomputer scheitern. Möglichkeiten zur quantenmathematischen Verifizierung und schließlich Zertifizierung eines Quantensimulators können sich beispielsweise durch **Weiterentwicklungen in der Quantentheorie** ergeben.¹⁶⁴

Bei **passenden Algorithmen** für die Quantensimulation sowie der **Verzahnung mit klassischen Computersystemen** besteht ebenfalls noch großer Entwicklungsbedarf.¹⁶⁵

Das High Level Steering Committee des EU Flagship schätzt, dass es in den **nächsten drei Jahren** möglich sein wird, mit Quantensimulatoren **einzelne Fragestellung aus der Physik** unter Laborbedingungen besser als mit einem Supercomputer zu lösen. Die Entwicklung von **Prototypen für die Quantensimulation in der Materialforschung** wird hingegen erst in etwa **zehn Jahren** erwartet.¹⁶⁶ Allerdings gehen die Meinungen der befragten Expertinnen und Experten zum Teil auseinander. So erwarten **einige** von ihnen **Anwendungen** im Bereich der Chemie und Materialforschung **bereits deutlich früher**, sind bei Fragen der Hochenergiephysik jedoch skeptisch.

9.2 Marktpotenziale und Wertschöpfungsketten

Für Quantensimulatoren wird ein großes Marktpotenzial gesehen, da sie in lukrativen und für Deutschland hochrelevanten Wirtschaftssektoren wichtige Durchbrüche versprechen. Quantensimulatoren könnten vor Quantencomputern marktreif werden, stehen aber langfristig in Konkurrenz zu ihnen. Bisher gibt es keine Hersteller und keine Wertschöpfungskette für Quantensimulatoren. Deutsche Firmen, auch noch zu gründende Start-ups, könnten hier Schlüsselstellen besetzen und zum Beispiel Quantensimulation as-a-Service anbieten.

Da sich das Feld der Quantensimulationen noch in einem **frühen Entwicklungsstadium** befindet und von einer kommerziellen Nutzung noch entfernt ist, ist es **schwierig, belastbare Aussagen über das Marktpotenzial** des Technologiefelds zu treffen.

Den Expertinnen und Experten zufolge sind **kommerzielle Anwendungen in der Materialforschung**, etwa bei Chemie-, Pharma- oder Automobilkonzernen, am wahrscheinlichsten. Dieser Bereich wird auch als ein Anwendungsszenario für Quantencomputer gesehen (siehe Kapitel 8). In Bezug auf Quantencomputer bewegen sich die Schätzungen für den **wirtschaftlichen Mehrwert**, den die **Anwendung in Materialwissenschaften und Pharmaforschung** bringen könnte, **in einer ersten Phase** (nächste drei bis fünf Jahre) zwischen **0,6 und 1,1 Milliarden USD** im Jahr.¹⁶⁷ Dementsprechend dürften potenzielle Nutzer bereit sein, auch signifikante Summen für entsprechende Dienstleistungen und Kapazitäten zu bezahlen. Die Expertinnen und Experten gehen davon aus, dass sich **Quantensimulatoren einen Teil dieses Marktes sichern** können, vor allem wenn sie vor Quantencomputern zur Marktreife gelangen.

Bei der **Realisierung kommerzieller Quantencomputer** besteht allerdings die Gefahr, dass der **Markt für Quantensimulatoren** relativ **schnell wieder schrumpfen** wird. Quantencomputer sind vielseitiger einsetzbar und können gleichzeitig auch die meisten Problemstellungen adressieren, die mit Quantensimulatoren bearbeitet werden.¹⁶⁸

Auch wenn die Anwendungsgebiete von Quantensimulatoren beschränkter als die des Quantencomputers sind, versprechen sie doch einen **signifikanten Wettbewerbsvorteil für Industrien**, die gerade in **Deutschland einen großen Stellenwert** haben. Deshalb sind mit der weiteren Entwicklung von Quantensimulatoren und einer möglichen Etablierung Deutschlands als **Leitmarkt und Leitanbieter** sehr große Chancen verbunden.

Wertschöpfungsketten

Die potenzielle Wertschöpfungskette für Quantensimulatoren gestaltet sich sehr **ähnlich wie Wertschöpfungsketten für Quantencomputer** (siehe Kapitel 8.2). Es bedarf der Bereitstellung von **Komponenten**, die oft mit denen für Quantencomputer identisch sind, sowie der **Produktion und Nutzbarmachung der eigentlichen Hardware**. Auch ein Quantensimulator benötigt eine Ebene

163 | Vgl. ebd.

164 | Vgl. QUTEQA 2017.

165 | Vgl. VDI Technologiezentrum GmbH 2017.

166 | Vgl. High-Level Steering Committee 2017.

167 | Vgl. BCG 2019.

168 | Vgl. Preskill 2018.



von System- und Steuerungselementen, auch wenn diese weniger komplex als bei Quantencomputern ausfällt.

Ferner sind **Softwareanwendungen** wie Algorithmen und maßgeschneiderte mathematische Modelle erforderlich, die auch ein **Zusammenspiel mit klassischen Supercomputern** ermöglichen. Hier könnten sich **Start-ups**, die solche Dienstleistungen bereits für Quantencomputer entwickeln, Anteile sichern, oder es könnten sich spezialisierte Anwender, die einen Fokus auf Quantensimulatoren legen, etablieren.

Analog zum Quantencomputer dürften sich die ersten **Geschäftsmodelle** für die komplex zu bedienenden Quantensimulatoren als „**as-a-Service**“-Modelle etablieren.

Bisher sehen die befragten Expertinnen und Experten **noch keine industrielle Aktivität** zur Kommerzialisierung von Quantensimulatoren. Diese **Lücke zu besetzen**, stellt eine **attraktive Option für deutsche Firmen und potenzielle Gründerinnen und Gründer** dar, da in Deutschland sowohl das relevante wissenschaftliche Know-how als auch eine große Zahl relevanter potenzieller Anwender vorhanden sind. Allerdings droht möglichen deutschen Anbietern Konkurrenz von Firmen, die bereits an der Entwicklung von Quantencomputern arbeiten und aufgrund ähnlicher Grundprinzipien relativ schnell auch eigene Quantensimulatoren entwickeln könnten.

„In Deutschland gibt es die besten Voraussetzungen, also die richtigen Köpfe und potenziellen Nutzer in der Großindustrie, um Quantensimulatoren schnell in die Anwendung zu bringen. Warum macht das keiner?“

Die **Diskussionen** über Potenziale und Anwendungsgebiete von Quantensimulatoren finden noch **innerhalb der akademischen**

Community statt. Auch deshalb sind sich potenzielle Anwender der Möglichkeiten oft **noch nicht bewusst** und legen ihren Fokus vor allem auf Quantencomputer. Hier könnte durch Veranstaltungen, wie zum Beispiel Showcase Events oder Wettbewerbe, eine bessere **Vernetzung von Entwicklern und Nutzern** vorangetrieben werden. Die Befragten gehen auch davon aus, dass gerade **Großkonzerne aus der Chemie- und Pharmaindustrie** mit kontinuierlichem Bedarf an Quantensimulationen verstärkt **interne Kapazitäten aufbauen** werden, sofern sie die damit verbundenen Potenziale verstanden haben.

9.3 Technologische Souveränität

Da es noch keine kommerziellen Anbieter von Quantensimulator-Hardware gibt, sind potenzielle deutsche oder europäische Anbieter in der Lage, strategische Abhängigkeiten erst gar nicht entstehen zu lassen.

Im **Gegensatz zum Quantencomputer** gibt es für Quantensimulatoren noch **keine etablierten Unternehmen**, die sich durch den Einsatz großer Mittel bereits **einen Entwicklungsvorsprung** verschafft haben. Deshalb besteht die Möglichkeit, dass Entwicklung und Kommerzialisierung von Quantensimulatoren von **deutschen oder europäischen Anbietern** vorangetrieben werden. In einem solchen Fall würde sich **keine mögliche Zugangsproblematik** im Bereich der Hardware, wie sie für Quantencomputer denkbar ist, entwickeln.

Eine **vertiefte Zusammenarbeit der europäischen Akteure** auch über das „EU Quantum Flagship“-Projekt PASQuaS hinaus mit dem klaren Ziel, kommerzielle Anwendungen zu entwickeln, kann hierfür ein erster Baustein sein.

9.4 Stärken- und Schwächenprofil Deutschlands sowie aktuelle Chancen und Risiken

Eine spezielle Übersicht über Stärken und Schwächen sowie Chancen und Risiken für den Standort Deutschland bei **Quantensimulatoren** erfolgt hier. Für eine allgemeine Übersicht über

die verschiedenen Technologiefelder der Quantentechnologien hinweg siehe Kapitel 3.3.

Stärken

- Viele deutsche Spitzenforschende
- Einsatzmöglichkeiten für führende deutsche Großunternehmen höchst relevant (zum Beispiel in der Automobil-, Chemie-, Pharmaindustrie)

Schwächen

- Keine Ausgründungen oder Angebote bestehender deutscher Unternehmen
- Wenig Wissen über Einsatzmöglichkeiten bei potenziellen Anwendern

Chancen

- Auch international noch keine Kommerzialisierungsaktivitäten: First-Mover-Advantage für deutsche Unternehmen und Start-ups noch erreichbar
- Wettbewerbsvorteil durch frühe Nutzung in vielen für Deutschland relevanten Branchen

Risiken

- Möglicherweise bei Realisierung des Quantencomputers obsolet; Zeithorizont hierbei unklar
- Quantenvorteil bislang noch nicht für wirtschaftlich relevante Fragestellungen bewiesen, Zeithorizont dafür ebenfalls unklar
- Verdrängung kleiner spezialisierter Anbieter durch schnelles Umsatteln der im Quantencomputing aktiven Großunternehmen, sobald Quantensimulation kommerziell interessant wird



Anhang

Im nachfolgenden **Glossar** sollen **zentrale technologische Begriffe der aktuellen Diskussion über Quantentechnologien** der ersten sowie der zweiten Generation erläutert werden. Das Glossar basiert auf Definitionen aus mehreren Quellen aus der Fachliteratur und von offiziellen Stellen.¹⁶⁹ Es folgen weiterführende Informationen zum Thema Quantencomputing.

Anhang A: Quanten-Glossar

Ionenfalle: Elektrische und magnetische Felder sorgen in Ionenfallen dafür, dass die Ionen, also elektrisch geladene Atome oder Moleküle, festgehalten werden. Es gibt alternativ auch die Möglichkeit, sämtliche Ionen bereits in einer Falle vorrätig zu halten und durch die Veränderung der Felder den Ionen-Vorrat gezielt massenaufgetrennt zu scannen. Sie sind eine der möglichen Grundlagen für Quantencomputer.

Kohärenz: In der Physik bezeichnet Kohärenz die Eigenschaft von Wellen, dass sich deren Auslenkung zeitlich bis auf eine Phasenverschiebung auf dieselbe Weise ändert. Als Folge der Kohärenz kann bei der Überlagerung von Wellen stationäre Interferenz sichtbar werden. Liegt eine gewünschte Form der Kohärenz nicht vor, so spricht man in diesem Zusammenhang von Inkohärenz. Das Phänomen, das zur unvollständigen oder vollständigen Unterdrückung der Kohärenzeigenschaften quantenmechanischer Zustände führt, nennt man Dekohärenz.

NISQ: Steht für „Noisy Intermediate-Scale Quantum“ und beschreibt quantencomputerähnliche Geräte der aktuellen Ära, die noch sehr stör anfällig sind und auf denen nur eingeschränkt Algorithmen angewandt werden können. Ein großer Teil ihrer Rechenleistung muss deshalb zur Fehlerkorrektur eingesetzt werden. Sie finden Anwendung in der Quantensimulation.

No-Cloning-Theorem: Es besagt, dass ein unbekannter Quantenzustand, so auch ein Qubit, nicht perfekt kopiert oder gelöscht werden kann. Dadurch unterscheidet sich die Verarbeitung von Quanteninformation grundlegend von der klassischen Informationsverarbeitung.

NV-Zentrum: Aus dem Englischen „nitrogen-vacancy center in diamond“, im Deutschen auch Stickstoff-Fehlstellenzentrum

genannt. NV-Zentren in Diamanten zählen zu den prominentesten Kandidaten für den Einsatz als nanoskaliger Magnetfeldsensor für die Anwendung in der Medizin oder als Emittent in einer Einzelphotonenquelle bei Raumtemperatur. Mögliche Anwendungen liegen beispielsweise in Quantencomputer-Systemen und der Quantenkryptografie.

Quant: Die kleinste Einheit, um die sich bestimmte Größen (etwa die Energie) eines Quantensystems ändern können. Max Planck und Albert Einstein haben zum Beispiel gezeigt, dass Licht nur in Paketen auftritt, sogenannten Photonen.

Qubit: Ist die gängige Abkürzung für Quantenbit, die grundlegende Informationseinheit eines Quantencomputers. Klassischen Computern liegt das Bit zugrunde, das exakt zwei Zustände einnehmen kann (0 oder 1). Ein Qubit, hergestellt zum Beispiel aus einem Atom oder Photon, kann aber nicht nur 0 und 1, sondern gleichzeitig jeden Zustand annehmen, der ein Vektor des Betrags 1 ist, also eine Superposition.

Spin: Die Bezeichnung stammt aus dem Englischen, bedeutet übersetzt „Drehung“ oder „Drall“ und bezeichnet den Eigendrehimpuls von Teilchen. Wie die Masse ist der Spin eine unveränderliche innere Eigenschaft fundamentaler Teilchen. Die Messung der Veränderung von Spinzuständen bildet die Grundlage für quantensensorische und quantenmetrologische Anwendungen.

SQUID: Ist ein englisches Akronym für **superconducting quantum interference device** (auf Deutsch: supraleitende Quanteninterferenzeinheit). Ein SQUID ist ein Sensor, mit dem sehr präzise Messungen extrem geringer Magnetfeldänderungen durchgeführt werden können. SQUIDS werden beispielsweise im medizinischen Bereich eingesetzt.

Supraleiter: Supraleiter sind Materialien, deren elektrischer Widerstand (abrupt) auf null fällt, wenn sie eine bestimmte sehr niedrige Temperatur, die sogenannte Sprungtemperatur, unterschreiten. Entdeckt wurde die Supraleitung, ein makroskopischer Quantenzustand, 1911 von Heike Kamerlingh Onnes. Die Supraleitung wird zur Erzeugung starker Magnetfelder – zum Beispiel für Teilchenbeschleuniger, Kernfusionsreaktoren, Magnetresonanztomografie – sowie Mess- und Energietechnik eingesetzt. Zudem sind sie eine der möglichen Grundlagen für Quantencomputer. Aktuell laufen Forschungsprojekte zu Supraleitern bei Raumtemperatur, die bei Anwendungen den Wegfall von Kühlelementen ermöglichen würden.

169 | Vgl. Bruß 2003; Grumbling/Horowitz 2019; Krupansky 2018; Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2015.

Welle-Teilchen-Dualismus: Objekte der Quantenphysik können je nach Fragestellung gleichermaßen die Grundeigenschaften von klassischen Wellen sowie von klassischen Teilchen besitzen. Ein Beispiel hierfür ist Licht: Es scheint einerseits aus einzelnen Teilchen (Photonen) zu bestehen, deren Energie sich bestimmen

lässt. Andererseits kann anhand eines Doppelspaltexperiments nachgewiesen werden, dass sich zwei Lichtstrahlen verstärken oder auslöschen können. Dieses Phänomen ist nur durch den Wellencharakter des Lichts zu erklären.

Anhang B: Investitionen in Quantencomputing-Start-ups

Abbildung 19 zeigt eine tabellarische Übersicht über erfolgreich abgeschlossene Finanzierungsrunden für Quantencomputing-Start-ups bis einschließlich Mitte 2018.¹⁷⁰ Das heißt, die jüngst abgeschlossenen Finanzierungsrunden, beispielsweise von IQM

(finnisches Hardware-Start-up) und Heisenberg Quantum Simulations (deutscher Quantenalgorithmien-Entwickler), haben noch keine Berücksichtigung gefunden.¹⁷¹

Start-up	Land	Betrag (in Mio. USD)	Letzte Finanzierung	
D-Wave Systems	Kanada	205	1. Juni 2018	10,15 Mio. USD durch kanadische Regierung
Rigetti Computing	USA	119	28. März 2017	40 Mio. USD in Serie-B-Finanzierungsrunde
PsiQ	USA	65	-	-
Silicon Quantum Computing	Australien	60	August 2017	83 Mio. AUD Wagniskapital durch: Regierung von New South Wales (9 Mio. AUD), Universität von New South Wales (25 Mio. AUD), Commonwealth Bank of Australia (14 Mio. AUD), Telstra (10 Mio. AUD über zwei Jahre), Regierung von Australien (25 Mio. AUD über fünf Jahre)
Cambridge Quantum Computing	Vereinigtes Königreich	50	26. August 2015	50 Mio. USD Entwicklungskapital
1QBit	Kanada	35	28. November 2017	45 Mio. CAD Entwicklungskapital in Serie-B-Finanzierung
IonQ	USA	22	24. Februar 2017	20 Mio. USD in Serie-B-Finanzierung
Quantum Circuits	USA	18	13. November 2017	18 Mio. USD in Serie-A-Finanzierung
Alpine Quantum Computing	Österreich	12	8. Februar 2018	10 Mio. EUR Fördermittel
QC Ware	USA	8	5. Juli 2018	7 Mio. USD in Serie-A-Finanzierung
Optalysys	Vereinigtes Königreich	8	21. September 2017	3 Mio. GBP Seed-Finanzierung
Nextremer	Japan	5	8. August 2017	500 Mio. JPY Wagniskapital
Oxford Quantum Circuits	Vereinigtes Königreich	3	8. September 2017	2 Mio. GBP Wagniskapital

Abbildung 19: Investitionen in Quantencomputing-Start-ups (Quelle: BCG 2018c)

170 | Vgl. BCG 2018c.

171 | Vgl. High-Tech Gründerfonds 2019; IQM 2019.



Anhang C: Ansätze zur Realisierung eines Quantencomputers

Abbildung 20 bietet einen Überblick über Möglichkeiten der Realisierung eines Quantencomputers. Dabei wird auf die Funktionsweise, den Status quo, bestehende Barrieren, internationale

Hauptakteure sowie in Deutschland aktive Forschungsgruppen eingegangen.



Abbildung 20: Übersicht über verschiedene Ansätze zur Realisierung eines Quantencomputers (Quelle: eigene Darstellung basierend auf Birch 2018)

Anhang D: Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Gegenwärtige Position Deutschlands bei der Kommerzialisierung von Quantentechnologien im internationalen Vergleich	6
Abbildung 1: Gegenwärtige Position Deutschlands bei der Kommerzialisierung von Quantentechnologien im internationalen Vergleich	17
Abbildung 2: Exzellenzcluster mit Bezug zu Quantentechnologien der zweiten Generation in der jüngsten Runde der Exzellenzstrategie	23
Abbildung 3: EU-Quantentechnologie-Förderung im 7. Rahmenprogramm und Horizon2020 nach Land	23
Abbildung 4: Investitionen in Quantentechnologie-Unternehmen (2012–2018)	31
Abbildung 5: Gesamtzahl der Publikationen und Anteil der vielzitierten Publikationen im Bereich Quantentechnologien nach Ländern (2012–2016)	32
Abbildung 6: Zahl der angemeldeten Patentfamilien nach Ursprungsland des Anmelders für die Bereiche Quantencomputing, Quantenverschlüsselung (QKD) und Kaltatominterferometrie (angewandt in quantenbasierter Sensorik/Metrologie; Stand: August 2019)	33
Abbildung 7: Übersicht über Förderprogramme für Quantentechnologien der zweiten Generation	35
Abbildung 8: Hype-Zyklus Quantenmetrologie und Quantensensorik	50
Abbildung 9: Potenzielles Wertschöpfungsvolumen für unterschiedliche Anwendungen in den Bereichen quantenbasierter Sensorik/Imaging/Metrologie	51
Abbildung 10: Gesamtzahl der Publikationen im Bereich Quantenkommunikation/-kryptografie (2000–2016)	56
Abbildung 11: Schematische Darstellung einer QKD-gesicherten Kommunikation	59
Abbildung 12: Zahl der Publikationen im Bereich Quantencomputing; Übersicht nach Ländern berücksichtigt nur Publikationen im Zeitraum 2012–2016	65
Abbildung 13: Zahl angemeldeter Patentfamilien im Bereich Quantencomputing nach Anmelder (Stand 2017)	66
Abbildung 14: Projizierte Entwicklung des Marktpotenzials für Quantencomputer (2025–2050) mit Grund- und Positivszenarios	71
Abbildung 15: Potenzielle Anwendungen für Quantencomputer entlang der Wertschöpfungskette in der Chemieindustrie	72
Abbildung 16: Wertschöpfungssegmente im Quantencomputing-Ökosystem	73
Abbildung 17: Schematische Darstellung des Prinzips der Quantensimulation	76
Abbildung 18: Zahl der Publikationen im Bereich Quantensimulation; Übersicht nach Ländern berücksichtigt nur Publikationen im Zeitraum 2012–2016	78
Abbildung 19: Investitionen in Quantencomputing-Startups	83
Abbildung 20: Übersicht über verschiedene Ansätze zur Realisierung eines Quantencomputers	84



Literatur

Accenture 2018

Accenture: *Advancing Drug Discovery through quantum computing*, 2018. URL: <https://www.accenture.com/us-en/success-biogen-quantum-computing-advance-drug-discovery> [Stand: 29.11.2019].

Airbus 2019a

Airbus: *Airbus eröffnet Wettbewerb im Bereich Quantencomputing zur Transformation des Flugzeuglebenszyklus*, 2019.

Airbus 2019b

Airbus: *Airbus Quantum Computing Challenge*, 2019. URL: <https://www.airbus.com/innovation/tech-challenges-and-competitions/airbus-quantum-computing-challenge.html> [Stand: 29.11.2019].

Alpine Quantum Technologies 2019

Alpine Quantum Technologies: *New investors to support AQT*, 2019. URL: <https://www.aqt.eu/new-investors/> [Stand: 29.11.2019].

AMA 2019

Verband für Sensorik und Messtechnik: *Branchenstatistik 2018*, 2019. URL: <https://www.ama-sensorik.de/verband/brancheninformationen/branchenstatistik-2018/> [Stand: 29.11.2019].

Argüello-Luengo et al. 2018

Argüello-Luengo, J./González-Tudela, A./Shi, T./Zoller, P./Cirac, J. I.: *Analog quantum chemistry simulation*, 2018.

Arute et al. 2019

Arute, F./Arya, K./Babbush, R./Bacon, D./Bardin, J. C./Barends, R./Biswas, R./Boixo, S./Brandao, F. G. S. L./Buell, D. A./Burkett, B./Chen, Y./Chen, Z./Chiaro, B./Collins, R./Courtney, W./Dunsworth, A./Farhi, E./Foxen, B./Fowler, A./Gidney, C./Giustina, M./Graff, R./Guerin, K./Habegger, S./Harrigan, M. P./Hartmann, M. J./Ho, A./Hoffmann, M./Huang, T./Humble, T. S./Isakov, S. V./Jeffrey, E./Jiang, Z./Kafri, D./Kechedzhi, K./Kelly, J./Klimov, P. V./Knysh, S./Korotkov, A./Kostritsa, E./Landhuis, D./Lindmark, M./Lucero, E./Lyakh, D./Mandrà, S./McClean, J. R./McEwen, M./Megrant, A./Mi, X./Michielsen, K./Mohseni, M./Mutus, J./Naaman, O./Neeley, M./Neill, C./Niu, M. Y./Ostby, E./Petukhov, A./Platt, J. C./Quintana, C./Rieffel,

E. G./Roushan, P./Rubin, N. C./Sank, D./Satzinger, K. J./Smelyanskiy, V./Sung, K. J./Trevithick, M. D./Vainsencher, A./Villalonga, B./White, T./Yao, Z. J./Yeh, P./Zalcman, A./Neven, H./Martinis, J. M.: „Quantum supremacy using a programmable superconducting processor“. In: *Nature*, 574: 7779, 2019, S. 505–510.

Atos 2018

Atos: „Atos, Bayer und die RWTH Aachen beschleunigen medizinische Forschung mit Quantum-Computing“ (Pressemitteilung vom 07.11.2018). URL: https://atos.net/de/2018/pressemeldungen_2018_11_07/atos-bayer-und-die-rwth-aachen-beschleunigen-medizinische-forschung-mit-quantum-computing [Stand: 29.11.2019].

Australian Government Department of Defence 2018

Australian Government Department of Defence: „\$6 million injection into Quantum Technologies research“ (Pressemitteilung vom 25.01.2018). URL: <https://www.minister.defence.gov.au/minister/christopher-pyne/media-releases/6-million-injection-quantum-technologies-research> [Stand: 29.11.2019].

Australian Research Council 2019

Australian Research Council: „Quantum launch into the future“ (Pressemitteilung vom 15.02.2019). URL: <https://www.arc.gov.au/news-publications/media/media-releases/quantum-launch-future> [Stand: 29.11.2019].

BASF 2019

BASF: „BASF investiert in Quantencomputer-Startup Zapata Computing“ (Pressemitteilung vom 17.04.2019). URL: <https://www.basf.com/global/de/media/news-releases/2019/04/p-19-178.html> [Stand: 29.11.2019].

Bayerische Akademie der Wissenschaften 2019

Bayerische Akademie der Wissenschaften: „Das Quanteninternet kommt in Reichweite: Abhörsichere Kommunikation zwischen Quantencomputern realisiert“ (Pressemitteilung vom 24.10.2019). URL: <https://badw.de/die-akademie/presse/pressemitteilungen/pm-einzelartikel/detail/das-quanteninternet-kommt-in-reichweite-abhoersichere-kommunikation-zwischen-quantencomputern-reali.html> [Stand: 29.11.2019].

BCG 2017

The Boston Consulting Group: *A Framework for Deep-Tech Collaboration*, 2017. URL: <https://www.bcg.com/en-gb/publications/2017/digital-joint-venture-alliances-framework-deep-tech-collaboration.aspx> [Stand: 29.11.2019].

BCG 2018a

The Boston Consulting Group: *Chad Rigetti on the Race for Quantum Advantage*, 2018. URL: <https://www.bcg.com/publications/2018/chad-rigetti-race-quantum-advantage-interview-founder-ceo.aspx> [Stand: 29.11.2019].

BCG 2018b

The Boston Consulting Group: *The Coming Quantum Leap in Computing*, 2018. URL: <https://www.bcg.com/en-gb/publications/2018/coming-quantum-leap-computing.aspx> [Stand: 29.11.2019].

BCG 2018c

The Boston Consulting Group: *The Next Decade in Quantum Computing—and How to Play*, 2018. URL: <https://www.bcg.com/publications/2018/next-decade-quantum-computing-how-play.aspx> [Stand: 29.11.2019].

BCG 2019

The Boston Consulting Group: *Where Will Quantum Computers Create Value—and When?*, 2019. URL: <https://www.bcg.com/publications/2019/quantum-computers-create-value-when.aspx> [Stand: 29.11.2019].

Berke 2014

Berke, C.: *Ultrakalte Gase als Quantensimulatoren*, 02.07.2014.

Birch 2018

Birch: *Q-campus Background study*. In support of "Building a Q-Campus - Realising a Quantum Ecosystem in Delft", 2018.

Bloch 2018

Bloch, I.: „Quantum simulations come of age“. In: *Nature Physics*, 14: 12, 2018, S. 1159–1161.

BMBF 2017a

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Anwendungsszenarien der Quantenkommunikation*, 2017. URL: <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1343.html> [Stand: 29.11.2019].

BMBF 2017b

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Projekt: Neuartige Gehirn-Maschine Schnittstelle basierend auf Quantensensoren (BrainQSens)*, 2017.

BMBF 2017c

Bundesministerium für Bildung und Forschung: „Richtlinie zur Fördermaßnahme „Schlüsselkomponenten für Quantentechnologien“ im Rahmen des Förderprogramms „Photonik Forschung Deutschland““ (Pressemitteilung vom 11.05.2017). URL: <https://www.bmbf.de/foerderungen/bekanntmachung-1372.html> [Stand: 29.11.2019].

BMBF 2018

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt*. Rahmenprogramm der Bundesregierung, 2018.

BMBF 2019a

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Fortschrittsbericht zur Hightech-Strategie 2025*, 2019.

BMBF 2019b

Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Q.Link.X*, 2019. URL: <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/q-link.x> [Stand: 29.11.2019].

BMBF 2019c

Bundesministerium für Bildung und Forschung: „Kryptografie für das Auto der Zukunft“ (Pressemitteilung vom 11.10.2019). URL: <https://www.bmbf.de/de/kryptografie-fuer-das-auto-der-zukunft-9878.html> [Stand: 29.11.2019].

BMW 2019

BMW: *Ein Quantensprung für die Mobilität?*, 2019. URL: <https://www.bmwgroup.com/de/unternehmen/bmw-group-news/artikel/ein-quantensprung-fuer-die-mobilitaet.html> [Stand: 29.11.2019].

BMWi/BMBF 2019

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie/Bundesministerium für Bildung und Forschung: *Das Projekt GAIA-X – Eine vernetzte Dateninfrastruktur als Wiege eines vitalen, europäischen Ökosystems*, 2019.

Bornmann et al. 2019

Bornmann, L./Haunschild, R./Scheidsteger, T./Ettl, C.: „Quantum technology – a bibliometric analysis of a maturing research field“ 2019. 10.6084/m9.figshare.9731327 (https://figshare.com/articles/Quantum_technology_a_bibliometric_analysis_of_a_maturing_research_field/9731327/files/17427953.pdf).

**Boto et al. 2018**

Boto, E./Holmes, N./Leggett, J./Roberts, G./Shah, V./Meyer, S. S./Muñoz, L. D./Mullinger, K. J./Tierney, T. M./Bestmann, S./Barnes, G. R./Bowtell, R./Brookes, M. J.: „Moving magnetoencephalography towards real-world applications with a wearable system“. In: *Nature*, 555, 2018, 657-661.

Braxmeier et al. 2018

Braxmeier, C./Marquardt, C./Pürckhauer, J./Rasel, E. M./Roura, A./Schleich, W. P.: „Konzeptpapier zur Einrichtung eines DLR-Institutes zum Thema „Quantentechnologien in Raumfahrtanwendungen (DLR-QT)“ an der Universität Ulm“ 2018.

Brooks 2019

Brooks, M.: „Beyond quantum supremacy: the hunt for useful quantum computers“. In: *Nature*, 574: 7776, 2019, S. 19-21.

Bruß 2003

Bruß, D.: *Quanteninformation*. Turingmaschine, Komplexität, Superposition, Verschränkung, No-cloning-Prinzip, Bell'sche Ungleichung, Quantenteleportation, Quantenkryptographie, Quantencomputer, Quantenalgorithmen, Quantenspiele, Frankfurt am Main: Fischer-Taschenbuch-Verlag, 2003.

BSI 2019

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik: *Entwicklungsstand Quantencomputer v1.1*, 2019.

Buchmann et al. 2017

Buchmann, J./Braun, J./Demirel, D./Geihs, M.: „Quantum cryptography“. A view from classical cryptography. In: *Quantum Science and Technology*, 2 (2017) 020502: 2, 2017.

Canada NRC 2017

Canada NRC: *Quantum Canada*. Survey Overview, 2017.

Cao et al. 2019

Cao, Y./Romero, J./Olson, J. P./Degroote, M./Johnson, P. D./Kieferová, M./Kivlichan, I. D./Menke, T./Peropadre, B./Sawaya, N. P. D./Sim, S./Veis, L./Aspuru-Guzik, A.: „Quantum Chemistry in the Age of Quantum Computing“. In: *Chemical reviews*, 119: 19, 2019, S. 10856-10915.

Center for New American Security 2018

Center for New American Security: *Quantum Hegemony? China's Ambitions and the Challenge to U.S. Innovation Leadership*, 2018.

Chaste et al. 2012

Chaste, J./Eichler, A./Moser, J./Ceballos, G./Rurali, R./Bachtold, A.: „A nanomechanical mass sensor with yoctogram resolution“. In: *Nature nanotechnology*, 7: 5, 2012, S. 301-304.

CiViQ 2019

CiViQ: *ABOUT CiViQ*, 2019. URL: <https://civiquantum.eu/about-civiq/> [Stand: 29.11.2019].

Counterpoint Research 2019

Counterpoint Research: „Dell, HPE, Lenovo Lead as Cloud Server Market Surges to a US\$86 Billion in 2018“ (Pressemitteilung vom 05.05.2019). URL: <https://www.counterpointresearch.com/dell-hpe-lenovo-lead-cloud-server-market-surges-us86-billion-2018/> [Stand: 29.11.2019].

Daimler 2018

Daimler: *Daimler joins forces with Google to research the application of quantum computers.*, 2018. URL: <https://media.daimler.com/marsMediaSite/en/instance/ko/Daimler-joins-forces-with-Google-to-research-the-application-of-quantum-computers.xhtml?oid=34483890> [Stand: 29.11.2019].

DARPA 2013

Defense Advanced Research Projects Agency: *Quantum-Assisted Sensing and Readout (QuASAR)*, 2013. URL: <https://www.darpa.mil/program/quantum-assisted-sensing-and-readout> [Stand: 29.11.2019].

DARPA 2019

Defense Advanced Research Projects Agency: „Taking the Next Step in Quantum Information Processing“ (Pressemitteilung vom 27.02.2019). URL: <https://www.darpa.mil/news-events/2019-02-27> [Stand: 29.11.2019].

Deloitte 2018

Deloitte: *Technology, Media and Telecommunications Predictions 2019*, 2018.

Deutsche Telekom AG 2018

Deutsche Telekom AG: „Deutsche Telekom und SK Telecom unterzeichnen strategische Cross-Investment-Vereinbarung“ (Pressemitteilung vom 22.10.2018). URL: <https://www.telekom.com/de/medien/medieninformationen/detail/strategische-cross-investmentvereinbarung-549110> [Stand: 29.11.2019].

Deutscher Bundestag 2018

Deutscher Bundestag: *Drucksache 19/4645*, 2018.

Digital Assembly 2019

Digital Assembly: *Declaration of Cooperation*, 2019.

DLR 2015

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: „Erwin Schrödinger-Preis 2015: Quantenkryptographie hebt ab“ (Pressemitteilung vom 19.10.2015). URL: http://www.dlr.de/dlr/desktopdefault.aspx/tabid-10122/333_read-15527/year-2015/#/gallery/20972 [Stand: 29.11.2019].

DLR 2019

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: *BMBF und Forschung starten Großoffensive*, 2019. URL: https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2019/02/20190517_bmbf-und-forschung-starten-grossoffensive-fuer-quantenkommunikation.html [Stand: 29.11.2019].

Eisert et al., 2017

Eisert, J./Bloch, I./Lewenstein, M./Kuhr, S.: „Quantum Simulation“. In: Acín, A./Bloch, I./Buhrman, H./Calarco, T./Eichler, C./Eisert, J./Esteve, D./Gisin, N./Glaser, S. J./Jelezko, F./Kuhr, S./Lewenstein, M./Riedel, M. F./Schmidt, P. O./Thew, R./Wallraff, A./Walmsley, I./Wilhelm, F. K. (Hrsg.), *The European Quantum Technologies Roadmap 2017*, S. 12–16.

EPSRC 2019

Engineering and Physical Sciences Research Council: *Quantum technologies*, 2019. URL: <https://epsrc.ukri.org/research/our-portfolio/themes/quantumtech/> [Stand: 29.11.2019].

ERC 2019

European Research Council: *ERC Starting Grants 2019*, 2019.

ETSI 2018

Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen: *Quantum Key Distribution (QKD); Components and Internal Interfaces*, 2018.

EU-KOM 1995

Europäische Kommission: *Green Paper on Innovation*, 1995.

EU-KOM 2016

Europäische Kommission: *Commission Staff Working Document on Quantum Technologies*, 2016.

EU-KOM 2017

Europäische Kommission: *The Impact of Quantum Technologies on the EU's Future Policies*. Part 1 Quantum Time, Luxemburg, 2017.

EU-KOM 2019a

Europäische Kommission: *China*. Challenges and prospects from an industrial and innovation powerhouse, 2019.

EU-KOM 2019b

Europäische Kommission: *Open European Quantum Key Distribution Testbed*, 2019. URL: <https://cordis.europa.eu/project/rcn/224682/factsheet/en> [Stand: 29.11.2019].

EU-KOM 2019c

Europäische Kommission: *Patent analysis of selected quantum technologies*, 2019.

EU-KOM 2019

Europäische Kommission: „The future is quantum: EU countries plan ultra-secure communication network“ (Pressemitteilung vom 13.06.2019). URL: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/future-quantum-eu-countries-plan-ultra-secure-communication-network> [Stand: 29.11.2019].

EURAMET 2019

European Association of National Metrology Institutes: *Support for a European Metrology Network on Quantum Technologies*, 2019.

Executive Office of the President of the United States 2018

Executive Office of the President of the United States: *National strategic overview for quantum information science*, 2018.

FAZ 2017

Frankfurter Allgemeine Zeitung: *Internet 4.0: Quantencodes spuken aus dem All*, 2017. URL: <https://www.faz.net/aktuell/wissen/physik-mehr/internet-4-0-quantencodes-spukent-jetzt-auch-zwischen-pekung-und-wien-15227444.html> [Stand: 29.11.2019].

Feynman 1982

Feynman, R. P.: „Simulating physics with computers“. In: *International Journal of Theoretical Physics*, 21: 6-7, 1982, S. 467–488.



FieldLine Inc. 2019

FieldLine Inc.: *Magnetic sensing and imaging solutions*, 2019. URL: <http://fieldlineinc.com/> [Stand: 29.11.2019].

Financial Times 2018

Financial Times: *Quantum computing: the power to think outside the box*, 2018. URL: <https://www.ft.com/content/154a1cf4-ad07-11e8-94bd-cba20d67390c> [Stand: 29.11.2019].

Financial Times 2019

Financial Times: *British quantum computing experts leave for Silicon Valley*, 2019. URL: <https://www.ft.com/content/afc27836-9383-11e9-aea1-2b1d33ac3271> [Stand: 29.11.2019].

FNSNF 2019

Swiss National Science Foundation: *Guide 2019*. National Centres of Competence in Research, 2019.

Foreign Affairs 2018

Foreign Affairs: *China's Quantum Future*, 2018. URL: <https://www.foreignaffairs.com/articles/china/2018-09-26/chinas-quantum-future> [Stand: 29.11.2019].

Forschungszentrum Jülich 2019

Forschungszentrum Jülich: „Quantencomputer: Forschungszentrum Jülich und Google vereinbaren Partnerschaft“ (Pressemitteilung vom 08.07.2019). URL: <https://www.fzjuelich.de/Shared-Docs/Pressemitteilungen/UK/DE/2019/2019-07-08-quantencomputer-fzj-google.html?nn=364280> [Stand: 29.11.2019].

Forschungszentrum Jülich 2019

Forschungszentrum Jülich: „Launch of JUNIQ“ (Pressemitteilung vom 25.10.2019). URL: https://www.fzjuelich.de/portal/EN/Press/PressReleases/2019/2019-10-25-juniq/_node.html [Stand: 29.11.2019].

Forteza et al. 2020

Forteza, P./Herteman, J.-P./Kerenidis, I.: *Quantique: Le Virage Technologique que la France ne rateras pas*, 2020.

Fraunhofer HHI 2018

Fraunhofer-Institut für Nachrichtentechnik, Heinrich-Hertz-Institut, HHI: „Fraunhofer HHI entwickelt Quantenkommunikation für jedermann im EU-Projekt UNIQORN“ (Pressemitteilung vom 16.08.2018). URL: <https://www.hhi.fraunhofer.de/presse-medien/nachrichten/2018/fraunhofer-hhi-entwickelt-quantenkommunikation-fuer-jedermann-im-eu-projekt-uniqorn.html> [Stand: 29.11.2019].

Fraunhofer SIT 2019

Fraunhofer-Institut für Sichere Informationstechnologie: *QuantumRISC*, 2019. URL: <https://www.sit.fraunhofer.de/quantumrisc/> [Stand: 29.11.2019].

Fraunhofer-Gesellschaft 2019a

Fraunhofer-Gesellschaft: „German ministry and research sector join forces to launch major quantum communications initiative“ (Pressemitteilung vom 17.05.2019). URL: <https://www.fraunhofer.de/en/press/research-news/2019/may/german-ministry-and-research-sector-join-forces-to-launch-major-quantum-communications-initiative.html> [Stand: 29.11.2019].

Fraunhofer-Gesellschaft 2019b

Fraunhofer-Gesellschaft: „IBM und Fraunhofer treiben mit einer gemeinsamen Initiative Quantencomputing in Europa voran“ (Pressemitteilung vom 11.09.2019). URL: https://www.fraunhofer.de/content/dam/zv/de/presse-medien/2019/September/pi34_Erste-Installation-eines-physischen-IBM-Quanten-Computers-in-Europa.pdf [Stand: 29.11.2019].

Gibney 2019

Gibney, E.: „Quantum gold rush: the private funding pouring into quantum start-ups“. In: *Nature*, 574: 7776, 2019, S. 22-24.

Global Risk Institute 2019

Global Risk Institute: *Quantum Threat Timeline Report*, 2019.

Gooch & Housego et al. 2018

Gooch & Housego/Milner Strategic Marketing/University of Bristol: *The UK Market for Quantum Enabling Photon Sources 2018-2022*, 2018.

Grumbling/Horowitz 2019

Grumbling, E./Horowitz, M.: *Quantum Computing*. Progress and Prospects, Washington, D.C.: National Academies Press, 2019.

Heisenberg 1927

Heisenberg, W.: „Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik“. In: *Zeitschrift für Physik*, 43: 3, 1927, S. 172–198.

High-Level Steering Committee 2017

High-Level Steering Committee: *Quantum Technologies Flagship Final Report*, 2017.

High-Tech Gründerfonds 2019

High-Tech Gründerfonds: „HQS Quantum Simulations schließt Seed-Finanzierungsrunde ab“ (Pressemitteilung vom 21.10.2019). URL: https://high-tech-gruenderfonds.de/de/hqs-quantum-simulations-schliesst-seed-finanzierungsrunde-ab/?utm_source=HTGF+Pressemitteilungen&utm_campaign=1191a462ef-EMAIL_CAMPAIGN_2019_10_18_01_19&utm_medium=email&utm_term=0_4d43e2f40a-1191a462ef89098405 [Stand: 29.11.2019].

Homeland Security Research 2017

Homeland Security Research: *The U.S. and China "Quantum Computing Arms Race" Will Change Long-Held Dynamics in Commerce, Intelligence, Military Affairs and Strategic Balance of Power*, 2017. URL: <https://homelandsecurityresearch.com/u-s-china-quantum-computing-arms-race-will-change-long-held-dynamics-commerce-intelligence-military-affairs-strategic-balance-power/> [Stand: 29.11.2019].

IARPA 2019

Intelligence Advanced Research Projects Activity: *Quantum Programs at IARPA*, 2019. URL: <https://www.iarpa.gov/index.php/research-programs/quantum-programs-at-iarpa> [Stand: 29.11.2019].

IBM 2018

IBM: „IBM und die Universität der Bundeswehr München starten IBM Q Hub“ (Pressemitteilung vom 12.07.2018). URL: <https://www-03.ibm.com/press/de/de/pressrelease/54152.wss#release> [Stand: 29.11.2019].

IBM 2019

IBM: *IBM Unveils Beta of Next Generation Quantum Development Platform*, 2019. URL: <https://www.ibm.com/blogs/research/2019/05/next-gen-ibmqx/> [Stand: 29.11.2019].

IBM 2019a

IBM: *On "Quantum Supremacy"*, 2019. URL: <https://www.ibm.com/blogs/research/2019/10/on-quantum-supremacy/> [Stand: 29.11.2019].

IBM 2019b

IBM: *The IBM Q Network*, 2019. URL: <https://www.research.ibm.com/ibm-q/network/members/> [Stand: 29.11.2019].

Infineon Technologies AG 2017

Infineon Technologies AG: „Gewappnet für die Zukunft: Infineon demonstriert erste Post-Quantum-Kryptographie auf einem kontaktlosen Sicherheitschip“ (Pressemitteilung vom 30.05.2017). URL: <https://www.infineon.com/cms/de/about-infineon/press/press-releases/2017/INFCCS201705-056.html> [Stand: 29.11.2019].

InfiniQuant 2019

InfiniQuant: *Secure quantum telecom*, 2019. URL: <http://infini-quant.com/> [Stand: 29.11.2019].

Innovate UK and the Engineering and Physical Science Research Council 2015

Innovate UK and the Engineering and Physical Science Research Council: *UK National Quantum Technologies Programme*. National Strategy for Quantum Technologies, 2015.

Inside Quantum Technology 2018

Inside Quantum Technology: „Quantum Sensor Revenues to Reach Over \$1 Billion by 2023: New Inside Quantum Technology Report Reveals Market Sizing and Strategies for Quantum Sensor Age“ (Pressemitteilung vom 18.09.2018). URL: <https://www.globenewswire.com/news-release/2018/09/18/1572606/0/en/Quantum-Sensor-Revenues-to-Rreach-Over-1-Billion-by-2023-New-Inside-Quantum-Technology-Report-Reveals-Market-Sizing-and-Strategies-for-Quantum-Sensor-Age.html> [Stand: 29.11.2019].

Inside Quantum Technology 2019a

Inside Quantum Technology: *Post-Quantum Cryptography: A Ten-Year Market and Technology Forecast*, 2019. URL: <https://www.insidequantumtechnology.com/product/post-quantum-cryptography-ten-year-forecast/> [Stand: 29.11.2019].

Inside Quantum Technology 2019

Inside Quantum Technology: *Quantum Repeater Markets*, 2019. URL: <https://www.insidequantumtechnology.com/infographic/quantum-repeater-markets/> [Stand: 29.11.2019].



IQM 2019

IQM: *IQM secures US\$13M Seed Round for Quantum Computing*, 2019. URL: <https://www.meetiqm.com/2019/07/09/iqm-secures-unprecedented-usd13m-seed-round-for-quantum-computing/> [Stand: 29.11.2019].

Knight/Walmsley 2019

Knight, P./Walmsley, I.: „UK national quantum technology programme“. In: *Quantum Science and Technology*, 4: 4, 2019, S. 40502.

Krupansky 2018

Krupansky, J.: *Quantum Computing Glossary – Introduction*, 2018. URL: <https://medium.com/@jackkrupansky/quantum-computing-glossary-introduction-2414aa510854> [Stand: 29.11.2019].

Kühn et al. 2019

Kühn, M./Zanker, S./Deglmann, P./Marthaler, M./Weiß, H.: „Accuracy and Resource Estimations for Quantum Chemistry on a Near-term Quantum Computer“. In: *Journal of Chemical Theory and Computation*, 15: 9, 2019, S. 4764–4780.

macQsimal 2019

macQsimal: *About macQsimal*, 2019. URL: <https://www.macqsimal.eu/> [Stand: 29.11.2019].

Market Media Research 2019

Market Media Research: *Quantum Computing Market Forecast 2020-2025*, 2019.

Markets and Markets 2017

Markets and Markets: *Quantum Computing Market Worth 495.3 Million USD by 2023*, 2017. URL: <http://www.prnewswire.com/news-releases/quantum-computing-market-worth-4953-million-usd-by-2023-639443813.html> [Stand: 29.11.2019].

Markets and Markets 2019

Markets and Markets: *Quantum Cryptography Market by Solutions & Services - Global Forecast to 2023*, 2019. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/Market-Reports/quantum-cryptography-market-45857130.html> [Stand: 29.11.2019].

Marr 2017

Marr, B.: *How Quantum Computers Will Revolutionize Artificial Intelligence, Machine Learning And Big Data*, 2017. URL: <https://www.forbes.com/sites/bernardmarr/2017/09/05/how-quantum-computers-will-revolutionize-artificial-intelligence-machine-learning-and-big-data/#45a5a1115609> [Stand: 29.11.2019].

Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerb 2019

Max-Planck-Institut für Innovation und Wettbewerb: *Berechnungen zu Patentfamilien in verschiedenen Feldern der Quantentechnologien*. Datenquelle: DOCDB-Datenbank des Europäischen Patentamtes (August 2019), 2019.

McKinsey & Company 2019

McKinsey & Company: *The next big thing? Quantum computing's potential impact on chemicals*, 2019.

Merck 2019

Merck: „Merck and HQS Quantum Simulations Cooperate in Quantum Computing“ (Pressemitteilung vom 04.06.2019). URL: <https://www.merckgroup.com/en/news/quantum-computing-04-06-2019.html> [Stand: 29.11.2019].

MIT Technology Review 2018a

MIT Technology Review: *Google thinks it's close to "quantum supremacy." Here's what that really means.*, 2018. URL: <https://www.technologyreview.com/s/610274/google-thinks-its-close-to-quantum-supremacy-heres-what-that-really-means/> [Stand: 29.11.2019].

MIT Technology Review 2018b

MIT Technology Review: *Serious quantum computers are finally here. What are we going to do with them?*, 2018. URL: <https://www.technologyreview.com/s/610250/serious-quantum-computers-are-finally-here-what-are-we-going-to-do-with-them/> [Stand: 29.11.2019].

MIT Technology Review 2019a

MIT Technology Review: *Explainer: What is quantum communication?*, 2019. URL: <https://www.technologyreview.com/s/612964/whatis-quantum-communications/> [Stand: 29.11.2019].

MIT Technology Review 2019b

MIT Technology Review: *We'd have more quantum computers if it weren't so hard to find the damn cables*, 2019. URL: <https://www.technologyreview.com/s/612760/quantum-computers-component-shortage/> [Stand: 29.11.2019].

Mohseni et al. 2017

Mohseni, M./Read, P./Neven, H./Boixo, S./Denchev, V./Babbush, R./Fowler, A./Smelyanskiy, V./Martinis, J.: „Commercialize quantum technologies in five years“. In: *Nature*, 543: 7644, 2017, S. 171-174.

MPG 2019

Max-Planck-Gesellschaft: *Ein Impuls für abhörsichere Quantenkommunikation*. Das BMBF will der QuNet-Initiative 165 Millionen Euro zur Verfügung stellen, 2019. URL: <https://www.mpg.de/13488883/qunet-quantenkommunikation-quantenkryptografie> [Stand: 29.11.2019].

MPQ 2018

Max-Planck-Institut für Quantenoptik: „European Commission funds the next-generation platform for quantum simulation with cold atoms (PASQuaS project)“ (Pressemitteilung vom 29.10.2018). URL: https://www.mpq.mpg.de/5739232/18_10_29_PASQuaS [Stand: 29.11.2019].

Muquans 2019

Muquans: *Absolute Quantum Gravimeter*, 2019. URL: <https://www.muquans.com/product/absolute-quantum-gravimeter/> [Stand: 29.11.2019].

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina et al. 2015

Nationale Akademie der Wissenschaften Leopoldina/acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften/Union der Deutschen Akademien der Wissenschaften: *Perspektiven der Quantentechnologien*, Halle (Saale)/München/Mainz, 2015.

NCCR-QSIT 2018

National Centre of Competence in Research 'QSIT - Quantum Science and Technology': *Equal Opportunity*, 2018. URL: <https://nccr-qsit.ethz.ch/equal-opportunity.html> [Stand: 29.11.2019].

NIST 2017

National Institute of Standards and Technology: *Post-Quantum Cryptography | CSRC*, 2017. URL: <https://csrc.nist.gov/Projects/Post-Quantum-Cryptography> [Stand: 29.11.2019].

NIST 2018

National Institute of Standards and Technology: „NIST Launches Consortium to Support Development of Quantum Industry“ (Pressemitteilung vom 28.09.2018). URL: <https://www.nist.gov/news-events/news/2018/09/nist-launches-consortium-support-development-quantum-industry> [Stand: 29.11.2019].

ÖBMWFW 2017

Österreichisches Bundesministerium für Forschung, Wissenschaft und Wirtschaft: *National Quantum Technology Initiatives: Austria*, 2017.

OpenSuperQ 2018

OpenSuperQ: *A Quantum Computer for Europe*, 2018. URL: <http://opensuperq.eu/> [Stand: 29.11.2019].

opticlock 2019

opticlock: *Informationen zum BMBF Projekt opticlock*, 2019. URL: <https://www.opticlock.de/info/> [Stand: 29.11.2019].

Persistence Market Research 2017

Persistence Market Research: *Global Quantum Computing Market is Expected to Reach US\$ 23 Bn by 2025 - PMR's Study*, 2017. URL: <https://www.prnewswire.com/news-releases/global-quantum-computing-market-is-expected-to-reach-us-23-bn-by-2025-pmrs-study-636708523.html> [Stand: 29.11.2019].

Peruzzo et al. 2014

Peruzzo, A./McClean, J./Shadbolt, P./Yung, M.-H./Zhou, X.-Q./Love, P. J./Aspuru-Guzik, A./O'Brien, J. L.: „A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor“. In: *Nature communications*, 5, 2014, S. 4213.

PhotonicsViews 2016

PhotonicsViews: *Ghost Imaging in the Time Domain*, 2016. URL: <http://www.photonicsviews.com/ghost-imaging-in-the-time-domain/> [Stand: 29.11.2019].



Preskill 2018

Preskill, J.: „Quantum Computing in the NISQ era and beyond“. In: *Quantum*, 2, 2018, S. 79.

PTB 2019

Physikalisch-Technische Bundesanstalt: *Das neue System der Einheiten*, 2019. URL: <https://www.ptb.de/cms/forschung-entwicklung/herausforderungen-und-perspektiven/das-neue-system-der-einheiten.html> [Stand: 29.11.2019].

Q.Link.X 2019

Q.Link.X: *Was ist Q.Link.X?*, 2019. URL: <https://qlinkx.de/was-ist-qlinkx/> [Stand: 29.11.2019].

QuantiCor Security 2019

QuantiCor Security: *Quantencomputer-resistente Sicherheitslösungen*, 2019. URL: <https://quanticor-security.de/> [Stand: 29.11.2019].

Quantum Alliance 2019

Quantum Alliance: *Quantum-Alliance*, 2019. URL: <https://quantum-alliance.de/> [Stand: 29.11.2019].

Quantum Delta Nederland 2019

Quantum Delta Nederland: *National Agenda for Quantum Technology*, 2019.

Quantum Flagship 2019

Quantum Flagship: *Strategic Research Agenda DRAFT*, 2019.

QuSoft 2019

QuSoft: *Bosch and QuSoft start quantum computing collaboration*, 2019. URL: <http://www.qusoft.org/bosch-and-qusoft-start-quantum-computing-collaboration/> [Stand: 29.11.2019].

QuTech 2015

QuTech: *The Netherlands invests €135 million in quantum technology*, 2015. URL: <https://qutech.nl/investmentquantum-technology/> [Stand: 29.11.2019].

QUTEGA 2017

Nationalen Initiative zur Förderung der Quantentechnologie von Grundlagen bis Anwendungen: *Quantentechnologie - Grundlagen und Anwendungen*. Konzeptpapier der Nationalen Initiative zur Förderung der Quantentechnologie von Grundlagen bis Anwendungen (QUTEGA), 2017.

Raymer/Monroe 2019

Raymer, M. G./Monroe, C.: „The US National Quantum Initiative“. In: *Quantum Science and Technology*, 4: 2, 2019, S. 20504.

Richter 2018

Richter, W.: „Dieser Apparat könnte bald Ihr Bankkonto knacken“. In: *GEO*, 2018: 5, 2018, S. 115-126.

Riedel et al. 2018

Riedel, M. F./Bloch, I./Debuisschert, T./Wilhelm-Mauch, F./Pruneri, V./Vitanov, N. V./Wehner, S./Calarco, T.: „Europe's Quantum Flagship is taking off“. In: *Europhysics News*, 49: 5-6, 2018, S. 30-34.

Riedel et al. 2019

Riedel, M./Kovacs, M./Zoller, P./Mlynek, J./Calarco, T.: „Europe's Quantum Flagship initiative“. In: *Quantum Science and Technology*, 4: 2, 2019, S. 20501.

Rigetti Computing 2018

Rigetti Computing: *The Rigetti Quantum Advantage Prize*, 2018. URL: <https://medium.com/rigetti/the-rigetti-quantum-advantage-prize-8976492c5c64> [Stand: 29.11.2019].

Roberson/White 2019

Roberson, T. M./White, A. G.: „Charting the Australian quantum landscape“. In: *Quantum Science and Technology*, 4: 2, 2019, S. 20505.

Schmidt et al. 2018

Schmidt, P./Schwienbacher, D./Pernpeintner, M./Wulschner, F./Deppe, F./Marx, A./Gross, R./Huebl, H.: „Ultrawide-range photon number calibration using a hybrid system combining nano-electromechanics and superconducting circuit quantum electrodynamics“. In: *Applied Physics Letters*, 113: 15, 2018, S. 152601.

Schrödinger 1935

Schrödinger, E.: „Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik“. In: *Naturwissenschaften*, 23: 48, 1935, S. 807-812.

Shor 1997

Shor, P. W.: „Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer“. In: *SIAM Journal on Computing*, 26: 5, 1997, S. 1484-1509.

Siegner/Göbel 2019

Siegner, U./Göbel, E. O.: *The New International System of Units (SI)*. Quantum Metrology and Quantum Standards: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2019.

Spektrum der Wissenschaft 2017

Spektrum der Wissenschaft: „Verrückter Quanteneffekt erneut experimentell bestätigt“. Physiker schließen ein Schlupfloch für ein von Einstein als „spukhafte Fernwirkung“ abgelehntes Phänomen. In: *Spektrum-Die Woche*: 15, 2017.

Spektrum der Wissenschaft 2018

Spektrum der Wissenschaft: „Quantensimulatoren auf der Überholspur“. In: *Forschung aktuell*: 1.18, 2018, S. 28-30.

Stebila/Mosca 2017

Stebila, D./Mosca, M.: *Post-Quantum Key Exchange for the Internet and the Open Quantum Safe Project*, McMaster University: Ontario, 2017.

Sussman et al. 2019

Sussman, B./Corkum, P./Blais, A./Cory, D./Damascelli, A.: „Quantum Canada“. In: *Quantum Science and Technology*, 4: 2, 2019, S. 20503.

Swiss National Science Foundation 2019

Swiss National Science Foundation: *The National Centres of Competence in Research NCCRs*. Research in networks, 2019.

TU Delft Quantum Vision Team 2019

TU Delft Quantum Vision Team: *Quantum Internet*. The internet's big step, 2019.

UK National Quantum Technology Hub Sensors and Metrology 2018

UK National Quantum Technology Hub Sensors and Metrology: *Outline of quantum sensors technology roadmap*. 2018, 2018.

UK Research and Innovation 2018

UK Research and Innovation: *The past, present and future of the UK's quantum industry*, 2018. URL: <https://www.ukri.org/innovation/industrial-strategy-challenge-fund/quantum-technologies/the-past-present-and-future-of-the-uks-quantum-industry/> [Stand: 29.11.2019].

UK Research and Innovation 2019a

UK Research and Innovation: *2020 quantum prototype will help engineers see underground*, 2019. URL: <https://www.ukri.org/innovation/industrial-strategy-challenge-fund/quantum-technologies/2020-quantum-prototype-will-help-engineers-see-underground/> [Stand: 29.11.2019].

UK Research and Innovation 2019b

UK Research and Innovation: „The Next Leap Forward' – Four Quantum Technologies Hubs to lead UK's research" (Pressemitteilung vom 07.11.2019). URL: <https://www.ukri.org/news/the-next-leap-forward-four-quantum-technologies-hubs-to-lead-uks-research-drive/> [Stand: 29.11.2019].

Universität Bonn 2019

Universität Bonn: *Q.Link.X – Universität Bonn*, 2019. URL: <https://www.uni-bonn.de/forschung/Drittmittel%20und%20Projekte/bmbf-verbundprojekte/Quanten%20Repeater-Plattform> [Stand: 29.11.2019].

VDI Technologiezentrum GmbH 2017

VDI Technologiezentrum GmbH: *Förderung von Quantentechnologien*. Positionspapier der Deutschen Industrie, Düsseldorf, 2017.

Vermaas 2017

Vermaas, P. E.: „The societal impact of the emerging quantum technologies: a renewed urgency to make quantum theory understandable“. In: *Ethics and Information Technology*, 19: 4, 2017, S. 241-246.

Volkswagen AG 2017

Volkswagen AG: *Quantum Computing at Volkswagen*. Traffic Flow Optimization using the D-Wave Quantum Annealer, 27.09.2017.

Wehner et al. 2018

Wehner, S./Elkouss, D./Hanson, R.: „Quantum internet: A vision for the road ahead“. In: *Science*, 362: 6412, 2018.

Yamamoto et al. 2019

Yamamoto, Y./Sasaki, M./Takesue, H.: „Quantum information science and technology in Japan“. In: *Quantum Science and Technology*, 4: 2, 2019.

**Zeiss 2018**

Zeiss: *White Paper on Quantum Metrology&Sensing and Quantum Enhanced Imaging*, 2018.

Zeiss 2019

Zeiss: *ZEISS Quantum Challenge*, 2019. URL: <https://www.zeiss.com/corporate/int/careers/events/zeiss-quantum-challenge.html> [Stand: 29.11.2019].

Zhang et al. 2018

Zhang, Q./Xu, F./Chen, Y.-A./Peng, C.-Z./Pan, J.-W.: „Large scale quantum key distribution: challenges and solutions Invited“. In: *Optics express*, 26: 18, 2018, S. 24260-24273.

Zhang et al. 2019

Zhang, Q./Xu, F./Li, L./Liu, N.-L./Pan, J.-W.: „Quantum information research in China“. In: *Quantum Science and Technology*, 4: 4, 2019, S. 40503.



acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter www.acatech.de



Autoren und Autorinnen:

Prof. Dr. Henning Kagermann

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Karolinenplatz 4
80333 München

Florian Süssenguth

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Karolinenplatz 4
80333 München

Dr. Jorg Körner

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Karolinenplatz 4
80333 München

Dr. Annka Liepold

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften
Karolinenplatz 4
80333 München

Reihenherausgeber:

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften, 2020

Geschäftsstelle
Karolinenplatz 4
80333 München

Hauptstadtbüro
Pariser Platz 4a
10117 Berlin
T +49 (0)30/2 06 30 96-0
F +49 (0)30/2 06 30 96-11

Brüssel-Büro
Rue d'Egmont/Egmontstraat 13
1000 Brüssel (Belgien)
T +32 (0)2/2 13 81-80
F +32 (0)2/2 13 81-89

info@acatech.de
www.acatech.de

Vorstand i.S.v. § 26 BGB: Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Karl-Heinz Streibich, Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl, Prof. Dr. Hermann Requardt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier, Prof. Dr. Martina Schraudner

Empfohlene Zitierweise:

Kagermann, H./Süssenguth, F./Körner, J./Liepold, A.: *Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation* (acatech IMPULS), München 2020.

ISSN 2195-1829/ISBN 978-3-96834-001-2

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

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

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften • 2020

Koordination: Florian Süssenguth

Lektorat: Lektorat Berlin

Layout-Konzeption: Groothuis, Hamburg

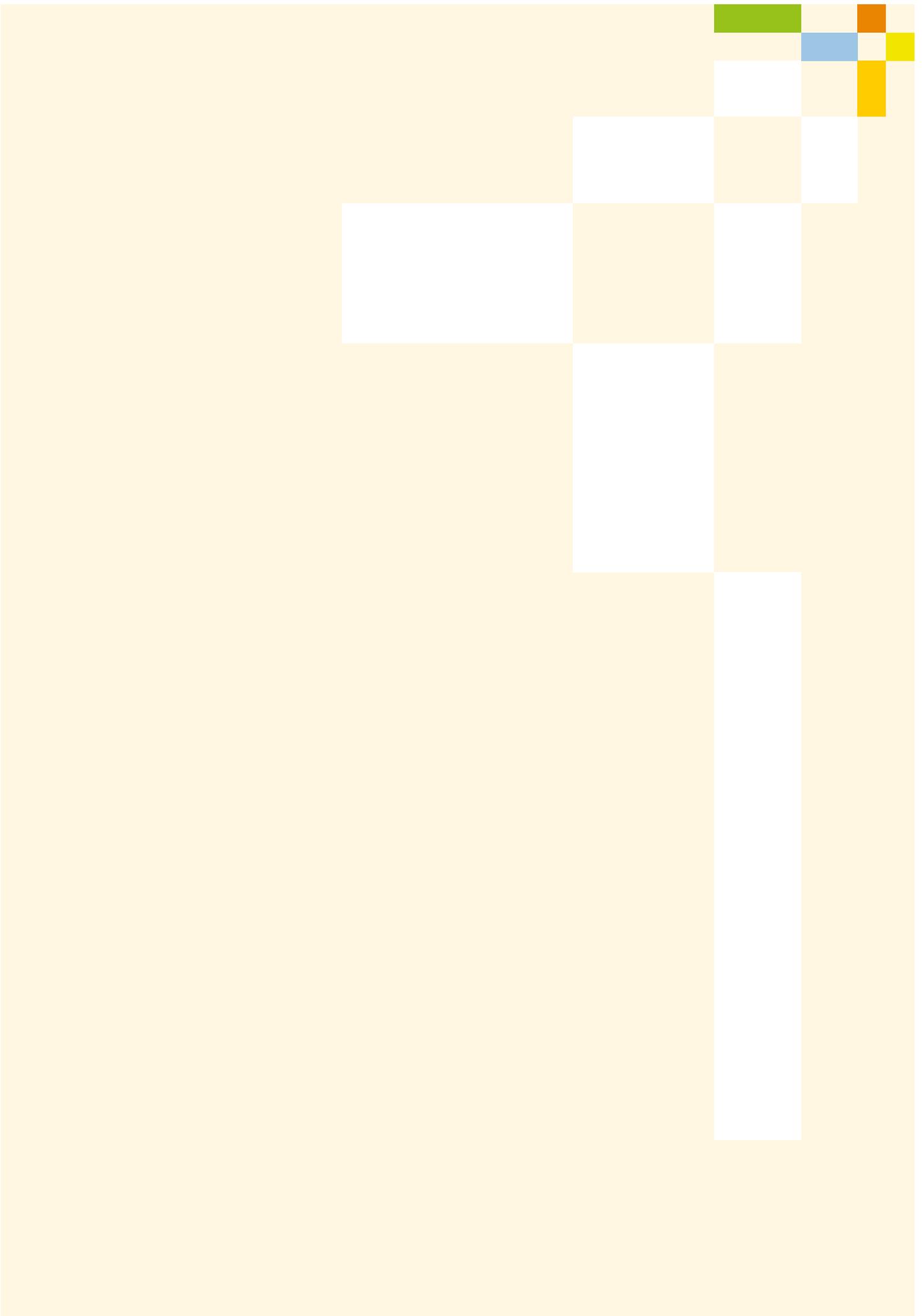
Titelfoto: © Fraunhofer IOF

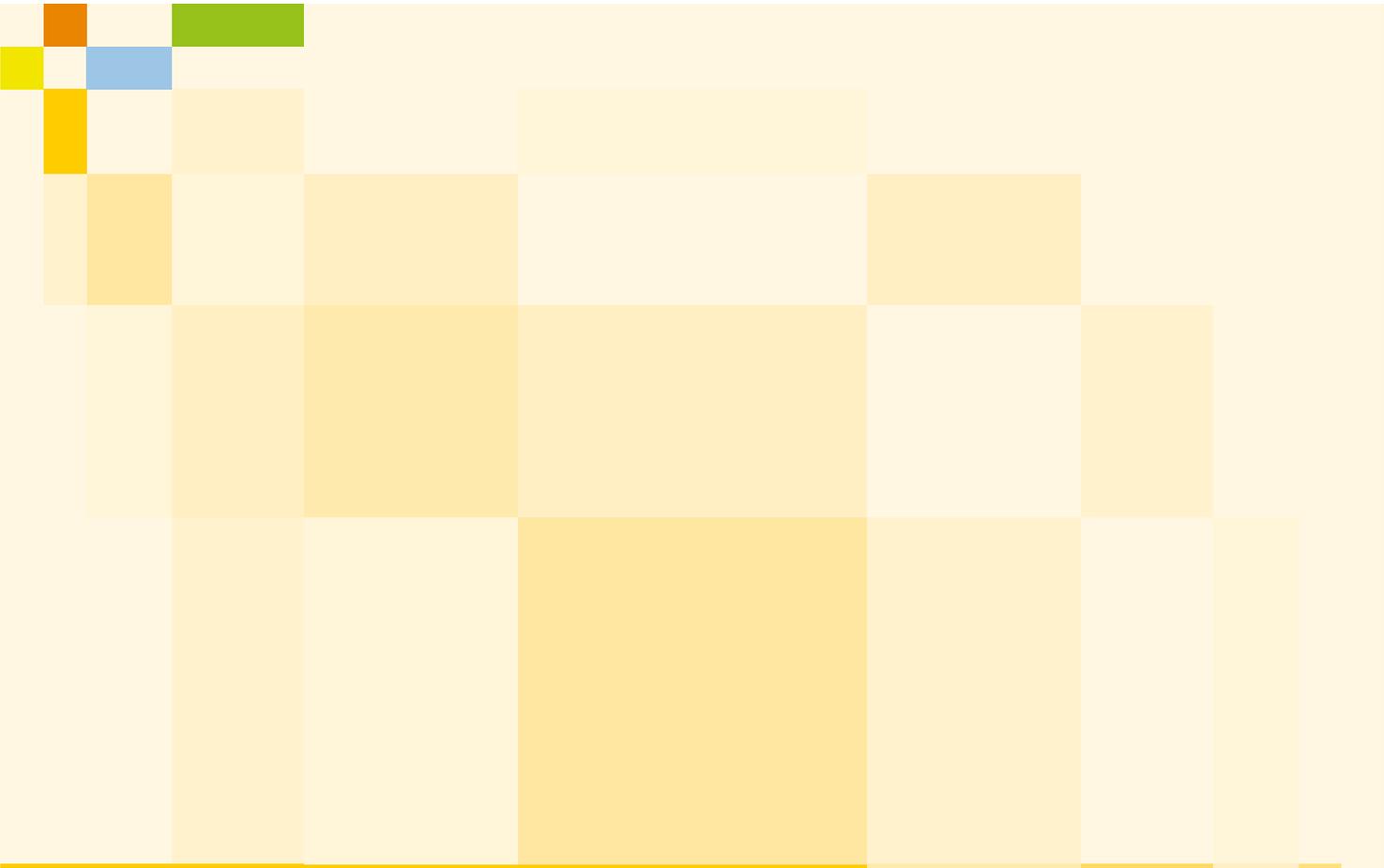
Konvertierung und Satz: Fraunhofer IAIS, Sankt Augustin

Druck: KOMPLAN Biechteler GmbH & Co. KG, München

Printed in EC

Die Originalfassung der Publikation ist verfügbar auf www.acatech.de





Der Quantencomputer ist nur das bekannteste Beispiel für eine ganze Reihe denkbarer innovativer Anwendungen, die auf der gezielten Kontrolle quantenmechanischer Effekte basieren. Erkenntnisse der Quantenphysik erlauben daneben die Konstruktion abhörsicherer Kommunikationskanäle oder neuartige Simulationsverfahren, die in der Materialentwicklung eingesetzt werden könnten. Auch Patientinnen und Patienten könnten von Quantensensoren profitieren, die als Teil medizintechnischer Geräte präzisere und zugleich weniger belastende Untersuchungen möglich machen. Die erfolgreiche Entwicklung dieser und weiterer Quantentechnologien der zweiten Generation erfordert eine langfristige enge Zusammenarbeit von Forschung und Unternehmen. Gelingt der Aufbau eines solchen leistungsfähigen Quantentechnologie-Ökosystems in Deutschland, wäre dies auch ein wichtiger Beitrag zur Absicherung der technologischen Souveränität des Standorts.

Dieser acatech IMPULS fasst die wichtigsten wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklungen im Bereich der Quantentechnologien der zweiten Generation zusammen. Er gibt einen Überblick über die damit verbundenen Innovationspotenziale und Herausforderungen am Standort Deutschland und darüber hinaus.

ISBN 978-3-96834-001-2



9 783968 340012