

Technikfolgenabschätzung für die Quantentechnologien

Technology Assessment for Quantum Technologies

Oktober 2025



Institut für
Technikfolgenabschätzung
und Systemanalyse



Karlsruher Institut für Technologie

Impressum

Diese Studie wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) erstellt. Zum Zeitpunkt des Projektbeginns firmierte das Ministerium noch als Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Die Verantwortung für den Inhalt liegt bei den Autor:innen; das BMFTR hat keinen Einfluss auf die Erstellung des Berichts genommen.

Verantwortliches Institut

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Karlstraße 11
76133 Karlsruhe
<https://www.itas.kit.edu/>

Autor:innen

Adrian Schmidt, KIT-ITAS, adrian.schmidt2@kit.edu (stellvertretender Projektleiter)
Zeki C. Seskir, KIT-ITAS, zeki.seskir@kit.edu
Nora Weinberger, KIT-ITAS, nora.weinberger@kit.edu
Christopher Coenen, KIT-ITAS, christopher.coenen@kit.edu (Projektleiter)

Kontakt für Rückfragen

Adrian Schmidt, KIT-ITAS
adrian.schmidt2@kit.edu

Bildnachweis:

Titel- und Rückseite: KI-generiertes Bild, erstellt mit Mage.space (Modell FLUX Schnell, Black Forest Labs), erstellt am 07.10.2025.

Datum Veröffentlichung

Oktober 2025

Zitierempfehlung

Schmidt, A., Seskir, Z. C., Weinberger, N., & Coenen, C. (2025). *Technikfolgenabschätzung für die Quantentechnologien*. Abschlussbericht einer Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR). Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
<https://doi.org/10.5445/IR/1000185698>

DOI

[10.5445/IR/1000185698](https://doi.org/10.5445/IR/1000185698)

Beauftragt durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
Abkürzungsverzeichnis.....	4
Kurzzusammenfassung	6
Executive Summary.....	11
1 Einleitung.....	16
1.1 Einführung in die Quantentechnologien.....	16
1.2 Einführung in die Technikfolgenabschätzung	17
1.3 Beschreibung der Studie	19
1.4 Zeitplan und Methodik.....	19
1.5 Limitationen der Studie.....	21
2 Literatur zur Abschätzung der Technikfolgen von Quantentechnologien	22
2.1 Wissenschaftliche Literatur	22
2.2 Graue Literatur	29
3 Methoden.....	32
3.1 Identifizierung der Stakeholder	32
3.2 Auswahl der Stakeholder	39
3.3 Teilnehmende Stakeholder	42
3.4 Methodik der Interviews und Umfragen	45
3.5 Methodik des Workshops	48
4 Ergebnisse aus Interviews, Umfrage und Workshop.....	50
4.1 Ergebnisse der Interviews	50
4.2 Statistische Ergebnisse des Interview-Kodierschemas	82
4.3 Ergebnisse der Umfrage.....	85
4.4 Ergebnisse des Workshops	100
5 Übergreifende thematische Erkenntnisse	118
5.1 Status Quo der Technikfolgenabschätzung in den Quantentechnologien.....	118
5.2 Auswirkungen des Quantencomputings auf IT-Sicherheit	120
5.3 Nachhaltigkeit des Quantencomputings.....	121
5.4 Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik	122
5.5 Konsequenzen ungleichen Zugangs zu Quantentechnologien/Quantencomputing	123
5.6 Gesellschaftliche Auswirkungen	124
5.7 Diskurs über Quantentechnologien	125
5.8 Gesellschaftliche Wahrnehmung und Wissenschaftskommunikation	126
5.9 Rolle der Kunst in Vermittlung, Gestaltung und Reflexion von Quantentechnologien	127
5.10 Unbeabsichtigte Nebenfolgen	128
5.11 Einfluss auf andere Technologien	129
5.12 Philosophische Aspekte.....	130
5.13 Bildung.....	131
5.14 Anderes	132
6 Referenzen	133

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Langform
AI	Artificial Intelligence (dt. Künstliche Intelligenz)
AIT	Austrian Institute of Technology
ASICS	Application-Specific Integrated Circuits (dt. anwendungsspezifische integrierte Schaltkreise)
B2C	business-to-consumer (dt. Geschäftsbeziehung Unternehmen zu Endverbrauchern)
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMFTR	Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (heute Bundesministerium für Wirtschaft und Energie, BMWI)
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
BW	Baden-Württemberg
BWI GMBH	BWI GmbH (IT-Dienstleister der Bundeswehr)
CAN	Kanada
CEN-	European Committee for Standardization – European Committee for Electrotechnical Standardization
CENELEC	(dt. Europäisches Komitee für Normung – Europäisches Komitee für elektrotechnische Normung)
CERN	Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (dt. Europäische Organisation für Kernforschung)
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (dt. Australische Organisation für wissenschaftliche und industrielle Forschung)
DARPA	Defense Advanced Research Projects Agency (Forschungsbehörde des US-Verteidigungsministeriums)
DE	Deutschland
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DPG	Deutsche Physikalische Gesellschaft
EIC	European Innovation Council (dt. Europäischer Innovationsrat)
ERC	European Research Council (dt. Europäischer Forschungsrat)
ETAG	European Technology Assessment Group (dt. Europäische Technologiebewertungsgruppe)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute (dt. Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen)
EU	Europäische Union
EUROQCI	European Quantum Communication Infrastructure (dt. Europäische Quantenkommunikationsinfrastruktur)
EUROQUIC	European Quantum Industry Consortium (dt. Europäisches Quantenindustrie-Konsortium)
F&E	Forschung und Entwicklung
FRAUN-	Fraunhofer-Zentrum für Internationales Management und Wissensökonomie
HOFFER IMW	
GPS	Global Positioning System (dt. Globales Positionsbestimmungssystem)
HHL	Harrow–Hassidim–Lloyd
HPC	High Performance Computing (dt. Hochleistungsrechnen)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (dt. Institut der Elektro- und Elektronikingenieure)
IOT	Internet of Things (dt. Internet der Dinge)
IP	Intellectual Property (dt. Geistiges Eigentum)
IT	Information Technology (dt. Informationstechnologie)
ITAS	Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse
KI	Künstliche Intelligenz

KIT	Karlsruher Institut für Technologie
KMU	Kleine und mittlere Unternehmen
MAXQDA	Software für qualitative Datenanalyse
MINT	Mathematik, Informatik, Naturwissenschaft und Technik
MRI	Magnetic Resonance Imaging (dt. Magnetresonanztomographie)
MRT	Magnetresonanztomographie
NATO	North Atlantic Treaty Organization (dt. Nordatlantikpakt-Organisation)
NGO	Non-Governmental Organization (dt. Nichtregierungsorganisation)
NL	Niederlande
NRW	Nordrhein-Westfalen
OECD	Organisation for Economic Co-operation and Development (dt. Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
OQI	Open Quantum Institute
OTA	Office of Technology Assessment (dt. US-Büro für Technikfolgenabschätzung)
PNT	Positioning, Navigation and Timing (dt. Positionierung, Navigation und Zeitbestimmung)
PQC	Post-Quantum Cryptography (dt. Post-Quanten-Kryptografie)
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Q.E.D.	Quantum Ecosystem Deutschland (Fraunhofer IMW)
QBN	Quantum Business Network
QC	Quantencomputing
QDNL	Quantum Delta Netherlands
QED-C	Quantum Economic Development Consortium
QEI	Quantum Energy Initiative
QKD	Quantum Key Distribution (dt. Quanten-Schlüsselverteilung)
QML	Quantum Machine Learning (dt. Quantenmaschinelles Lernen)
QT	Quantum Technologies (dt. Quantentechnologien)
QUTAC	Quantum Technology and Application Consortium
QVLS	Quantum Valley Lower Saxony
RRI	Responsible Research and Innovation (dt. verantwortungsvolle Forschung und Innovation)
STEEP-C	Social, Technological, Economic, Environmental, Political, Cultural (dt. Sozial, technologisch, wirtschaftlich, ökologisch, politisch, kulturell)
STEM	Science, Technology, Engineering and Mathematics (dt. MINT)
STOA	Science and Technology Options Assessment (dt. Wissenschafts- und Technologieoptionsanalyse)
STS	Science and Technology Studies (dt. Wissenschafts- und Technikforschung)
TA	Technikfolgenabschätzung
TAB	Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag
TU	Technische Universität
UK	Vereinigtes Königreich
UN	United Nations (dt. Vereinte Nationen)
UNCTAD	United Nations Conference on Trade and Development (dt. Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung)
UNESCO	United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization (dt. Organisation der Vereinten Nationen für Bildung, Wissenschaft und Kultur)
WEF	World Economic Forum (dt. Weltwirtschaftsforum)
ZKM	Zentrum für Kunst und Medien

Kurzzusammenfassung

Quantentechnologien (QT) haben den Bereich der reinen Grundlagenforschung verlassen und befinden sich in einer Übergangsphase zur praktischen Anwendung. In dieser Formierungsphase entscheidet sich, wie sich ihre Entwicklung auf gesellschaftliche, sicherheitspolitische und wirtschaftliche Strukturen auswirken wird. Prognosen gehen davon aus, dass Quantencomputer bis 2040 gängige Verschlüsselungssysteme überwinden könnten; Quantensensoren versprechen präzise Navigations- und Überwachungsfähigkeiten; und die ersten Quantenkommunikationsinfrastrukturen werden bereits eingerichtet. Da die jetzt getroffenen Entscheidungen, etwa zur Hardware- und Software-Entwicklung, zur Struktur von Lieferketten oder zur Entwicklung von Kompetenzen, die zukünftige Nutzung dieser Technologien prägen und bestimmen, welche sozialen, ökologischen und geopolitischen Pfadabhängigkeiten sich herausbilden werden, sind frühzeitige, koordinierte Maßnahmen erforderlich, um sicherzustellen, dass QT zur Stärkung von Souveränität, Resilienz und gesellschaftlichen Nutzen, beitragen, anstatt Abhängigkeiten, Ungleichheiten und Risiken zu vertiefen.

Die Methoden der Technikfolgenabschätzung (TA) können helfen, solche Pfadabhängigkeiten zu erkennen und proaktiv informierte Entscheidungen zu treffen, mit denen langfristig negativer Entwicklungen verhindert und positive Potenziale gehoben werden können. TA setzt dort an, wo die Faktenlage unsicher ist und mögliche gesellschaftliche Folgen antizipiert werden müssen: Sie verbindet Vorausschau, Szenarienentwicklung und einen inklusiven Dialog mit Interessengruppen mit einer kontinuierlichen Überwachung der Technikentwicklung, sodass Entscheidungen über Gestaltung und Steuerung angepasst werden können, lange bevor sich Märkte oder Standards verfestigen. In einer frühen Phase der technologischen Entwicklung ist die gesellschaftliche

Kontrolle über die Entwicklungsverläufe vergleichsweise leichter, da die Technologie noch nicht ausgereift ist und bisher keine breite gesellschaftliche Einbettung stattgefunden hat. Mit zunehmender Reife einer Technologie und ihrer Einführung in die Gesellschaft zeigen sich immer mehr gesellschaftliche Auswirkungen, doch wird es immer schwieriger, den Entwicklungsverlauf gesellschaftlich und politisch zu beeinflussen. Daher ist ein frühzeitiger Aufbau reflexiver Kapazitäten erforderlich, um Forschungsprogramme, Regulierungsbehörden und Industriekonsortien mit den notwendigen Instrumenten auszustatten, damit sie soziale, ethische, sicherheitsrelevante und nachhaltige Fragen möglichst frühzeitig angehen können, bevor sich Probleme verfestigen. Gleichzeitig lassen sich so die Entwicklungen einer Technologie an gesellschaftlichen Wertvorstellungen ausrichten, und damit langfristig sowohl die Akzeptanz als auch die wirtschaftliche Verwertbarkeit der Technologie verbessern. Da QT bereits weit genug fortgeschritten sind, um konkrete Fragen aufzuwerfen, sich aber noch in einem frühen Stadium befinden und offen für Einflussnahme sind, besteht ein hoher Bedarf mittels einer TA zu analysieren, wie eine zeitnahe, iterative Bewertung des sich schnell entwickelnden Feldes mit öffentlichen Werten und strategischen Zielen in Einklang gebracht werden könnte.

Die vorliegende Studie untersucht daher aus einer TA-Perspektive gesellschaftliche, ethische und politische Implikationen der QT, wobei ein Fokus auf die Sicherung der technologischen Souveränität Deutschlands und Europas gelegt wird. Im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) (jetzt Bundesministerium für Forschung Technologie und Raumfahrt, BMFTR) wurde eine Reihe von Interviews mit Stakeholdern aus Wissenschaft, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und öffentlicher

Verwaltung durchgeführt, eine Online-Umfrage ausgewertet sowie ein zweitägiger Visionsworkshop veranstaltet. Ziel der Studie war es, zentrale Gestaltungsbedarfe frühzeitig zu identifizieren und politische Handlungsoptionen aufzuzeigen, bevor technologische Entwicklungen unumkehrbare Pfadabhängigkeiten erzeugen.

In diesem Zusammenhang wurden vom BMBF acht Hauptthemen identifiziert, die in der Studie zu untersuchen waren: (1) Status Quo der Technikfolgenabschätzung in den QT, (2) Auswirkungen des Quantencomputings auf IT-Sicherheit, (3) Nachhaltigkeit des Quantencomputing, (4) Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik, (5) Konsequenzen ungleichen Zugangs zu Quantentechnologien/Quantencomputing, (6) Gesellschaftliche Auswirkungen, (7) Diskurs über Quantentechnologien, (8) Unbeabsichtigte Nebenfolgen. Diese Hauptthemen wurden um weiterführende Fragen zur gesellschaftlichen Rezeption, zu Auswirkungen von QT auf andere Technologien, philosophischen und kulturellen Aspekten, Bildung sowie Kunst erweitert.

Zentrales Ergebnis ist, dass **Technikfolgenabschätzung für QT** bisher nur punktuell erfolgt, obwohl das Thema gesellschaftlich zunehmend als relevant wahrgenommen wird. Während einzelne Akteure in Wissenschaft, Behörden und internationalen Organisationen bereits Beiträge leisten, fehlen bislang systematische, international koordinierte TA-Infrastrukturen zu den QT. Insbesondere aus der Perspektive von Politik und öffentlichen Fördergebern wird ein strategischer Handlungsbedarf gesehen, um soziale, sicherheitspolitische und ethische Risiken frühzeitig sichtbar zu machen und in Innovationspfade einzubetten. Die Integration von TA in Innovationsagenden sollte dazu als strategisches Instrument zur Steuerung von Investitionen genutzt werden, um Lieferketten resilienter zu machen und auch die Wertschöpfung zu erhöhen. Die bestehenden Strukturen reichen hierfür bislang nicht aus. Die Integration von TA in politische Entscheidungsprozesse ist lückenhaft, die institutionelle Verankerung schwach und

die europäische Struktur, von der international ganz zu schweigen, nicht ausreichend.

Im Bereich der **IT-Sicherheit** wurden die Folgen von Quantencomputing als systemisch, geopolitisch relevant und langfristig potenziell destabilisierend eingeschätzt. Obwohl vollständig funktionsfähige, fehlerkorrigierte Quantencomputer derzeit noch nicht existieren, besteht weitgehend Einigkeit darüber, dass sie mittel- bis langfristig bestehende kryptografische Verfahren unterlaufen könnten. Dies betrifft nicht nur die Integrität digitaler Kommunikation, sondern auch die Sicherheit kritischer Infrastrukturen, die Vertraulichkeit von Finanztransaktionen und das Gleichgewicht militärischer Kräfte. Da auch Sorge vor einer Beschleunigung dieser Entwicklung besteht und heutige Kommunikation zwecks zukünftiger Entschlüsselung vermutlich bereits mitgeschnitten wird („store now, decrypt later“), wurde für eine deutlich verstärkte Aufmerksamkeit geworben. Die Ergebnisse legen nahe, dass der europäische Ansatz zur Post-Quantum-Kryptografie (PQC) bislang fragmentiert ist und in seinen Umsetzungsmechanismen hinter dem politischen Problembewusstsein in den USA zurückbleibt. Insbesondere kleinere Unternehmen müssten auf die Gefahren hingewiesen und eine zeitnahe Implementierung der PQC sollte angestrebt werden.

Die Frage der **Nachhaltigkeit von Quantencomputern** wurde von den Teilnehmenden der Studie als hochrelevant bewertet, wobei erhebliche Unsicherheit über konkrete Potenziale und Belastungen besteht. Während langfristige Effizienzgewinne in einer Vielzahl an Anwendungen erwartet werden, bestehen für einige Personen noch deutliche Unsicherheiten über den zukünftigen Energie- und Ressourcenbedarf von Quantencomputern. Unklarheiten existieren auch, ob der Einsatz in klassischen Computersystemen, wie Supercomputer, zu bevorzugen sei oder ob nicht für nachhaltige Effizienzgewinne vor allem reine Quantencomputer-Ansätze verfolgt werden müssten. Dabei wird deutlich, dass derzeit weder verbindliche Standards noch systematische Förderinstrumente für nachhaltige QT existieren. Eine

präventive Untersuchung von Nachhaltigkeit in Forschung, Entwicklung und Regulierung wurde daher von vielen als notwendig erachtet, um informiert mögliche Nachhaltigkeitsaspekte in Förderung und Regulierung aufnehmen zu können. Hier sollten vor allem auch globale Materialströme und die Abhängigkeit von seltenen Rohstoffen untersucht werden.

Besonders deutlich traten die **sicherheitspolitischen Implikationen von Quantensensoren** hervor. Diese Technologien eröffnen neben zivilen Anwendungen auch weitreichende neue Möglichkeiten der Navigation, Grenzüberwachung oder Detektion militärisch relevanter Objekte. Die Studienergebnisse deuten darauf hin, dass eine sicherheitspolitische Begleitung dieser Entwicklung bislang nur begrenzt stattfindet, obwohl der Dual-Use-Charakter der Technologie bereits auf potenziell destabilisierende Szenarien verweist. Mittels kontinuierlicher Beobachtung der sicherheitspolitischen Entwicklungen, wie durch umfassende Projekte der Militärtechnikfolgenabschätzung, könnten solche negative Entwicklungen erkannt und mittels Methoden der Rüstungskontrolle verhindert werden. Unklarheit besteht hingegen in Bezug auf Exportkontrollen kritischer Quantensensoren. Angesichts der Dynamik wird zwar eine Harmonisierung der EU-Exportkontrollmechanismen empfohlen, jedoch bestehen Unklarheiten ob diese nur direkt militärisch einsetzbare Komponenten einschließen oder weiter gefasst werden sollten. Einigkeit besteht hingegen darin, dass europäische Abhängigkeiten systematisch erkannt und über den Aufbau eigener Kompetenzen strategisch reduziert werden müssen.

Die Interviews und Workshopbeiträge verweisen auf die Entstehung eines globalen Quantum Divide, also eines **ungleichen Zugangs zu quantentechnologischer Infrastruktur, Wissen und Anwendungen**. Hierin liegt ein erhebliches Risiko einer Vertiefung globaler Ungleichgewichte, da Länder ohne Zugang zu kritischer Quanteninfrastruktur potenziell abgehängt werden könnten. Insbesondere zum erstmaligen Zeigen des Quantum Advantage werden Akteure deutlich profitieren, die Zugang zu der aktuellen

Quantencomputing-Hardware in einem Quanten-Ökosystem haben. Da jedoch gleichzeitig eine Abhängigkeit Europas von außereuropäischen Hardwareanbietern erkannt wurde, sehen die Studienteilnehmenden auch Europa in einer potenziell vulnerablen Position. Es wird empfohlen, europäische Ökosysteme strategisch auszubauen, Zugänge zu außereuropäischer Infrastruktur vertraglich zu sichern und eigene Entwicklungen über IP-Rechte zu sichern. Gleichzeitig sollten aber auch internationale Kooperationen mit weniger privilegierten Akteuren gefördert werden, etwa durch Bildungsprogramme, Open-Source-Initiativen oder technikpolitische Partnerschaften, damit andere Akteure die Abhängigkeiten dieser Länder nicht ausnutzen.

Die **sozialen Auswirkungen und der Einfluss von QT auf den Arbeitsmarkt** werden als nicht so umfassend beschreiben, jedoch wird erwartet, dass bestimmte Personengruppen überproportional von den Entwicklungen profitieren werden. Anders als im Falle weiterer neuer Technologien wie Künstlicher Intelligenz (KI) oder Robotik werden weniger Arbeitsplätze durch QT wegfallen und gleichzeitig neue geschaffen werden. Es wird jedoch vermutet, dass diese Entwicklung eher hochqualifizierte und spezialisierte Arbeitskräfte bevorzugen wird, womit aus Gerechtigkeits- und aus Souveränitätsgründen insbesondere der Zugang zu QT sowie die Aus- und Weiterbildung im Vordergrund zukünftiger Handlungen stehen muss. Hier wurde besonders auf die MINT-Bildung und auf das verstärkte Einbeziehen von Frauen verwiesen, um einem möglichen sozialen Quantum Divide entgegenzutreten und einem wachsenden Fachkräftebedarf zu begegnen.

Die **gesellschaftliche Wahrnehmung** der Quantentechnologien findet bislang nur in sehr begrenztem Umfang statt. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass der gesellschaftliche Diskurs derzeit stark geteilt ist in eine kleine Gruppe hochspezialisierter Expert:innen und einer weitgehend uninformatierten breiten Öffentlichkeit. Dieses Informationsgefälle wird als potenziell risikobehaftet eingeschätzt, da fehlendes Wissen über QT langfristig zu gesellschaftlicher

Ablehnung führen könnte, vor allem wenn die Technologien sichtbar in den Alltag eingreifen oder mit kontroversen Anwendungen verknüpft werden. Insgesamt ist es deshalb wichtig, dass über verschiedene Kanäle ein informierter, gesellschaftlich breiter Diskurs über die Entwicklung der QT geführt wird. Dieser kann beispielsweise über einen verstärkten b2c-Zugang der wirtschaftlichen Akteure gestärkt werden, wobei überzogenen Erwartungen durch bestimmte Industrieakteure oder einen überhitzten Innovationsdiskurs vermieden werden müssen. Vor diesem Hintergrund bedarfs es auch einer differenzierten Wissenschaftskommunikation, die sowohl Faszination als auch realistische Anwendungsszenarien adressiert. Menschen sollten unter Verwendung verschiedenster Formate und Medien über Anwendungsszenarien und auch über eher bildliche Sprache über die Möglichkeiten der QT informiert und zur Reflektion angeregt werden.

Ein besonderes Potenzial wurde der **Kunst** als Reflektionsraum und Brückeninstanz zugeschrieben. Kunst kann nicht nur neue Sichtweisen auf QT eröffnen, sondern auch bisher schwer erreichbare Bevölkerungsgruppen ansprechen. Die Diskussionen des Workshops zeigen, dass künstlerische Arbeiten zu Quantentechnologien sowohl für die Wissenschaft und Wirtschaft als auch für die Gesellschaft produktive Irritationen und neue Zugänge schaffen können. Voraussetzung für eine erfolgreiche Einbindung der Kunst ist jedoch eine strukturelle Verankerung jenseits instrumenteller Illustrationsfunktion. Da Kunstschaffende sich die QT in jedem Falle künstlerisch erschließen werden, sollte der Austausch mit Forschenden durch öffentlich geförderte interdisziplinäre Initiativen gezielt gefördert werden, um damit auch esoterischen Entwicklungen gezielt entgegenzuwirken. Notwendig für dieses gegenseitige Befruchten sind jedoch ein Austausch auf Augenhöhe und eine Offenheit für unvorhergesehene Entwicklungen auf beiden Seiten.

Zur Erforschung potenzieller **unbeabsichtigter Folgen von QT** hoben die Teilnehmenden der Studie mehrere Punkte hervor, darunter einen erhöhten

Energieverbrauch, die Abhängigkeit von knappen Materialien und Dual-Use-Risiken – sowohl hinsichtlich Überwachung als auch militärischer Anwendungen. Trotz hoher Unsicherheit hinsichtlich solcher und weiterer Nebenfolgen, betonten viele Befragte die Notwendigkeit kontinuierlicher Risikoaufsicht und die Etablierung geeigneter Frühwarnmechanismen – auch bezüglich wirtschaftlich verwertbarer Entwicklungen. Hier könnte der Zivilgesellschaft eine Überwachungsfunktion zukommen, während Wissenschaft und Industrie die Hauptakteure der Entwicklung sein sollten. Von den Behörden wurde erwartet, dass sie Überwachungsmechanismen für solche Entwicklungen implementieren und die wirtschaftliche Verwertbarkeit durch gezielte Freiräume in den geförderten Projekten schaffen sollten.

Ein zentrales Ergebnis der Studie besteht darin, dass QT in ihrer Wirkung nicht isoliert, sondern **ko-evolutiv mit anderen Technologien** zu betrachten sind. Dies gilt insbesondere für Kryotechnik, Materialwissenschaft und Mikroelektronik und ggfs. auch für die KI. Viele der für QT notwendigen Basistechnologien stammen aus diesen Feldern, und umgekehrt können Fortschritte in den QT diese Bereiche durch ihre Funktion als „Schnittstellentechnologien“ beschleunigen. Die technologische Entwicklung von QT ist daher untrennbar mit sektorübergreifender Forschung und interdisziplinärer Zusammenarbeit verbunden. Technologische Entwicklungspfade verschiedener Technologien sind nicht isoliert, daher wird jeder größere Durchbruch bei grundlegenden Technologien (wie der Kryotechnik oder integrierter Photonik) auch Auswirkungen auf die QT haben. Gleichzeitig ermöglicht die Forschung und Entwicklung von QT auch wirtschaftlich verwertbare klassische Technologien. Es müssen jedoch Mechanismen vorhanden sein, um solche Entwicklungen rechtzeitig zu verfolgen, zu nutzen und in die QT zu implementieren. In dieser Hinsicht spielen kontinuierliche Überwachung und Erforschung eine Schlüsselrolle sowie Aufmerksamkeit für alle relevanten angrenzenden Bereiche.

Die Befragten äußerten differenzierte Einschätzungen zu möglichen **philosophischen und kulturellen**

Implikationen der QT. Während ein Großteil der Teilnehmenden bezweifelte, dass nennenswerte Implikationen bestehen, sahen einige in der Auseinandersetzung mit den Prinzipien der Quantenphysik ein Potenzial für veränderte Denkweisen und gesellschaftliche Selbstverständnisse. Ob und wie solche Effekte eintreten, ist jedoch derzeit kaum abschätzbar.

Weiterhin zeigte sich, dass **Bildung** eine zentrale Rolle spielt, um sowohl die zukünftige QT-Arbeitswelt als auch die informierte Teilhabe der Bevölkerung zu sichern. Die Integration quantentechnologischer Grundlagen in schulische, universitäre und berufliche Curricula wurde von nahezu allen Teilnehmenden befürwortet, allerdings mit unterschiedlichen Einschätzungen zur Machbarkeit und Tiefe. Wichtig erscheint eine abgestufte Vermittlung, die technologische Tiefe mit gesellschaftlicher Anschlussfähigkeit verbindet und dabei auch das Informieren von Entscheidungsträger:innen mit einbezieht. Dabei wurde auch die Bedeutung informeller Lernangebote, öffentlicher Wissenschaftsformate und eines niedrigschwelligen Zugangs zur QT-Technologie betont.

Die Studienteilnehmenden wurden auch gebeten, etwaige zu **wenig beachtete oder besonders wichtige Aspekte** zu nennen. Neben den bereits erwähnten Themen des Energie- und Ressourcenverbrauchs sowie negativer sicherheitspolitischer Entwicklungen, sahen viele die strategische, koordinierte, langfristige Förderung von QT unter Einbeziehung europäischer und anderer internationaler Akteure als besonders relevant an. Unter der Prämisse technologischer Souveränität sollte die Förderung von QT in der EU strategisch weiter ausgebaut und harmonisiert werden. Die deutsche Bundesebene sollte dazu über

Koordinierung der Bundesländeraktivitäten das deutsche Ökosystem in die EU-Strategie einpflegen und sich für einen weiteren QT-Ausbau stark machen. Hierzu könnte ein explizites wissenschaftliches Begleitgremium sinnvoll sein, in dem die verschiedenen Akteure der Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft vertreten sind. Auch sollte über aktive Verbreitung der Erfolge ein Bewusstsein für europäische QT-Entwicklungen geschaffen werden, damit die privaten Investitionen in Europa steigen.

Insgesamt liefert die Studie eine Vielzahl empirisch fundierter Einsichten in gesellschaftliche, wirtschaftliche, politische und kulturelle Herausforderungen und Möglichkeiten von Quantentechnologien. Sie verweist auf die Notwendigkeit, TA frühzeitig zu verankern, gesellschaftliche Zielvorstellungen systematisch in Innovationsstrategien zu integrieren und offene, inklusive Formen des Dialogs über Zukunftsszenarien zu entwickeln. Die Zukunft der Quantentechnologien ist kein rein technisches Projekt, sondern ein soziales Gestaltungsfeld mit erheblicher wirtschaftlicher und politischer Relevanz. Die Ergebnisse dieser Studie zeigen deutlich, dass die Community eine politische Begleitung der Entwicklungspfade für QT wünscht, während eine zu enge Regulierung in einem frühen Stadium abgelehnt wird. Die derzeitige Rolle der Behörden wird darin gesehen, die stetig wachsende QT-Community zu unterstützen und zu führen, zu vernetzen und einzubinden sowie gleichzeitig den Bereich aktiv unter technischen, sozialen, wirtschaftlichen, sicherheitspolitischen und politischen Gesichtspunkten zu bewerten. Diese Rolle erfordert eine Erweiterung der Bewertungs- und Umsetzungskapazitäten der Behörden sowie die Entwicklung eines übergreifenden strategischen Ansatzes, sowohl auf Bundesebene für Deutschland als auch auf EU-Ebene für Europa.

Executive Summary

Quantum technologies (QT) have left the realm of pure basic research and are now in an early application phase, making this decade crucial for their development and future impact. Quantum computers are expected to be able to crack today's public encryption systems by 2040, quantum sensors promise advanced navigation and surveillance capabilities, and the first quantum communication infrastructures are already being established. Since decisions made now on hardware and software development, supply chains for rare materials, and skills development will also determine future use and its social and environmental costs, early, coordinated action is needed to increase security and prosperity in the coming quantum age, rather than deepening dependencies and risks.

Technology assessment (TA) methods can help identify such path dependencies and enable proactive, informed decisions to be made that prevent negative developments in the long term and leverage positive potential. TA comes into play when the facts are still scarce but the consequences are already apparent: it combines foresight, scenario development, and inclusive dialogue with stakeholders with continuous monitoring of technological developments so that decisions on design and control can be adjusted long before markets or standards become established. In the early stages of technological development, it is relatively easier for society to control the course of development, as the technology is not yet mature and has not yet become widely embedded in society. As a technology matures and is introduced into society, its social impacts become increasingly apparent, but it becomes increasingly difficult to influence its development socially and politically. It is therefore necessary to build reflexive capacities at an early stage in order to equip research programs, regulatory authorities, and industry consortia with the

necessary tools to address social, ethical, safety-related, and sustainability issues as early as possible, before problems become entrenched. At the same time, this allows the development of a technology to be aligned with societal values, thereby improving both the acceptance and economic viability of the technology in the long term. Since QT are already advanced enough to raise concrete questions but are still at an early stage and open to influence, there is a great need for TA to analyze how a timely, iterative assessment of this rapidly evolving field can be reconciled with public values and strategic goals.

This study therefore examines the social, ethical, and political implications of QT from a TA perspective, with a focus on securing the technological sovereignty of Germany and Europe. On behalf of the German Federal Ministry of Education and Research (BMBF) (now Federal Ministry of Research, Technology and Space, BMFTR), a series of interviews with stakeholders from science, industry, civil society, and public administration was conducted, an online survey was evaluated, and a two-day vision workshop was held. The aim of the study was to identify key design requirements at an early stage and to highlight policy options before technological developments create irreversible path dependencies.

In this context, the BMBF identified eight main topics to be examined in the study: (1) Status quo of technology assessment in QT, (2) Impact of quantum computing on IT security, (3) sustainability of quantum computing, (4) security policy implications of quantum sensor technology, (5) consequences of unequal access to quantum technologies/quantum computing, (6) societal impacts, (7) discourse on quantum technologies, and (8) unintended side effects. These main topics were expanded to include further questions on social acceptance, the impact of

QT on other technologies, philosophical and cultural aspects, education, and art.

The key finding is that **technology assessment for QT** has so far only been carried out on an ad hoc basis, even though the topic is increasingly perceived as socially relevant. While individual actors in science, government agencies, and international organizations are already making contributions, there is still a lack of systematic, internationally coordinated TA infrastructures for QT. From the perspective of policy-makers and public funding agencies in particular, there is a strategic need for action to identify social, security, and ethical risks at an early stage and embed them in innovation pathways. The integration of TA into innovation agendas should be used as a strategic instrument for steering investments in order to make supply chains more resilient and also increase value creation. The existing structures are not yet sufficient for this. The integration of TA into political decision-making processes is patchy, its institutional anchoring is weak, and the European structure, not to mention the international one, is inadequate.

In the field of **IT security**, the consequences of quantum computing have been assessed as systemic, geopolitically relevant, and potentially destabilizing in the long term. Although fully functional, error-corrected quantum computers do not yet exist, there is broad agreement that they could undermine existing cryptographic methods in the medium to long term. This affects not only the integrity of digital communications, but also the security of critical infrastructure, the confidentiality of financial transactions, and the balance of military power. As there are also concerns that this development could accelerate and that today's communications are probably already being recorded for future decryption („store now, decrypt later”), significantly greater attention was called for. The results suggest that the European approach to post-quantum cryptography (PQC) has been fragmented so far and that its implementation mechanisms lag behind the political awareness of the problem in the US. Smaller companies in

particular need to be made aware of the risks, and the timely implementation of PQC should be a priority.

The participants in the study rated the question of the **sustainability of quantum computers** as highly relevant, although there is considerable uncertainty about their specific potential and impact. While long-term efficiency gains are expected in a wide range of applications, some people still have significant uncertainties about the future energy and resource requirements of quantum computers. There is also uncertainty as to whether their use in classic computer systems, such as supercomputers, is preferable or whether pure quantum computer approaches should be pursued in order to achieve sustainable efficiency gains. It is clear that there are currently no binding standards or systematic funding instruments for sustainable QT. Many therefore considered a preventive investigation of sustainability in research, development, and regulation to be necessary in order to be able to informedly incorporate possible sustainability aspects into funding and regulation. In particular, global material flows and dependence on rare raw materials should be examined.

The **security implications of quantum sensors** were particularly evident. In addition to civilian applications, these technologies open up far-reaching new possibilities for navigation, border surveillance, and the detection of military objects. The study results indicate that security policy measures to accompany this development have been limited to date, even though the dual-use nature of the technology already points to potentially destabilizing scenarios. Through continuous monitoring of security policy developments, such as comprehensive military technology impact assessment projects, such negative developments could be identified and prevented through arms control measures. However, there is uncertainty regarding export controls on critical quantum sensors. In view of the dynamic nature of this issue, harmonization of EU export control mechanisms is recommended, but it is unclear whether these should only include components that can be

used directly for military purposes or whether they should be defined more broadly. There is agreement, however, that European dependencies must be systematically identified and strategically reduced by building up in-house expertise.

The interviews and workshop contributions point to the emergence of a global quantum divide, i.e., **unequal access to quantum technology infrastructure, knowledge, and applications**. This poses a considerable risk of deepening global imbalances, as countries without access to critical quantum infrastructure could potentially be left behind. In particular, players with access to the latest quantum computing hardware in a quantum ecosystem will benefit significantly when the quantum advantage is demonstrated for the first time. However, as Europe's dependence on non-European hardware suppliers has also been recognized, the study participants believe that Europe is in a potentially vulnerable position. It is recommended that European ecosystems be strategically expanded, access to non-European infrastructure be secured through contracts, and in-house developments be protected by IP rights. At the same time, however, international cooperation with less privileged players should be promoted, for example through education programs, open-source initiatives, or technology policy partnerships, so that other players do not exploit these countries' dependencies.

The **social impact and influence of QT on the labor market** are not described as extensive, but certain groups are expected to benefit disproportionately from developments. Unlike other new technologies such as AI or robotics, QT will result in fewer job losses and the creation of new jobs. However, it is assumed that this development will favor highly qualified and specialized workers, which means that, for reasons of fairness and sovereignty, access to QT and education and training must be at the forefront of future actions. Particular reference was made here to STEM education and the greater involvement of women in order to counteract a possible social

quantum divide and meet the growing demand for skilled workers.

So far, the **social perception of quantum technologies** has been very limited. The results of the study show that the social discourse is currently strongly divided between a small group of highly specialized experts and a largely uninformed general public. This information gap is considered potentially risky, as a lack of knowledge about QT could lead to social rejection in the long term, especially if the technologies become visibly integrated into everyday life or are linked to controversial applications. Overall, it is therefore important that an informed, broad social discourse on the development of QT is conducted through various channels. This can be strengthened, for example, through increased b2c access for economic actors, while avoiding exaggerated expectations by certain industry players or an overheated innovation discourse. Against this backdrop, there is also a need for differentiated science communication that addresses both fascination and realistic application scenarios. People should be informed about application scenarios and the possibilities of QT using a wide variety of formats and media, including more visual language, and encouraged to reflect on these issues.

The Arts were seen as having special potential as a space for reflection and a bridge-builder. Art can not only open up new perspectives on QT, but also appeal to population groups that have been difficult to reach in the past. The workshop discussions show that artistic works on quantum technologies can create productive irritations and new approaches for science, business, and society alike. However, a prerequisite for the successful integration of art is its structural anchoring beyond its instrumental illustrative function. Since artists will inevitably explore QT artistically, exchange with researchers should be specifically promoted through publicly funded interdisciplinary initiatives in order to counteract esoteric developments. However, this mutual enrichment requires exchange on an equal footing and openness to unforeseen developments on both sides.

To investigate potential **unintended consequences of QT**, the study participants highlighted several points, including increased energy consumption, dependence on scarce materials, and dual-use risks—both in terms of surveillance and military applications. However, many respondents emphasized the inherent unpredictability of these side effects. It was recommended that preparedness in this regard be increased through continuous monitoring mechanisms for the timely detection and communication of emerging risks, with civil society playing a monitoring role, while science and industry should be the main actors. Given the high level of uncertainty associated with the topic, authorities were expected to implement monitoring mechanisms for such developments and to create economic viability through targeted leeway in funded projects.

A key finding of the study is that QT should not be viewed in isolation, but rather as **co-evolving with other technologies**. This applies in particular to cryogenics, materials science, and microelectronics, and possibly also to artificial intelligence. Many of the basic technologies required for QT originate from these fields, and conversely, advances in QT can accelerate these areas through their function as “interface technologies.” The technological development of QT is therefore inextricably linked to cross-sector research and interdisciplinary collaboration. Technological development paths of different technologies are not isolated, so any major breakthrough in fundamental technologies (such as cryogenics or integrated photonics) will also have an impact on QT. At the same time, QT research and development also enables economically viable classical technologies. However, mechanisms must be in place to track such developments in a timely manner, exploit them, and implement them in QT. In this regard, continuous monitoring and research play a key role, as does attention to all relevant adjacent areas.

Respondents expressed differing views on the potential **philosophical and cultural implications of QT**.

While the majority of participants doubted that there would be any significant implications, some saw the examination of the principles of quantum physics, as having the potential to change ways of thinking and societal self-perceptions. However, it is currently difficult to assess whether and how such effects will occur.

Furthermore, it became clear that **education** plays a central role in securing both the future QT working world and the informed participation of the population. The integration of quantum technology fundamentals into school, university, and vocational curricula was supported by almost all participants, albeit with differing assessments of feasibility and depth. A gradual approach that combines technological depth with social connectivity and also involves informing decision-makers appears to be important. The importance of informal learning opportunities, public science formats, and low-threshold access to QT technology was also emphasized.

The study participants were also asked to name any **overlooked or particularly important aspects**. In addition to the aforementioned topics, such as energy and resource consumption and negative developments in security policy, many considered the strategic, coordinated, long-term promotion of QT, involving European and other international actors, to be particularly relevant. Under the premise of technological sovereignty, the promotion of QT in the EU should be strategically expanded and harmonized. To this end, the German federal government should coordinate the activities of the federal states to integrate the German ecosystem into the EU strategy and advocate for further expansion of QT. An explicit scientific advisory board representing the various stakeholders from science, industry, and society could be useful for this purpose. Active dissemination of successes should also raise awareness of European QT developments in order to increase private investment in Europe.

Overall, the study provides a wealth of empirically based insights into the social, economic, political, and cultural challenges and opportunities of quantum technologies. It points to the need to anchor TA at an early stage, systematically integrate societal objectives into innovation strategies, and develop open, inclusive forms of dialogue on future scenarios. The future of quantum technologies is not a purely technical project, but a social field of action with considerable economic and political relevance. The results of this study clearly show that the community wants political support for the development

paths for QT, while rejecting overly strict regulation at an early stage. The current role of public authorities is seen as supporting and guiding the steadily growing QT community, networking and involving it, while actively assessing the field from a technical, social, economic, security, and political perspective. This role requires an expansion of the assessment and implementation capacities of the authorities and the development of a comprehensive strategic approach, both at the federal level for Germany and at the EU level for Europe.

I Einleitung

I.1 Einführung in die Quantentechnologien

Quantentechnologien (QT) nutzen die Prinzipien der Quantenphysik, insbesondere Superposition und Verschränkung, um Fähigkeiten zu ermöglichen, die weit über die klassischen Systeme hinausgehen. Die drei Hauptbereiche sind Quantencomputing, Quantensensorik und Quantenkommunikation (manchmal wird die Quantensimulation als vierter Bereich einbezogen, im Folgenden jedoch unter Quantencomputing geführt). Jeder dieser Bereiche birgt ein transformatives Potenzial für die Gesellschaft und die Wirtschaft.

Im **Quantencomputing (QC)** werden unter Nutzung der quantenphysikalischen Phänomene Superposition und Verschränkung eine Vielzahl sogenannter Qubits (Quantenbits) derart verbunden, dass bestimmte Berechnungen ermöglicht werden, die auf klassischen Computern nicht effizient gelöst werden können. So lassen sich die einzelnen Qubits jeweils in einen Überlagerungszustand aus 0 und 1 setzen (Superposition), wodurch die Anzahl möglicher Rechenzustände exponentiell mit der Zahl der Qubits zunimmt. Wenn diese anschließend verschränkt werden, eine nicht-klassische Art der Korrelation, lassen sich Algorithmen zum Lösen von Problemen implementieren, die auf Supercomputern nicht effizient gelöst werden können. Solche Algorithmen könnten, wenn Quantencomputer in großem Maßstab realisiert werden, erhebliche Fortschritte in Bereichen wie Kryptographie, Materialwissenschaft, Arzneimittelforschung oder Optimierung ermöglichen. Denn es wird erwartet, dass zukünftige, fehlertolerante Quantencomputer in großem Maßstab in der Lage sein werden, komplexe molekulare Interaktionen für neue Arzneimittel zu simulieren (W. Li et al., 2024)

oder große Logistiknetze weitaus effizienter zu optimieren als es heutige Computer tun (Weinberg et al., 2023). Trotz dieses Versprechens sind die derzeitigen Quantencomputer noch nicht ausgereift. Bestehende Prototypen mit Dutzenden bis Hunderten Qubits sind fehleranfällig und schwer zu skalieren, z.B. aufgrund der Instabilität der Qubits und von Dekohärenz (Verlust von Quantenzuständen). Aufgrund dessen sind in der derzeitigen Phase der „NISQ“-Ära (Noisy Intermediate-Scale Quantum) bislang nur spezielle Demonstrationen möglich (Preskill, 2018). Als zentrale Herausforderung gilt es, fehlertoleranter, skalierbarer Systeme mit stabiler Qubit-Kohärenz zu entwickeln. Dabei ist unklar, ob in der kommenden Übergangszeit, in der in der Quantencomputer noch nicht vollständig fehlerkorrigiert sind, jedoch bereits Millionen Operationen ausführen können, für sinnvolle Anwendungen verwendet werden können (Preskill, 2025). Viele Expert:innen gehen deshalb davon aus, dass es noch mindestens ein weiteres Jahrzehnt braucht, bis Quantencomputer klassischen Systemen bei praxisrelevanten Aufgaben zuverlässig überlegen sein werden (Chen et al., 2021).

Die **Quantensensorik** nutzt ebenfalls Quantenphänomene, um eine noch nie dagewesene Präzision bei der Messung verschiedener physikalischer Größen zu erreichen. Sie ist als Teilbereich bereits ausgereifter als Quantencomputer, verbessert die Präzision in der Materialwissenschaft, der Rohstoffindustrie und anderen Bereichen und wird voraussichtlich schon bald kommerziellen Nutzen bringen (Degen et al., 2017; Kantsepolsky et al., 2023). Quantensensoren machen sich dabei die extreme Empfindlichkeit von Quantenzuständen gegenüber externen Störungen zunutze und ermöglichen die Detektion geringster Veränderungen in der Schwerkraft, in Magnetfeldern, in der Zeit oder in der Beschleunigung, die herkömmliche Sensoren nicht wahrnehmen können.

Erste Anwendungen existieren bereits, z.B. in optischen Atomuhren oder Quantengravimetern, doch es bestehen noch Herausforderungen bei Miniaturisierung, Robustheit und Kosten. Der weitere Durchbruch hängt davon ab, ob diese Hürden überwunden werden können (Oh et al., 2024).

Die **Quantenkommunikation** ist der dritte Hauptpfeiler der Quantentechnologie. Ihr Hauptziel ist Quanteninformationen, etwa verschränkte Zustände, sicher zu übertragen. Die bekannteste Anwendung ist die Quantenschlüsselverteilung (QKD), bei der die fundamentalen Eigenschaften der Quantenphysik genutzt werden, um Abhörsicherheit zu garantieren. Theoretisch könnten so Kommunikationskanäle geschaffen werden, die mit den heutigen Mitteln nicht hackbar sind, da jeder Messvorgang einen Quantenzustand verändert und somit detektierbar wäre. Erste Pilotnetze für QKD wurden weltweit etabliert; auch satellitengestützte Verbindungen über große Distanzen (über Tausende Kilometer) wurden erfolgreich getestet (Y. Li et al., 2025). Langfristig ist ein globales Quanteninternet geplant, in dem Quantencomputer und -sensoren über Quantenkommunikationsverbindungen miteinander vernetzt sind (Wehner et al., 2018, p. 201). Derzeit bestehen jedoch noch physikalische und technische Einschränkungen, etwa Reichweitenbeschränkungen durch Signalverluste und fehlende Quanten-Repeater (Bhaskar et al., 2020).

Angeichts des strategischen Potenzials investieren Staaten und Unternehmen weltweit massiv in die Entwicklung von Quantentechnologien. Allein die öffentlichen Investitionen summieren sich auf mehr als 40 Milliarden Euro (QURECA, 2025). Damit zählen Quantentechnologien zu den wichtigsten Zukunftstechnologien und stehen zugleich vor erheblichen, technischen, ökonomischen und gesellschaftlichen Herausforderungen. Für die Technikfolgenabschätzung (TA) ergeben sich daraus zentrale Beobachtungs- und Gestaltungsaufgaben.

I.2 Einführung in die Technikfolgenabschätzung

Die Entwicklung, Förderung und Regulierung tiefgreifender Technologien wie der Quantentechnologien erfordert nicht nur technisches, sondern auch gesellschaftliches Verständnis – insbesondere im Hinblick auf Risiken, Chancen und Zielkonflikte. Genau hier setzt die Technikfolgenabschätzung an: als inter- und transdisziplinärer Ansatz zur Bewertung technologischer Entwicklungen in ihrem gesellschaftlichen Kontext. TA liefert Entscheidungsträger:innen „zeitnahe strategische Informationen“, indem sie potenzielle wirtschaftliche, soziale, ökologische und ethische Auswirkungen neuer Technologien systematisch beleuchtet. Im Zentrum der TA steht die Frage, welche gesellschaftlichen Chancen, Risiken und Zielkonflikte mit einer neuen Technologie verbunden sein könnten und wie diese frühzeitig erkannt, abgewogen und politisch gestaltbar gemacht werden können (Grunwald, 2024).

Die TA entwickelte sich seit den 1970er Jahren als Reaktion auf die wachsende Komplexität technologischer Innovationen und deren oft schwer abschätzbaren unbeabsichtigten Nebenfolgen. Ein zentraler institutioneller Bezugspunkt ist das Office of Technology Assessment (OTA), das 1974 beim US-Kongress eingerichtet wurde. Es diente der wissenschaftlichen Beratung von politischen Entscheidungsträger:innen bei der Bewertung neuer Technologien durch die Zurverfügungstellung unabhängigen Orientierungswissens. Seitdem haben viele Länder (vor allem in Europa) ihre eigenen TA-Agenturen oder parlamentarischen Beratungsgremien eingerichtet und internationale Organisationen haben TA als Instrument für die Steuerung übernommen (Grunwald, 2024). TA verfolgt drei zentrale Ziele: (a) die systematische Analyse und Bewertung von Chancen und Risiken neuer Technologien, (b) die Information und Einbindung politischer Entscheidungsträger:innen sowie der Öffentlichkeit und (c) die Bereitstellung von Handlungsoptionen für eine verantwortungsvolle Technikgestaltung. TA verknüpft dabei

Erkenntnisse aus unterschiedlichsten Disziplinen, wie z.B. Natur-, Sozial-, Rechts- und Geisteswissenschaften und erweitert außerdem technologische Innovationslogiken um gesellschaftliche Perspektiven. Wichtig ist: TA bewertet nicht nur technische Leistungsfähigkeit, sondern auch indirekte, langfristige oder unbeabsichtigte gesellschaftliche Auswirkungen, etwas im Fall von Quantencomputing auf Datenschutz, Arbeitsmärkte und internationale Sicherheit. Auf diese Weise trägt die TA dazu bei, dass die Gesellschaft Innovationen zum Wohle der Allgemeinheit nutzen und gleichzeitig potenzielle Schäden proaktiv bewältigen kann (Grunwald, 2024).

Im Laufe der Zeit haben sich verschiedene methodische Ansätze in der TA etabliert. Sie lassen sich grob drei Idealtypen zuordnen (Grunwald, 2018):

- **Analytische TA** ist in der Regel expert:innengestützt und nutzt qualitative und quantitative Verfahren zur Risikoabschätzung, Kosten-Nutzen-Analysen, oder Policy- und Wirkungsanalysen. Ein Beispiel sind die TA-Studien des Büros für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestag (TAB) (Grunwald, 2003), die systematisch Entscheidungsgrundlagen für Parlamentarier:innen, u.a. zur synthetischen Biologie oder zur additiven Fertigung, aufbereiten. Diese von Expert:innen durchgeführten Bewertungen liefern Informationen für die strategische Planung und politische Maßnahmen, indem sie Chancen, Zeitpläne und damit verbundene Risiken aufzeigen.
- **Partizipative TA** erweitert den Bewertungsprozess um gesellschaftliche Perspektiven und bezieht betroffene und interessierte Akteur:innen ein, etwa durch Bürgerversammlungen, Konsenskonferenzen, Multi-Stakeholder-Workshops und deliberative Umfragen. So haben beispielsweise europäische Bürgerforen zur Nanotechnologie, vor allem in Belgien, Deutschland und Dänemark, die nationalen Forschungsagenden geprägt, indem sie ethische, ökologische und gesundheitliche Prioritäten hervorhoben, die bei

rein technischen Analysen übersehen wurden. Ziel ist eine breitere Legitimierung und Demokratisierung der Technikbewertung und das Abgleichen der technologischen Entwicklung mit gesellschaftlichen Erwartungen.

- **Vorausschauende TA (Foresight)** analysiert mögliche Zukunftsszenarien und Unsicherheiten. Typische Methoden sind Szenarienentwicklung, Horizon Scanning oder Delphi-Befragungen. Europäische Programme, darunter die deutsche BMBF-Foresight-Initiative (Cuhls et al., 2009) und das britische Foresight-Programm (Georghiou, 1996), haben damit strategische Innovationspolitik unterstützt.

In der Praxis werden diese drei Ansätze oft in unterschiedlichster Art und Weise kombiniert. Eine umfassende TA integriert diese analytischen, partizipativen und vorausschauenden Methoden, mit dem Ziel, technologische Entwicklungen gestaltbar zu machen, statt sie nur zu beobachten. Dabei unterscheidet sich das Design von TA-Studien auch in Abhängigkeit von der technologischen Reife der zu untersuchenden Technologie. Gerade in frühen Entwicklungsstadien, wie bei den QT, bestehen vielfältige, noch offene Entwicklungspfade. Eine reine konsequentialistische Technikfolgenabschätzung, die bereits prognostizierbare Zukünfte auf ihre Konsequenzen hin untersucht, ist daher aufgrund der Vielzahl der Möglichkeiten (noch) nicht möglich. Auch wenn dadurch die konkreten Technikfolgen schwerer abzuschätzen sind, ermöglicht dieser Zeitpunkt früher TA nach dem Collingridge-Dilemma (Collingridge, 1982) eine größere Steuerungsfähigkeit für Entscheidungsträger:innen. Dementsprechend gilt für QT, dass ein proaktiver, vorausschauender TA-Prozess hilfreich ist, um die Politik zu informieren, bevor Quantentechnologien in der Breite existieren und bestimmte Pfadabhängigkeiten bestehen. TA-Prinzipien erfordern daher frühzeitige, fundierte und flexible Governance-Strategien, um sicherzustellen, dass Quanteninnovationen mit gesellschaftlichen Werten vereinbar sind, den potenziellen Nutzen maximieren und unbeabsichtigte Schäden minimieren.

I.3 Beschreibung der Studie

Die vorliegende Studie zur Technikfolgenabschätzung für die Quantentechnologien wurde im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF)¹ im Rahmen des Forschungsprogramm Quantensysteme – Spitzentechnologie entwickeln. Zukunft gestalten. durchgeführt.

Quantentechnologien gelten als Schlüsseltechnologien mit hohem Innovationspotenzial. Durch ihre spezifischen Eigenschaften (siehe Abschnitt 1.1), etwa im Bereich Rechenleistung und Sensorsensitivität, eröffnen sie neue Anwendungen in Wissenschaft, Wirtschaft und Sicherheitsinfrastrukturen. Gleichzeitig wirft ihre Entwicklung grundsätzliche gesellschaftliche, ethische und sicherheitspolitische Fragen auf. Ziel dieser TA ist es daher, technologische Entwicklungen nicht nur zu beschreiben, sondern ihre möglichen, weitreichenden Auswirkungen systematisch zu analysieren und damit zu einer vorausschauenden, verantwortungsvollen Innovationspolitik beizutragen.

Die Studie untersucht acht zentrale Themenfelder, die im Vorfeld auf Basis von Vorstudien, Fachgesprächen und strategischer Relevanz für das BMBF identifiziert wurden.

1. **Status Quo der Technikfolgenabschätzung** in den QT: Analyse der derzeitigen Akteure, Forschungsansätze und Forschungslücken.
2. **Auswirkungen des Quantencomputings auf IT-Sicherheit:** Bewertung der Bedrohung bestehender Verschlüsselungsverfahren durch Quantencomputer sowie mögliche Gegenmaßnahmen.
3. **Nachhaltigkeit des Quantencomputing:** Untersuchung des Energie- und Ressourcenbedarfs von Quantencomputern sowie potenzieller Effizienzgewinne.

4. **Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik:** Einschätzung möglicher strategischer und militärischer Anwendungen hochpräziser Messmöglichkeiten.
5. **Konsequenzen ungleichen Zugangs zu Quantentechnologien/Quantencomputing:** Analyse geopolitischer und wirtschaftlicher Ungleichgewichte, durch asymmetrische Verfügbarkeit von Quantentechnologien.
6. **Gesellschaftliche Auswirkungen:** Diskussion von Folgen für Arbeitswelt, Qualifikationen, soziale Ungleichheit und Verteilungsgerechtigkeit.
7. **Diskurs über Quantentechnologien:** Untersuchung öffentlicher Deutungsmuster, Narrative und deren Einfluss auf die gesellschaftliche Akzeptanz.
8. **Unbeabsichtigte Nebenfolgen:** Identifikation potenzieller emergenter Effekte oder „Nebenprodukte“ der QT-Entwicklung.

Diese Themen wurden im Verlauf der Studie um **weiterführende Fragestellungen** ergänzt, wie z.B. zur gesellschaftlichen Wahrnehmung, zu Bildungsfragen sowie zur Rolle von Wissenschaftskommunikation und Kunst.

In ihrer Gesamtheit zielen die untersuchten Themen auf eine ausgewogene Betrachtung technologischer, wirtschaftlicher, ethischer, sozialer und sicherheitspolitischer Aspekte ab. Sie spiegeln das Bestreben wider, die Entwicklung von Quantentechnologien im Sinne einer verantwortungsvollen, wertebasierten und strategisch reflektierten Innovationspolitik zu begleiten.

I.4 Zeitplan und Methodik

Die Studie wurde zwischen Juli 2024 und Mai 2025 durchgeführt. Sie umfasste eine systematische Literaturrecherche, leitfadengestützte Interviews, eine Online-Umfrage sowie einen zweitägigen

¹ Zum Zeitpunkt der Studienveröffentlichung „Bundesministerium für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR)“. Im Folgenden weiterhin BMBF.

Visionsworkshop. Die Ergebnisse der Literaturrecherche finden sich in Kapitel 2, die ausführlichen Ergebnisse der Interviews, Umfrage und des Workshops in Kapitel 4, sowie zusammengefasst in Kapitel 5. Im Zentrum standen vier Stakeholdergruppen: Wissenschaft, Wirtschaft und Industrie, Zivilgesellschaft (z.B. NGOs, Verbände, gemeinnützige Organisationen) sowie öffentliche Einrichtungen und Behörden, insbesondere solche mit Regulierungs- und/oder Sicherheitsbezug auf Bundes- oder Landesebene. Auf Basis der Literaturrecherche und einer umfassenden Stakeholder-Analyse (vgl. Abschnitt 3.1) wurden jeweils Personen aus diesen Gruppen identifiziert und kontaktiert. Da sich die Studie auf eine TA der europäischen QT-Entwicklung mit Schwerpunkt Deutschland konzentriert, wurde ein 3:2-Auswahlverhältnis angewendet: Pro Stakeholdergruppe wurden drei Expert:innen aus Deutschland und zwei aus anderen europäischen Ländern (oder der Europäischen Kommission) berücksichtigt.

1.4.1 Interviews und Umfrage

Der Interviewfragebogen wurde halbstrukturiert gestaltet und bestand aus 25 Fragen, die anhand der Literaturrecherche und in Absprache mit der Projektkoordination im BMBF ermittelt wurden. Von den 25 Fragen bezogen sich drei auf den Hintergrund der Befragten (die für die Analyse verwendet, aber aus Gründen der Anonymisierung aus dem Datensatz herausgenommen wurden), 16 auf die acht zentralen Themen (die in Abschnitt 1.3 vorgestellt wurden) mit jeweils zwei Fragen, fünf Fragen zu weiteren Themen (wie z. B. die gesellschaftliche Wahrnehmung von QT oder die Rolle oder Funktion der Kunst bei der Information der Gesellschaft) und eine Frage, in der die Befragten Themen vorschlagen konnten, die ihrer Meinung nach im Fragebogen übersehen worden waren. In der Umfrage wurde derselbe Fragenkatalog verwendet, ergänzt um offene Antwortfelder und Rankingskalen zur differenzierten Erhebung.

Die Interviews wurden mit insgesamt 20 Expert:innen aus Wissenschaft, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und Verwaltung geführt, die über fundierte Erfahrung in Forschung, Transfer, Regulierung gesellschaftlicher Begleitung oder politischer Koordination im Kontext von QT verfügen. Die Interviews fanden online statt, wurden aufgezeichnet, transkribiert, kodiert und inhaltsanalytisch ausgewertet.

Die Onlineumfrage wurde über einen datenschutzkonformen Server realisiert. Sie richtete sich an zuvor identifizierte Expert:innen aus dem erweiterten Stakeholder-Feld.

1.4.2 Workshop

Der zweitägige Workshop im Januar 2025 diente als inhaltliche Erweiterung der Interviews und Umfragen. Ziel war es, wünschenswerte Zukünfte für die Entwicklung der Quantentechnologien in Deutschland und Europa bis zum Jahr 2045 zu entwerfen und darauf aufbauend politische Handlungsempfehlungen zum Erreichen dieser abzuleiten. Der Workshop setzte auf partizipative Methoden: In Einzel- und Gruppenarbeiten wurden Visionen formuliert, Szenarien bewertet und Rückwirkungen auf Politik und Gesellschaft diskutiert. Die erarbeiteten Visionen bildeten die Grundlage für eine Stakeholder-spezifische Ableitung von Handlungsempfehlungen.

Insgesamt nahmen 17 Personen teil, die im Rahmen der Stakeholder-Analyse identifiziert worden waren. Neben den vier zentralen Stakeholdergruppen (Wissenschaft, Wirtschaft und Industrie, Zivilgesellschaft und öffentliche Einrichtungen und Behörden) wurden gezielt vier Personen aus Kunst und Kultur einbezogen, um die kreative und normative Rahmung der Visionen zu erweitern. Alle Teilnehmenden verfügten über QT-relevante Kenntnisse und brachten zusätzliche thematische Perspektiven ein.

I.4.3 Auswertung übergreifender Erkenntnisse

Die Ergebnisse der einzelnen Arbeitspakete Interviews, Umfrage und Workshop wurden abschließend zum Herausarbeiten der zentralen Ergebnisse zusammengetragen und übergreifende Erkenntnisse qualitativ herausarbeitet (Kapitel 5). Die thematische Aufteilung erfolgte entlang des Interviewfragebogens, wobei einzelne Fragenkategorien aufgrund ähnlicher Antworten zusammengefasst wurden. Die in Kapitel 5 genannten Ergebnisse dienen somit als zentrale Ergebnisse dieser Studie.

I.5 Limitationen der Studie

Diese Studie wurde in einem Bereich durchgeführt, der sich schnell entwickelt. Die Quantentechnologien sind noch im Fluss und die technischen, kommerziellen und institutionellen Entwicklungen schreiten schnell voran. Dies bedeutet, dass einige der Beobachtungen in diesem Bericht in naher Zukunft überholt sein könnten, insbesondere wenn sie bestimmte Anwendungsfälle oder Erwartungen an die technologische Reife betreffen.

Die Rücklaufquote der schriftlichen Umfrage blieb hinter den Erwartungen zurück. Möglicherweise haben die Länge und Komplexität des Fragebogens jene Akteursgruppen von der Teilnahme abgehalten, die über weniger zeitliche Ressourcen verfügen, etwa kleinere Organisationen oder zivilgesellschaftliche Initiativen. In der Folge sind bestimmte

Perspektiven in der Stichprobe nur eingeschränkt vertreten, während Stimmen aus dem Wissenschaftsbereich mit 26 von 37 Befragten deutlich überwiegen. Die Überrepräsentation wissenschaftlicher Perspektiven wurde bei der Auswertung berücksichtigt und durch gezielte Rückkopplung mit Stakeholdern aus Zivilgesellschaft und Behörden im Workshop ergänzt. Zudem zeigte sich eine gewisse Unschärfe in der Antwortverteilung: Einige Fragen wurden deutlich häufiger beantwortet als andere. Die Datenbasis der Umfrage ist daher nicht durchgängig stabil und erlaubt keine statistisch belastbare Generalisierung. Die Umfrageergebnisse sollten daher nicht als repräsentatives Meinungsbild interpretiert werden, sondern vielmehr als ergänzende Perspektive und zur Plausibilisierung der qualitativen Interviewergebnisse herangezogen werden.

Die sozialen Auswirkungen der Quantentechnologien lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt nur schwer abschätzen. Zwar zielt diese Studie darauf, potenzielle Entwicklungen frühzeitig zu identifizieren und einzuordnen, doch befinden sich viele Technologien noch in einem sehr frühen Reifestadium. Entsprechend beruhen zahlreiche Einschätzungen auf Annahmen, die sich mit dem weiteren technischen Fortschritt verändern können. Die Ergebnisse sind daher nicht als abschließende Bewertung zu verstehen, sondern als Beitrag zu einer laufenden, offenen Diskussion über gesellschaftlich wünschenswerte Entwicklungspfade.

2 Literatur zur Abschätzung der Technikfolgen von Quantentechnologien

Dieses Kapitel dokumentiert die systematische Literaturrecherche zu technikfolgenabschätzungs-relevanten Arbeiten im Bereich der Quantentechnologien. Die Recherche diente als Grundlage für die Entwicklung der Interview- und Umfrageinstrumente sowie für die Auswahl relevanter Stakeholdergruppen. Das Kapitel gliedert sich in zwei Teile: die Auswertung wissenschaftlicher Literatur (2.1) und die Analyse grauer Literatur (2.2).

2.1 Wissenschaftliche Literatur

In diesem Abschnitt wird die Sichtung der wissenschaftlichen Literatur, die in begutachteten und in Scopus-indizierten Medien veröffentlicht wurde und die sich auf TA-relevante Veröffentlichungen zu Quantentechnologien konzentriert, beschrieben. Ziel war es, einen Überblick über das vorhandene Forschungsfeld zu erhalten und daraus relevante Themen, Akteurskonstellationen und Forschungslücken abzuleiten. Die Abfrage wurde am 21. Juli 2024 durchgeführt und auf den Zeitraum 2010–2024 sowie auf wissenschaftliche Artikel, Konferenzbeiträge, Buchkapitel und Monografien beschränkt.

Die Recherche erfolgte mittels einer kombinierten Suchstrategie in der Scopus-Datenbank, die sich an Studien von (Wolbring, 2022) und (Umbrello et al., 2024) orientierte. Der erste Suchblock (in blau) umfasste Begriffe zu QT (u. a. quantum computing, quantum sensing, quantum communication), der zweite (in orange) TA-relevante Schlagworte (u. a. ethics, societal impact, responsible innovation):

(("quantum comm*" OR "quantum crypto*" OR "quantum key distribution" OR (qkd AND quantum) OR "quantum network*" OR "quantum channel*" OR "quantum internet" OR "quantum repeater*")) OR ("quantum comput*" OR "quantum software" OR

"quantum algorithm*" OR "quantum simulation" OR "quantum programming" OR "quantum coding" OR "quantum error correct*" OR "quantum circuit*" OR "quantum logic gate" OR "quantum annealing" OR "quantum machine learning" OR ("QML" AND quantum)) OR ("quantum sens*" OR "quantum imag*" OR "quantum metro*" OR "quantum noise engineering" OR "quantum state engineering" OR "quantum magnet*" OR "quantum gravimet*" OR "quantum thermomet*" OR "quantum gyroskop*" OR "quantum tech*") AND ("responsibility" OR "ethic*" OR "technology assessment" OR "societal" OR "stakeholder*" OR "technology policy" OR "science policy" OR "innovation policy" OR "STI policy" OR "justice" OR "equity" OR "EDI" OR "DIE" OR "DEI" OR "RRI" OR "responsible tech*" OR "responsible innovation" OR "national strategy" OR "democra*")

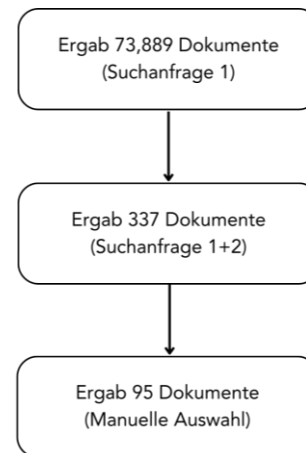


Abbildung 2.1: Literaturrecherche-Strategie zur Identifizierung von TA-relevanten Publikationen von QT.

Die kombinierte Suche ergab zunächst 337 Treffer. Zum Vergleich wurde eine Abfrage nur mit den hellblau markierten Schlüsselwörtern und denselben

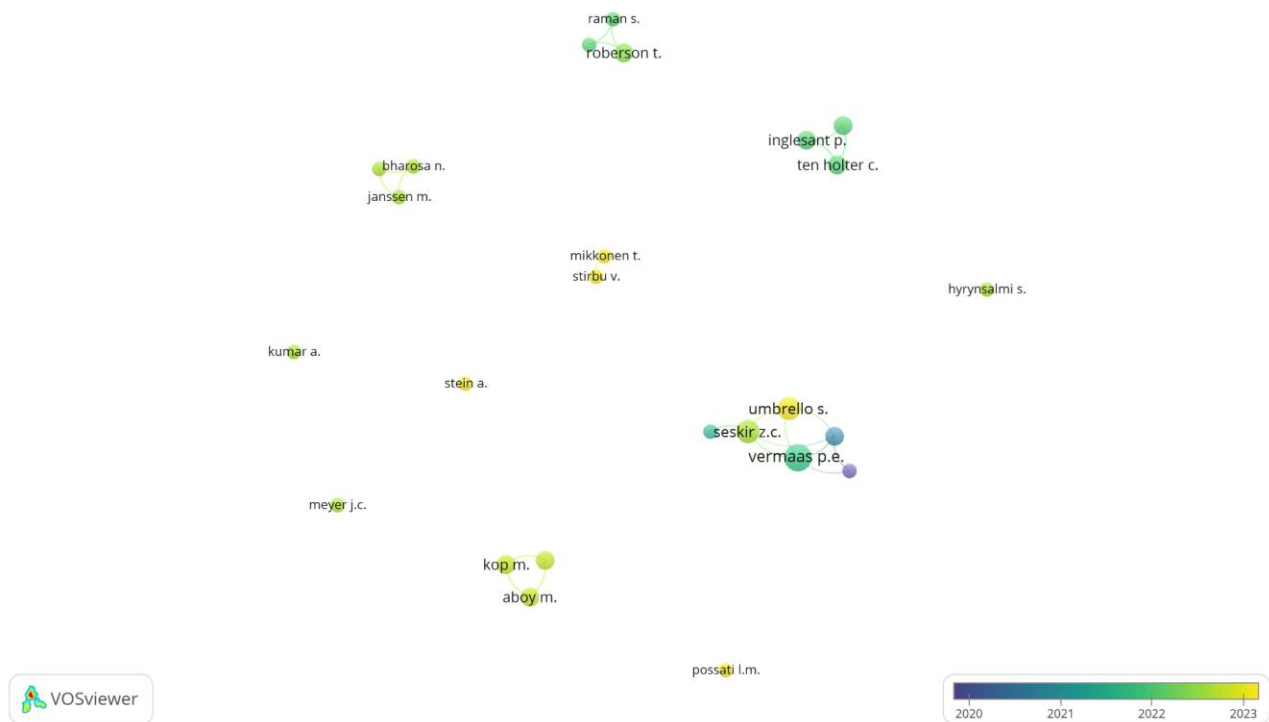


Abbildung 2.2: Analyse der Ko-Autorenschaft bei Autor:innen mit mindestens zwei TA-relevanten Publikationen von QT.

Einstellungen durchgeführt. Diese ergab 73.889 Treffer. Im Anschluss wurden die Titel und Zusammenfassungen jener 337 Dokumente manuell überprüft. Es stellte sich heraus, dass die meisten dieser Dokumente den Fokus nicht auf QT und auf gesellschaftlich oder TA-relevante Perspektive legen. Stattdessen zeigte sich, dass die Dokumente entweder verschiedene QT-Teilbereiche neben anderen in ihren Zusammenfassungen erwähnen (wie KI, Blockchain, 3D-Druck, Biotechnologie und andere). Oder aber sie konzentrieren sich auf technische Aspekte und gesellschaftliche Dimensionen werden nur beiläufig erwähnt. Solche Artikel wurden aussortiert und lediglich die Artikel ausgewählt, die i) sich explizit auf QT fokussieren oder QT als wesentlich für das Hauptthema betrachten (wie z.B. drahtlose Sicherheit), und ii) ausdrücklich ethische, soziale, rechtliche oder politische Aspekte erwähnen. Nach dieser manuellen Analyse blieben 95 Dokumente von den ursprünglich 73.889 Treffern übrig (siehe Abbildung

2.1). Folglich lässt sich feststellen, dass nur etwa 0,1 % der gesamten QT-Literatur gesellschaftlich relevante Themen und Fragen behandelt.

Ausgehend von den 95 Dokumenten, wurden im zweiten Schritt die Metadaten der Artikel aus der Scopus-Datenbank heruntergeladen und die Ko-Autorenschaft von Autoren und Ländern sowie die Koinzidenz von Schlüsselwörtern geprüft. Dafür wurde die Software VOSviewer² (van Eck & Waltman, 2017) verwendet.

In der Analyse der Ko-Autorenschaft für die 95 Dokumenten konnten elf Cluster mit insgesamt 25 Autor:innen aus 17 verschiedenen Ländern identifiziert werden, die jeweils mindestens mit zwei Dokumenten in dem Datensatz von 95 Artikeln, Konferenzberichten, Büchern und Buchkapiteln vertreten waren. Zudem ergab die Analyse von Schlüsselwörtern, welche in mindestens drei von den 95 Dokumenten vorkamen, ein Aufkommen von insgesamt 41 ein

² Der VOSviewer ist ein frei zugängliches Software-Tool und wird genutzt, um bibliometrische Netzwerke

konstruieren und visualisieren zu können (<https://www.vosviewer.com/>)

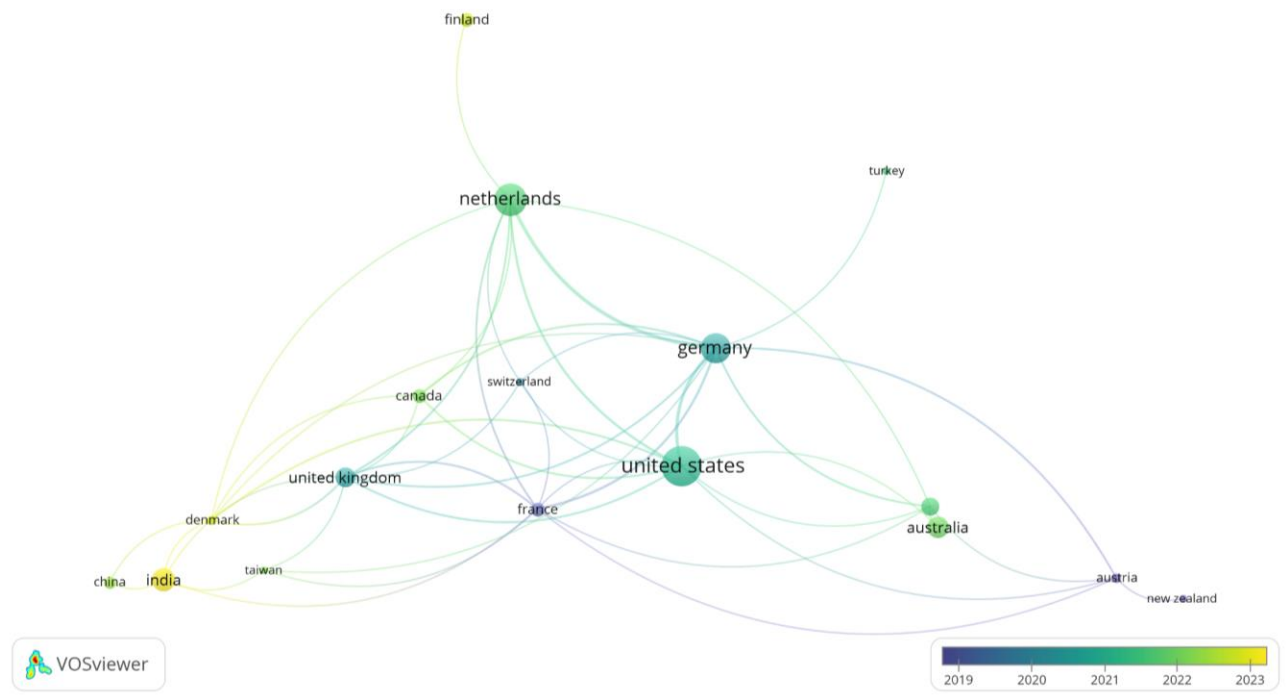


Abbildung 2.3: Analyse der Ko-Autorenschaft für Länder mit mindestens zwei TA-relevanten Publikationen von QT.

Aufkommen von insgesamt 41 Schlüsselwörtern (vgl. Abbildung 2.5)³. Um der Analyse eine zeitliche Dimension hinzuzufügen, wurde das Overlay-Visualisierungstool VOS-Viewer verwendet: Wie in Abbildung 2.5 zu sehen, ließ sich über die Farbwahl das zeitliche Auftreten der Schlüsselwörter auswerten, wobei QT-nahe Begriffe vor allem in jüngeren Jahren auftauchten. Die Größe der Kästen um die Schlüsselwörter lieferte dazu einen Hinweis auf die Häufigkeit der Verwendung dieser Schlüsselwörter (Anzahl an Publikationen mit diesen Schlüsselwörtern). Weiterhin lieferten die Nähe der Begriffe sowie die Linienstärke zwischen diesen eine Information über die Häufigkeit gemeinsamen Auftretens.

Weiterhin wurde die Anzahl der pro Jahr veröffentlichten Dokumente ausgewertet (Abbildung 2.4). Hierdurch wurde ersichtlich, dass die Zahl der Veröffentlichungen pro Jahr zwischen 2020 und 2024 signifikant anstieg. Eine mögliche Erklärung für diese Entwicklung ist die deutlich gestiegene

Aufmerksamkeit für das Thema Quantentechnologien und vor allem Quantencomputing nach den Erfolgen Googles mit dem Sycamore-Prozessor (Arute et al., 2019) im Jahr 2019. Da der Datensatz im Juli 2024 erstellt wurde, wurde anschließend die Anzahl an Publikationen im Jahr 2024 auf das gesamte Jahr 2024 hochgerechnet, was etwa 30 Publikationen

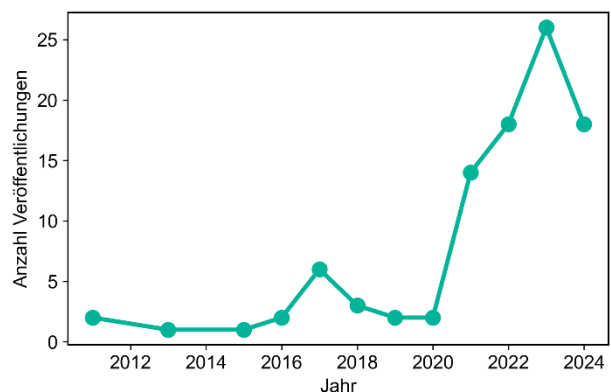


Abbildung 2.4: Anzahl der wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu TA-relevanten QT-Publikationen pro Jahr im Datensatz.

³ Die in den Abbildungen 2.2, 2.3 und 2.5 verwendete Farbgebung und Größe der einzelnen Begriffe wurden

jeweils individuell für die in den Abbildungen dargestellten Jahres- und Themenbereiche normiert und erstellt.

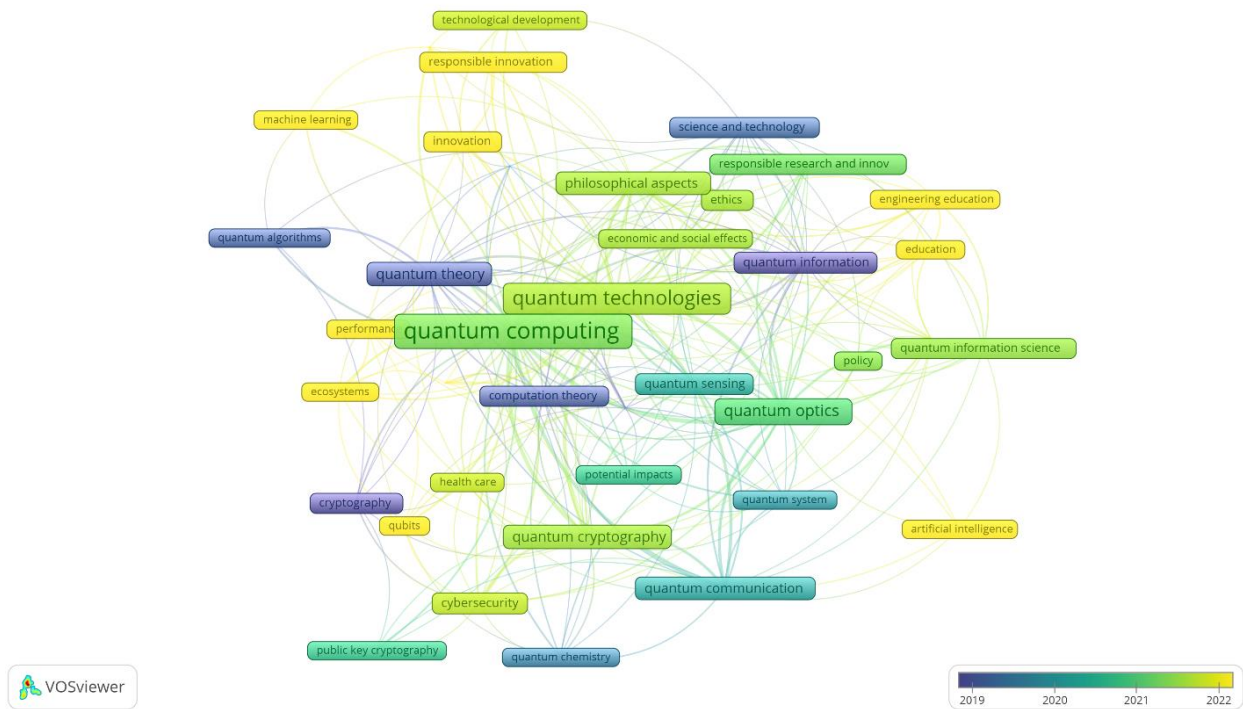


Abbildung 2.5: Analyse des gemeinsamen Vorkommens von Schlüsselwörtern in mindestens drei Dokumenten des Datensatzes.

ergab. Diese Zahl deutet darauf hin, dass der Aufwärtstrend der TA-relevanten QT-Publikationen seit 2020 mit hoher Wahrscheinlichkeit angehalten hat.

Darüber hinaus wurden alle in den 95 Dokumenten genannten finanziellen Zuwendungsgeber ausgewertet (siehe Abbildung 2.6). Auf die National Science Foundation wurde dabei am häufigsten verwiesen, gefolgt vom Australian Research Council und der Europäischen Kommission. Es lässt sich jedoch feststellen, dass Forschungsprogramme wie bspw. Horizon 2020 mehrfach unter teils abweichenden Bezeichnungen geführt wurden, weshalb die absoluten Zahlen mit Vorsicht zu betrachten sind.

Anschließend wurde der Datensatz dahingehend analysiert, welche der Autor:innen-Organisationen mit mindestens drei Beiträgen gelistet war. Wie in Abbildung 2.7 zu sehen, war die TU Delft aus den Niederlanden mit 11 von 95 Dokumenten gelistet, (mindestens ein Erst- und/oder Ko-Autor). Danach folgten mit jeweils fünf Dokumenten die University of Oxford (UK), die University of Queensland

(Australien) und das Karlsruher Institut für Technologie (KIT) (Deutschland). Dieses Ergebnis deckt sich mit den in Abbildung 2.3 dargestellten Beziehungen zwischen den einzelnen Ländern, die jeweils als Koautoren auftreten.

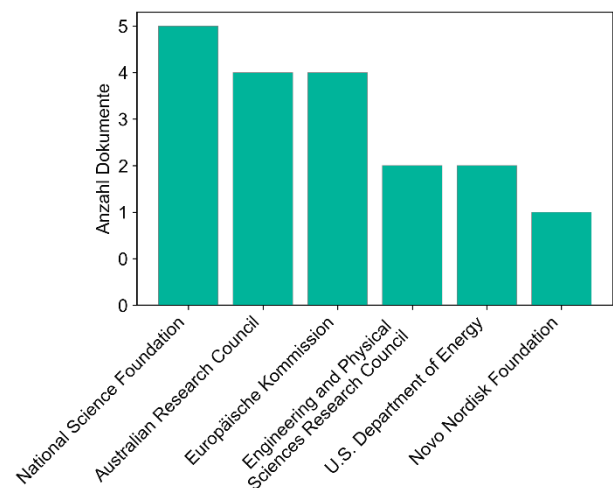


Abbildung 2.6: Zuwendungsgeber, die in mindestens zwei Dokumenten des Datensatzes genannt werden.

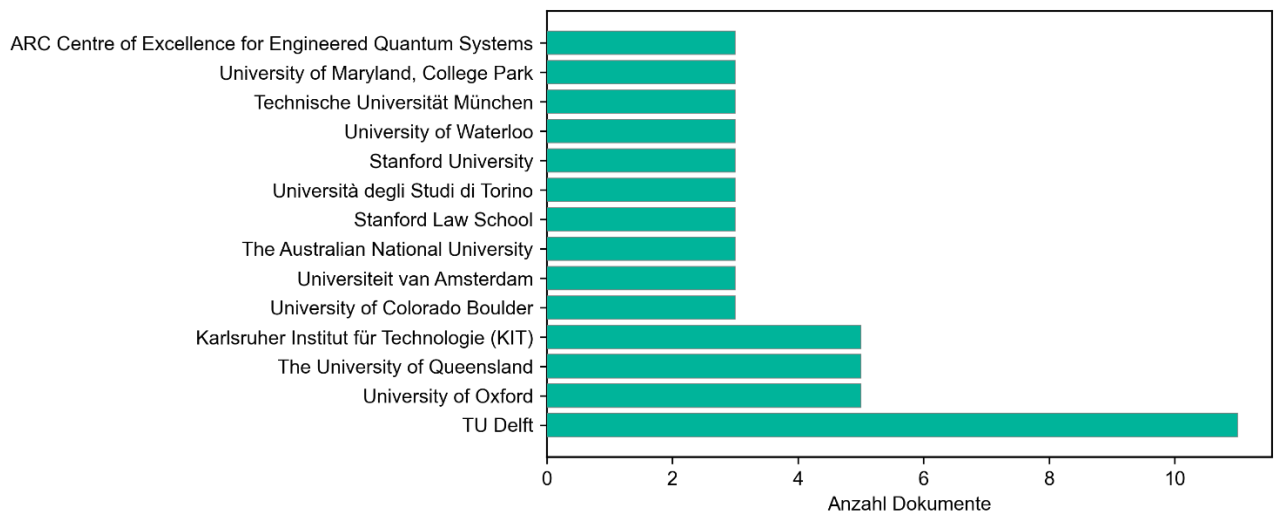


Abbildung 2.7: Anzahl der TA-relevanten Publikationen von QT nach Organisationen mit mehr als zwei Dokumenten im Datensatz.

Als Nächstes wurde mittels einer *Burst-Analyse* überprüft, ob in der Literatur markante Schlüsselwörter plötzlich auftauchten (siehe Abbildung 2.8). Neben „philosophical aspects“ (philosophische Aspekte) konnten so insbesondere erwartete Schlüsselwörter wie *Quantencomputing*, *Quantensensorik*, *Quantentechnologien* und *Quantenoptik* identifiziert werden. Die prominente Stellung dieser Begriffe steht in Einklang mit ihrer zentralen Position in der bibliographischen Karte in Abbildung 2.5, welche auch auf die oftmalige direkte Verbindung mit anderen Begriffen zurückzuführen ist. Gleichzeitig zeugt dieser Fokus auf technische Schlüsselworte davon, dass sich die Forschung bisher wenig mit den potenziellen, nicht-intendierten Folgen und den gesellschaftlichen, rechtlichen und ethischen Fragestellungen beschäftigt hat, die sich aus der Anwendung der Technologien ergeben könnten.

Danach wurden die am meisten zitierten Dokumente im Datensatz untersucht. Hierzu wurden die Dokumente mit mehr als 15 Zitierungen ausgewählt, was den „Top 20“ der 95 Dokumente im Datensatz entsprach. Die vollständige Liste mit In-Text- Zitierungen und Titeln sind in Tabelle 2.1 aufgeführt.

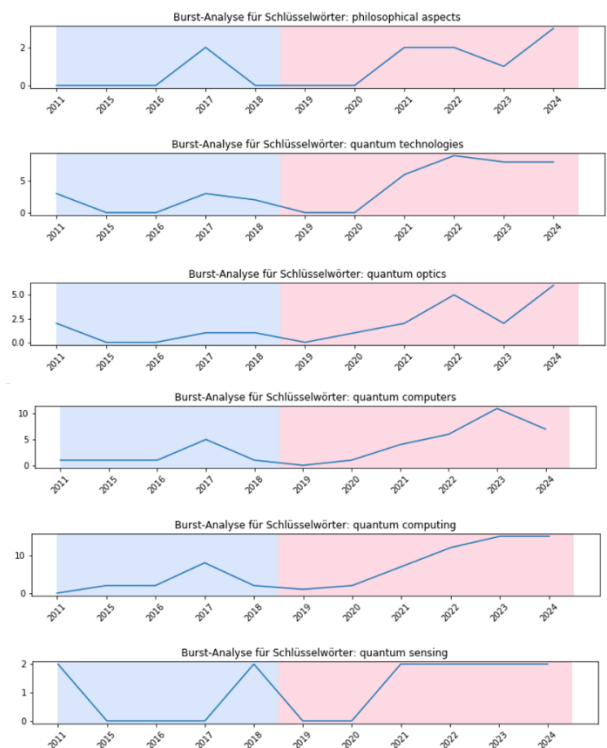


Abbildung 2.8: Burst-Analyse der Schlüsselwörter im Datensatz. Von oben abwärts: philosophical aspects, quantum technologies, quantum optics, quantum computers, quantum computing, quantum sensing.

Tabelle 2.1: TA-relevanter Publikationen von QT im Datensatz mit mehr als 15 Zitierungen in alphabetischer Reihenfolge.

Referenz	Titel
(Acín et al., 2018)	The quantum technologies roadmap: A European community view
(Auffèves, 2022)	Quantum Technologies Need a Quantum Energy Initiative
(Möller & Vuik, 2017)	On the impact of quantum computing technology on future developments in high-performance scientific computing
(Krelina, 2021)	Quantum technology for military applications
(Aiello et al., 2021)	Achieving a quantum smart workforce
(de Wolf, 2017)	The potential impact of quantum computers on society
(Kumar et al., 2022)	Futuristic view of the Internet of Quantum Drones: Review, challenges and re-search agenda
(Dyakonov, 2019)	When will useful quantum computers be constructed? Not in the foreseeable future, this physicist argues. Here's why: The case against: Quantum computing
(Roberson et al., 2021)	Talking about public good for the second quantum revolution: Analysing quantum technology narratives in the context of national strategies
(Hughes et al., 2021)	Assessing the Needs of the Quantum Industry
(Vermaas, 2017)	The societal impact of the emerging quantum technologies: a renewed urgency to make quantum theory understandable
(Svore & Troyer, 2016)	The Quantum Future of Computation
(Coenen & Grunwald, 2017)	Responsible research and innovation (RRI) in quantum technology
(Gupta et al., 2023)	Quantum computing led innovation for achieving a more sustainable Covid-19 healthcare industry
(Taylor, 2020)	Quantum Artificial Intelligence: A “precautionary” U.S. approach?
(Ten Holter et al., 2023)	Reading the road: challenges and opportunities on the path to responsible innovation in quantum computing
(Wolbring, 2022)	Auditing the ‘Social’ of Quantum Technologies: A Scoping Review
(Seskir & Aydinoglu, 2021)	The landscape of academic literature in quantum technologies
(Inglesant et al., 2021)	Asleep at the wheel? Responsible Innovation in quantum computing
(Atik & Jeutner, 2021)	Quantum computing and computational law

Tabelle 2.2: Zuordnung der gefundenen TA-relevanter Publikationen von QT zu den mit dem BMBF abgestimmten Themenfeldern.

Themenfeld	Artikel
1 – Status Quo der Technikfolgenabschätzung in den Quantentechnologien	(Coenen & Grunwald, 2017; Seskir & Aydinoglu, 2021; Wolbring, 2022)
2 – Auswirkungen des Quantencomputings auf IT-Sicherheit	(Atik & Jeutner, 2021)
3 – Nachhaltigkeit des Quantencomputing	(Auffèves, 2022; Gupta et al., 2023)
4 – Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik	(Krelina, 2021)
5 – Konsequenzen ungleichen Zugangs zu Quantentechnologien/Quantencomputing	(de Wolf, 2017; Ten Holter et al., 2023)
6 – Gesellschaftliche Auswirkungen	(Aiello et al., 2021; Hughes et al., 2021; Vermaas, 2017)
7 – Diskurs über Quantentechnologien	(Dyakonov, 2019; Möller & Vuik, 2017; Roberson et al., 2021; Svore & Troyer, 2016)
8 – Unbeabsichtigte Nebenfolgen	(Inglesant et al., 2021; Taylor, 2020)

Durch die nachfolgende Zuordnung dieser „Top 20“-Artikel zu den im Vorfeld mit dem Auftraggeber BMBF identifizierten Themenfeldern sollte herausgefunden werden, ob die identifizierten Themen mit der aktuellen Diskussion in denjenigen Veröffentlichungen übereinstimmen, die einen großen Impact, also eine hohe Zitierungsrate, aufwiesen (siehe Tabelle 2.2). Dies sollte klären, ob die Themen, die in den Interviews und der Umfrage behandelt werden sollten, die aktuelle Diskussion entsprechend abdeckten. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass obwohl die Anzahl der Zitierungen oft als Indikator für den Einfluss („Impact“) verwendet wird, das Forschungsfeld jedoch erst seit kurzem an Bedeutung gewonnen hat und die meisten Veröffentlichungen erst nach 2020 erfolgten (vgl. Abbildung 2.4). Daher könnte sich der Schwerpunkt der Themen in den kommenden Jahren verschieben.

In Verbindung mit der Liste aus Tabelle 2.1 ergaben sich daraus mehrere Hinweise für den weiteren Studienverlauf:

1. Es besteht eine starke Übereinstimmung zwischen der zu behandelnden Themenliste und

dem aktuellen Stand der TA-relevanten Literatur zu QT.

2. Themen wie *IT-Sicherheit* und *sicherheitspolitische Implikationen von QT* sind in der Literatur bisher nicht gut erforscht. Aufgrund der Aktualität dieser Themen könnte man argumentieren, dass sie eher unter technischen Aspekten als unter gesellschaftlichen und politischen Aspekten behandelt und publiziert werden.
3. Einige Veröffentlichungen konnten nicht nur einem Thema zugeordnet werden, da sie mehrere Themen behandeln, wie zum Beispiel (Acín et al., 2018) und (Kumar et al., 2022) (vgl. Tabelle 2.2). Dies war jedoch zu erwarten, da gesellschaftlich relevante Problemlagen und damit die Themen selten klare Grenzen haben (z.B. werden gesellschaftliche Auswirkungen auch in Arbeiten zum *Status Quo der Technikfolgenabschätzung von Quantentechnologien* mitbehandelt oder *Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik* könnten auch unter *unbeabsichtigte Nebenfolgen* fallen).
4. Angesichts des großen Zeitraums der meistzitierten Artikel (von 2016 bis 2023), die als

Vergleichsbasis genommen wurden, ließ sich argumentieren, dass besonders TA-Fragen zu diesem Thema erforscht werden sollten und mehr grundlegende Beiträge notwendig sind. Daher erscheint es ratsam, diese Literaturübersicht regelmäßig zu aktualisieren, um die Entwicklungen zu verfolgen und sie in ein Echtzeit-TA-Modell zu integrieren.

Zusammenfassend konnten durch die Analyse der TA-relevanten wissenschaftlichen Literatur zu QT mehrere Erkenntnisse gewonnen werden. Zunächst lässt sich festhalten, dass lediglich ein sehr kleiner Teil der veröffentlichten Dokumente (ungefähr 0,4 %) explizit gesellschaftliche oder politische Aspekte von QT erwähnt. Selbst innerhalb der kleinen Anzahl an Veröffentlichungen, die diese Aspekte behandelt, sind nur etwa 28 % (95 von 337) tatsächlich für die TA relevant. Die Mehrheit dieser Artikel führen diese Aspekte entweder nur sehr oberflächlich an oder streifen QT-Teilbereiche nur am Rande, ohne sie eingehend zu behandeln. Infolgedessen beträgt der effektive Anteil der TA-relevanten wissenschaftlichen Literatur zu QT ungefähr 0,1% der Gesamtheit der wissenschaftlichen Literatur zu QT. Des Weiteren nimmt Deutschland in diesem Bereich der Literatur eine führende Position ein (unter den Top 4), Europa insgesamt schneidet insbesondere durch die Beiträge der TU Delft noch besser ab (vier von fünf der meist zitierten Artikel stammen aus Europa). Außerdem hat sich gezeigt, dass der QT-Bereich erst nach dem Jahr 2020 richtig Fahrt aufgenommen hat, weswegen der Großteil der Literatur weniger als fünf Jahre alt ist. Das impliziert, dass spezifische regelmäßige bibliometrische Analysen, wie beispielsweise die Erkennung von Ausbrüchen (siehe Burst-Analyse in Abbildung 2.8), noch nicht besonders hilfreich sind, um Trends und Muster zu erkennen. Ebenso erscheint es notwendig, manuelle Sortierungen und Selektionen der Literatur vorzunehmen, um die Entwicklung dieser Literatur verfolgen zu können.

Außerdem entsprechen die acht für diese Studie identifizierten Themen weitgehend der akademischen Literatur in diesem Bereich. Die Themen *IT-Sicherheit* und *sicherheitspolitische Implikationen* sind jedoch in den besonders bedeutenden Teilen der Literatur unterrepräsentiert bzw. nicht ausreichend vertreten.

2.2 Graue Literatur

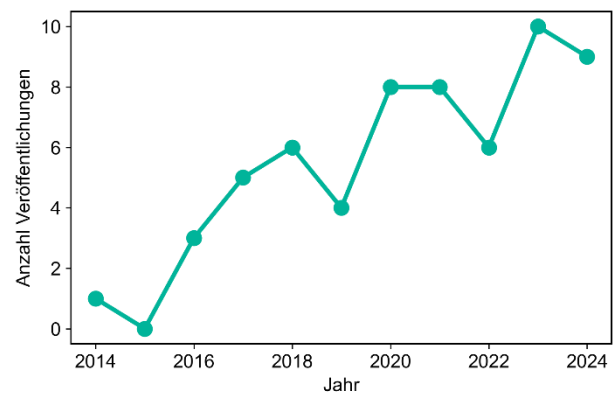


Abbildung 2.9: Anzahl der Veröffentlichungen TA-relevanter grauer Literatur zu QT pro Jahr im Datensatz.

Anschließend an die Analyse der wissenschaftlichen TA-relevanten Literatur zu QT wurden Quellen der sogenannten grauen Literatur, wie z.B. unveröffentlichte Vorabdrucke sowie Berichte von öffentlichen Einrichtungen, von Think Tanks, von Politikzentren und anderen, ausgewertet. Um den Datensatz der TA-relevanten grauen Literatur zu QT zu erstellen, wurden die Referenzen der 20, in Tabelle 2.1 aufgeführten, wissenschaftlichen Veröffentlichungen manuell durchsucht. Alle Verweise auf graue Literatur in diesen Artikeln, die explizit auf QT Bezug nehmen, wurden dokumentiert.

Zu Beginn wurden auf diese Weise 34 Berichte und 11 Preprint-Artikel (hauptsächlich von arXiv⁴) identifiziert. Da die Aufstellung in Tabelle 2.1 jedoch die Jahre 2023 und 2024 nicht abdeckte, wurden 26 Berichte und zwei arXiv-Preprints zusätzlich manuell

⁴ arXiv ist ein kostenloser Verbreitungsdienst und ein Open-Access Archiv.

Tabelle 2.3: Veröffentlichungsjahr der grauen Literatur in Bezug auf die geografische Verteilung pro Jahr im Datensatz.

Jahr	AUS	DE	EU	CAN	NL	UK	USA	Gesamt
2014						1		1
2015								
2016			1			2		3
2017	1		1	2		1		5
2018			3			2	1	6
2019							3	3
2020			2	1		4	1	8
2021	2	1		2		1	2	8
2022	1		1	2				4
2023		2	2	2	2		1	9
2024		1	2		2	2	1	8
Insgesamt	4	4	12	9	4	13	9	55

zum Datensatz hinzugefügt, welche nach Wissen des Projektteams als besonders wichtig eingeschätzt wurden. Somit ergab sich ein Datensatz an grauer Literatur von 60 Berichten und 13 Vorabdrucken.

Im nächsten Schritt wurde die zeitliche und geografische Verteilung der Berichte überprüft (siehe Abbildung 2.9 und Tabelle 2.3). Für die geografische Analyse wurden 55 Bericht einbezogen, wobei ein Bericht aus den Vereinigten Arabischen Emiraten und vier Berichte des Weltwirtschaftsforum (WEF) aufgrund der geringen Berichtszahl dieser Akteure ausgeklammert wurden (Tabelle 2.3). Rein europäische Organisationen, wie bspw. das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen, ETSI mit Sitz in Frankreich, sind unabhängig von ihren länderspezifischen Standorten unter *EU* aufgeführt. Amerikaweite Organisationen wie die IDB wurden aufgrund der Dominanz US-amerikanischer Organisationen unter den *USA* aufgeführt.

Da es für graue Literatur per Definition keine strukturierten Datenbanken gibt, die die einzelnen Zitierungen zu diesen Dokumenten erfassen, war es nicht möglich aus diesen 73 Dokumenten die bedeutendsten Berichte und Vorabdrucke händisch zu ermitteln und zu kategorisieren. Aus diesem Grund wurden zur

Analyse Künstliche Intelligenz (KI), genauer ChatGPT-4, genutzt. Hierzu wurden alle 73 öffentlich zugänglichen Dokumente heruntergeladen und die Titel und die Kurzzusammenfassungen der Dokumente in ChatGPT-4 hochgeladen, um sie anschließend von der KI kategorisieren zu lassen. Auf diese Weise konnten 65 von 73 Dokumenten wie folgt kategorisiert werden:

- Status Quo der Technikfolgenabschätzung in den Quantentechnologien: 15 Artikel
- Auswirkungen des Quantencomputings auf IT-Sicherheit: 8 Artikel
- Nachhaltigkeit des Quantencomputings: 9 Artikel
- Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik: 6 Artikel
- Konsequenzen ungleichen Zugangs zu Quantentechnologien/Quantencomputing: 5 Artikel
- Gesellschaftliche Auswirkungen: 5 Artikel
- Diskurs über Quantentechnologien: 11 Artikel
- Unbeabsichtigte Nebenfolgen: 6 Artikel

Diese Kategorisierung wurde im Anschluss manuell überprüft und nachträglich mehrere Einträge korrigiert. So wurde beispielsweise ein Bericht mit dem Titel „A Methodology for Quantum Risk Assessment“

fälschlicherweise von der KI der Kategorie *Status quo der TA in den QT* zugeordnet, obwohl es sich de facto um eine Methodik zur Risikobewertung der Auswirkungen von Quantencomputing auf die IT-Sicherheit handelt. In ähnlicher Weise wurde ein Preprint mit dem Titel „Quantum technologies for climate change: Preliminary assessment“ unter *Unbeabsichtigte Nebenfolgen* kategorisiert, obwohl der Bericht recht eindeutig der Kategorie *Nachhaltigkeit des Quantencomputings* zuzuordnen ist. Selbstverständlich ist anzumerken, dass die Zuordnung nicht immer eindeutig sein kann, da sich ein beträchtlicher Teil der Berichte problemlos in zwei oder mehr der genannten Themenbereiche einordnen lässt. Zur klaren Strukturierung und Vereinfachung der Analyse jedoch, wurde zum Begrenzen des Kategorisierungsaufwands jedem Dokument nur eine Kategorie zugewiesen.

Die weitere Analyse der Dokumente im Datensatz ergab zudem, dass die Themen *Auswirkungen des Quantencomputings auf die IT-Sicherheit* und *Sicherheitspolitische Implikationen der Quantensensorik* in der grauen Literatur ausführlicher behandelt wurden, als dies in der wissenschaftlichen Literatur der Fall war (vgl. Abschnitt 2.1). Hauptsächlich stammten die Informationen zu diesen Themen von militärischen Einrichtungen, nationalen Behörden (wie dem Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik) und Think Tanks. Ebenso ließ sich beobachten, dass das Thema *Nachhaltigkeit des Quantencomputings* zwar in mehreren Berichten angesprochen wurde und einige ausführliche Preprint-Artikel

existierten, aber in den meisten Dokumenten nur am Rande im Kontext der Bemühungen um ein verantwortungsvolles Quantencomputing erwähnt wurde. (Eine Ausnahme ist ein vom Unternehmen Pasqal organisierter Bericht über die „positiven Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit“ durch Quantencomputing, der für die UN-Klimakonferenz COP28 im Jahr 2023 erstellt wurde). Dennoch gewinnt das Thema an Bedeutung, vor allem seit der Gründung der Quantum Energy Initiative im Jahr 2022 (Auffèves, 2022). Die übrigen Themen scheinen in der grauen Literatur recht gleichmäßig vertreten zu sein, ähnlich wie in der wissenschaftlichen Literatur.

In diesem Abschnitt wurden die akademische und graue Literatur zu TA-relevanten Themen der QT identifiziert und analysiert. **Es lässt sich zunächst zusammenfassen**, dass nur 95 wissenschaftliche Zeitschriftenartikel, d.h. 0,1 % der untersuchten, von Expert:innen begutachteten Artikel, Konferenzberichte, Bücher und Buchkapitel zu QT, existieren, die relevante Inhalte zur Abschätzung der Technikfolgen von QT beinhalten. Dabei sind vor allem europäische Akteure prominent vertreten, was vor allem auf Organisationen wie die TU Delft oder das KIT zurückzuführen sind. Zusammen mit 55 Berichten der Grauen Literatur, bildeten diese 140 Dokumente die inhaltliche Grundlage für die Formulierung der Interview- und Umfrageinstrumente, für die thematische Schwerpunktsetzung der Studie (die acht zentralen Themenfelder) sowie für die Stakeholder-Analyse.

3 Methoden

In diesem Kapitel werden die Methoden zur Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Studie dargestellt. Diese unterteilen sich in (3.1) Identifizieren der Stakeholder für Interviews, Umfrage und Workshop, welche auf Grundlage der Literaturrecherche geschah; (3.2) Auswahl der Stakeholder; (3.3) Beschreibung der finalen Stakeholder-Listen; (3.4) Methodik der Interviews und Umfragen, inkl. Beschreibung des Fragebogens und der Auswertung; und (0) Methodik des Workshops und dessen Auswertung.

3.1 Identifizierung der Stakeholder

Um ein breites Spektrum gesellschaftlich relevanter Perspektiven auf die Entwicklung von Quantentechnologien abzubilden, wurden vier zentrale Stakeholdergruppen identifiziert: *Wissenschaft, Wirtschaft und Industrie, Zivilgesellschaft* sowie *Behörden und öffentliche Einrichtungen*. Für jede Gruppe wurden gezielt Expert:innen mit fundierter Erfahrung in Forschung, Anwendung, Regulierung oder gesellschaftlicher Reflexion ausgewählt. Dieser Auswahlprozess war zweistufig unterteilt in (3.1) Identifizieren der Stakeholder und (3.2) Auswahl der Stakeholder. Hintergrund ist, dass im ersten Schritt zunächst alle relevanten Organisationen und diesen zugeordneten Personen sowie eigenständig tätige Personen identifiziert werden mussten, aus denen im zweiten Schritt die zur Befragung relevantesten Personen anhand klarer Kriterien ausgewählt werden konnten. Da sich dieses Vorgehen für die verschiedenen Stakeholdergruppen sehr unterschiedet, sind die folgenden Unterabschnitte jeweils viergeteilt.

Weiterhin wurde im Prozess auf Vorarbeiten zur Analyse von Stakeholdern aus aktuellen akademischen Veröffentlichungen zurückgegriffen. Für die Gruppe der Wissenschaft auf (Scheidsteger et al.,

2021), (Seskir & Aydinoglu, 2021) und (Wolbring, 2022), für die Gruppe der industriellen Akteure auf (Seskir et al., 2022) sowie (Seskir & Willoughby, 2023) und für die Identifizierung von Organisationen der Zivilgesellschaft auf (Umbrello et al., 2024). Bei der Identifizierung von Behörden wurde sich auf die graue Literatur (Abschnitt 2.2) und Vorarbeiten und Vorwissen des Projektteams gestützt.

Im Folgenden werden die Identifizierung der Stakeholder und der Prozess, wie die den Stakeholder-Listen zugrunde liegenden Daten erstellt und kuratiert wurden, wiedergegeben.

3.1.1 Identifizierung von Stakeholdern (Wissenschaft)

Die Identifizierung der Stakeholder der Wissenschaft erfolgte sowohl über personenorientierte Suchen in der wissenschaftlichen Literatur – da einzelne Forschende organisationsunabhängig enorme Wichtigkeit erlangen können – als auch über das Auswerten von Metadaten von hier beteiligten Organisationen, Ländern und Zuwendungsgebern. Letztere Informationen lieferten zum einen Hinweise, von welchen Organisationen ebenfalls Personen befragt werden sollten, und zum anderen eine Entscheidungsgrundlage für die Auswahl der final wichtigsten Personen.

In einem ersten Schritt wurde deshalb erneut eine Scopus-Analyse für die drei zentralen Quantentechnologien (Quantensensorik, Quantencomputing und Quantenkommunikation/Kryptographie) durchgeführt, um die Anzahl der Veröffentlichungen je Bereich inklusive der Metadaten zu Autoren, Organisationszugehörigkeit, Ländern und Zuwendungsgebern zu ermitteln. Unter der Verwendung der Suchanfragen aus früheren Studien (Scheidsteger et al., 2021; Seskir & Aydinoglu, 2021) wurden dazu die folgende Suchanfragen im Juli 2024 in der Scopus-Datenbank eingegeben. Es wurde sich dabei aus Qualitäts-

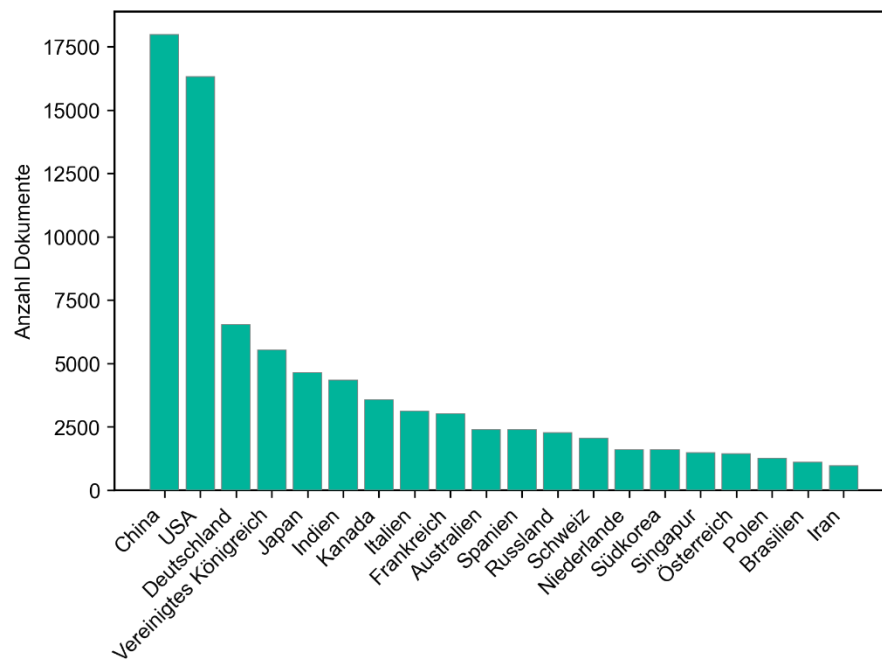


Abbildung 3.1: Gesamtzahl der Dokumente im Datensatz der 20 führenden Länder.

gründen auf Konferenzbeiträge und wissenschaftliche Veröffentlichungen, die im Zeitraum zwischen 2010 und 2024 veröffentlicht wurden, beschränkt.

*Suchanfrage für **Quantensensorik**:* ("quantum sens*" OR "quantum imag*" OR "quantum metro*" OR "quantum noise engineering" OR "quantum state engineering" OR "quantum magnet*" OR "quantum gravimet*" OR "quantum thermomet*" OR "quantum gyroscop*")

Gesamtzahl der Dokumente: 7.929 Dokumente
Beschränkt auf Deutschland: 1.165 Dokumente

*Suchanfrage für **Quantencomputing**:* (("quantum comput*" OR "quantum software" OR "quantum algorithm*" OR "quantum simulation" OR "quantum programming" OR "quantum coding" OR "quantum error correct*" OR "quantum circuit*" OR "quantum logic gate" OR "quantum annealing" OR "quantum machine learning" OR ("QML" AND quantum)))

Gesamtzahl der Dokumente: 41.317 Dokumente
Beschränkt auf Deutschland: 3.873 Dokumente

*Suchanfrage für **Quantenkommunikation/Kryptographie**:* (("quantum comm*" OR "quantum crypto*" OR "quantum key distribution" OR (qkd AND

quantum) OR "quantum network*" OR "quantum channel*" OR "quantum internet" OR "quantum repeater*"))

Gesamtzahl der Dokumente: 26.790 Dokumente
Beschränkt auf Deutschland: 2.155 Dokumente

• *Suchanfrage für **kombiniert**:* (("quantum comm*" OR "quantum crypto*" OR "quantum key distribution" OR (qkd AND quantum) OR "quantum network*" OR "quantum channel*" OR "quantum internet" OR "quantum repeater*")) OR (("quantum comput*" OR "quantum software" OR "quantum algorithm*" OR "quantum simulation" OR "quantum programming" OR "quantum coding" OR "quantum error correct*" OR "quantum circuit*" OR "quantum logic gate" OR "quantum annealing" OR "quantum machine learning" OR ("QML" AND quantum))) OR ("quantum sens*" OR "quantum imag*" OR "quantum metro*" OR "quantum noise engineering" OR "quantum state engineering" OR "quantum magnet*" OR "quantum gravimet*" OR "quantum thermomet*" OR "quantum gyroscop*"))

Gesamtzahl der Dokumente: 68.649 Dokumente
Beschränkt auf Deutschland: 6.600 Dokumente

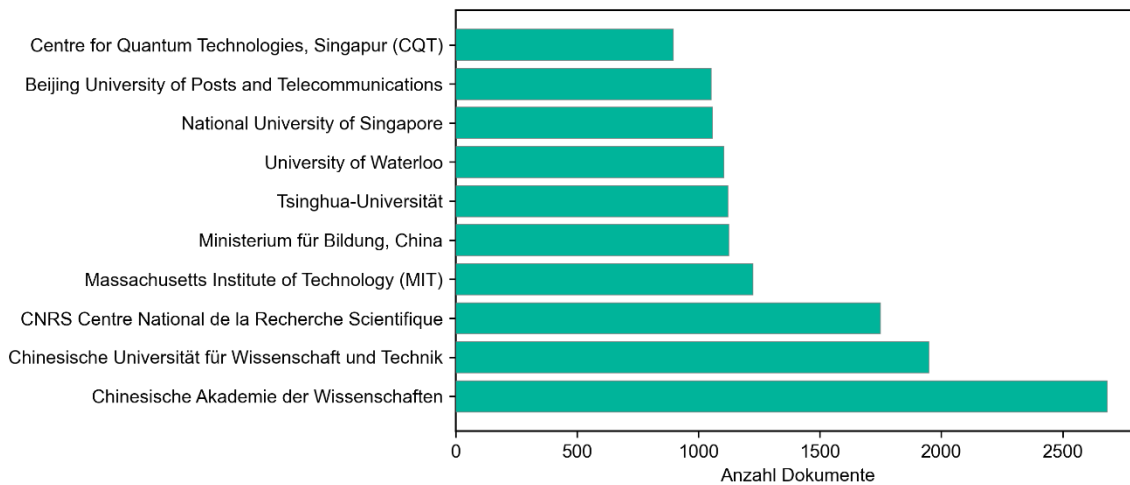


Abbildung 3.2: Institutionen mit der größten Anzahl an zugehörigen Personen im Datensatz (Top 10).

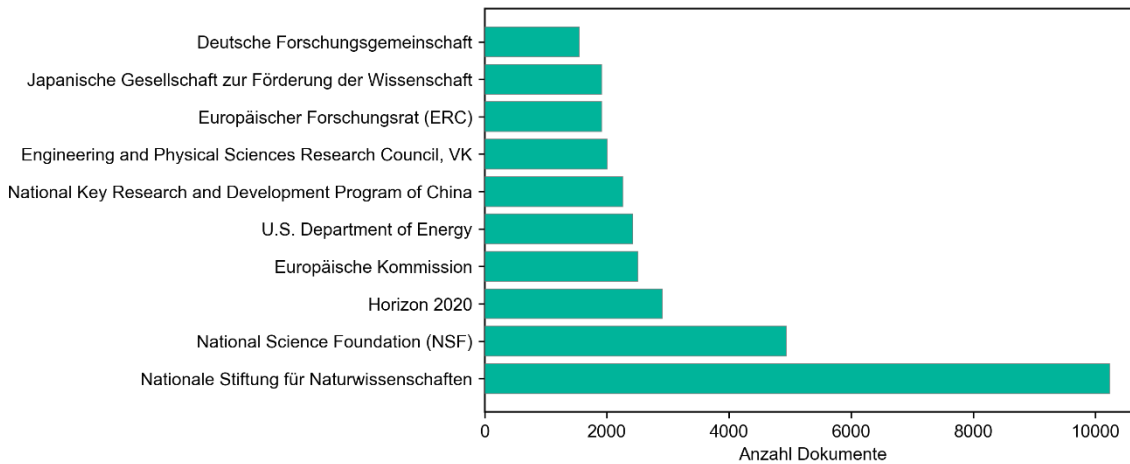


Abbildung 3.3: Meistgenannte Zuwendungsgeber im Datensatz (Top 10).

Für jede Suchanfrage wurde die Liste der Autor:innen, Organisationszugehörigkeiten, Länder und Zuwendungsgeber heruntergeladen. Die Informationen für den kombinierten Datensatz sind für Länder (Abbildung 3.1), institutionelle Zugehörigkeiten (Abbildung 3.2) und Zuwendungsgeber (Abbildung 3.3) aufgeführt. Die Gesamtliste der Autor:innen ist aufgrund des Umfangs hier nicht gelistet, jedoch auf Anfrage verfügbar.

Wie Abbildung 3.1 zeigt, liegen China mit 13.848 Artikeln und die USA mit 9.139 Artikeln deutlich vor den anderen Ländern der Top 20. Kombiniert man die Ergebnisse für die Autorenschaft für alle

Einzelländer der EU-27, dann ergeben sich insgesamt 19.748 Dokumente. Dies bedeutet, dass bei 19.748 der insgesamt 68.649 Dokumenten mindestens ein Autor aus einem EU-27-Land kommt. Weiterhin wurden die rein inländischen Veröffentlichungen der EU-27 geprüft, indem alle Artikel mit mindestens einem Autor außerhalb der EU-27 rausgefiltert wurden. Dies ergab eine Dokumentenanzahl von 10.264. Das gleiche Verfahren wurde für China (13.848) und für die USA (9.139) angewandt. Dies zeigt, dass China die meisten rein inländischen Veröffentlichungen vorweisen kann, gefolgt von der EU-27 und erst dahinter von den USA.

Tabelle 3.1: Anzahl der Veröffentlichungen pro Land und QT-Teilbereich im Datensatz mit mindestens einem Autor (Top 5).

Land	Quantensensorik	Quantencomputing	Quantenkommunikation	Summe
<i>Deutschland</i>	1165	3873	2155	6600
<i>Großbritannien</i>	779	3226	2125	5529
<i>Frankreich</i>	458	1802	1038	3032
<i>Italien</i>	525	1800	1091	3129
<i>Schweiz</i>	354	1205	692	2050

Tabelle 3.2: Verteilung der Gesamt- und Inlandspublikationen aus Deutschland in Abhängigkeit von den Zuwendungsgebern.

Zuwendungsgeber	Gesamtpublikationen (6600)	Inlandspublikationen (2247)
<i>Deutsche Forschungsgemeinschaft</i>	1464	562
<i>Bundesministerium für Bildung und Forschung</i>	852	414
<i>Horizon 2020 Framework Programme</i>	918	201
<i>Europäischer Forschungsrat (ERC)</i>	664	134
<i>Europäische Kommission</i>	788	123
<i>Seventh Framework Programme</i>	395	74
<i>Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz</i>	76	45

Darüber hinaus wurde die Liste der Autor:innen, Zugehörigkeiten und Zuwendungsgeber für jedes europäische Land ausgewertet, das in den jeweiligen Teilbereichen (Sensorik, Computing, Kommunikation) zu den Top 10 gehören. Eine Übersicht über die Anzahl der Artikel im Datensatz aus den Top 5⁵ der europäischen Länder ist in Tabelle 3.1 zu finden.

Weiterhin wurde die Veröffentlichungsquoten der einzelnen Länder im kombinierten Datensatz überprüft, d. h. Veröffentlichungen aus einem Land mit ausschließlich in diesem Land ansässigen Autor:innen durch die Gesamtzahl der Veröffentlichungen dieser Länder geteilt. Daraus ergaben sich folgende Annäherungswerte: 0,34 für Deutschland (2247), 0,33 für das Vereinigte Königreich (1828), 0,40 für Italien (1267), 0,31 für Frankreich (940). Zum Vergleich: In

China liegt der Wert bei 0,77, in den USA bei 0,56 und in der EU-27 zusammen bei 0,54.

Im Anschluss daran wurden die Veröffentlichungen aus Deutschland auf die einzelnen in den Dokumenten genannten Zuwendungsgeber aufgeteilt (Tabelle 3.2).

Aus der Kombination von Publikationsdaten, institutioneller Sichtbarkeit und Fördermittelverteilung ergibt sich ein differenziertes Bild:

- Deutschland hat in Europa die höchste Anzahl von Veröffentlichungen in allen Bereichen der QT.
- Davon sind etwa ein Drittel inländische Veröffentlichungen (nur in Deutschland Forschende sind beteiligt).

⁵ Die Schweiz liegt im Bereich Sensorik unter den Top 10, nicht aber in anderen Bereichen, und Spanien übertrifft

die Schweiz in dieser Kombination sogar (obwohl beide Länder nicht in der Liste der Top 10 vertreten sind).

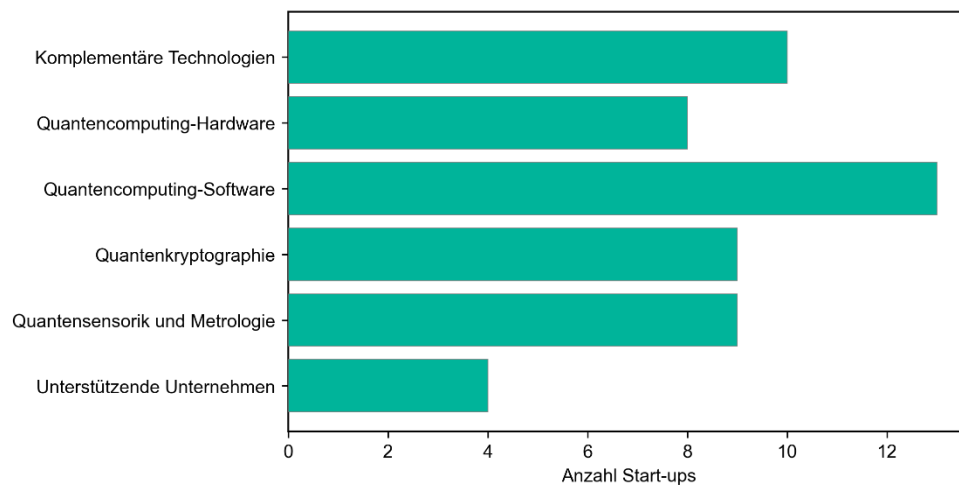


Abbildung 3.4: Verteilung der deutschen Start-ups auf die QT-Unternehmenssektoren.

- Keine deutsche Forschungseinrichtung ist unter den Top-10-Forschungseinrichtungen
- Die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) ist als zehnthäufigster Zuwendungsgeber für weltweite Publikationen der QT gelistet.
- Die europäischen Zuwendungsgeber Horizon 2020, die Europäische Kommission und der Europäischer Forschungsrat (ERC) sind in dem Datensatz unter den 10 wichtigsten Zuwendungsgebern aufgeführt.
- Die nationale französische Forschungsorganisation CNRS ist die einzige europäische Organisation, die ebenfalls unter den Top 10 der Mitgliedsorganisationen aufgeführt ist.

Daraus ergibt sich das folgende Profil der deutschen Wissenschaft in den QT: Deutschland ist global ein bedeutender Akteur im Generieren wissenschaftlicher Erkenntnisse und zählt zu den drei führenden Akteuren in diesem Bereich. Zudem verfügt Deutschland über ein ausgewogenes Profil der internationalen Zusammenarbeit in Europa (mehr reine Inlandsforschung als Großbritannien und Frankreich, weniger als Italien). Obwohl auch das europäische Horizon-Programm für Deutschland wichtig ist, sind die DFG und das BMBF die wichtigsten Zuwendungsgeber, sowohl in der internationalen als auch in der rein nationalen deutschen Forschung zu QT. Im Vergleich zu Frankreich und asiatischen Ländern mit

zentralisierten Forschungsstrukturen wie China und Singapur ist die QT-Forschung in Deutschland wesentlich dezentraler organisiert und damit nicht unter den Top-10-Forschungseinrichtungen geführt. Darüber hinaus lässt sich jedoch feststellen, dass die Technische Universität München, die Universität Stuttgart und das Max-Planck-Institut für Quantenoptik sowohl bei den internationalen als auch bei den nationalen Veröffentlichungen in Deutschland an der Spitze stehen.

3.1.2 Identifizierung der Stakeholder (Wirtschaft und Industrie)

Im Gegensatz zur Wissenschaft wurden die wichtigen Stakeholder der Wirtschaft und Industrie weniger personen-, sondern eher organisationspezifisch ausgewählt. Denn auch wenn einzelne wichtige QT-Expert:innen in den letzten Jahren Start-ups gegründet haben, so sind die in Unternehmen mit QT Beschäftigten vor allem an die Ziele der Unternehmen und nicht ihre persönliche Forschung gebunden. Dies gilt insbesondere für Großunternehmen oder weitere größere wirtschaftliche Akteure. Aus diesen Gründen wurde die Identifizierung der Stakeholder aus Wirtschaft und Industrie auf eine Listung der mit QT beschäftigten Start-ups, KMUs, Großunternehmen und weiteren wirtschaftlichen Organisationen

beschränkt, aus der im Anschluss einzelne Personen ausgewählt und kontaktiert wurden (Abschnitt 3.2).

Ausgangslage der Recherche war eine bestehende Liste von 441 QT-spezifischen Start-ups und KMU aus Vorarbeiten des Projektteams (Seskir et al., 2022). Diese Liste wurde mittels der gleichen Methoden aktualisiert und enthält nun 576 Unternehmen, die aufgrund ihres ausdrücklichen Fokus auf QT als „Quanten-Start-ups“ oder „Quanten-KMUs“ geführt werden können. Von diesen 576 Unternehmen haben 54 ihren Hauptsitz in Deutschland. Eine Verteilung dieser Unternehmen nach Unternehmenssektoren befindet sich in Abbildung 3.4.

Dieses bestehende Datenset der Unternehmen wurde im Anschluss, vor allem aufgrund der fehlenden Großunternehmen, umfassend ergänzt. Dazu wurde zum einen das Quantum Ecosystem Deutschland (Q.E.D.) des Fraunhofer IMW verwendet. Mit Hilfe des Q.E.D konnten weitere KMUs und große Unternehmen, die im Bereich QT aktiv sind, identifiziert werden, die im ersten Datensatz aus der Literatur aufgrund der definierten Kriterien ausgeschlossen wurden oder noch nicht gegründet waren. Darüber hinaus wurden die Websites der Landesinitiativen wie QuantumBW und Quantum Valley Lower Saxony (QVLS) auf weitere wirtschaftliche und industrielle Stakeholder überprüft. Nach dem Entfernen von Duplikaten ergab sich eine Liste von 115 zusätzlichen KMUs und 55 zusätzlichen Großunternehmen. Diese Liste ist aufgrund der Kartierung des Quantencomputerökosystems in der Q.E.D.-Datenbank stark auf Quantencomputer ausgerichtet (133 von 170)⁶. Aufgrund der bisherigen industriellen Schwerpunkte der QT-Entwicklung – insbesondere im Bereich Quantencomputing – liegt der Fokus der ausgewählten Unternehmen auf diesem Teilbereich. Die Bereiche Quantensensorik und -kommunikation wurden bei Bedarf durch gezielte Ergänzungen aus anderen

Quellen berücksichtigt. Weiterhin wurde die Website quantentechnologien.de verwendet und hier beteiligte Unternehmen ausgewertet. Da es jedoch keine Optionen zum Herunterladen von Daten gab, wurden die Webseite manuell nach möglichen Ergänzungen gescannt. Schließlich wurde die Suche auf Berichte und Weißbücher ausgedehnt und auch die graue Literatur genutzt (Abschnitt 2.2), um die relevanten großen Beratungsunternehmen, Risikokapitalfirmen und andere unterstützende Organisationen zu ermitteln.

Es scheint an dieser Stelle wichtig, darauf hinzuweisen, dass deutsche Start-ups, obwohl sie weltweit in der Anzahl an vierter Stelle nach den USA, dem Vereinigten Königreich und Kanada stehen (Seskir et al., 2022), im Vergleich zu ihren US-amerikanischen Pendanten kleiner und geringer bewertet sind. Das einzige Unternehmen mit einer Bewertung von mehr als 1 Mrd. USD ist IQM, das zwar seinen Ursprung in Finnland hat, jedoch mittlerweile als finnisch-deutsches Start-up gilt. Im Gegensatz dazu, gibt es in den USA mehrere QT-Start-ups mit einer Bewertung von über 1 Mrd. USD (z.B. PsiQuantum, IonQ, Quantinuum). Es scheint, dass die deutschen industriellen Aktivitäten im Bereich der QT hauptsächlich mit großen Unternehmen (wie Infineon, BASF, Bosch, Merck, Volkswagen Group, Siemens) sowie mit Start-ups in Verbindung stehen, die nicht auf schnelles Wachstum („Scale-ups“) abzielen, sondern Lücken in der Wertschöpfungskette schließen wollen. Sie fungieren somit als Zulieferer für lokale und globale Unternehmen in der vorgelagerten Entwicklung. Eine vergleichende Analyse auf EU-27-Ebene wurde nicht durchgeführt, aber frühere Studien und die Auswertung der aktualisierten Daten zu Unternehmensgründungen deuten darauf hin, dass die EU-27 (ohne das Vereinigte Königreich) mit der nordamerikanischen Region (d. h. in den USA und Kanada) gleichauf liegen.

⁶ Da es sich bei den Themen jedoch größtenteils um Fragen zum Quantencomputing sowie einzelnen Fragen zur

Quantensensorik und teilweise zur Quantenkommunikation handelt, erscheint solch ein Bias als vertretbar.

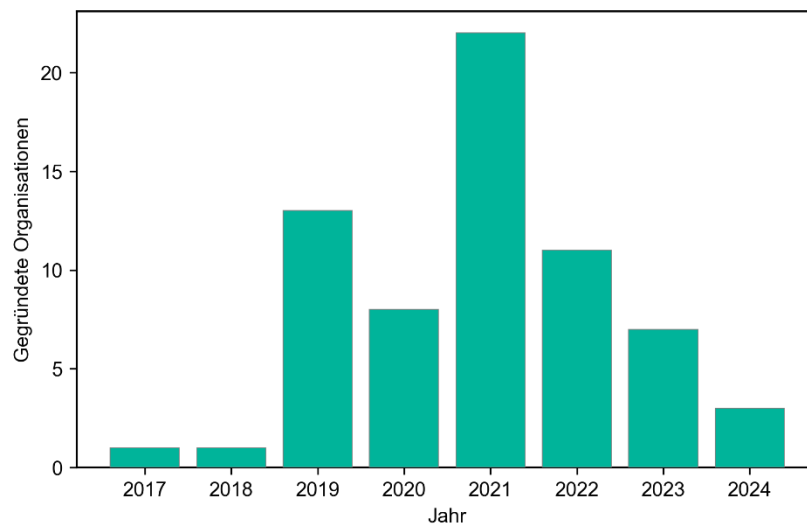


Abbildung 3.5: Anzahl der pro Jahr gegründeten Grasswurzel-Organisationen pro Jahr. Generiert aus (Genenz et al., 2025).

3.1.3 Identifizierung von Stakeholdern (Zivilgesellschaft)

Die QT-Akteure der Zivilgesellschaft sind eine eher weniger homogene Gruppe aus Bildungsorganisationen, vernetzenden Organisationen oder Organisationen mit Fokus auf Öffentlichkeitsarbeit. Die Identifizierung der Stakeholder erfolgte deshalb in unterschiedlichen Schritten. Zunächst wurde von einem Datensatz einer Vorstudie ausgegangen, die 42 solche zivilgesellschaftlichen Organisationen enthält (Umbrello et al., 2024). Von diesen wurden alle nicht-europäischen Organisationen aussortiert, sodass 27 übrigblieben. Ergänzt wurde diese Liste um weltweit aktive zivilgesellschaftliche Gruppen aus dem Bildungsbereich (meist informell, als Gemeinschaften, ohne formelle Gremien), welche ebenfalls seitens des Projektteams für eine Studie gesammelt wurden (Genenz et al., 2025). Deren Zahl hat dabei, wie Abbildung 3.5 zu sehen, insbesondere während der COVID-19-Pandemie zugenommen.

Darüber hinaus wurde die Suche auf Organisationen der Zivilgesellschaft ausgedehnt, die nicht ausschließlich auf QT spezialisiert sind. Dazu gehören u.a. das Goethe-Institut, das sich auf künstlerische Arbeiten in den QT fokussiert, die Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), die um die Bildung und

Bewusstseinsbildung für QT kümmert, die Volkswagen Stiftung, die mehrere Projekte in QT finanziell unterstützt, und der Chaos Computer Club, der sich mit Fragen der Cybersicherheit befasst. Zusätzlich wurde die Suche um Personen erweitert, die an zivilgesellschaftlichen Aktivitäten beteiligt sind – jedoch nicht in einer organisatorischen Rolle. Hierzu gehören besonders einzelne QT-Kunstschaffende und Medienproduzierende (wie Podcaster oder YouTuber), sowie Journalist:innen, die in überregionalen Medien über QT berichtet haben.

3.1.4 Identifizierung von Stakeholdern (Behörden und andere öffentliche Einrichtungen)

Bei der Identifizierung von Behörden und anderen öffentlichen Einrichtungen wurden drei Gruppen in den Blick genommen: (1) Initiativen auf regionaler Ebene (wie [QuantumBW](#), [QVLS](#), [EIN Quantum NRW](#) und andere), Initiativen auf nationaler Ebene (wie [Swiss Quantum Initiative](#), [Quantum Delta NL](#) und andere) und Initiativen auf europäischer Ebene (wie [Quantum Flagship](#), [EuroQCI](#) und andere). (2) Förderorganisationen und -programme, sowohl auf nationaler (wie DFG, BMBF, BMWK und andere) als auch auf europäischer Ebene (wie [QuantERA](#), [European Innovation Council \(EIC\)](#)

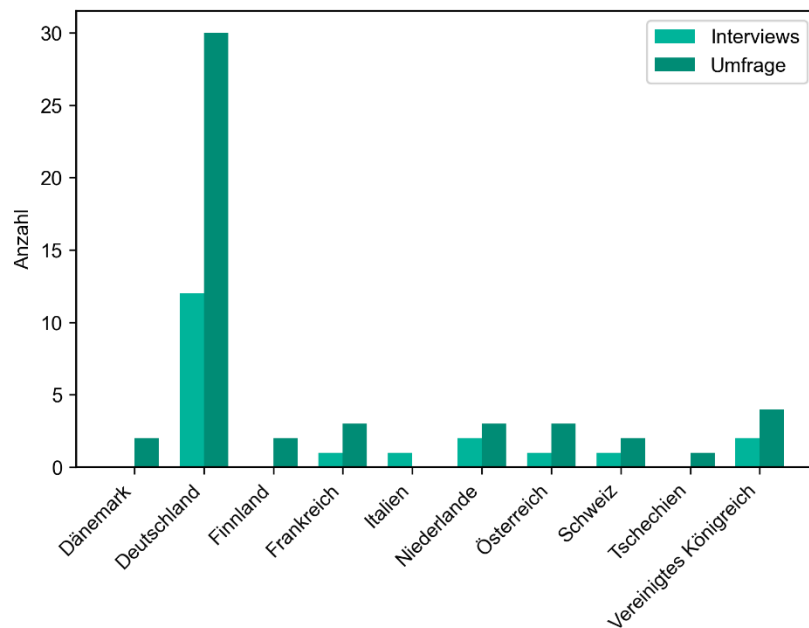


Abbildung 3.6: Verteilung der ausgewählten Personen für die Interviews und Umfrage nach Ländern.

und European Research Council (ERC)), und (3) sonstige Behörden und relevante Organisationen, die an QT-bezogenen Aktivitäten beteiligt sind, einschließlich Normungsorganisationen wie das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) und die BWI GmbH und auf europäischer Ebene bspw. das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI) und das Europäische Komitee für elektrotechnische Normung (CEN-CENELEC).

Auch für diese Stakeholder gilt, dass die Organisationen selbst und nicht die einzelnen Personen die relevanten Stakeholder sind. Deshalb erfolgte in diesem Schritt ausschließlich eine Auflistung aller relevanten Stakeholder-Organisationen und erst anschließend eine personenbezogene Suche.

3.2 Auswahl der Stakeholder

Ausgehend von diesen umfangreichen Recherchen wird im Folgenden die Auswahl der Stakeholder aus dem oben beschriebenen Pool von Instituten, Organisationen und Unternehmen beschrieben. Die Auswahl der Stakeholder orientierte sich an der strategischen Relevanz für die Technikgestaltung von QT

im europäischen Kontext. Das Verhältnis von drei deutschen zu zwei europäischen Akteuren pro Gruppe spiegelt den Fokus der Studie auf die deutsche Perspektive im europäischen Rahmen wider. Dies entspricht bei der angestrebten Zahl von 20 potenziellen Interviewpartner 12 deutschen und 8 europäischen Stakeholdern für jede Stakeholdergruppe und 50 (30 deutsche: 20 europäische) potenzielle Umfrageteilnehmende. Die finale Verteilung der Befragten ist in Abschnitt 3.3 gelistet.

3.2.1 Auswahl der Stakeholder (Wissenschaft)

Bei der Auswahl der wissenschaftlichen Akteure wurde sich in erster Linie auf die Ergebnisse der Scopus-Suche und der TA-Literaturübersicht (Abschnitt 2.1) sowie frühere Studien der Autoren wie (Schmidt, 2021) gestützt. Bei der Auswahl der potenziellen Interviewpartner wurde zusätzlich darauf geachtet, dass nicht mehr als zwei potenzielle Interviewpartner aus derselben Organisation teilnahmen. Für die Auswahl von Personen aus dem Ausland wurde die Länderlisten verwendet, die in der Phase der Identifizierung der Stakeholder aus Scopus

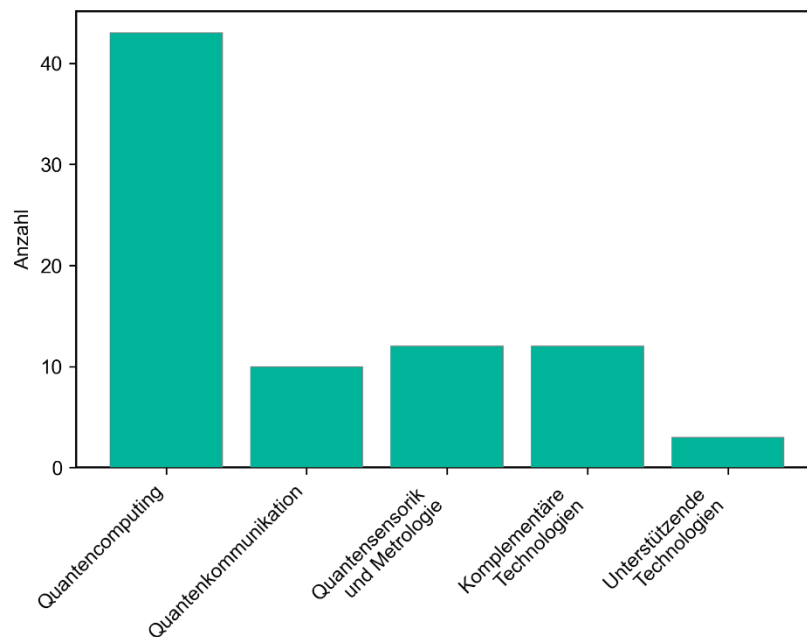


Abbildung 3.7: Verteilung der ausgewählten Stakeholder aus Wirtschaft und Industrie nach QT-Teilbereichen.

generiert wurde. Bei der Auswahl der deutschen Interviewpartner wurde auch überprüft, ob sie Projektkoordinatoren von BMBF-geförderten Projekten waren (über die Website quantentechnologien.de), um ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Koordinatoren und Nicht-Koordinatoren zu erhalten. Die Verteilung der Länder für die Auswahl der Interviewpartner und der Umfrageteilnehmer ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

3.2.2 Auswahl der Stakeholder (Wirtschaft und Industrie)

Für die Auswahl der relevanten Akteure aus Wirtschaft und Industrie wurde, wie oben beschrieben, auf frühere Studien des Projektteams zurückgegriffen (Schmidt, 2021; Seskir et al., 2022; Seskir & Willoughby, 2023), sowie auf das Q.E.D.-Tool des Fraunhofer IMW, die Website quantentechnologien.de, die QT-Branchennetzwerke QED-C, EuroQuIC, QUTAC und das Quantum Business Network. Weiterhin wurden auch die Scopus-Suchergebnisse für Wissenschaftler:innen, die auch für ihre unternehmerischen Aktivitäten bekannt sind, genutzt.

Diese Liste an Organisationen wurde anschließend in Bezug auf die relevantesten Stakeholder analysiert. Hier wurden jedoch im Gegensatz zu den Stakeholdern der Wissenschaft nicht Einzelpersonen als relevante Einheit betrachtet, sondern die Unternehmen selbst. Beim Durchsehen des gesamten Datensatzes ergaben sich so 225 Unternehmen in Europa, die über öffentlich zugängliche Kontaktinformationen verfügen (entweder als E-Mail oder als Kontakt-Webseiten auf ihren Websites) und die explizit den Zugang zu ihrer QT-relevanten Abteilung ermöglichen (und zum Unternehmensbetrieb selbst im Falle von QT-spezifischen Start-ups/KMUs). Von diesen 225 Unternehmen befinden sich 48 in Deutschland.

Ausgehend von dieser Gesamtliste wurde anschließend eine ausgewogene Liste der 80 relevantesten Unternehmen erstellt. Diese wies ein Verhältnis deutscher zu europäischer Unternehmen von 3:2 auf, beinhaltete Start-ups, KMUs und Großunternehmen verschiedener Branchen und verfügte auch über eine Aufteilung zwischen den QT-Teilbereichen.

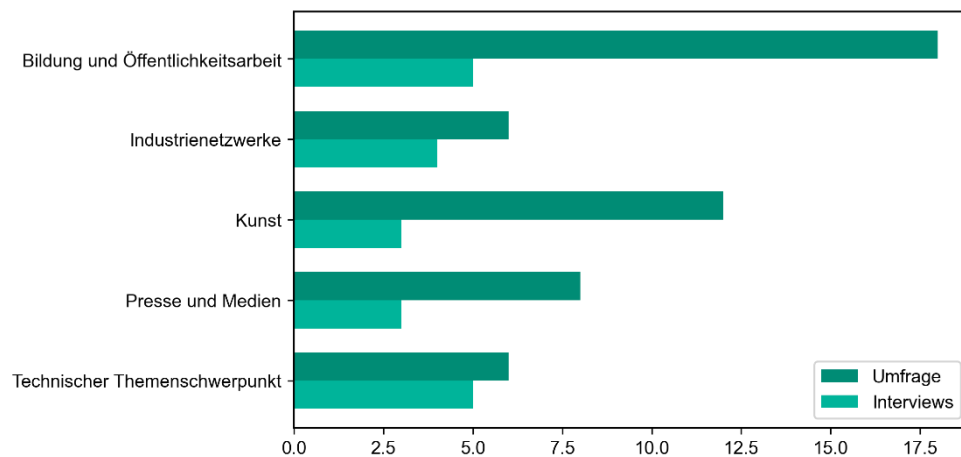


Abbildung 3.8: Verteilung der Teilbereiche für die ausgewählten Stakeholder der Zivilgesellschaft.

Technologiespezifisch ist in Abbildung 3.7 zu erkennen, dass ein Schwerpunkt auf dem Quantencomputing lag. Dies ist auf die allgemeine Wichtigkeit des Quantencomputings sowie dessen zentralen Rolle in dieser Studie zurückzuführen. Eine weitere Erklärung ist, dass Unternehmen, die Hardware, Software oder Anwendungen, sowie alles, was zwischen diesen Bereichen liegt, entwickeln, unter der Kategorie „Computing“ aufgeführt wurden.

3.2.3 Auswahl der Stakeholder (Zivilgesellschaft)

Für die Auswahl der zivilgesellschaftlichen Akteure wurde frühere Literatur (Umbrello et al., 2024), die Website quantentechnologien.de, die graue Literatur (Abschnitt 2.2) sowie Expertise und Erfahrung des Projektteams genutzt.

Ausgehend von den Konzepten wurde für die Zivilgesellschaft eine Kombination aus Personen etablierter Vereine im Bereich QT, aus Studentenclubs, aus etablierten zivilgesellschaftlichen Gruppen, die sich mit QT befassen (wie z.B. der Chaos Computer Club) und für Personen aus dem Kunstsektor angelegt. Angesichts der Tatsache, dass die meisten etablierten Vereinigungen und Studentenclubs in QT sich auf Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit konzentrieren, gab es im Datensatz eine Verzerrung in Richtung dieser Organisationen. Um dem entgegenzuwirken, wurde

für die Interviews und Umfragen eine ausgewogenere Liste mit einer gleichmäßigen Verteilung auf alle Arten von Aktivitäten angestrebt. Auch hier wurden Listen mit 20 potenziellen Interview- und 50 Umfrageteilnehmenden zusammengestellt. Ihre Verteilung auf die verschiedenen Aktivitäten ist unten dargestellt (Abbildung 3.8).

3.2.4 Auswahl der Stakeholder (Behörden und andere öffentliche Einrichtungen)

Bei der Auswahl der Stakeholder der Behörden wurde ähnlich wie bei den Stakeholdern der Wirtschaft und Industrie (Unterabschnitt 3.2.2) vorgegangen und Organisationen anstelle von Einzelpersonen als relevante Einheiten ausgewählt. Im Gegensatz zur Wirtschaft und Industrie, bei der die Kontaktinformationen der Organisationen selbst (z. B. E-Mails oder Kontakt-Webseiten) erfasst wurden, wurde für die öff. Einrichtungen und Behörden versucht, zwei bis drei Personen pro Organisation zu identifizieren, die direkt kontaktiert werden konnten. Insgesamt wurde so eine Liste von 40 Organisationen mit 110 potenziellen Umfrageteilnehmenden und 35 potenziellen Interviewteilnehmenden erstellt.

Um auch in diese Listen für ein ausgewogenes Verhältnis der Länder und Organisationsformen zu sorgen, wurden Informationen zu den Herkunftsländern

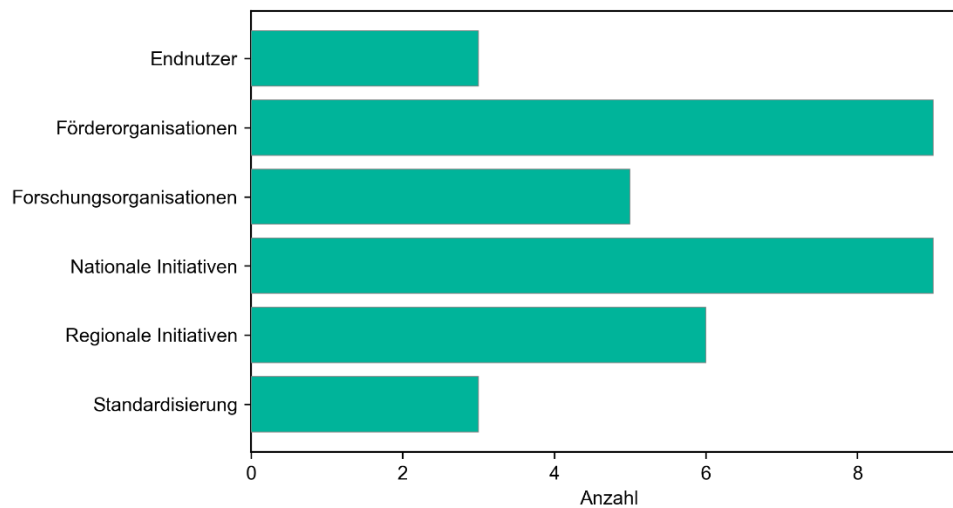


Abbildung 3.9: Verteilung der Organisationskategorien der ausgewählten Stakeholder aus Behörden und anderen öff. Einrichtungen.

sowie Organisationskategorien angelegt: Endnutzer, Förderorganisation, Regionale Initiative, Nationale Initiative, Forschungsorganisation und Standardisierung (siehe Abbildung 3.9). Die zugewiesenen Kategorien waren dabei nicht immer eindeutig, da viele Organisationen mehrere Funktionen aufweisen.

In der Auswahl der relevantesten Organisationen wurde abschließend eine Fokus auf nationale Initiativen und Finanzierungsstellen gelegt, da diese derzeit die aktivsten Rollen im QT-Ökosystem innerhalb der Behörden spielen (im Vergleich zu Endnutzern und Normungsgremien) und die Forschungsorganisationen teilweise auch von akademischen Interessengruppen abgedeckt werden. Weiterhin wurden Ministerien auf Landesebene in Deutschland absichtlich ausgelassen, da diese in den Fördervolumina nicht an nationale Einrichtungen heranreichen und gleichzeitig den Rahmen dieser Studie sprengen würden⁷.

3.3 Teilnehmende Stakeholder

Nachdem mögliche Stakeholder identifiziert worden waren, galt es im nächsten Schritt diese in

Rücksprache mit dem Auftraggeber BMBF auf eine Liste anzufragender Personen zu reduzieren. Der Prozess für die Interviews und Umfrage sowie für den Workshop sind im Folgenden dargestellt.

3.3.1 Teilnehmende Stakeholder der Interviews und Umfrage

Für die Interviews und Umfrage wurden zunächst vier kuratierte Listen relevanter Stakeholder zusammengestellt, deren institutionale Zugehörigkeit in Tabelle 3.3 zu sehen ist.

Ausgehend von diesen vier Listen, die insgesamt 250 Personen und 300 Organisationen beinhalteten, wurden anschließend die für die Interviews zu kontaktierenden Personen ausgewählt. Dabei wurde auf ein 3:2 Verhältnis zwischen deutschen und nicht-deutschen Institutionen sowie eine ungefähre Geschlechtergerechtigkeit geachtet. Nachdem die Liste der Interviewten feststand, und im Falle von Absagen ohne Verlust der Qualität auf entsprechende alternative Personen ausgewichen wurde, wurden die Personen der Umfrage nach dem gleichen Vorgehen ausgewählt.

⁷ Dass durch den Fokus auf Organisationen der Bundesebene bildungsspezifische Fragestellungen weniger

beachtet werden konnten, musste in Kauf genommen werden.

Tabelle 3.3: Kuratierte Liste der potenziellen Teilnehmenden der Interviews und Umfrage nach Stakeholdergruppen.

Stakeholdergruppe	Interviews	Umfrage	Insgesamt
<i>Wissenschaft</i>	20 Einzelpersonen aus 18 Organisationen	50 Einzelpersonen aus 34 Organisationen	70 Einzelpersonen aus 52 Organisationen
<i>Wirtschaft und Industrie</i>	20 Einzelpersonen	80 Organisationen	20 Einzelpersonen und 225 Organisationen
<i>Zivilgesellschaft</i>	19 Einzelpersonen und 1 Organisation	50 Personen	69 Einzelpersonen und 1 Organisation
<i>Behörden und andere öff. Einrichtungen</i>	88 Einzelpersonen aus 40 Organisationen	35 Einzelpersonen aus 34 Organisationen	88 Einzelpersonen aus 40 Organisationen

Tabelle 3.4: Anonymisierte Liste der Interviewteilnehmenden.

Person	Stakeholdergruppe	Land	Organisationstyp
1	Wissenschaft	Deutschland	Forschungseinrichtung
2	Wissenschaft	Deutschland	Forschungseinrichtung
3	Wissenschaft	Niederlande	Universität
4	Wissenschaft	Deutschland	Forschungseinrichtung
5	Wissenschaft	Zypern	Forschungseinrichtung
6	Wirtschaft und Industrie	Schweiz	Großunternehmen
7	Wirtschaft und Industrie	Großbritannien	Start-up/KMU
8	Wirtschaft und Industrie	Deutschland	Großunternehmen
9	Wirtschaft und Industrie	Deutschland	Start-up/KMU
10	Wirtschaft und Industrie	Deutschland	Start-up/KMU
11	Zivilgesellschaft	Irland	Öffentliche Einrichtung
12	Zivilgesellschaft	Deutschland	Wiss. Zeitschrift
13	Zivilgesellschaft	Deutschland	Universität
14	Zivilgesellschaft	Deutschland	Think Tank
15	Zivilgesellschaft	Schweiz	Internationale Initiative
16	öff. Einrichtungen und Behörden	Europäische Union	Internationale Initiative
17	öff. Einrichtungen und Behörden	Deutschland	Bundesbehörde
18	öff. Einrichtungen und Behörden	Deutschland	Bundesbehörde
19	öff. Einrichtungen und Behörden	Europäische Union	Öffentliche Einrichtung
20	öff. Einrichtungen und Behörden	Niederlande	Nationale Initiative

Während einzelne Personen der Umfrage keine umfassenden Angaben zu persönlichem Hintergrund machten, liegen die Daten der Interviewten vollständig vor. Diese sind anonymisiert in Tabelle 3.4 zu

sehen. Im weiteren Studienverlauf werden die Personennummern entsprechen der Tabelle 3.4 verwendet.

Für die Interviews wurde die sehr hohe Qualität des Teilnehmendenfeldes durch Rücksprache mit dem BMBF gewährleistet. Es konnten die Pläne zur Auswahl der Interviewten vollständig realisiert werden. Alle Befragten verfügten über ein umfassendes Verständnis der QT sowie ihrer spezifischen Arbeitsrichtung innerhalb dieser und nahmen in den jeweiligen Organisationen eine leitende oder Expert:in-Funktion ein. Für die Umfragen wurde durch ein Zirkulieren unter vorher ausgewählten Expert:innen ebenfalls eine hohe Qualität gewährleistet – auch wenn im Folgenden nicht alle Hintergrundinformationen angegeben werden können.

Insgesamt gab es 20 Interviews und 37 gültige Umfrageteilnehmende (von 154 begonnen Umfragen). Von den 57 Befragten gaben 21 an, in Deutschland zu wohnen, vier in den Niederlanden, drei in Großbritannien, zwei in Luxemburg und der Schweiz und jeweils eine Person in Österreich, der Tschechischen Republik, Frankreich, Griechenland, Italien, Irland und Zypern. 18 haben keine Angaben gemacht. Es gab 15 weibliche und 29 männliche Befragte, 13 machten keine Angaben. Bei den Interviews war die Verteilung zwischen den Stakeholdergruppen gleichmäßig. Da das Teilnehmendenfeld der Umfrage jedoch weniger kontrollierbar war, ergab sich insgesamt eine gewisse Ausrichtung auf den wissenschaftlichen Bereich und in geringerem Maße auf die Industrie (26 aus der Wissenschaft, 14 aus der Industrie, acht aus der öff. Verwaltung, sechs aus der Zivilgesellschaft und drei aus dem Bereich "Sonstige", wie z. B. Beratungsunternehmen). Was die Erfahrung auf dem Gebiet der QT in der Umfrage betrifft, so gab es zwei Neulinge auf diesem Gebiet, vier mit weniger als zwei Jahren, zwölf mit 2-5 Jahren, zwölf mit 6-10 Jahren und 13 mit mehr als zehn Jahren Erfahrung. 14 Befragte haben keine Angaben gemacht. Angesichts der lückenhaften Daten der Umfrage wurde eine eher qualitativ orientierte Analyse der Umfragedaten durchgeführt (vgl. Abschnitt 4.3).

3.3.2 Teilnehmende Stakeholder des Workshops

Für den Workshop wurde ebenfalls auf die identifizierten Stakeholder zurückgegriffen und in Rücksprache mit dem Auftraggeber 25 Personen eingeladen. Dabei wurde auf eine inhaltlich und persönlich diverse Verteilung zwischen und innerhalb der fünf Stakeholdergruppen geachtet (Wissenschaft, Wirtschaft und Industrie, Zivilgesellschaft, öffentliche Einrichtungen und Behörden, sowie Kunst und Kultur). Die Personen aus Kunst und Kultur waren zuvor unter Zivilgesellschaft gelistet gewesen. Pro Stakeholdergruppe wurden damit fünf Personen ausgewählt, von denen möglichst drei von deutschen und zwei von nicht-deutschen europäischen Institutionen stammen. Es wurde auf eine technologische Breite mit verschiedenem QT-Fokus, eine Auswahl verschiedener Organisationsarten (Universität vs. Forschungseinrichtungen) und -größen (Start-up/KMU vs. Großunternehmen), gleichmäßige Geschlechterverteilung sowie eine thematische Breite geachtet (Medien vs. Netzwerke vs. Bildung; Nationale Initiativen vs. Regionale Initiativen vs. Standardisierung). Für alle Personen wurden alternative Einzuladende identifiziert und im Falle von Absagen kontaktiert.

Von den 25 eingeladenen Expert:innen musste ein Teil aus gesundheitlichen oder persönlichen Gründen kurzfristig absagen. Hier scheint der Zeitpunkt der Workshopdurchführung Ende Januar suboptimal gewählt worden zu sein. Aus diesen Gründen wich die finale Verteilung der Teilnehmenden leicht vom angedachten Plan ab. Es nahmen final 17 Expert:innen aus den fünf Stakeholdergruppen Wissenschaft (4 Personen), Wirtschaft und Industrie (3), Zivilgesellschaft (3), öff. Einrichtungen und Behörden (3) und Kunst & Kultur (4) am Workshop teil. 14 Personen waren an deutschen Institutionen beschäftigt und drei an nicht-deutschen Einrichtungen (1x EU, 1x Niederlande, 1x Schweden). Die vertretenen Institutionen waren Universitäten (2 Personen), Forschungseinrichtungen (2), Start-up/KMU (1),

Großunternehmen (1), Industrienetzwerke (1), Presse und Medien (1), Bildung und Öffentlichkeitsarbeit (2), Nationale Initiativen (1), Regionale Initiativen (1), Standardisierung (1), Kunstschaffende (3) und Kurator:in (1). Das Geschlechterverhältnis war mit neun männlich- und acht weiblich-gelesenen Personen ausgeglichen. Alle Personen wiesen ein grundlegendes Vorwissen von QT auf und wurden in Rücksprache mit dem BMBF ausgewählt.

3.4 Methodik der Interviews und Umfragen

Im Folgenden werden die Vorbereitung, Durchführung und Auswertung der Interviews und Umfragen beschrieben.

3.4.1 Vorbereitung und Fragebogen für die Interviews und Umfragen

Die Interviews wurden entlang eines halbstrukturierten Interviewfragebogens geführt, welcher auf Grundlage acht zentraler thematischer Kategorien entworfen und um persönliche und weiterführende Fragen ergänzt wurde. Die acht zentralen Kategorien waren vorab mit dem Auftraggeber BMBF definiert worden. Die einzelnen thematischen Kategorien lauten:

- **Status Quo der Technikfolgenabschätzung** in den Quantentechnologien: Ein Ausgangspunkt dieser Studie war der Eindruck, dass vergleichbare Arbeiten zu den Technikfolgen von Quantentechnologien bisher kaum existieren, weshalb zunächst der heutige Stand solcher Arbeiten untersucht werden sollte: Wer sind die wichtigsten Akteure, die bereits auf dem Gebiet der Technikfolgenabschätzung in den Quantentechnologien tätig sind und welche Arbeiten wurden bereits durchgeführt?
- **Auswirkungen des Quantencomputings auf IT-Sicherheit:** Der wohlmöglich prominenteste und in den Medien am meisten diskutierte Aspekt bezieht sich auf die kryptographische Relevanz von

Quantencomputern: Welche Konsequenzen sind zu erwarten, wenn Quantencomputer in der Lage sein sollten, gängige Verschlüsselungsmethoden zu knacken? Wann ist dies zu erwarten und wie gut sind Deutschland und Europa auf ein solches Szenario vorbereitet? Welche Fähigkeitslücken werden entstehen? Welche Rolle spielt die Quantenkryptographie (einschließlich Post-Quantenkryptographie PQC), um dieser Bedrohung zu begegnen?

- **Nachhaltigkeit des Quantencomputings:** Die Rolle des Quantencomputings für eine nachhaltige Informationsverarbeitung ist derzeit ambivalent und nicht klar absehbar: Einerseits handelt es sich noch um hochkomplexe Laboraufbauten, die im Verhältnis zur bereitgestellten Rechenleistung sehr viel Energie verbrauchen (z.B. durch enormen Kühlungsbedarf). Auf der anderen Seite hat das Quantencomputing das Potenzial, große Fortschritte bei der Ressourceneffizienz von Rechenprozessen zu ermöglichen oder effizientere Anwendungen zu entwickeln. Damit stellen sich die Fragen, wie die Nachhaltigkeit des Quantencomputings in absehbarer Zeit zu bewertet ist und ob Nachhaltigkeitsaspekte von QT bereits heute berücksichtigt und gefördert werden sollten.
- **Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik:** Die Quantensensorik wird in absehbarer Zeit und vermutlich früher als Quantencomputer, Auswirkungen auf sicherheitspolitische Fragen haben: Mit Quantensensoren lassen sich Magnetfelder und das Gravitationsfeld der Erde so genau messen, dass es in Zukunft möglich sein könnte, Bodenschätze oder kritische Infrastrukturen aus der Luft oder aus dem Weltraum zu orten. Aus dieser Dual-Use Möglichkeit der ergeben sich die Fragen, welche sicherheitspolitischen Konsequenzen dies hätte? Welche Bereiche gelten als besonders sensibel? Und welche Szenarien sind realistisch?
- **Konsequenzen ungleichen Zugangs zu Quantentechnologien/Quantencomputing:** Aufbauend auf den vorangegangenen Überlegungen stellt

sich die Frage, welche Auswirkungen es hätte, wenn verschiedene Länder oder Wirtschaftsräume in der Entwicklung von Quantentechnologien unterschiedlich weit fortgeschritten sind: Würden sich Fortschritte in den Quantentechnologien eher in graduellen Unterschieden in der technologischen oder wirtschaftlichen Leistungsfähigkeit manifestieren? Sind Kippunkte in der Entwicklung vorstellbar? Umgekehrt stellt sich die Frage, inwieweit ein inländischer Vorsprung bei einer Technologie durch Beschränkungen des Wissensflusses oder des Technologietransfers (bspw. Exportkontrollen) aufrecht erhalten werden sollte oder kann.

- **Gesellschaftliche Auswirkungen:** Neben den eher internationalen, geopolitischen Folgen besteht noch Unklarheit, ob soziale Auswirkungen durch Quantentechnologien denkbar sind – sowohl innerhalb als auch zwischen Gesellschaften: Werden bestimmte Gruppen von der QT-Entwicklung überproportional profitieren? Werden Wohlstandszuwächse aus Quantentechnologien gerecht verteilt werden (können). Und könnten anderweitige sozial problematische Entwicklungen durch den breiten Einsatz von Quantentechnologien verschärft bzw. beschleunigt werden? Weiterhin besteht die Frage nach Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt, wie einer möglichen Beschleunigung der Arbeits- und Kommunikationswelt, oder der Erhöhung der Qualifikationsanforderungen für bestimmte Berufsgruppen.
- **Diskurs über Quantentechnologien:** Ob es Akzeptanzprobleme mit Quantentechnologien in der Bevölkerung geben wird, hängt stark davon ab, wie über sie gesprochen wird, d.h. welche Bilder und Metaphern dominieren. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage, ob ein Akzeptanzrisiko darin besteht, dass quantenphysikalische Vorgänge in der öffentlichen Diskussion mystifiziert werden („spooky“, „wer glaubt, die Quantenphysik zu verstehen, hat die Quantenphysik nicht verstanden“). Die Studie sollte

untersuchen: Welche Deutungsmuster werden in der Bevölkerung mit den Quantentechnologien verbunden? Und welche alternativen Narrative gibt es (z.B. pragmatische Bezüge auf konkrete Ergebnisse und technologische Erfolge, oder Betonung der Präzision der Quantenphysik)?

- **Unbeabsichtigte Nebenfolgen:** Die Studie sollte sich auch mit Bereichen befassen, die über die bereits beschriebenen Themen hinausgehen und weiter von den vorhersehbaren Auswirkungen der Technologien entfernt sind: Welche Nebenprodukte könnten sich aus der Technologieentwicklung ergeben („Teflon-Effekt“, andere Anwendungen von Basistechnologien)? Welche „Ausreißer“-Szenarien (sehr geringe Wahrscheinlichkeit, aber sehr große Auswirkungen) könnten beschrieben werden?

Diese Themen bildeten die Grundlage und den Schwerpunkt für die Fragebögen der Interviews und der Umfrage. Sie wurden nach Rücksprache mit dem Auftraggeber BMBF vom Projektteam durch einige weiterführende Fragen ergänzt. Die weiteren Fragen bezogen sich auf:

- **Philosophische Aspekte:** Ist es denkbar, dass die zukünftige Verbreitung von QT für eine verstärkte gesellschaftliche Aufmerksamkeit für quantenphysikalischer Grundprinzipien führt und sich daraus gesellschaftliche Auswirkungen ergeben?
- **Einfluss auf andere Technologien:** Welche anderen, „klassischen“ Technologien könnten wie die QT beeinflussen bzw. durch QT beeinflusst werden?
- **Gesellschaftliche Wahrnehmung:** Wie lässt sich die derzeitige Wahrnehmung der QT beschreiben und wie lassen sich positive, aber realistische Bilder von QT in der Gesellschaft teilen?
- **Bildung:** Wie lassen sich das Lehren und Lernen von QT in bestehende Bildungsstrukturen integrieren und wie vorausschauend sollte solch eine Integration stattfinden?

- **Wissenschaftskommunikation und Kunst:** Wie lässt sich die Gesellschaft am besten zu QT erreichen und über sie informieren? Welche Rolle könnte hier die Kunst spielen?
- **Anderes:** Welche Themengebiete wurden bisher nicht ausreichend untersucht?

Es wurde für alle Themen darauf geachtet, dass sowohl inhaltliche Fragen zur Bewertung der Themen gestellt werden als auch diese um Empfehlungen an Politik und andere Akteure erweitert werden. Dazu wurden auf Grundlage der Literaturrecherche (s. Abschnitt 2.1) 25 Fragen entworfen, von denen sich drei auf die Hintergründe der Teilnehmenden bezogen, 16 auf die acht Themen á zwei Fragen, fünf zu den weiterführenden Fragen und eine Frage auf bisher nicht behandelte Themen.

Für die Umfrage wurde derselbe Fragenkatalog verwendet, jedoch zum Erfassen weiterer Details mit offenen Fragen und Ranglisten versehen. Ziel war es, insbesondere die Wichtigkeit der Rolle der einzelnen Stakeholder abzufragen und so die Interviews zu ergänzen.

3.4.2 Durchführung der Interviews und Umfrage

Die Interviews wurden über Microsoft Teams geführt und auf internen Servern aufgezeichnet. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurden den Teilnehmenden die Fragen möglichst wortwörtlich gestellt und auf Nachfragen weitestgehend verzichtet. Die Interviewsprache war entweder Deutsch oder Englisch.

Die Umfrage wurde über einen internen Server der Plattform SoSci Survey durchgeführt. Die Fragen wurden wortgleich, in englischer Sprache und in der gleichen Reihenfolge wie in den Interviews gestellt. Der Link zur Onlineumfrage wurde anschließend mit den ausgewählten Stakeholdern geteilt.

3.4.3 Auswertung der Interviews und Umfrage

Die aufgezeichneten Interviews wurden transkribiert, kodiert und mit MAXQDA ausgewertet. Die Analyse erfolgte über ein Kodierschema. Für jedes der obigen acht Themen wurde eine Code-Kategorie geschaffen, mit Unter-codes für Zitate und politikrelevanten Aspekte (für die Ausarbeitung politischer Handlungsempfehlungen).

Darüber hinaus wurden weitere Codes aufgenommen: Ethische Aspekte, rechtliche Aspekte, soziale Aspekte, philosophische Aspekte, Auswirkungen auf andere Technologien, Bildung, Wissenschaftskommunikation und Kunst, Geopolitik, Finanzierung, Exportkontrollen und die zusätzliche Kategorie „Anderes“.

Die kodierten Antworten der Interviews wurden anschließend sowohl qualitativ als auch statistisch ausgewertet. Letzteres beinhaltete eine Analyse der Koinzidenz verschiedener Codes und damit zusammenhängender Gemeinsamkeiten von Themen. In der qualitativen Analyse wurden die Antworten sortiert, etwaige Häufungen notiert und entlang der Fragen wiedergegeben. Auf diese Weise konnten sowohl Gemeinsamkeiten der Antworten identifiziert als auch divergierende Ansichten erkannt werden. Auch Einzelmeinungen wurden notiert und im nachfolgenden Kapitel 4 Ergebnisse wiedergegeben.

Ein ähnliches Vorgehen wurde für die Umfragen vorgenommen. Es wurde dabei insbesondere auch auf mögliche Unterschiede zu den Interviews geachtet.

Die Ergebnisse der einzelnen Themen wurden anschließend zusammen mit den Ergebnissen des Workshops analysiert und auf übergreifende Erkenntnisse hin analysiert (s. Kapitel 5).

3.5 Methodik des Workshops

Im Folgenden werden die Methoden des zweitägigen Workshops beschrieben.

3.5.1 Workshopvorbereitung und -programm

Der Workshop wurde vom Auftragnehmer in Zusammenarbeit mit dem Zukunftsforscher Wenzel Mehnert vom Austrian Institute of Technology (AIT)⁸ konzipiert. Herr Mehnert verfügt über umfangreiche Erfahrung in der Erstellung von Szenarien, die gesellschaftliche Veränderungen durch neue Technologien erforschen und hat dabei mit unterschiedlichsten Stakeholdern zusammengearbeitet.

Der Workshop wurde zweistufig konzipiert. Am ersten Tag („Envision“) wurden Visionen entwickelt, für die am zweiten Tag („Reflection“) politische Handlungsempfehlungen abgeleitet wurden. Der erste Tag wurde in vier gemischten Gruppen durchgeführt (eine Person pro Stakeholdergruppe), während der zweite Tag in den fünf reinen Stakeholdergruppen durchgeführt wurde.

Konkret wurden folgende Arbeitsschritte nach einer Einleitung und kurzen Vorstellung der bisherigen Projektergebnisse zeitlich nacheinander ausgeführt:

1. Entwicklung von QT-Vision in Deutschland und Europa in 2045 (Tag 1)

A. *Entwickeln individueller Visionen*

Generieren einer erwünschten Vision für QT in Deutschland und Europa in 2045. Es wurde eine Vision pro Person erstellt, anschließend innerhalb der Arbeitsgruppen geteilt und durch die Gruppenmitglieder bewertet. Jede Person konnte bis zu drei Stimmen frei verteilen.

B. *QT-Entwicklung anhand von STEEP-C-Kategorien abschätzen*

Ausarbeitung von möglichen Aspekten der QT-Entwicklungen in verschiedenen STEEP-C

Teilbereichen (Social, Technological, Economical, Ecological, Political und Cultural, sowie Other)⁹. Die Ideensammlung erfolgte zunächst in Einzelarbeit. Danach wurden bis zu drei Aussagen pro STEEP-C Teilbereich und Gruppe schriftlich gesammelt. Anschließend erfolgten eine Vorstellung der jeweiligen STEEP-C-Antworten und eine Bewertung durch alle Teilnehmenden. Mittels jeweils 16 farblicher Sticker (32 pro Person) konnten Präferenz (preference) und Plausibilität (plausibility) der einzelnen Aussagen bewertet werden. Mehrfachauswahl und Auswahl eigener Antworten war zulässig.

C. *Herleitung einer gemeinsamen QT-Vision*

Die vorherigen Ergebnisse wurden von den Moderatoren genutzt und daraus eine gemeinsame, konsensfähige Vision entworfen.

D. *Stakeholder-spezifische Anpassung der gemeinsamen Vision*

Anpassung der gemeinsamen Vision in Stakeholdergruppen über bis zu fünf Aspekte. Die Form der Anpassung war freigestellt.

2. Entwicklung politischer Handlungsempfehlungen zum Erreichen der QT-Vision (Tag 2)

A. *Stakeholder-Mapping*

Identifizierung der zum Erreichen der Vision zu adressierender Stakeholder. Die Relevanz der Stakeholder zum Erreichen der Vision wurde auf einer Skala 1-3 bewertet.

B. *Backcasting*

Zeitliches und gruppenspezifisches Anordnen von Ereignissen und Aktivitäten von Stakeholdern zum Erreichen der modifizierten Vision. Mit dem Ziel, die zum Erreichen der Vision notwendigen Schritte zu identifizieren und zeitlich anzuordnen, wurden verschiedene Akteure der Stakeholdergruppen entlang eines Zeitstrahls angeordnet. Die Ergebnisse wurden vorgestellt und ggfs. angepasst.

⁸ <https://wenzelmehnert.de/>

⁹ auch E³LSC genannt

C. *Entwickeln von politischen Handlungsempfehlungen*

Identifizierung der fünf zentralen Problemstellungen pro Stakeholdergruppe zum Erreichen der jeweiligen Visionen auf Grundlage des Backcasting. Anschließend wurden politische Handlungsempfehlungen identifiziert, mittels derer sich die Probleme möglicherweise beheben ließen sowie die jeweiligen Adressaten gelistet.

3.5.2 Materialien und Auswertung des Workshops

Die Ergebnisse jedes einzelnen Programmpunkts wurden auf entsprechenden Arbeitsblättern von den

Teilnehmenden notiert, welche als Grundlage für die Auswertung dienten. Weiterhin wurden Beobachtungen notiert und die Diskussionen protokolliert.

Die jeweiligen Programmpunkte wurden anschließend quantitativ und qualitativ ausgewertet. Dazu wurden die gemeinsame Vision des ersten Tages und die politischen Handlungsempfehlungen des zweiten Tages analysiert. Weiterhin wurden im Entwicklungsprozess auftretende Stakeholder-spezifische Unterschiede herausgearbeitet und im Abschnitt 4.4 gelistet. Die zusammengefassten Ergebnisse dienten anschließend als Input für die abschließende Ausarbeitung von zentralen Erkenntnissen dieser Studie (s. Kapitel 5).

4 Ergebnisse aus Interviews, Umfrage und Workshop

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Studie, d. h. der Interviews, der Umfrage sowie des Visionsworkshops, vorgestellt. In den Abschnitten 4.1 und 4.2 werden die Ergebnisse der Interviews, in Abschnitt 4.3 die Ergebnisse der Umfrage und in Abschnitt 4.4 die Ergebnisse des Workshops beschrieben.

Die Beschreibung erfolgt entlang der thematischen Ordnung des Fragebogens, wie in Abschnitt 3.4 erläutert. Dieser beinhaltet neben den acht Hauptthemen, Status Quo der Technikfolgenabschätzung in den Quantentechnologien, Auswirkungen des Quantencomputings auf IT-Sicherheit, Nachhaltigkeit des Quantencomputing, Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik, Konsequenzen ungleichen Zugangs zu Quantentechnologien/Quantencomputing, Gesellschaftliche Auswirkungen, Diskurs über Quantentechnologien, Unbeabsichtigte Nebenfolgen auch die weiterführenden Fragen Philosophische Aspekte, Einfluss auf andere Technologien, Gesellschaftliche Wahrnehmung, Bildung, Wissenschaftskommunikation und Kunst, sowie Anderes.

4.1 Ergebnisse der Interviews

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Interviews entlang der Abfolge aus dem Fragebogen wiedergegeben und für jeden Abschnitt kurz zusammengefasst. Die Antworten über den persönlichen Hintergrund der Teilnehmenden werden aus Datenschutzgründen nicht genannt. Einzelne Zitate sind den interviewten Personen über die Nummern aus Tabelle 3.4 zugeordnet. Die Personen 1-5 entsprechen den Teilnehmenden der Wissenschaft, Personen 6-10 denen der Wirtschaft und Industrie, 11-15 denen der Zivilgesellschaft und 16-20 denen der öffentlichen Einrichtungen und Behörden.

4.1.1 Eigene Arbeiten zu Technikfolgenabschätzung von Quantentechnologien

Die erste konkret projektbezogene Frage der Interviews war (3.) die Frage nach eigenen oder gruppeninternen Aktivitäten zu den gesellschaftlichen Folgen von QT, beteiligten Projekten sowie verwendeten Methoden der Technikfolgenabschätzung.

Nur eine Person (Zivilgesellschaft) gab an, dass sie aktiv an Projekten beteiligt war, die gesellschaftliche und ethische Folgen von QT untersuchen und dabei manche **Methoden der TA** verwenden.

Drei Personen (2x Wissenschaft, 1x Wirtschaft und Industrie) gaben an die gesellschaftlichen Folgen von QT im engeren Sinne zu untersuchen, dabei jedoch keine TA-Methoden zu verwenden. Es würden stattdessen **Methoden des Responsible Research and Innovation (RRI), Science and Technology Studies (STS) bzw. Philosophie der Physik** verwendet. Drei weitere Befragte – aus Behörden oder Förderinstitutionen – gaben an, in administrativer oder programmatischer Rolle an Projekten zur gesellschaftlichen Bewertung von QT beteiligt zu sein. Dabei handelt es sich vor allem um die Entwicklung von Leitlinien, Förderinstrumenten oder ethischen Begleitformaten.

„Ich bin in der [Organisation] Ethikkommission und wir haben sehr viele Diskussionen über Technikfolgenabschätzung. Ich möchte in der nächsten Ethikkommission das Thema Quantentechnologien vorschlagen für [die Organisation]. Dass wir auch das beleuchten, um wirklich zu sehen, was sind die Potenziale, Was sind die Möglichkeiten von Quantencomputing, sowohl positive als auch negative Richtung? (Person 5)

Vier Personen aus der Zivilgesellschaft gaben an **im weitesten Sinne** die gesellschaftlichen Folgen von QT zu beleuchten oder über partizipative Projekte zu mitleigieren. Hier würden journalistische Arbeiten, das Ausarbeiten von Policy-Dokumenten oder interdisziplinäre, künstlerische Programme genutzt werden.

Drei Personen gaben an, „**lediglich**“ für **solche Studien und Arbeiten interviewt** worden zu sein.

Sieben Personen waren bisher **nicht involviert**. Dabei gaben zwei Teilnehmende aus der Wirtschaft an, sich in ihrer Tätigkeit an „*ethischen Grundsätzen zu orientieren und der UN-Menschenrechtskonvention zu folgen*“. Weiterhin sei für Personen aus der Wissenschaft schlicht nicht genug Zeit für eine tiefere Beschäftigung mit dem Thema:

„Ich weiß auch natürlich, was Oppenheimer gesagt hat, aber ja, man kann sich ja nicht gleichzeitig um alles kümmern. Ich sehe da die Verantwortung woanders. Natürlich sollte man immer kritisch hinterfragen, was man macht. Aber die Gesamtstrategie muss an anderer Stelle verabschiedet werden.“ (Person 2)

4.1.2 Status Quo der Technikfolgenabschätzung in den Quantentechnologien

Die ersten beiden inhaltlichen Fragen bezogen sich auf (4.) die relevanten Akteure bei der Betrachtung gesellschaftlicher und ethischer Folgen von QT sowie aktueller Entwicklungen, und (5.) auf Publikationen, Projekte oder Veranstaltungen, die die Teilnehmenden in ihre Arbeiten mit einbeziehen.

Die genannten Organisationen sind in Tabelle 4.1 zu sehen. Darunter sind aus Deutschland u.a. das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des KIT, Institute der Fraunhofer-Gesellschaft, das Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestags (TAB), das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), die Technische Universität München und die

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) genannt. Hinzu kommen einzelne Konferenzen und Publikationen.

Viele Teilnehmende gaben an, dass die Zahl der sicher derzeit mit den gesellschaftlichen Folgen von QT beschäftigenden Akteuren und Projekten überschaubar sei, obwohl vielen die Relevanz des Themas klar sei. Man solle hier vor allem nicht die gleichen Fehler wie bei KI machen und die Frage stellen „*wie wir als Gesellschaft mit technologischen Sprüngen*“ umgehen (Person 11).

“At the moment there are not so many other actors in this. And in fact, it is one of the reasons why, since this is a very important topic, I am trying to stimulate it, to encourage a broader engagement, not only from the quantum community, but also from the community of people who work in this kind of ethical and societal assessment. Because I am convinced that even though this has not yet started in a way which would be satisfactory, it is very much at an embryonic stage, it is necessary to engage on with this topic and develop a vision early enough so that we are sort of not overtaken by developments such as what is happening in AI.” (Person 16)

Es passiere wenig auf „*Think-Tank-Level*“ (Person 14), systematische Untersuchungen seien unbekannt (Person 8) und nur wenige Länder würden diese gezielt fördern. Es wurden hier nur Österreich (Person 14) und die Niederlande genannt (Person 20). Es fehle außerdem an Arbeiten, die internationale Aspekte beleuchten (Personen 13 und 20), bzw. an europäischen oder weltweit übergreifenden Projekten:

„[...] es gibt also kein wirklich mir bekanntes europäisches Projekt [...]. Oder auch außereuropäisch, USA oder darüber hinaus. Spezifisch aufgesetzte Projekte [zu den gesellschaftlichen und ethischen Folgen von QT], die übernational sind, gibt es – soweit ich es weiß – in dem Sinne nicht.“ (Person 6)

Tabelle 4.1: Von den Interviewten genannte Organisationen und Einrichtungen, die die Auswirkungen von Quantentechnologien abschätzen. In alphabetischer Reihenfolge, im Wortlaut und für deutsche Einrichtungen übersetzt.

Stakeholder-Typ	Explizit in den Interviews genannte Organisationen
Wissenschaft	Büro für Technikfolgenabschätzung beim Deutschen Bundestags (TAB), Deutsche Physikalische Gesellschaft (DPG), Helmholtz-Gemeinschaft Deutscher Forschungszentren, Humboldt-Universität zu Berlin, Institute der Fraunhofer-Gesellschaft, Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des KIT, Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Quantum Policy Academy (of QBN), Responsible Technology Institute in Oxford, Security Research 2025, Stanford University, Technische Universität Berlin, TU Delft, Technische Universität München, Trinity College Dublin, Universität der Künste Berlin, Universität Wien, Universität Innsbruck, Universiteit van Amsterdam, University of Chester, University of Oxford, University of Sherbrooke, Yale University.
Wirtschaft und Industrie	IBM
Zivilgesellschaft	Hans-Böckler-Stiftung, Junge Tüftler*innen, Schering Stiftung, Studio Quantum (Goethe Institut Irland), Open Quantum Institute (OQI), Quantum Ethics Project, Zentrum für Kunst und Medien (ZKM).
Öffentliche Einrichtungen und Behörden	Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI), CSIRO, DARPA, Deutscher Ethikrat, Europäische Union, European Quantum Flagship, NATO, National Quantum Computing Centre, Nationale Regierungen, Quantum Delta NL, Responsible Industry Forum.
Andere	UNESCO, Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD), Q.E.D. Quantum Ecosystem Deutschland (Fraunhofer IMW), World Economic Forum (WEF).

In dem Zuge wurde von einem Stakeholder außerhalb Deutschlands das föderale System in Deutschland kritisiert, welches „effektive Kollaborationen innerhalb Europas Quantenökosystem behindere“ (Person 20).

Trotz dieser unter den Befragten verbreiteten Sicht, dass Untersuchungen gesellschaftlicher und ethischer Folgen von QT notwendig seien, sei auf zwei sorgenvolle bis kritische Stimmen aus der Wirtschaft verwiesen. Unter Verweis auf das Collingridge-Dilemma sei es noch zu früh Auswirkungen von QT zu erkennen (Person 10) und man solle nicht „durch Regulierungen im Vorhinein das Gute verhindern“ (Person 9). Außerdem sei für eine Person aus der Forschung zwar klar, dass diese Untersuchungen

sicherlich relevant und hochqualitativ seien, aber schlicht die Zeit fehle, diese zu lesen. Nicht überraschend verwiesen diese Personen deshalb auch darauf, in ihrer alltäglichen Praxis lediglich generellen ethischen Standards zu folgen (Person 2).

„Also ich habe eine endliche Zeit auch selbst und es gibt sicherlich in der Community gut angesehene Publikationen. [...] Aber ich habe einfach keine Zeit, die zu lesen. Ich muss am Zahn der Zeit der Forschung bleiben. Ich muss die Forschung verstehen und voranbringen. Ich werde es nicht schaffen, mir dazu Publikationen durchzulesen.“ (Person 2)

Auch wenn nicht explizit gefragt, gaben viele Befragte Empfehlungen, wie die Abschätzung der

Folgen von QT verbessert werden könnte. Es wurde das Ausarbeiten von Richtlinien, Handlungsempfehlungen oder Chartas empfohlen, an die sich Akteure im Ökosystem halten könnten (Personen 1 und 2). Da die Gruppengröße relevanter Akteure noch eher klein sei, könne man diese in einem Dialog zusammenbringen (Personen 1 und 20). Zwei Personen – eine aus Standardisierung sowie eine aus der Friedensforschung – gaben an, dass ihre jeweils eigenen Bereiche in solche Aktivitäten einbezogen werden sollten (Person 13 und 17). Es wurde außerdem der Wunsch geäußert, dass andere Länder – neben Österreich und Deutschland – gezielt die Abschätzung von gesellschaftlichen und ethischen Folgen von QT fördern sollten und dass dies auch eine Analyse der europäischen Wertschöpfungskette einschließen sollte:

“We developed a methodology that was picked up by the European Quantum Industry Consortium. It was picked up by the European Commission, which is all good. But the next step is critical. Can we translate this into an investment agenda? I don't want to know the supply chain because I want to know how the supply chain looks. I want to know how the supply chain works and where the bottlenecks are, because I can do something about it. And there is a direct link between knowing where potential bottlenecks are and investment decisions by, for example, the European Innovation Council on Start-Ups in Europe. We can drive this conversation. We can drive the creation of the shaping of a European quantum market. We don't have to just let it happen if we are serious about industrial policy.” (Person 20)

Es lässt sich zusammenfassen, dass die meisten Befragten die Abschätzung von gesellschaftlichen und ethischen Folgen von QT begrüßen. In Deutschland werden einige Akteure, wie das Büro für Technikfolgenabschätzung des Bundestags (TAB), das Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des KIT, oder das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), als relevante angesehen, jedoch fehlen umfassende, systematische Arbeiten. Insbesondere auf europäischer und

internationaler Ebene fehle eine strategische Behandlung des Themas, dass auch sicherheitspolitische und militärische Aspekte oder die Standardisierung einschließe. Hier sei es sinnvoll, in einem (europäischen) Stakeholder-Dialog Richtlinien und Handlungsempfehlungen für gesellschaftlich und ethisch vertretbare QT-Entwicklung zu entwerfen. Die abzuleitenden Empfehlungen sollten möglichst kompakt, verständlich und einfach umzusetzen zu sein und keine neuen bürokratischen Hürden für die entstehende QT-Industrie enthalten. Es könne vielmehr über eine detaillierte Analyse der europäischen Wertschöpfungskette eine zielgenaue Investitionspolitik unterstützt werden.

4.1.3 Auswirkungen des Quantencomputings auf IT-Sicherheit

Die Fragen zu den Auswirkungen des Quantencomputings auf die IT-Sicherheit wurde entlang der Fragen (6.) welche technischen Voraussetzungen und Meilensteine zu erfüllen seien und wann mit diesen zu rechnen sei, sowie (7.) welche Folgen sich dann für Deutschland und Europa ergeben würden und wie diese darauf vorbereitet seien, untersucht.

Die Interviews ergaben eine breite Übereinstimmung, dass das Quantencomputing **eine große Herausforderung für die IT-Sicherheit** darstelle, insbesondere im Bereich der Kryptographie. Viele Teilnehmer bezeichneten Quantencomputer als eine grundlegende Bedrohung für die digitale Infrastruktur, die Kommunikation, Authentifizierung und Datenschutz. Gleichzeitig wurde deutlich, dass diese Bedrohung noch in der Zukunft liege, aber nahe genug, um strategische Vorbereitungen zu erfordern.

Aus technischer Sicht sei die Fähigkeit von Quantencomputern, aktuelle kryptografische Methoden wie RSA zu brechen, heute noch nicht gegeben, jedoch absehbar möglich. Algorithmen wie der von Shor seien mathematisch solide, aber ihre Umsetzung erfordere eine Größenordnung des Quantencomputers, die weit über die derzeitigen Möglichkeiten hinausgehe. Zahlreiche Interviewpartner betonten,

dass fehlertolerante Quantencomputer, die solche Algorithmen ausführen können, Tausende bis Zehntausende von logischen Qubits benötigen, die wiederum von einer hocheffizienten Fehlerkorrektur unterstützt werden müssen. Obwohl bei fehlertoleranten Quantenspeichern und Einzeloperationen erhebliche Fortschritte erzielt wurden und manche von ersten fehlerkorrigierten Operationen im nächsten Jahr ausgingen, bleibe ein vollständig integriertes System eine gewaltige technische Aufgabe. Ein Teilnehmer merkte an, dass die Maschine, die zur Ausführung solcher Algorithmen benötigt wird, „gigantisch“ wäre und obwohl keine neue Physik erforderlich sei, enorme Investitionen und technische Anstrengungen erforderlich seien. Dennoch wurde häufig darauf hingewiesen, dass die Entwicklung solcher Systeme nicht eine Frage der generellen Möglichkeit, sondern des Zeitpunkts sei.

Es herrschte weitgehend Einigkeit darüber, dass der **Zeitpunkt der Realisierung** von Quantencomputern, die in der Lage sind, die derzeitige Verschlüsselung zu knacken, schwer vorherzusagen sei. Die Schätzungen variierten, aber die meisten Teilnehmer gingen von einem Zeitrahmen von zehn bis zwanzig Jahren aus. Es wiesen jedoch mehrere darauf hin, dass diese Einschätzungen auf Unsicherheiten beruhen:

“What I tend to tell people is that there is a consensus that every single milestone that we need and that we expected over the last couple of years came sooner than we thought it would. And there is no consensus on what that means for the timelines. If you look at somebody who's got a mandate to secure public key infrastructure, I would be on the worrying side and I would expect somebody in the next three years to come up with something that can work and just break that code in some sort of way. [...] These people have to be careful, have to be overestimating these timelines.” (Person 20)

Es wurde bemerkt, dass sich die technische Entwicklung deutlich beschleunigt habe und Roadmaps angepasst würden. Es sei zwar weiterhin damit zu rechnen, dass eher zehn Jahre bis zu kryptografisch

relevanten Maschinen vergehen würden, jedoch könnten auch Durchbrüche in der Hardware die bisherigen Zeitschätzungen deutlich verändern:

„Der fehlerfreie Quantencomputer, die Roadmap von IBM und auch von Quantinuum haben sich dramatisch beschleunigt. Wir können davon ausgehen, dass nicht 2030, sondern bereits nächstes Jahr die ersten fehlerfrei rechnenden Quantencomputer auf dem Markt sind.“ (Person 5)

Andere betonten, dass es nicht auf den genauen Zeitpunkt der Realisierung ankomme, sondern darauf, dass man vorbereitet sei:

„Und es ist auch völlig egal, wann es passiert, weil die Leute jetzt handeln müssen. Und wenn du dann diesen Algorithmus realisieren kannst, dann ist es im besten Fall nutzlos, dass du ihn realisieren kannst, weil die Leute schon reagiert haben.“ (Person 2)

Die **möglichen Folgen** solcher Entwicklungen wurden als weitreichend angesehen. Quantencomputer würden nicht nur die Verschlüsselung gefährden, sondern könnten eine ganze Reihe von darauf aufbauenden Systemen untergraben: Finanztransaktionen, sichere Kommunikation, Infrastrukturen mit öffentlichen Schlüsseln und Mechanismen zur Identitätsprüfung. Mehrere Befragte beschrieben Strategien nach dem Prinzip „store now, decrypt later“, bei denen Daten bereits abgefangen und in Erwartung künftiger Entschlüsselungsmöglichkeiten archiviert werden:

„[...] staatliche Akteure fangen ja sowieso schon an alles auf zu speichern, auch einzusammeln, wenn das dann geknackt werden kann, dass sie es dann auslesen können und alles auswerten können.“ (Person 10)

Sogar persönliche Daten und alltägliche finanzielle Interaktionen könnten gefährdet sein und die möglichen globalen Auswirkungen wurden hervorgehoben. Eine Reihe von Teilnehmenden betonte, dass

lokale Schutzmaßnahmen allein nicht ausreichen würden, selbst wenn sie vollständig umgesetzt würden:

„[...] dass selbst wenn Deutschland perfekt geschützt wäre, so viele Transaktionen auch über Rechner laufen, die im Ausland stehen, dass das nichts bringt, wenn nur Deutschland sich quasi die perfekte Mauer aufbauen würde.“ (Person 6)

Neben individuellen oder finanziellen Bedrohungen beschrieben die Teilnehmenden, wie kompromittierte Kryptografie auch physische Systeme gefährden könne, insbesondere solche, die mit dem Internet der Dinge verbunden oder in die Infrastruktur eingebettet sind:

„Man kann sich auch so Szenarien vorstellen. Dann fällt die Kryptographie aus und irgendwelche Züge fahren irgendwo. Müssen jetzt keine Züge sein. Wenn Sie IoT Devices haben und man die hacken kann. Da gibt es glaube ich auch Arbeiten zu. Wenn man die rhythmisch ein- und ausschaltet, das Stromnetz zum Zusammenbruch bringt, also Herde oder sowas. Ich glaube da fehlt uns eigentlich im Moment auch noch die Fantasie. Um überhaupt zu sehen, was alles möglich ist.“ (Person 18)

Für andere war das Potenzial für ein geopolitisches Ungleichgewicht besorgniserregend. Wenn es bestimmten Ländern oder Bündnissen (wie der NATO) gelänge, sich Post-Quantum-Fähigkeiten zu sichern, während andere hinterherhinkten, könnte dies zu einem ungleichen Zugang zu sicherer Kommunikation und Aufklärung führen.

Auf die Frage, **ob Deutschland oder Europa auf diese Herausforderung vorbereitet seien**, waren die meisten Antworten zurückhaltend oder kritisch. Zwar haben Organisationen wie das BSI die notwendigen Schritte unternommen und unter anderem Empfehlungen für Post-Quantum-Kryptographie herausgegeben, doch viele waren der Meinung, dass dies noch nicht ausreiche. Das Bewusstsein der politischen Akteure sei nach wie vor begrenzt. Und ein Bewusstsein für die Dringlichkeit sei in den

verschiedenen Sektoren unterschiedlich ausgeprägt. Obwohl große Unternehmen in Deutschland, z. B. im Bankwesen, in der Mobilitätsbranche oder im verarbeitenden Gewerbe, beginnen, interne Strategien zu entwickeln, merkten mehrere Befragte an, dass ein Großteil des privaten Sektors das Thema immer noch als zweitrangig betrachte. In der Privatwirtschaft sei noch nicht angekommen, wie dringlich das Thema ist (Personen 5 und 14) und viele Unternehmen würden das Thema verschlafen (Person 1).

Mehrere Befragte wiesen ausdrücklich auf eine **fehlende europäische Führungsrolle** in diesem Bereich hin. Während die EU vielversprechende Programme wie die paneuropäische Quantenkommunikationsinfrastruktur (EuroQCI) initiiert habe und Anstrengungen unternommen würden, um die nationalen QKD-Netze miteinander zu verbinden, herrschte die Meinung vor, dass die USA in Bezug auf PQC sowohl bei der Einführung als auch bei den Investitionen schneller vorankomme.

„Ich bin mir sehr sicher, dass andere Länder deutlich weiter sind im Denken. Nicht in der Technologie. Weil wir in Europa, Deutschland speziell, auch ein wirklich exzellentes Wissenschaftsnetzwerk haben, aber in den ganzen Gedanken, wie wir uns verteidigen müssen, wie wir auch potentiell angreifen können – eines Tages – [nicht gut aufgestellt sind]. Da sehe ich generell in den Quanten[technologien], aber auch in den eher konventionellen Sachen, Deutschland, Europa nicht gut aufgestellt. Ja, da ist einfach Mangel. Ressourcenmangel, Aufmerksamkeit. Die ganzen politischen Akteure haben das nicht auf der Tagesordnung und die wollen das oft auch nicht hören.“ (Person 10)

Einige Befragte drängten auf ein stärkeres Vorgehen auf europäischer Ebene, insbesondere in den Bereichen Regulierung, öffentliches Auftragswesen und Koordinierung von Normen:

“Of course, it's not easy, but I think there is room that is not yet filled where the European Union and member states could start saying ‘okay, we see this

is coming'. We want everyone who provides us IT services, particularly those from the European ecosystems, to add quantum safe assessments or quantum safe protocols or quantum safe innovations to the mix. And we want everyone to at least tell us what is possible, what is not possible to really start that conversation. I think that is an underused tool. The procurement tool is underused in emerging tech in general. And, quantum in particular." (Person 20)

Während PQC allgemein als die kurz- bis mittelfristig praktikabelste Lösung angesehen wurde, äußerten viele Teilnehmende Zweifel an ihrer langfristigen Robustheit. Mehrere als vielversprechend geltende Algorithmen waren bereits in frühen Versuchen gescheitert. Eine Person erklärte: "[...] einige von den besonders vielversprechenden Post-Quanten-Kryptografie-Algorithmen, die dann halt bei den NIST Hackathons oder ähnlichen Hackathons angeguckt wurden. Die wurden dann teilweise in einer Dreiviertelstunde auf dem Laptop geknackt [...]" (Person 1). Andere wiesen darauf hin, dass für kein PQC-Schema formal bewiesen sei, dass es gegen alle Quantenangriffe sicher ist (Personen 1 und 17). Einige warnten davor, sich zu sehr auf Zeitlinien zu verlassen oder anzunehmen, dass nur Quantenalgorithmen eine Bedrohung darstellten und wiesen stattdessen auf die mögliche Beschleunigung von Angriffen durch „quanteninspirierte klassische Techniken“ hin.

"Putting any timescale on it can lead to complacency, because so long as we know that we're not yet developing the qubit scale-up quickly enough, so long as we know we're not developing a new algorithm, [...] there's the danger of [...] not putting enough effort into mitigation now." (Person 15)

Eine Person warnte davor, alles auf bekannte Methoden wie Shor oder Grover zu setzen:

„Gibt es andere Algorithmen außer Shor, Grover oder sowas? Beispielsweise HHL [Harrow–Hassidim–Lloyd] und wie könnte man die benutzen? Auch das ist offen. Und wenn Sie mal die letzten Tage geguckt haben; zum Beispiel gab es Veröffentlichungen aus

China, wo gesagt wurde, man können irgendwelche symmetrischen Algorithmen mit einem Computer angreifen. Das ist aber nicht veröffentlicht, was sie da gemacht haben, also wenig hilfreich.“ (Person 18)

Die Teilnehmenden äußerten auch Bedenken hinsichtlich der kommerziellen Landschaft im Quantensicherheitssektor. Einige Start-ups würden zu viel versprechen und „heilende“ Quantenlösungen anbieten oder sogar ihre geopolitische Zugehörigkeit verschleiern. Einige erklärten, dass es Unternehmen gäbe, die im Stillen von ausländischen Akteuren unterstützt würden:

„[...] wir haben da eine gewisse Bedrohung, dass da jetzt im Moment viele Geld machen. Und bei einzelnen Firmen wissen wir auch, dass sie [...] durchaus einen russischen Hintergrund haben, den sie im Moment verbergen. Die Russen sind plötzlich Finnen geworden, teilweise. Dass das so ist, sehe ich auch als eine der Gefahren, dass das in den Bereich des Betrugs irgendwie abgeschoben wird. Ja, und ich glaube auch nicht, dass alle Firmen, die sich jetzt da auf tun und aktiv sind, am Ende erfolgreich sein werden. Was bei Start-ups natürlich nicht überrascht.“ (Person 18)

Zusammenfassend machten die Interviewten deutlich, dass die Bedrohung der IT-Sicherheit durch das Quantencomputing real, global und systemisch sei, auch wenn dies noch nicht unmittelbar bevorstehe. Die dynamische Entwicklung des Feldes, sowohl in Hardware als auch in Algorithmen, könnte jedoch zu unvorhergesehene Beschleunigungen führen. Die Vorbereitung auf diese Bedrohung erfordere deshalb mehr als nur technische Bereitschaft; sie erfordere politischen Willen, regulatorische Weitsicht und internationale Koordination. Zwar seien bereits Initiativen in den Bereichen Normung, Forschung und Infrastruktur im Gange, doch müssten diese Bemühungen sektor- und grenzübergreifend skaliert und aufeinander abgestimmt werden. Der Zeitplan mag ungewiss sein, aber viele Befragte betonten, dass die Zeit zum Handeln gekommen ist.

4.1.4 Nachhaltigkeit des Quantencomputings

In Bezug auf die Nachhaltigkeit des Quantencomputings wurden zwei Fragen gestellt: (8.) Wie der Energie- und Ressourcenverbrauch von Quantencomputern einzuschätzen ist und inwieweit sie mögliche Einsparungen im Vergleich zu klassischen Computern liefern könnten; und (9.) ob und zu welchem Zeitpunkt bzw. technischen Reifegrad eine explizite Berücksichtigung der Nachhaltigkeit in Forschung und Entwicklung notwendig ist.

Die erste Frage nach **möglichen Energieeinsparungen durch Quantencomputer** wird nahezu vollständig bejaht. Vier der 20 interviewten Personen sind sich den Einsparungen sicher und neun Personen halten Einsparungen für wahrscheinlich. Meist genannt wurden Einsparungen durch das Anwenden von Quantenalgorithmen, welche Effizienz- und so Energievorteile im Vergleich zu klassischen Algorithmen liefern würden (bspw. Simulation, Analyse von Molekülen). Dies könne auch im Einsatz in Supercomputer-Zentren (HPC-Zentren) oder im Zusammenspiel mit Quantum Machine Learning (QML) geschehen. Diese Einsparungen würden auch den Energieverbrauch durch das teilweise notwendige Kühlen von Qubit-Systemen wie supraleitenden Qubits wettmachen. Während vier Personen keine Antwort gaben oder auf fehlende technische Expertise verwiesen, gaben lediglich zwei Personen an, eine deutliche Unklarheit über Energievorteile von Quantencomputern zu sehen. Person 15 verwies dabei auf die noch geringe technische Reife, die noch fortschreitende Algorithmenforschung und Unklarheiten über das konkrete Zusammenspiel mit klassischen Computern, welche den späteren Energieverbrauch nicht eindeutig bestimmen ließen. Person 8 wurde deutlicher und gab an, dass einige Menschen ein „Greenwashing betreiben“ würden und lediglich angäben Quantencomputer benötigten deutlich weniger Energie ohne den Nachweis dafür zu liefern.

Die Frage nach möglicher zwingender **heutiger Betrachtung der Nachhaltigkeitsaspekte** wiederum wurde deutlich kontroverser beantwortet. So war für

die Personen, die einen sicheren Energievorteil durch die Anwendung von Quantencomputern sehen, eine explizite Energiebetrachtung eher nicht notwendig bzw. frühestens, wenn kommerziell einsatzfähige Geräte existierten. Heute sei dies „*waste of money; oder besser gesagt waste of energy [...]. Technische Entwicklung muss der erste Weg sein. Ich muss erst einmal zeigen, dass ich performanceseitig eine klassische Simulation überholen kann. Und dann die Kosten-Diskussion starten?*“ (Person 9). Für diese Personen, die aus Wissenschaft oder Wirtschaft und Industrie kommen, wird sich die Energieeffizienz entweder aus Preisgründen automatisch „*evolutionär ergeben*“ (Person 10) oder es müsse erst „*ab Einsatz auf die Nachhaltigkeit geschaut werden*“ (Person 4).

Für Personen hingegen, die Energieeinsparungen eher vermuten, überwiegt deutlich eine heute schon notwendige Betrachtung der Energieeffizienz. Nachhaltigkeit und technische Entwicklung sollten „*von Anfang an Hand in Hand gehen*“ (Person 12), wobei diese jedoch meist „*nicht zwingend, eher bestrebend*“ stattfinden solle (Person 6). Mehrfach wurde auf ein Betrachten „*des Weltkontexts*“ verwiesen, da der Einsatz von Quantencomputern auch in anderen Ländern mit anderen Energieproduktionsformen stattfinden werde (Person 14) und dass gleichzeitig der Materialeinsatz und die Abhängigkeit von bestimmten Materialien relevant sei:

“I think with many other technologies in the past, this question was not posed. Like ‘oh, as long as this thing gets to work, we’ve got to worry about energy consumption and environmental pollution and sourcing the raw materials later on’. We don’t have the luxury to do that. And I would argue, in times of digital sovereignty and increasing tensions across supply chains in the world, we have a responsibility to think about these things in advance. So, energy is just one of the aspects that we need to tackle when building the stuff in the lab. If you see that you can build something with a raw material that is not available. Take helium three. You have a responsibility to think through the consequences. Do we want to make our entire quantum ecosystem

dependent on something that is nuclear waste product from two countries in the world, or do we want to invest in finding alternatives for it? I think these questions need to be asked and they need to be asked today.” (Person 20)

Um diese divergierenden Einschätzungen faktenbasiert klären zu können, wurde seitens einer Person vorgeschlagen, Unklarheiten über funktionierende Maßnahmen und den richtigen Zeitpunkt ihrer Implementierung untersuchen zu lassen:

“The BMBF could make a public funded project to investigate these questions in detail. But I think before, before a lot of money is spent in the moment, we really have to find out whether it is already time to do this or if this is still too early. I think the first question, we have to answer is, ‘could we take such an initiative to success or do we still have to wait a few years to learn more about quantum computers, to be able to answer these questions in sufficient detail and quality?’” (Person 8)

Dies deckt sich mit der Einschätzung einiger Personen – sowohl derer, die sich unklar über mögliche Einsparungen sind als auch derer, die Einsparungen vermuten – zur Wichtigkeit aktueller Forschung zu Energieeinsparungen. Dabei wurde ebenfalls gefordert die vermuteten Einsparungen durch Quantencomputer nicht durch eine Integration in HPC-Zentren zunichte zu machen:

„Was man im Moment macht: Man baut neue Supercomputer Zentren, die extrem energiefressend sind und nimmt dann den Quantencomputer als Coprozessor. Und ich denke, wir müssen Aktivitäten fördern, die tatsächlich Quanten sind. Ja, wir denken immer noch viel zu klassisch. Wir müssen weiter darüber überlegen, wie wir es schaffen, echt Quantum zu denken und echte Quantenalgorithmen zu entwickeln.“ (Person 5)

Ebenfalls finde bisher noch keine breite gesellschaftliche Auseinandersetzung mit Aspekten der Nachhaltigkeit von Quantencomputern statt (Person 16),

weshalb diese Auseinandersetzung explizit gefordert wurde (Person 11).

Zusammengefasst lässt sich erkennen, dass das Thema Nachhaltigkeit von Quantencomputern als sehr relevant angesehen wird, jedoch die Wege zum Erreichen dieser unterschiedlich eingeschätzt werden – abhängig davon ob die Energieeffizienz von Quantencomputern als gegeben oder als „nur“ wahrscheinlich angesehen wird. Eine mögliche Antwort darauf ist die mehrfach gewünschte verstärkte Forschung zum Energieeinsatz von Quantencomputern wie durch die Quantum Energy Initiative oder von Arbeiten, die den Einsatz von Quantencomputern explizit für Energieeffizienz anderer Prozesse untersuchen. Weiterhin könne ein breiterer Nachhaltigkeitsbegriff unter Einbeziehen von seltenen Materialien nützlich sein, der einen interdisziplinären und ggfs. auch öffentlichen Diskurs unterstütze. Und falls keine Einigkeit über das weitere Vorgehen bestehe, könne eine freiwillige Angabe zum Energie- und Ressourcenverbrauch der heutigen Systeme gefördert werden, wodurch zunächst ein informierter Überblick über den Energieverbrauch von Quantencomputern geschaffen werde.

4.1.5 Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik

Zu den sicherheitspolitischen Auswirkungen von Quantensensoren wurde zum einen (10.) nach konkreten Anwendungen, deren zeitliche Entwicklung und Implementierung sowie Auswirkungen auf die Sicherheitspolitik gefragt. Zum anderen bestand die Frage, ob (11.) regulatorische Aspekte wie Rüstungs- oder Exportkontrolle sinnvoll und angemessen wären.

Für die **technischen Möglichkeiten** von Quantensensoren scheint es einen großen Konsens zu geben. So wurden eine Vielzahl an Quantensensoren benannt, die verschiedenste zivile und gleichzeitig militärische Anwendungspotenziale aufweisen und damit grundsätzlich Dual-Use sind:

*“One is a network of quantum gravity methods that will be deployed on the ground, but also on mounted on platforms. [...] And we see several use cases about the **monitoring of volcano activity**, [...] the **monitoring of water cycle** [...]. [Sensors] being able to detect what is under the ground. We have already seen some simulation of that in a recent seminar in **archaeology**.*

*And the other projects that we are deploying are **quantum MRI** in some hospital researches. And this quantum MRI will be quite more accurate in the **cancer cells detection** or the more precise images of what is happening inside the body. [...]*

*But there are others also like the ones allowing you to **avoid the GPS**. Devices which would be able to work even [...] if the GPS signal is blurred.”*
(Person 19)

Daneben werden genannt: Verbesserte Lokalisation von Raketen und Schiffen; Signalbasierte Aufklärung über Radiofrequenzsensoren; bessere Feldkommunikation durch Atomuhren; Magnetfeldsensoren zum Aufspüren von U-Booten; oder Seitenkanalangriffe auf Kommunikationsnetzwerke. Auf der eher indirekten Seite der militärischen Anwendung wurden genannt: Grenzkontrollen; Detektion von Landminen; und Unterstützung verwundeter Soldaten. Viele dieser Anwendungen seien dabei in naher Zukunft denkbar, da Quantensensoren bereits weit entwickelt seien. All diese Möglichkeiten lieferten militärisch „*Riesenfortschritte*“, womit das Militär zentraler Treiber der Entwicklung und aus Kostengründen auch erster Abnehmer von Quantensensoren sei.

Bzgl. der konkreten **Auswirkungen** wurden mehrmals Folgen für das nukleare Gleichgewicht durch die mögliche Detektion von mit Nuklearsprengköpfen bestückten U-Booten genannt. Dies könne sowohl

*„Zum Beispiel **unterirdische Tunnel**. Es wird immer geredet, dass man die vielleicht orten kann, [...]. Man fährt mit dem Fahrzeug auf dem Boden herum oder vielleicht in der Drohne, 20 Meter über dem Boden, und versucht, einen **Bunker** oder so etwas im Untergrund zu orten.“* (Person 13)

*“If you can [build] an array of quantum sensors which can **read into neurons** in real time. This could even lead in some dystopian scenario to a situation in which some sort of malevolent power might be able to read the thought of people.”* (Person 16)

*„Erster Anwendungsbereich ist natürlich **PNT, also Positionen, Navigation, Timing**. [GPS unabhängige Systeme] werden ermöglichen, dass man deutlich unabhängiger [wird], und dass man **neue Operationsszenarien für seine Streitkräfte** entwickeln kann. Das wird taktische Vorteile geben“*
(Person 1)

die Zweitschlagmöglichkeiten reduzieren als auch in kritischen Situationen zu einem Präventionszwang der aufklärenden Seite führen. Ebenfalls verstärkt debattiert wurden ausführliche Überwachungsmöglichkeiten. Ob satellitengestützt oder über verbesserte tomographische Methoden, stets wurde von gesellschaftlichen Dystopien und Schreckensszenarien gesprochen.

Aufgrund der Vielzahl an militärischen Möglichkeiten, deren Entwicklung sich aus „*Angst, dass ein anderer einen Sensor oder Computer verwenden kann, um etwas Sicherheitspolitisches umzusetzen*“ noch weiter beschleunigen könne (Person 2), wurden von allen Teilnehmenden direkte **politische Handlungsempfehlungen** geäußert. Diese unterschieden sich jedoch – außer darin, dass Militärtechnik nicht in Staaten wie Nordkorea exportiert werden sollte – deutlich in Art, Argumentationsgrundlage und Umfang.

So argumentierten viele Interviewte entlang der „*implizit in der Frage enthaltenen Sichtweise technologischer Souveränität und ökonomischer Faktoren*“ (Person 16). D.h. aus Sorge davor, dass andere Staaten die eigenen Quantensensoren militärisch einsetzen könnten, sowie dass Deutschland bzw. Europa den Anschluss an bestimmte Entwicklungen verlieren könnten und damit Schlüsselindustrien schützen müssten, wurden auf der einen Seite verschiedene Möglichkeiten für Exportkontrollen vorgeschlagen. So sei ein Übertragen von Grenzwerten aus anderen Sensorbereichen möglich (Person 17) und auch zwingend nötig (Person 8). Solche Fälle gäbe es auch schon für bestimmte Gravitationssensoren (Person 1). Andere forderten hier auch die weitergehende Betrachtung von Materialien und Geräten, welche für die Entwicklung von Quantensensoren (und anderen Quantentechnologien) notwendig sind (Person 18). Unter Verweis auf einen bekannten chinesischen Forscher wurde außerdem auf Prüfung ausländischer Forscher und Studierender verwiesen (Person 4).

„Es gibt die pazifistische Antwort, [...] man soll solche Sachen militärisch überhaupt nicht einsetzen. Das ist aber eine pazifistische, komplett unrealistische Aussage. Aber was man vermeiden sollte, ist, dass man wirklich sicherheitsrelevante Technologie exportiert.“ (Person 5)

Ein großer Teil der Interviewten argumentierte hingegen gegenteilig und verwies auf den geringen bis nicht existenten Nutzen von **Exportkontrollen**. Diese würden nur temporär helfen und die Entwicklung und den Einsatz von Quantensensoren für militärische Anwendungen in anderen Ländern nur kurzzeitig verlangsamen (Person 9).

„Dieser Protektionismus ist nur begrenzt möglich und hilft nur kurzfristig, vielleicht im Zeitraum einer Legislaturperiode, vielleicht auch ein bisschen länger. Gerade im Zeitalter der Informationstechnologie lassen sich solche Wissensvorsprünge nicht unendlich lange halten. Ich bin deshalb der Meinung, dass man in Spitzentechnologien investieren muss.“

Um sich selbst in einem bestimmten Bereich der Spitzentechnologien eine Spitzenposition im nationalen Vergleich schaffen zu können.“ (Person 9)

Gleichzeitig schien bei einzelnen Teilnehmenden die Sorge zu bestehen, dass zu streng bzw. nicht zielführend reguliert würde. Manche der hiesigen Unternehmen würden aufgrund von Exportkontrollen das Potenzial Ihrer Technologie nicht ausreizen, um ohne Probleme exportieren zu können (Person 1). Besser sei es deshalb, „*in die Köpfe der Forschenden diese Thematik zu verankern und nicht in einem Gesetz, das mir sagt Du darfst das nicht ausführen oder Das muss besonders exportkontrolliert sein, wenn die Leute, die das herstellen, selbst dieses Verständnis haben.*“ (Person 2). Weiterhin wurde genannt, dass Regulierungen immer postfaktisch kämen, weshalb proaktive Mechanismen gefunden werden müssten (Person 6). Ebenfalls wären zu viele nationale Akteure involviert, was eine effektive und zügige Kontrolle ausschließe. Dies müsse reduziert und europäisch harmonisiert werden (Person 20).

Zwei Interviewte verwiesen auf ein Dilemma zwischen sicherheitspolitischer Kontrolle und globaler Verteilungsfrage: Einerseits wurde die Notwendigkeit zur Regulierung von Dual-Use-Technologien betont, andererseits erkannt, dass eine restriktive Exportpolitik bestehende globale Ungleichheiten verschärfen könnte, ohne effektiv die Sorge vor einem militärischen Einsatz zu reduzieren (Person 12). Es seien vielmehr effektive Rüstungskontrollverträge notwendig, mit denen sich durch den Einsatz von Quantensensoren entstehende Probleme regulieren ließen. Auch wenn dies sicherlich technisch und praktisch große Herausforderungen bedeuteten würde, sollten diese Anstrengungen heute begonnen und von einer umfassenden Militärtechnikfolgenabschätzung begleitet werden (Person 13).

„Das ist ein Bereich, der mit Blick auf mögliche Gefahren professionell zu untersuchen ist. Wenn sich dann Gefahren abzeichnen, dann ist zu überlegen, wie könnte man die notwendigen Begrenzungen einerseits politisch akzeptabel halten, aber auch

zuverlässig überprüfen, dass sie eingehalten werden? Da ist Technikfolgenabschätzung wirklich nötig, vor allen Dingen auch im Bereich der Nuklearstrategie – in Bezug auf U-Boot-Ortung und Erstschlagsdrohung bzw. -befürchtung. Das heißt also, Kontrolle wäre ganz gut, wenn sich da starke Gefahren abzeichnen. Die prinzipielle Aussicht dafür besteht. Das müsste genauer untersucht werden, und dann müssten dafür Konzeptionen entwickelt werden, Optionen für Begrenzungen und deren Überprüfung.“ (Person 13)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass alle Beteiligten Handlungsbedarf für den Umgang mit militärischen Möglichkeiten von Quantensensoren sehen, jedoch die Ansätze von „restriktive Exportkontrollen“ über „mit eigener Stärke lösen“ bis hin zu „globalen Rüstungskontrollverträgen“ reichen. Dennoch lässt sich aus einem gewissen Grundkonsens heraus, dass in Deutschland und Europa bereits einige Exportkontrollen wie bestimmte Grenzwerte für Sensoren und Kontrollen zur Aufnahme außereuropäischer Studierender bestehen, eine Empfehlung abgeben. Es erscheint das Ziel, aus einer Position der Stärke heraus durchdachte, europäisch harmonisierte Exportkontrollen von Quantensensoren aufzubauen und, um Rüstungskontrollen zu erweitern, als am sinnvollsten. Dies hieße (1.) besonders relevante Quantensensoren sowie Geräte und Materialien für deren Entwicklung zu identifizieren und außereuropäische Abhängigkeiten zu minimieren. Dies könnte über ein gezieltes Ansiedeln von Firmen, Ausgründen aus exzellenten Forschungsgruppen und Schutz solcher bereits bestehender Unternehmen bestehen. Gleichzeitig sollte kritische Infrastruktur wie Zeitnetze resilienter gestaltet werden. Aus dieser Position heraus könnten dann (2.) ein Export dieser besonders relevanten Technologien, Materialien und Geräte eingeschränkt und der Export von technologisch weniger entwickelter, aber militärisch einsetzbarer Objekte an bestimmte Länder verboten werden. All diese Schritte müssten jedoch (3.) europaweit durchgeführt werden, was eine klare Harmonisierung nationaler Exportbeschränkungen bedeuten

würde. Parallel könnte außerdem (4.) eine von einer umfassenden Militärtechnikfolgenabschätzung begleitete Analyse von Möglichkeiten der Rüstungskontrolle gestartet werden, mit der besonders kritische Einsatzmöglichkeiten verboten bzw. geächtet würden und langfristig die nicht-militärischen Anwendungen von Quantensensoren überwiegen könnten.

4.1.6 Konsequenzen ungleichen Zugangs zu Quantentechnologien/Quantencomputing

Die Konsequenzen ungleichen Zugangs zu QT und Quantencomputing wurden über (12.) die sich ergebenden Folgen für Länder oder Wirtschaftszonen sowie die Geschwindigkeiten solcher Entwicklungen untersucht und um (13.) Fragen nach möglichen restriktiven Maßnahmen wie Exportkontrollen ergänzt, die sich aus Gründen technologischer Souveränität ergeben könnten.

Die meisten Befragten legten einen Fokus auf das Quantencomputing und gaben an, dass die teils weitreichenden Folgen erst nach dem erstmaligen Zeigen des praktisch verwertbaren **Quantum Advantage** voll durchschlugen. Dies gelte für sicherheitspolitische Auswirkungen durch ein Knacken heutiger Verschlüsselung, militärische Auswirkungen durch veränderte Einsatzszenarien, oder wirtschaftliche Auswirkungen durch neue oder deutlich verbesserte Produktionsprozesse. Dabei gingen die meisten Befragten von einem nahezu schlagartig entstehenden Vorteil im Moment des Quantum Advantage aus (Kipppunkt). Dieser läge zwar noch etwas in der Zukunft und käme dementsprechend *„nicht über Nacht“* (Person 16), dafür würden Quantenökosysteme, die sich auf diesen Moment vorbereiteten innerhalb kürzester Zeit einen deutlichen (wirtschaftlichen) Vorteil erhalten.

„In dem Moment kann es Kipppunkte in den Ländern und den Regionen geben wo ein Quantenökosystem frühzeitig aufgebaut wurde. In dem Moment, wo es Quantum Advantage gibt, kann ich mir

*gut vorstellen, dass es einen **Kipppunkt** gibt. Aber den gibt es eben nur, wenn die Industrie vorher weiß, was sie machen möchte und quasi fertig ist mit den Algorithmen. Oder wenn Teile des Ökosystems bereits Algorithmen haben und nur noch darauf warten, die Algorithmen auf den Systemen mit entsprechender Hardware Kapazität laufen lassen zu können. [...] In den Ökosystemen oder in den Regionen, wo es diese Vorbereitung zu diesem Zeitpunkt nicht gab, wird es dann wahrscheinlich eher ein gradueller Prozess sein.“* (Person 6)

Diese Einschätzung, die insbesondere von den Akteuren der Wirtschaft und Industrie sowie den öffentlichen Einrichtungen und Behörden vertreten wurde (sechsmal ähnlich geäußert), wurde nur von wenigen Personen nicht geteilt. Diese wiesen auf die Langsamkeit von umzustellenden Prozessen wie im Pharmabereich hin, die eher graduelle Veränderungen bedeuteten würden.

Die **Folgen** solcher eher schlagartigen Veränderungen wären weltweit relevant, und würden sowohl Länder des globalen Südens als auch Europa deutlich treffen.

“From the moment, the first advantages will be shown and people will start thinking about getting business value out of quantum computers, you might probably have much less machine than people who want to run them. And then, obviously the regulations will come into action because the governments who regulate the access to those machines would prefer to first supply their own economy and then to export the technology.“ (Person 7)

In Anbetracht einer derzeit geschätzten Technologieführerschaft der USA im Quantencomputing, sehen einige Beteiligte Deutschland und Europa in solch einem Moment potenziell benachteiligt (Person 9), da die Annahme, dass wir in solchen Momenten direkten Zugriff auf amerikanische Hardware hätten, unter den derzeitigen geopolitischen Veränderungen fragwürdig erschienen (Personen 8 und 14).

„[...] IBM hat jetzt schon das amerikanische und das europäische Quantencomputing eingerichtet. Das heißt, wenn du beim amerikanischen Quantencomputer bist und Daten produzierst, hast du von Europa aus keinen Zugang zu diesen Daten und umgekehrt. Das heißt, hier findet jetzt schon tatsächlich eine Teilung statt zwischen Amerika und Europa. [...] Und da ist natürlich dann eine sehr, sehr große Gefahr. In Europa haben wir nur sehr wenige Quantencomputer. Und wenn Amerika sagen würde, was sie schon macht für bestimmte Länder, dass diese Länder keinen Zugriff auf Software oder Hardware in Quantencomputern haben, was passiert dann? Sind diese Länder komplett abgehängt und wir wären auch in Europa komplett abgehängt vom Quantencomputer in allen Entwicklungen.“ (Person 5)

Die Auswirkungen für den „Globalen Süden“ oder andere bisher in den QT nicht aktive Nationen für den Zeitpunkt des Quantum Advantage wurde ebenfalls besonders betont. Unter dem Stichwort **Quantum Divide** äußerten über sechs Befragte Sorge, vor einem Vergrößern der „Schere zwischen Ländern“ (Person 1), die sich aus wirtschaftlichen Faktoren und Abhängigkeiten, sowie durch sicherheitspolitische Vulnerabilität von nicht PQC-fähigen Ländern ergebe (Person 4). Besonders deutlich wurde eine Person, die auf ein mögliches geopolitisches Ausnutzen dieser Entwicklungen hinwies:

“One of the consequences that I could imagine is that you create dependencies. And these dependencies, depending on who develops this technology successfully, can create a digital divide, a fragmented landscape. Think about the way, for example China, made deals with pretty much any African nation on building railroads. In exchange for that, you could do that with AI cloud. You can do that with post-quantum encryption. You can do that with quantum computer access. So, that quantum in that sense is not something totally different. It would just be additional, a digital version of the railway.“ (Person 20)

Da hier bereits deutlich wurde, dass die Befragten Deutschland und Europa derzeit eher in einer benachteiligten Rolle ungleichen Zugangs sehen, wurden **Exportkontrollen** eher kritisch gesehen bzw. aus der Position der Abhängigkeit beschrieben. So seien neben einigen Akteuren aus Europa, wie bspw. Frankreich, vor allem auch die angelsächsischen Länder sehr stringent in ihren Kontrollen (Person 17), was Zusammenarbeiten mit manchen Ländern erheblich erschwere (Person 7). Ähnlich zur Argumentation zur Quantensensorik würden Exportkontrollen zum einen wirtschaftliche Nachteile bringen, da der Markt für QT in Deutschland und Europa noch nicht groß genug sei und deshalb weltweit exportiert werden müsse (Personen 9 und 10). Zum anderen seien diese Kontrollen nur zeitlich begrenzt wirkungsvoll, und Nationen wie die USA und China seien anscheinend in der Lage, selbst zentrale QT zu entwickeln (Person 13). Hinzu käme, dass einige bestehende eigene Exportkontrollen von Quantencomputern nicht zielführend seien, da die regulierten rudimentären Quantensysteme keine sinnvolle Anwendung hätten (Person 6).

Alternativ sollte lieber IP geschützt werden (Personen 2, 5 und 12), wodurch trotz Verwendung ausländischer Hardware wenigstens eigene Entwicklungen gesichert wären. Und auch bei der Auswahl ausländischer Forschender solle genauer geprüft werden. QT ließen sich nicht einfach aus Bauanleitungen zusammensetzen und das in Laboren erworbene spezifische Wissen sei viel wichtiger, weshalb der innere Zirkel der Forschenden genau geprüft werden sollte (Person 4). Es solle außerdem lieber gezielt kritische Infrastruktur und Unternehmen vor Aufkäufen geschützt werden als Exporte zu strikt zu kontrollieren:

„Im manchen Bereichen kann man beobachten, dass strategisch Unternehmen aufgekauft werden, die Quantentechnologien mit Relevanz für die kritische Infrastruktur und das Aufrechterhalten des normalen Lebens, oder Schlüsseltechnologien für die Quantentechnologie-Lieferkette produzieren. [Gut wäre] eine Bewertung dieser Technologien, so dass man dann solche Übernahmen auch bei

kleinen Unternehmen unterbinden kann. Das wäre besser, als zu sagen ‚ihr dürft nicht ausführen‘, weil das ja auch immer die Wettbewerbsfähigkeit der Unternehmen [...] potenziell beeinflusst. [Es] wäre schon wichtig aufzupassen, dass die Juwelen oder die kritischen Unternehmen nicht einfach aufgekauft werden.“ (Person 1)

Anstelle restriktiver Maßnahmen sollten lieber Menschen angezogen und Patente entwickelt werden (Person 18) und über Förderungen und Investitionen die eigene Position gestärkt werden (Person 2). Erst dies ermögliche Verhandlungen auf Augenhöhe und Partnerschaften mit Akteuren wie den USA oder der NATO und damit auch Zugang zu kritischer Technologie.

Dies deckt sich teilweise mit dem expliziten Wunsch von fünf Teilnehmenden den aufkommenden Quantum Divide zu verhindern oder zumindest zu reduzieren. Dazu sei für bisher Benachteiligte vor allem ein Zugang zu QT notwendig, der über internationale Kooperationen ermöglicht werden könnte (Person 16), über das Einbinden von ausländischen Studierenden (Person 12), wobei ein Braindrain zu verhindern sei (Person 15), oder über Initiativen wie dem Open Quantum Institute und dessen Bestrebungen für Kooperation und Open Source Lösungen. Dies wäre nicht nur aus Humanität gegeben, sondern langfristig nachhaltiger (Personen 15 und 16).

Zusammengefasst gibt es nahezu einen Konsens, dass der Zeitpunkt des Quantum Advantage einen Kipppunkt in der globalen Entwicklung von QT darstellen wird und die Akteure stark bevorteilen wird, die dann über Zugang zu den Quantencomputern und ein gut ausgebautes Quantenökosystem verfügen. Da die Einschätzung der Interviewten eher eine Rückständigkeit Deutschlands und Europas im Quantencomputing aufzeigt, erscheint anstatt eines Fokus auf Exportkontrollen die weitere Stärkung des hiesigen Ökosystems als zentral, um aus dieser Position heraus Partnerschaften auf Augenhöhe mit Hardware Providern eingehen zu können. Eigene Entwicklungen müssten außerdem über IP-Regelungen

gesichert werden. Gleichzeitig wurde der aufkommende Quantum Divide als ein zentrales Problem gesehen, welcher die globalen wirtschaftlichen Unterschiede vergrößern könnte und von manchen Akteuren wie China in Form von Abhängigkeiten ausgenutzt werden könnte (geopolitische Ausweitung der neuen Seidenstraße auf PQC oder Zugang zu Quantencomputern). Deshalb sollten nicht nur aus humanitären Gründen Kooperationen mit dem „Globalen Süden“ intensiviert und ein offener Zugang zu europäischer Technologie ermöglicht werden, was wiederum Menschen vor Ort unterstützen und langfristig neue Märkte für europäische Unternehmen eröffnen könnte.

4.1.7 Gesellschaftliche Auswirkungen

Die Fragen zu gesellschaftlichen Auswirkungen von QT beinhalteten zum einen (14.) inwieweit bestimmte Bevölkerungsgruppen von den QT-Entwicklungen profitieren bzw. benachteiligt werden könnten, und zum anderen (15.) welche Konsequenzen sich auf den Arbeitsmarkt ergeben könnten sowie welche Skills hier in Zukunft notwendig seien. Diese Fragen wurden von den Teilnehmenden oftmals zusammengefasst beantwortet, was in der folgenden Analyse berücksichtigt wurde.

Die Mehrheit der Befragten gab zunächst an, dass sich positive und negative gesellschaftliche Auswirkungen durch die **Anwendung und Nutzung von QT** ergeben könnten. Die genannten Beispiele entsprechen dabei vielen in den vorherigen Abschnitten genannten Möglichkeiten. Die Vorteile bezogen sich auf die Nutzung von Quantensensoren oder Quantensimulation für Medizinprodukte (Personen 1, 4 und 12) oder auf Optimierungsalgorithmen für Energie- oder Zeiteinsparungen (Person 18), welche allen Menschen zugutekämen. Nachteile seien hingegen durch die mögliche Nutzung von QT zur Überwachung oder im militärischen Bereich denkbar (Personen 8, 13 und 16). Betont wurde jedoch auch, dass die Vorteile der QT-Nutzung anfangs vor allem wohlhabenderen Staaten vorbehalten sein könnten

(Person 18) und dass auch unsicher sei, ob Privatleute profitieren würden:

“What you see already, the Quantum manifesto of Europe is framed as something where quantum technologies are developed by governments for their autonomy and their sovereignty. And related to that defense and economic. So, who benefits? Governments and defense industry. And quantum internet will probably not soon be attached to our normal houses.” (Person 3)

Für einige Teilnehmende seien solche Aussagen jedoch noch zu früh zu treffen – insbesondere durch den frühen Entwicklungszustand der Quantencomputer (Person 19) – und für einen Interviewten handelt es sich hier um „*lediglich eine andere Technologie*“, die somit positive und negative Einsatzszenarien mitbringe (Person 9). Dabei scheint es einen Konsens zu geben, dass der Einsatz der QT eher im Hintergrund erfolge und vor allem die Entwicklung anderer Technologien unterstütze.

Auch für die **Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt** gab es einen breiteren Konsens zu potenziell Bevorteilten und Benachteiligten. Im Vorteil seien alle, die Zugang zum Ökosystem hätten, was vor allem auf die Gutsausgebildeten zutreffen würde (Personen 2 und 4), die aufgrund noch vieler neuer Möglichkeiten Anstellungen finden oder Unternehmen gründen könnten (Person 7). Im Gegensatz zur KI würden hier vor allem neue Jobs geschaffen und es würden in Summe eher keine Berufe wegfallen (Personen 8 und 12). Da jedoch vor allem Besserausgebildete, wie Entwickler:innen gefragt sein würden, könnte es gewisse Nachteile für weniger gut Ausgebildete geben (Personen 12 und 3). Doch auch für nicht QT-gebildete Personen aus der Medizinforschung, im Pharmabereich oder der Materialentwicklung seien Nachteile denkbar, wenn sich die Entwicklungsprozesse auf QT umstellten (Person 10). In Bezug auf Unternehmen sehen einige der Befragten eher Vorteile für investitionsstarke Unternehmen mit Zugang zum QT-Ökosystem und Nachteile für kleinere

Unternehmen, denen dieser Zugang fehlen könnte (Personen 6 und 17).

Um von diesen Auswirkungen die von den Interviewten als positiv bewerteten wahrscheinlicher zu machen, wurden eine Vielzahl an Empfehlungen ausgesprochen. Diese lassen sich vor allem auf (a) Aufmerksamkeit, Befähigung und damit Zugang zu den QT, sowie (b) Monitoring, demokratische Kontrolle und damit Stärkung positiver Entwicklungen von den QT zusammenfassen.

Für den **Zugang** sei zunächst wichtig, dass die breite Bevölkerung über QT-Entwicklungen informiert sei, wobei zur Nutzung der QT langfristig vermutlich kein besonderes Wissen notwendig sein sollte (Person 10). Ein Vorschlag lautete, sich an den amerikanischen Unternehmen zu orientieren und die Zugangshürden für Nutzer – ähnlich wie bei KI – von Beginn an zu vereinfachen.

„Ich glaube, das ist eine Frage der des Willens, des Staates, aber auch vor allem der Firmen. Und die Amerikaner machen das ja immer recht klug, dass sie das sofort allen kostenlos zur Verfügung stellen. Für einen gewissen Zeitraum und dann Geld dafür verlangen. Also wenn es aus Amerika kommt, ist es wahrscheinlich schneller bei den Deutschen, als wenn es aus Deutschland kommt.“ (Person 14)

Dazu sollten Menschen in Schule oder später informiert werden, welche Möglichkeiten sich in den QT ergeben könnten, um damit einen Zugang zum QT-Arbeitsmarkt erhalten zu können (Person 2).

„Ganz viele Menschen haben entweder noch gar nichts davon gehört, [oder] können sich, weil es zu kompliziert klingt, nicht vorstellen, was in der Richtung zu studieren. Das heißt, das Thema ist noch sehr elitär und die Gruppe, die man dafür begeistern kann, ist noch sehr klein. Um das wirklich in den Arbeitsmarkt zu integrieren und mehr Berufe daraus zu generieren, bräuchte man eine früher

ansetzende Information darüber, was Quantentechnologien sind und was man damit machen kann. Warum könnte es spannend sein, mich in dem Bereich zu etablieren? Man müsste es schaffen, wie beim Auto, so eine Faszination zu wecken, Quantentechnologien mit entwickeln zu wollen.“ (Person 12)

In der weiteren Ausbildung sollten dann QT-Grundlagen in andere Studiengänge wie Biologie, Medizin oder Materialwissenschaften integriert werden (Personen 6, 8 und 10), da die meisten Befragten davon ausgingen, dass in den Unternehmen ein Grundverständnis der QT notwendig sei (Personen 5, 9, 13, 15 und 17).

„In vielen Fällen wird man wird wahrscheinlich ein grundlegendes Verständnis reichen. Tatsächlich gibt es da eine sehr gute Analyse von der EU Kommission. Das European Competence Framework for Quantum Technologies¹⁰. [...] Da gehe ich voll mit. Das ist, glaube ich, eine sehr gute Analyse.“ (Person 17)

Anstatt ausschließlich QT-Spezialist:innen auszubilden, sollten vor allem Quantencomputing-Programmierparadigma in die bestehende Informatikausbildung aufgenommen (Personen 4, 5, 10 und 18) und der Transfer zu KI und Machine Learning gelehrt werden (Personen 2 und 20).

Nicht vergessen werden sollte außerdem, dass derzeit eine große Geschlechterungleichheit in den QT vorherrsche. Dies würde nicht zu einem männlichen Bias in der Entwicklung führen, sondern wäre aufgrund eines Fachkräftemangels auch nachteilig für Unternehmen. Eng damit verbunden sei die Frage, inwieweit qualifizierte Immigration zugelassen werden sollte, um auch so diesem Mangel entgegenzuwirken (Person 20).

Parallel sollten die Entwicklungen von QT kontinuierlich auf negative Entwicklungen geprüft werden (Person 15), welche dann im besten Falle über einen

¹⁰ <https://qtedu.eu/european-competence-framework-quantum-technologies>

demokratischen Prozess hin zu **positiver Entwicklung** verändert werden könnten (Person 11).

“These are going to happen naturally due to the very fact that you're putting in societal impact as a goal which will change the way you develop.” (Person 15)

Hier wurde deutlich auf das Problem der in den QT bereits erreichten Tiefe und Breite hingewiesen, die „erschlagend“ sei und für die man selbst in der professionellen Betrachtung an seine Grenzen käme (Person 12). Jedoch erschien ein kontinuierlicher Austausch mit einer sich schrittweise informierenden Gesellschaft dennoch notwendig.

Zusammenfassend wird deutlich, dass viele Teilnehmende potenziell gesellschaftlich negative Auswirkungen durch die Anwendung von QT vermuten. Es sei notwendig, diese Entwicklungen kontinuierlich zu monitoren und hin zu positiveren Aspekten zu steuern. Dazu könne eine informierte Gesellschaft beitragen, aber auch regelmäßige Projekte und Berichte wie das vorliegende seien notwendig und hilfreich. Viele Teilnehmende äußerten die Vermutung, dass bestimmte Bevölkerungsgruppen überproportional von der QT-Entwicklung profitieren könnten, was sich unter dem Begriff des lokalen Quantum Divide fassen lässt (Gercek & Seskir, 2025). Es fehle vielen der Zugang zu Information über QT, zur Nutzung von QT und zu Bildung zu QT. Ansätze, um diese Zugänge zu verbessern, erscheinen deshalb zwingend notwendig. Begrenzte QT-Lehrinhalte in der Schule, Lehren von QT-Grundprinzipien in Studiengängen wie Biologie oder Medizin, und öffentliche Veranstaltungen zu QT könnten helfen. Dabei sollten alle Geschlechter angesprochen werden, um die Verfügbarkeit von Arbeitskräften zu erhöhen und QT mit einem breiteren gesellschaftlichen Blick zu entwickeln. Nicht vernachlässigt werden sollte außerdem ein b2c Marktzugang für Nutzer:innen von QT, der die Aufmerksamkeit steigern, Nutzer:innen an deutsche und europäische Unternehmen binden und Daten bei diesen lassen könnte.

4.1.8 Diskurs über Quantentechnologien

Um den Diskurs über QT zu verstehen, wurde (16.) um eine Charakterisierung des Diskurses, der Sprache und der Metaphern gebeten und erfragt ob die Verwendung „mystischer Sprache“ zu Problemen der Akzeptanz führen könnte. Anschließend wurde erfragt, (17.) wie sich der Diskurs ändern sollte und ob hier eine andere Sprache, Metaphern oder Narrative in Zukunft zu verwenden seien. Mit über 90 Codes waren diese Fragen die am ausführlichsten beantworteten.

Der **Diskurs über QT** wurde zunächst von allen Stakeholdergruppen als sehr gespalten zwischen uninformatierter breiter Gesellschaft und informierter Personen innerhalb der QT-Entwicklung beschrieben. Auf der einen Seite sei der Diskurs innerhalb der QT-Community sehr wissenschaftlich-technisch geprägt (Person 11) und enthalte ein großes Level an Fachsprache (Person 10), sei damit aber für die meisten Menschen unverständlich und weit von der breiten Gesellschaft entfernt (Person 2). Obwohl die zugrundeliegende Quantenphysik schlicht die Welt beschreibe (Person 2), würden die hier von der makroskopischen Ebene abweichenden Vorstellungen (Person 15) eine „strangeness“ der QT erzeugen, die Menschen ausschließe:

“I think, most people don't know what quantum is, and that will remain so for a long time.” (Person 3)

Dieser Zustand aus einer großen Gruppe uninformatierter Menschen, welche sich derzeit „keine Gedanken über QT machen“ (Person 3) wurde als potenzielles Risiko bezeichnet.

„Das ist was uns Sorgen macht: weil nämlich eine breite Öffentlichkeit zum aktuellen Zeitpunkt weder eine positive noch eine negative Einstellung zu QT hat.“ (Person 9)

Denn wenn in einigen Jahren QT einen breiteren Einsatz finden sollten, verbunden mit den gesellschaftlichen Folgen aus den Fragen 12. bis 15., und sich damit „die Gesellschaft“ innerhalb kürzester Zeit eine

Meinung zu dem Thema QT machen müssten, sei die **Gefahr für eine uniformierte Debatte** sehr groß. Menschen könnten durch falsche Versprechungen manipuliert werden, unbegründete Ängste überhandnehmen und der Diskurs über QT eine Richtung einschlagen, die nachhaltig schadhaft für die QT-Entwicklung in Deutschland und Europa sein könnte (Person 10). Ähnlich zur Gentechnik oder Nanotechnologie könnte es ein Backlash geben indem plötzlich negative Bilder überhand nehmen (Person 1).

Konkret machen sich einige Interviewte Sorgen, dass QT oftmals entlang der sicherheitspolitischen Auswirkungen diskutiert würden, womit das Bild einer potentiell negativen Technologie verfestigt würde (Personen 3 und 15). Die auch in Unternehmen unbewusst verwendete militärische Sprache, die vor allem aus dem angloamerikanischen Raum käme, würde diese Effekte stärken (Person 6).

Weiterhin seien übertriebene **Erwartungen, Versprechungen und Hype** ein zentrales Problem. Es würden falsche Versprechungen gemacht und damit Erwartungen in der Bevölkerung geschürt (Person 4), die sich so nicht bewahrheiten könnten und dadurch mittelfristig Enttäuschungen auslösten (Person 5). Hier wurden insbesondere einzelne wirtschaftliche Akteure negativ benannt, die sowohl die Unwissenheit mancher Geldgeber als auch der potenziellen Kunden ausnutzten. Auch wenn die informierte QT-Community solche Akteure einfach identifizieren könne, seien mittelfristig Schäden für die QT-Rezeption in der Gesellschaft möglich (Person 9). Ebenfalls problematisch seien die Unterschiede zwischen wissenschaftlichen Publikationen und öffentlichen Statements der Unternehmen, wie im Falle von Microsoft und der kürzlichen Erkenntnisse zu Majorana-Qubits. Solche Diskrepanzen könnten langfristig Vertrauen kosten (Person 5).

Damit verbunden ist die Sorge vor Akteuren, die unter der Verwendung „**mystischer Sprache**“ ein falsches Bild über QT transportieren könnten (Person 12). Diese könnten nicht nur Einzelpersonen ausnutzen und irreführende Produkte verkaufen (Person

18), sondern auch versuchen ihre Weltanschauungen „zu begründen“ (Person 2).

„Ich halte das schon für eine Gefahr, weil gerade Quanten esoterisch klingt. Man kann es nicht oft genug sagen, es ist nicht esoterisch, es ist 100 Jahre alt. [...] Was ungewöhnlich ist, ist die Interpretation. Aber dass die Natur sich so verhält, da gibt es keinen Zweifel. Also das ist, das muss man ganz klar sagen und ich halte es für eine Gefahr, dass auf jeden Geschirrspüler [Quanten] drauf geschrieben wird. Und dann sagt man, der löst das jetzt durch Zauberei.“ (Person 17)

Über den Umfang dieser Entwicklungen gibt es jedoch Unstimmigkeiten. Während sechs Befragte (aus allen Stakeholdergruppen kommend) diese Gefahr sehen, sprachen einzelne „von eher vereinzelt Akteuren“. Es sei eher normal, dass manche Menschen für solche Dinge empfänglich seien und „ihr krudes Weltbild manifestieren wollen“ (Person 11). Die Sorge überwog jedoch.

Aus dieser Diskursbeschreibung sowie den Sorgen vor uninformatierten Debatten für den Moment wenn QT breit verfügbar seien, stellte sich für die meisten Teilnehmenden die Frage wie sich das **Informationsniveau in der Gesellschaft erhöhen** ließe ohne dabei falsche Erwartungen zu schüren oder zu negative Szenarien zu beschreiben. Da aber der Schritt von „völlig uninformatiert“ zu „gesellschaftlich sprechfähig“ in den QT besonders groß sei, und Menschen unterschiedlich adressiert werden müssten, ist diese Frage unterschiedlich beantwortet worden.

„Beim Thema Quantencomputer und Quantentechnologien stößt der klassische Wissenschaftsjournalismus auch an seine Grenzen. Zum einen ist es schwierig, über Fortschritte zu berichten, wenn man eigentlich jedes Mal bei Adam und Eva anfangen muss und erstmal wieder erklärt, was eigentlich ein Qubit ist. Wie funktioniert das? Was ist Superposition? Was ist Verschränkung? Was ist daran jetzt besonders? Kann das den Computer ersetzen? Also eigentlich jedes Mal wieder alles exerziert. [...] Bevor

man eigentlich zum Kernpunkt kommt. Das andere ist natürlich genau die Frage ‚Und wenn ich es jetzt erkläre, wie erkläre ich es? Wie schaffe ich es, das so zu erklären, dass man es auch versteht?‘“ (Person 12)

Aus dem Konsens heraus, dass die Faszination für Quantenphysik genutzt werden sollte, um Menschen über QT zu informieren, ihnen ein realistisches Bild über deren Möglichkeiten zu vermitteln und damit den beschriebenen potenziell negativen Entwicklungen zuvorzukommen, wurden unterschiedliche Methoden genannt. So könnten Kinder und Jugendliche bereits in der Schule informiert werden (Person 18); Menschen direkten Zugang zu QT und Laboren erhalten (Personen 1 und 4); oder die breitere Bevölkerung über Formen der Wissenschaftskommunikation adressiert werden (Personen 11 und 12). Da diese eher klassischen Wege jedoch nur für einen Teil der Gesellschaft funktionieren würden, seien auch informelle und unstrukturierte Lösungen notwendig (Person 15), wie das Einbinden der Zivilgesellschaft und der Künste (Person 11).

Bei den zu verwendenden **Methoden und passender Sprache** wünschten sich einzelne Befragte eine wissenschaftlichere Beschreibung der QT. Quantenphysik sei vollständig erklärbar und Analogien immer unvollständig (Person 8). Die deutliche Mehrheit der Interviewten jedoch verwies auf die Notwendigkeit Menschen dort abzuholen, wo sie inhaltlich stünden (Person 6). Eine „klare, verständliche Sprache“ müsse entwickelt werden (Person 11), mittels derer möglichst viele Menschen eingebunden werden könnten (Person 16). Hier sollte seitens der QT-Community insbesondere die Sprache angepasst werden, die oftmals aus „epistemischer Faulheit vor Übersetzungsleistungen“ unnötig kompliziert sei:

„[Wir benötigen] definitiv weniger Arroganz. Es gibt die Unart, dass seitens der Expert:innen Floskeln genutzt werden wie ‚das versteht ihr jetzt eh nicht, oder?‘ Allein auch kleine Floskeln wie ‚Oh, jetzt wird es kompliziert‘ und ‚oh, das ist jetzt das Technische‘ sollten einfach weggelassen werden. Es wäre besser

die Sachverhalte einfach, mit ganz konkreten Analogien (wie z.B. dem Münzbeispiel) zu erklären“ (Person 6)

Besser sei es (auch) Metaphern zu verwenden (Person 15) und weiterzuentwickeln (Person 20), wobei hier insb. die Stakeholder der Zivilgesellschaft und der öff. Einrichtungen und Behörden dafür argumentierten. Auch sollte nicht erwartet werden, dass alle Menschen QT in beliebiger Tiefe verstehen müssten, sondern eher ein grundlegendes Verständnis notwendig sei, um QT in Europa in der Breite zu entwickeln:

“The biggest problem with big data and AI at the time was it was perceived to be something problematic and too theoretical, not worth exploring. And the consequence is that in Europe nobody picked up the bait and we ended up with basically being dependent on the US for anything digital and AI and data analytics. If we want to avoid that in quantum, we need to change the conversation. You know, every minister I've seen talking about quantum starts with a sentence like, ‘well, I don't understand it’. But there are fantastic people who would admit they don't understand 5G either. You don't understand how a rocket works. You don't understand how car works. Then you still use them every single day.” (Person 20)

Um in diesem Informationsprozess **falsche Vorstellungen auszuschließen** und Menschen nicht von falschen Versprechungen leiten zu lassen, sollten die wenigen Unternehmen, die aktiv Falschinformation verbreiteten oder falsche Versprechungen machten, bekämpft werden:

„Es sind nur einige wenige, aber man sollte auch seitens der Bundesregierung etwas dagegen tun. Die Frage ist wie schützt man sich davor? Dagegen anzugehen ist immer schwer, denn man muss ja den Gegenbeweis liefern. [...] In Deutschland versuchen wir das einzudämmen. Es herrscht ein Bewusstsein beim BMBF, [...] usw. und wir versuchen das einzudämmen. Nichtsdestotrotz sehen wir hier eine

Dynamik, die ein großes Risiko birgt: Es entsteht eine Art Bubble, eine Blase, die sich in der Vergangenheit bereits stark aus den Fördermitteln in Deutschland genährt hat. Es ist jetzt an der Zeit, über Konsolidierung zu sprechen und nur noch solche Quantentechnologien zu fördern, welche heute schon erste Endanwendungen zeigen können. Alle anderen müssen fallengelassen oder in die reine Grundlagenforschung zurück.“ (Person 9)

Denkbar seien genaue staatliche Prüfungen und eine anschließende Akkreditierung durch Bundesbehörden (Person 9). Deutlich wird hier, dass die Befragten insbesondere bei den staatlichen Akteuren ein hohes Vertrauen in die Kompetenz für solche Prüfungen sehen.

Ein letzter, sehr breiter Konsens ergab sich darüber, neben einem realistischen Bild für die Möglichkeiten von QT, eine **positive, wünschenswerte Zukunft für die QT** zu entwickeln. So sollten die positiven Anwendungsmöglichkeiten klar benannt (Personen 10 und 11), und zusammen mit der Gesellschaft wünschenswerte Szenarien entwickelt werden (Person 3):

“If you look at the Open Quantum Institute, it's somewhat naive. But it's really interesting to sit down and with people think about, okay, how do we want to use this technology? What do we want to achieve with it? And then you take ownership.” (Person 3)

Auf diese Weise ließen sich mehr Menschen involvieren, und die QT gesellschaftlich positiv entwickeln. Im Unterschied zu Versprechungen würden diese Wünsche Orientierung für Menschen, Investoren und die QT-Entwicklung an sich geben:

“But we might have to bring in better examples of what we hope it's going to achieve. We're not going to promise that it does, but we're saying these are the ambitions that we want. [...] There's something fundamentally different between saying this is our ambition with this technology and promising that you can do this with this technology. The former is fine. The latter is problematic. But if you don't do

the former, you're not going to get investors. You're not going to get ministers who understand what it is. We're not going to get people who can meaningfully communicate what this technology can do. [...] We need a lot of people who come from other backgrounds helping people who understand quantum to make that story work. And again, that does not come for free. We need resources for that.” (Person 20).

Erst wenn eine breite, positive Sicht auf die QT vorhanden sei, könnte der QT-Arbeitsmarkt wachsen, private Investoren einsteigen und die finanziellen und intellektuellen Mittel Europas gewinnbringend für die QT genutzt werden (Person 19).

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich der Diskurs über QT zwischen einer sehr informierten QT-Community und einer nahezu uninformierten breiten Gesellschaft aufteilen lässt. Diese große Distanz mache viele Personen nicht sprechfähig und anfällig für Falschinformation und Beeinflussung. Falsche Versprechungen oder Verschwörungstheorien könnten tendenziell verbreitet werden, wenn vermehrt bisher uninformierte Personen auf QT aufmerksam werden, und dadurch den bisher unproblematischen Diskurs negativ beeinflussen. Die Befragten sorgen sich in diesen Fällen vor Backlash, ähnlich zur Nanotechnologie oder der Gentechnik. Da für ein vollständiges Verständnis der QT jedoch eine Vielzahl an Konzepten zu lernen sind, argumentieren die meisten Interviewten für eine zielgruppenspezifische Information der Gesellschaft. So seien eher wissenschaftliche Ansätze in Schule oder Wissenschaftskommunikation wichtig, aber auch metaphorische Erläuterungen, bspw. im Zusammenspiel mit Kunst, denkbar. Nicht jeder müsse QT vollständig verstehen, um sich ein Bild von den Anwendungen machen zu können, und es sei besser ein grobes Bild bei vielen zu etablieren, als ein genaues bei einigen wenigen. Dieser Informationsprozess müsste jedoch von realistischen Bildern begleitet werden, damit falsche Vorstellungen ausgeschlossen werden könnten. (Wirtschaftliche) Akteure, die falsche Versprechungen machten, müssten detektiert und von

Förderungen ausgeschlossen werden. Staatliche Kontrolle bzw. Akkreditierungen von Start-ups könnten hier ein Weg sein. Außerdem wird vielfach dafür geworben, dass der frühe Entwicklungsstand der QT genutzt werden sollte, um zusammen mit der Gesellschaft eine positive, wünschenswerte Zukunft der QT zu entwerfen. Diese Vision würde sowohl Arbeitskräfte als auch private Investoren anziehen und insgesamt die QT in einem realistischen, positiven Rahmen entwickeln lassen.

4.1.9 Unbeabsichtigte Nebenfolgen

Die Frage nach unbeabsichtigten Nebenfolgen war aufgeteilt in (18.) potenzielle Nebenprodukte, die in der QT-Entwicklung entstehen könnten und die bisher nicht beachtet worden seien, sowie (19.) inwieweit die Stakeholder aus Wissenschaft, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und öff. Verwaltung auf diese Entwicklungen vorbereitet seien.

Die Frage zu unvorhergesehenen **potenziellen Nebenprodukten** wurde sehr unterschiedlich aufgenommen: Von völliger Unklarheit darüber; über spekulative, meist negative Szenarien; bis hin zu konkreten technischen Entwicklungen, die teilweise auch in Frage 21. wiederkehrten. Von ersterem ausgehend sind für einige Teilnehmende „*unerwartete Nebenwirkungen halt unerwartet*“ (Person 18) oder die Frage zumindest „*fast unmöglich zu beantworten*“ (Person 15). Für einige beinhalten diese unerwarteten Entwicklungen jedoch meist auch negative Aspekte und damit auch Sicherheitsprobleme:

“I find it quite impossible to answer about that, because unintended spinoffs will be an unintended, even when you try with your best intent anticipation. Because, that's the nature of them [...]. And we can embrace the fact that there probably hasn't been a single technology ever that doesn't have some aspect of negativity, some aspect of dual use.” (Person 15)

Technisch und zeitlich näherliegend waren zum einen QT-nahe Antworten, wie quanteninspirierten

klassischen Algorithmen, QML oder sich aus dem Quanteninternet ergebende Möglichkeiten. Weiterhin wurden Entwicklungen in der Kühltechnik, von Lasern oder der Sensorik genannt. Hier seien „*in den Quantentechnologien immer Querverbindungen zu anderen Technologien da, so dass das Geld mit großer Wahrscheinlichkeit nicht verschwendet ist, sondern dass das sozusagen gut eingesetzt ist.*“ (Person 17). Insbesondere mit Verweis auf die integrierte Photonik und Elektronik seien Entwicklungen denkbar. Diese Sprünge in eher „*klassischen Technologien*“, vor allem in der Zulieferindustrie, seien wahrscheinlich und für manche Teilnehmenden wurden hier bereits die ersten kommerziellen Lösungen beim Entwickeln von QT realisiert:

„Wir haben die erste kommerzielle Lösung tatsächlich im klassischen Bereich. Ja, wir wollen Quantencomputer entwickeln. Aber aus unternehmerischer Sicht, macht das so Sinn.“ (Person 9)

Die Frage nach der bisherigen **Vorbereitung der Stakeholder** auf diese Entwicklungen wurde eher negativ beantwortet, wobei teilweise Unterschiede zwischen den Gruppen erkannt wurden. Für einige sei insb. die Wissenschaft recht agil aufgestellt und auch die Wirtschaft prinzipiell flexibel genug auf solche Entwicklungen reagieren zu können, während jedoch die Gesellschaft und vor allem die öff. Verwaltung zu schwerfällig agierten. Viele der Interviewten gaben hingegen an, dass „*wir alle*“ nicht vorbereitet seien.

“I think we are not prepared for an unforeseen development, but I really I have no clue.” (Person 8)

Eine Person stellte daraufhin die Frage, ob man sich überhaupt vorbereiten müsse, da die Forschung immer ergebnisoffen sei (Person 12). Da jedoch die Mehrheit der Teilnehmenden Vorschläge für konkrete Vorbereitungen machte, erscheint eher die Form der Vorbereitungen relevant. Dabei solle man aufpassen nicht (nur) dem Model deterministischer Technikentwicklung zu folgen und die Anwendungen einer Technik nicht als zwingende Konsequenz zu

sehen. Vielmehr solle man Methoden wählen mittels derer gewünschte Entwicklungsrichtungen bevorzugt gegangen würden (Person 3).

Die **konkrete Umsetzung** könnte zum einen über von den Fördergebern eingeräumte Spielräume für unvorhergesehene Entwicklungen geschehen (Person 2). Auch wenn Deutschland hier in der Entwicklung generell „ganz gut aufgestellt“ sei (Person 17), erschiene eine europaweite Harmonisierung der Förderung sinnvoll (Person 19).

Dennoch scheint die Sorge vor dem Übersehen eher negativer unvorhergesehener Entwicklungen zu überwiegen, wobei hier nicht eine komplette Vorausschau, sondern eher inkrementelle Vorschläge zur Vorausschau gemacht wurden.

“We're now really in the beginning. Alan Turing could not have predicted that algorithms could be racist. And so, it's bizarre to assume that we can predict what quantum will bring.” (Person 3)

Zum einen sollten sicherheitsrelevante Aspekte kontinuierlich geprüft (Person 17) und ein Bewusstsein für den Einfluss der eigenen Forschung bei den Entwickelnden gestärkt werden (Person 20). Auch wurde eine in Deutschland an zentralen Stellen fehlende Zukunftsgewandtheit moniert. Es sei schwer „Themen nach oben zu bringen“ und es bestehe oft „keine Zeit für Zukunftstrends“, welche kontinuierlich analysiert werden sollten (Person 18). Insbesondere in Industrie und Politik sollten Führungspersonen dabei auf ausgebildete „quantum aware people“ hören und es sei wichtig, dass diese Zahl groß bliebe (Person 4). Dabei wurde sich auch ein QT-Begleitgremium für die Politik gewünscht (Person 9), mit der die Aufmerksamkeit für Entwicklungen und Folgen von QT früh hergestellt und kurzfristige reaktionäre Handlungen verhindert würden (Person 15):

„[Es] sollte sich meiner Meinung nach insbesondere politisch auf die Fachleute gehört werden. [...] Da braucht es eine Institution, eine Gruppe von Leuten, die tatsächlich berät. Und die aus der Gruppe der

Leute kommen, die die Quantentechnologien anwenden [...]“ (Person 5)

Insgesamt wurde sich außerdem mehrfach ein breiter Austausch über QT gewünscht. So sollten alle Stakeholder sich gemeinsamen über einen Austausch über die QT-Entwicklungen und -Folgen informieren (Person 15).

“What is the way to approach this kind of issue, I think is to have a constant and frequent dialog between science and society. And so I welcome this initiative and any other initiative which is going with direction because only through this dialog we can hopefully recognize early enough things which we didn't expect until shortly before, but now they seem to be on the horizon.” (Person 16)

Dabei müssten die „richtigen Menschen zum richtigen Zeitpunkt“ zusammengebracht werden und alle Perspektiven in die Diskussion eingebunden werden (Person 20). Da man jedoch noch früh in der QT-Entwicklung sei und damit die weitere Entwicklung beeinflussen könnte, könne diese Diskussion nicht über Gefahrenszenarien, sondern sehr positiv geführt werden (Person 15), und QT in der Gesellschaft eher positiv besetzen (Person 9). Für diese „sinnhafte und wertschöpfende Auseinandersetzung“ seien jedoch öffentliche Investitionen notwendig (Person 11)

Es lässt sich zusammenfassen, dass zwar unklar ist, welche unbeabsichtigten Nebenfolgen QT hervorbringen werden, bzw. ob sich diese überhaupt identifizieren lassen, dass jedoch gleichzeitig viele Akteure in Deutschland und Europa nicht auf diese vorbereitet sind. Mit dem Ziel mögliche Risiken und Chancen frühzeitig zu erkennen, und die Entwicklungsrichtung in diesem frühen Entwicklungsstadium gezielt positiv zu entwickeln, erscheinen vorbereitende Mechanismen als sinnvoll. Es könnten Spielräume in Fördermaßnahmen eingeräumt werden, mittels derer neue Erkenntnisse im Entwicklungsprozess wirtschaftlich genutzt werden könnten. Weiterhin erscheint eine kontinuierliche Analyse der Entwicklungsrichtungen von QT gegeben, wobei die

Erkenntnisse von zentralen Stellen wahrgenommen werden sollten. Konsens scheint es außerdem darüber zu geben, dass ein Austausch zwischen Forschenden und Entwickelnden, der Politik und öffentlichen Verwaltung, sowie der breiten Gesellschaft weiterhin nötig ist, damit sich zum einen ein breites Verständnis über die QT entwickelt, aber auch Befürchtungen und Wünsche der Gesellschaft im QT-Entwicklungsprozess widerspiegeln.

4.1.10 Philosophische Aspekte

Die inhaltlichen Fragen wurden um fünf weiterführende Fragen ergänzt, von denen die erste untersuchte ob (20.) die QT gesellschaftliche Debatten nachhaltig aufbrechen könnten, indem bspw. Prinzipien der Quantenphysik ein „klassisches, binäres Denken“ auflösen könnte (vgl. bspw. (Barad, 2007)). Lediglich 15 Personen beantworteten diese Frage.

Sieben Teilnehmende, von denen keine zur Zivilgesellschaft gehörte, gaben an, **keine Auswirkungen** auf gesellschaftliche Debatten zu erwarten. Dabei reichten die Antworten von grundsätzlicher Ablehnung gegenüber dieser Überlegung bis hin zu einer extrem unwahrscheinlichen, aber positiven Einschätzung solcher Entwicklungen. Manche äußerten, die Frage nach „klassischem, binärem Denken“ sei keine sinnvolle (Person 18) oder solch eine Entwicklung sei schlicht unwahrscheinlich. Andere gaben an, dass ähnlich zu anderen Technologien auch hier die Menschen kein Interesse an tiefergehenden Mechanismen ihrer Funktionen hätten (Person 1). Die Natur funktioniere schon immer quantenmechanisch und QT würden damit das Denken heute auch nicht ändern (Person 17). Wenn „Hegel es schon nicht geschafft hat“ die zweiwertige Logik zu überwinden, würden das auch die Quantentechnologien nicht schaffen (Person 6).

Eine kleinere Gruppe von fünf Befragten gab an, dass diese Entwicklungen **möglich und weitreichend, jedoch unwahrscheinlich** seien. So wären einige Teilnehmende froh, solche Entwicklungen zu sehen, halten sie aber für weit hergeholt (Person 19). Eher

spekulativ wirke, dass die Philosophie solche Gedanken konzeptionalisiere (Person 14) und in die Gesellschaft trage (Person 13). Doch wenn man die Quantenprinzipien von Beginn an lerne, könne vielleicht ein anderer Blick auf die Welt entstehen. Ein philosophischerer Blick auf die Besonderheit der Entstehung der Welt sei möglich und gesellschaftliche Debatten könnten vielleicht anders ablaufen (Person 2). Eine Person verwies dabei auf eine Aussage von Hartmut Neven [Engineering Director bei Google]:

„Ich sehe in der Tat die Physik als Philosophie mit quantitativen Methoden. Und ich denke, dass die Anwendung der Quantentheorie neue Räume eröffnet. Eine quantenbasierte künstliche Intelligenz wird sich sehr von der klassischen künstlichen Intelligenz unterscheiden, über die wir heute reden. Kürzlich habe ich auf Archive einen wissenschaftlichen Artikel veröffentlicht, in dem ich mit Koautoren die Frage diskutiere, ob Roboter, die mit Quantenprozessoren laufen, eine Art freien Willen haben. Das halte ich durchaus für möglich. Ich glaube, wir werden in den kommenden Jahren noch einige Überraschungen erleben.“

Dass diese Entwicklungen jedoch in die Gesellschaft ausstrahlten, wurde von dieser Person skeptisch bewertet (Person 12).

Anders als die vorherigen sind vier Teilnehmende jedoch **vollkommen überzeugt**, dass solche Entwicklungen stattfinden werden bzw. müssen. Mehr und mehr Menschen würden sich mit QT und damit auch ihren Grundprinzipien beschäftigen, was einen „erwachsenen Umgang mit Wahrscheinlichkeiten“ in der Gesellschaft verbreiten würde (Person 3). Auf diese Weise würde bestehende Konzepte wie die Binartität der Geschlechter sicherlich überholt werden und eingeprägte Gegensätze abgeschwächt werden (Person 11).

“Whenever we study in detail the world and we come up with new paradigms, we make new analogies to relate them to our way of thinking, or new paradigms of thinking, it always informs the world.

It always enriches the world. So yes, it's going to."
(Person 15)

Auch würde ein solches nicht-binäres Denken die Grundlage für eine breitere wissenschaftliche und technische Auseinandersetzung mit QT ermöglichen. Ein eher intuitiver Zugang zu QT, wie bspw. zum Programmieren von Quantencomputern, wäre dadurch möglich und müsste deshalb forciert werden (Person 5).

Zusammengefasst wurde die Frage nach philosophischen Auswirkungen und einem Aufbrechen der gesellschaftlichen Debatten sehr kontrovers beantwortet. Ein großer Teil sieht solche Fragen als nicht sinnvoll an, bzw. hält diese Entwicklungen für schlichtweg unmöglich. Weitere können dem Gedanken zwar sehr viel abgewinnen, sehen jedoch die Wahrscheinlichkeit des Eintritts als gering bzw. sehr weit in der Zukunft liegend. QT hätten hier nicht den entscheidenden Einfluss. Andererseits gibt es eine Gruppe an Interviewten, die bei diesem Thema einen Raum für Entwicklungen sehen, bisher jedoch noch keine konkreten philosophischen Konzeptionalisierungen erkannt haben. Doch frühes Auseinandersetzen mit den physikalischen Grundprinzipien könnten einen Einfluss haben. Auffällig war dazu ein Verweis auf Hartmut Neven, den Engineering Director von Google, der im Zusammenspiel von Quantencomputern und KI gesellschaftlich relevante „Überraschungen erwarte“. Für vier Interviewte sind solche Aussagen nicht überraschend. Für sie ist klar, dass ein Steigern der QT-Verfügbarkeit Prinzipien wie Wahrscheinlichkeiten in die Gesellschaften tragen werden und so auch bisher klare Gegensätze aufweichen könnten. Es sei klar, dass eine sich (durch Technologien) verändernde Welt immer neue Arten zu Denken mitbringe, und wiederum die Entwicklung der QT selbst beschleunigen könne. Insgesamt muss jedoch festgehalten werden, dass viele von einer breiten gesellschaftlichen Integration solch philosophischer Aspekte in naher Zukunft nicht ausgehen.

4.1.1.1 Einfluss auf andere Technologien

In den Fragen zu diesem Abschnitt wurde untersucht, (21.) inwieweit die QT andere technologische Bereiche beeinflussen oder sich mit ihnen zusammen entwickeln könnten.

In den Interviews herrschte weitgehend Einigkeit darüber, dass die QT nicht isoliert existieren, sondern vielmehr eng mit dem Fortschritt anderer Technologien verwoben sind. Viele Teilnehmende betonten einen bidirektionalen Einfluss: Quantentechnologien werden durch Innovationen in angrenzenden Bereichen sowohl ermöglicht als auch angetrieben.

Die Teilnehmenden bezeichneten QT wiederholt als *"Werkzeugkasten"* oder *"Schnittstellentechnologie"* und wiesen auf ihre Fähigkeit hin, Bereiche wie KI, Materialwissenschaft, Elektronik und Messtechnik verbessern zu können. Eine Person erklärte: *"Auch das ist ein Schnittstellenthema und Quanten sollte man immer als Werkzeug betrachten"* (Person 2), was ihren befähigenden Charakter unterstreicht. Aus dieser Sicht könnten QT-Entwicklungen als Katalysator für neue Entwicklungen in anderen Bereichen dienen, insbesondere wenn sie in bestehende Systeme wie maschinelles Lernen, Sensordesign oder Halbleitertechnologie integriert würden.

Einige Interviewpartner nannten konkrete Beispiele für diese **gegenseitige Verstärkung**. Photonische integrierte Schaltkreise, die für Quantencomputer entwickelt wurden, könnten in breiteren photonischen Anwendungen genutzt werden (Person 8). In ähnlicher Weise könnten Fortschritte in der kalten Elektronik und Kryotechnik, die für Quantenprozessoren erforderlich sind, klassischen Systemen zugutekommen, die hohe Taktraten und geringe Verlustleistung erfordern. Optimistisch waren die Befragten auch in Bezug auf quanteninspirierte Algorithmen, d. h. klassische Techniken, die auf Quantenprinzipien beruhen, wie z. B. Tensornetzwerke, die die Effizienz von Berechnungen über den Quantenbereich hinaus verbessern könnten (Personen 4 und 8).

“People understand why certain ideas arise in quantum to give a new perspective on classical.”
(Person 4)

Diese Rückkopplungsschleife sei nicht auf Berechnungen beschränkt. Der Einsatz von Quantenlogik in der Metrologie zeige beispielsweise, wie kleine Quantenalgorithmen bereits die Präzisionszeitmessung verbessere (Person 4). Außerdem könnten Technologien wie gefangene Ionen, die für die Quanteninformatik entwickelt wurden, die Konstruktion von Sensoren beeinflussen und umgekehrt. Dieses Thema der "Ko-Evolution" tauchte häufig auf:

„Alles gegenseitig. Das sind sich gegenseitig bedingende Systeme.“ (Person 9)

Die Materialwissenschaft wurde durchweg als ein wichtiges Querschnittsgebiet genannt. Mehrere Befragte betonten, dass Durchbrüche in der Materialentwicklung, insbesondere bei supraleitenden Qubits oder Josephson-Kontakten, den Fortschritt in der Quantenphysik erheblich beschleunigen würden. Gleichzeitig wurde die Quantensimulation als eine Möglichkeit angesehen, die Materialwissenschaft umgekehrt zu beeinflussen, indem sie die Entdeckung neuer Verbindungen oder leistungsfähigerer Materialien ermögliche, wodurch Batterien, Arzneimittel oder Sensoren verbessert werden könnten.

Zu den **Auswirkungen auf KI** gab es unterschiedliche Meinungen. Einige äußerten sich optimistisch über eine Synergie zwischen Quanten und KI, insbesondere in Bereichen wie der Arzneimittelforschung oder der Vorhersage von Proteinstrukturen. Eine Person verwies darauf, dass die Benennung der Google-Abteilung als "Quanten-KI" ein Hinweis auf diese erwartete Konvergenz sei. Andere hingegen waren skeptisch gegenüber den derzeitigen Behauptungen und verwiesen auf den fehlenden formalen Beweis für die Wirksamkeit des maschinellen Lernens mit Quantentechnologien: QML würde zwar immer genannt werden, aber bis heute schulde die Wissenschaft einen mathematischen Beweis (Person 9). Als direkte Antwort darauf könnte die Aussage eines

Forschenden aufgefasst werden, dass man trotz wachsender Zahl von Skeptikern und noch fehlender Beweise, weiter daran arbeiten müsse:

„Also sagen wir mal so, der Beweis muss noch geliefert werden. Aber es passiert einiges. [...] Meiner Meinung nach müssen wir tatsächlich weiter am Ball bleiben und das weiter untersuchen. [...] Es hat in bestimmten Bereichen der Wissenschaft oft 40 Jahre gebraucht, um dahin zu kommen, wohin man wollte. Und es gab immer wieder diese Phasen, wo Leute gesagt haben, das wird nie was. Und dann gab es diese ganzen Leute, die weitergemacht haben und tatsächlich das erreicht haben, was dann rausgekommen ist. Das heißt, man muss weiter daran arbeiten.“ (Person 5)

Die Befragten betonten, dass QT-Entwicklungen in hohem Maße von **Grundlagentechnologien** wie Photonik, Steuerelektronik, Kryotechnik und neuartigen Materialien abhängig seien. Viele dieser Grundlagentechnologien wurden ursprünglich nicht für die QT entwickelt, könnten sich aber als entscheidend für sie erweisen. Umgekehrt könne eine bessere technische Kontrolle über Quantensysteme die Präzision, den Umfang und die Qualität klassischer Systeme verbessern, was wiederum in breitere Innovationssysteme einfließe.

Schließlich sahen mehrere Teilnehmende die QT als Motor für einen systemischen technologischen Wandel, der Sektoren wie Klimaforschung, Verkehr, Medizin und Verteidigung verändern könne. Während einige auf spekulative Anwendungen hinwiesen, nahmen andere eine vorsichtiger Haltung ein: "Wer weiß schon, was Quanten in fünf Jahren bewirken oder nicht bewirken werden?" (Person 19). Dennoch herrschte Einigkeit darüber, dass die Quantenphysik bereits jetzt in allen Bereichen Innovationen hervorbringe, sei es durch quantennative Lösungen oder durch von der Quantenphysik inspirierte Fortschritte.

Zusammenfassend zeigen die Interviews eine weit verbreitete Überzeugung von der transformativen,

jedoch wechselseitigen Rolle der QT in der breiteren technologischen Landschaft. Quantentechnologien entwickelten sich nicht in einem Vakuum. Stattdessen stünden sie in ständigem Dialog mit Bereichen wie KI, Elektronik und Materialwissenschaft. Diese Wechselwirkung könne nicht nur den technologischen Fortschritt vorantreiben, sondern auch das Entstehen völlig neuer Disziplinen und Anwendungen erreichen. Bei der Vorhersage konkreter Ergebnisse sei jedoch Vorsicht geboten, insbesondere in Bereichen, in denen Quantenvorteile noch aktiv entwickelt werden müssten. Nichtsdestotrotz waren sich die Befragten weitgehend einig, dass die Förderung der Zusammenarbeit zwischen den einzelnen Fachgebieten in Forschung und Entwicklung von entscheidender Bedeutung sei, um die positiven Auswirkungen der QT-Fortschritte zu maximieren.

4.1.12 Gesellschaftliche Wahrnehmung, Wissenschaftskommunikation und Kunst

Zwei weiterführende Fragen bezogen sich auf (22.) die gesellschaftliche Wahrnehmung von QT und der Frage, wie sich ein positives Bild vermitteln ließe, sowie (24.) wie die Gesellschaft über Entwicklungen in den QT informiert werden könne und ob Kunst hier eine Rolle spielen könne. Diese Fragen waren dementsprechend als Erweiterung der Fragen 16. und 17. zum Diskurs gedacht: Frage 22. sollte genauer klären, wie die bisher über QT informierten Menschen auf die QT schauen und wie sich ein realistischeres bzw. positiveres Bild erreichen ließe. Frage 24. sollte anschließend herausarbeiten, wie sich das generelle Informationsniveau über QT in der Gesellschaft erhöhen ließe, welche Maßnahme nötig seien, und was die Befragten über die Rolle der Kunst denken.

Die **gesellschaftliche Wahrnehmung** wurde sehr ähnlich zu den Fragen 16. und 17. beantwortet. Während einem Großteil der Menschen bisher jeglicher Kontakt zu den QT fehle (Person 13), würden die übrigen Menschen über populärwissenschaftliche Artikel oder Zeitungsartikel informiert (Person 8). Dabei würde vereinzelt auf die Sicherheitsgefahren der QT

eingegangen, welche teilweise Sorgen auslösen könnten (Person 11), aber meist würden die breiten gesellschaftlichen Auswirkungen der QT nicht thematisiert (Person 10), und eher die Faszination stehe im Vordergrund:

„Grundsätzlich ist da eine unfassbar große Faszination und das ist erstmal gut. Das sollte man nutzen. Weil, solange es noch nicht wie bei KI wirklich mit negativen Bildern und auch Angst vorbelastet ist, sollte man nutzen, dass man die Menschen da noch relativ unvoreingenommen drauf vorbereiten kann und ihnen einfach erstmal erzählen kann, was an den Quantentechnologien faszinierend und schön ist.“ (Person 12)

Die Fragen wie Menschen nun sowohl informiert werden, als auch wie positive Wahrnehmungen über QT verstärkt werden könnten, wurde meist zusammen beantwortet. D.h. die meisten Interviewten beschrieben Programme oder Projekte, bei denen Menschen sowohl informiert werden, als auch ein positives oder wenigstens realistisches Bild auf die QT erhalten würden.

Ein erster Weg sei die **traditionelle Bildung** (Person 7). In Schulen, Universitäten und der Industrie müssten QT *„einfach gelehrt werden“* (Person 3). Dabei solle versucht werden, mehr Menschen in QT-relevante Studiengänge zu locken – insbesondere Frauen (Person 13). Verbunden damit solle Menschen in Laborbesuchen gezeigt werden, was QT sind und wie sie funktionieren (Person 7). Dabei ließen sich auch ästhetische Aspekte der QT nutzen, um Menschen anzulocken:

„Wie soll ich sagen, so ein Quantencomputer ist ja was ganz Tolles zum Anschauen. So mit Gold, goldener Kronleuchter, faszinierend blinkend und scheinend. Auch wenn es nur der Start ist.“ (Person 10)

Ein zweiter, wichtiger Weg sei, dass QT-Expert:innen erklärten, was QT sind und was nicht. Dies könnten klassische Wege der Wissenschaftskommunikation wie populärwissenschaftliche Zeitungsartikel sein,

aber auch Veranstaltungen, Seminare, Onlinevideos o.ä. Viel wichtiger als das konkrete Format sei, dass Transparenz geschaffen und ehrlich kommuniziert werde (Person 2); dass die Wissenschaft aus ihrem Elfenbeinturm komme und nach außen kommuniziere, warum das in QT investierte Geld gut angelegt sei (Person 12); und dass die so Informierten anschließend Berichte über QT lesen und einschätzen könnten (Person 8). Insgesamt sei die Zahl an Veröffentlichungen noch zu erhöhen, da in der Breite noch gar kein Bewusstsein über die Entwicklungen in Europa bestünde (Person 19).

Unklarheiten bestanden jedoch erneut darin, wie exakt die **Sprache** in der Beschreibung der QT sein müsste. Während eine Person sich analog zum Abschnitt Diskurs über Quantentechnologien eher eine exakte Beschreibung durch Forschende wünschte (Person 8), wiesen mehrere Befragte auf die Notwendigkeit hin, (sprachliche) Brücken zu schlagen. Metaphern, Analogien und sprachliche Bilder seien notwendig (Person 15), damit sich auch Nicht-Physiker:innen angesprochen fühlten (Person 11). Insgesamt gelte jedoch auch hier, dass die Beschreibung korrekt sein müsse, damit esoterischen Entwicklungen entgegengetreten werde:

„Das heißt, ich glaube, die Wissenschaft und da gibt es tatsächlich nur die Wissenschaftskommunikation, hat eine besondere Verantwortung bei einem Bereich wie den Quantentechnologien. Besonders sicher zu kommunizieren und klar zu kommunizieren und sich so aufzustellen, auch finanziell, um solchen Menschen dann eben auch entgegenzutreten zu können.“ (Person 11)

Einzelne Personen wünschten sich in den Erklärungen außerdem einen stärkeren **Fokus auf die Anwendungsmöglichkeiten** und Funktionalitäten der QT, anstatt auf deren Grundprinzipien. Über die Anwendungen würden Menschen verstehen, was mit QT möglich sei, aber auch erkennen, was technisch noch entwickelt werden müsste (Personen 5 und 10).

“I think the best thing is to explain it functionally. So, say what it can do. And not, tell how it does it. Just that. If you have a new mobile phone being presented, you don't tell how it works, but just what it can do.” (Person 3)

Dies deckt sich mit der Empfehlung mehr Menschen einen **niederschweligen Zugang zur Nutzung** von QT zu ermöglichen und sie ausprobieren zu lassen (Person 14):

“I think for societal engagement, we need to be interactive in a good way. Lower the bar by things that people can consume, and if they're really interested, try to have some good exchange with researchers. I think the lowering of the bar is important because otherwise you're always seeing the usual suspects – the stereotypical retired high school teachers.” (Person 4)

Über den Gebrauch von QT würde sich dann Normalität einstellen (Person 7), wobei hier ganz besonders Gratiszugänge zu den QT nötig seien. Mittelfristig würden Konsumprodukte am Ende alle erreichen (Person 14).

In dem Zuge sei auch ein spielerischer Umgang mit QT (Person 11) über **verschiedene Medien** denkbar. Gamification sei ein Ansatz zum Lernen der „merkwürdigen QT-Regeln“ (Person 4). Auch Wissenschaftskommunikation im Fernseh-Vorabendprogramm war ein wünschenswertes Szenario. Dies könnte einen „subtilen Zugang“ zu QT ermöglichen, weshalb wir solche Ansätze nicht nur „den Amerikanern“ überlassen sollten (Person 9).

Eng verbunden damit sehen die meisten Interviewten ein **Einbinden der Künste** als nachvollziehbar, positiv oder sogar notwendig an. Diese Entwicklung sei zunächst vollkommen logisch:

„Hat es immer gegeben, dass Künstler Physik aufnehmen.“ (Person 18)

Kunst könne Aufmerksamkeit für QT erhöhen (Person 10) und Menschen für QT interessieren, die auf anderen Wegen eher nicht erreicht werden würden

(Personen 5, 14 und 20). Eine Person, die aus der Forschung kommend aktiv in künstlerischen Projekten involviert ist, gab an, dass sowohl die Zuschauenden als auch die Kunstschaaffenden selbst die Grundlagen der QT-Kunst vermehrt verstehen wollten, womit die Kunst einen anderen Zugang zu den Grundprinzipien der QT liefere:

„Und ich denke, das ist das gleiche mit der Öffentlichkeit, mit Leuten, die dann angesprochen werden und sagen ‚okay, das war jetzt ein gutes Konzert, aber was steckt da jetzt eigentlich hinter? Was heißt das denn überhaupt, mit Quantenprinzipien zu arbeiten?‘ Die schauen sich unsere Gemälde an und sagen ‚Ja toll, super, klasse, Aber was heißt das, dass wir das mit Quantenalgorithm gemacht haben?‘ Und ich glaube, das hilft enorm, die Akzeptanz in die Gesellschaft zu tragen, aber auch eine gewisse Motivation zu erzeugen, sich mit Quantencomputing zu beschäftigen.“ (Person 5)

Manche Interviewte sehen Kunst jedoch als Form der Wissenschaftskommunikation (Person 1), und „gute künstlerische Repräsentationen“ könnten zur QT-Verbreitung hilfreich sein (Person 4). Diese Sicht wurde von einigen Interviewten, insbesondere aus dem Kulturbereich, stark kritisiert:

„Ich glaube, dass die Künste auch eine besondere Rolle spielen, weil sie einen ganz anderen Zugang geben können. Also Zugang, der nicht über das Lesen oder über das Verstehen der Technologie [kommt], sondern der sehr assoziativ ist und vor allen Dingen über diese Erfahrungsräume funktioniert. [...] Aber es geht natürlich nicht darum, dass die Künste die Wissenschaften illustrieren.“ (Person 11)

Vielmehr sei die Kunst ja unabhängig und „dürfe alles“ (Person 9), weshalb einzelne Interviewte auch das Einbinden der Künste kritisch sahen. Hier seien nicht mögliche esoterische Elemente das Problem, da diese zeitnah „aussterben würden“ (Person 3), sondern vielmehr das Herausarbeiten von kontrollierten Punkten in der QT-Entwicklung:

“Policy makers try to bring in some normality by adding art. I am less in favor of this since it might actually backfire [...]. Policy makers may expect that art leads mediation, but art is regularly providing provocation, speculation or highlighting of the sharper edges of a topic. And [policy makers] might dislike that.“ (Person 3)

Kunst ließe sich nicht steuern, weshalb man hoffen müsse, dass die Kunstschaaffenden immer wüssten, was sie erzeugten (Person 18). Denn es dürfe kein falscher Eindruck vom Funktionieren der Natur entstehen (Person 9).

Trotz dieser Unterschiedlichkeiten ließe sich über einen **Diskurs auf Augenhöhe** zwischen Kunst und Wissenschaft vielleicht ein Konsens herstellen. Es gäbe Programme wie Arts at CERN, in dem Kunstschaaffende und Forschende zusammenkommen. Den Verantwortlichen sei klar, dass die Künste eine wichtige Stimme sein, um „die Gesellschaft zu informieren“. Der andere, nicht-wissenschaftliche Blick aus der Kunst sei gesellschaftlich relevant (Person 15). Dabei müsse diese Zusammenarbeit über das Illustrierende hinausgehen und könnte durch das gegenseitige Interesse auch sehr fruchtbar für die QT und die Gesellschaft sein:

„Aber es geht natürlich nicht darum, dass die Künste die Wissenschaften illustrieren. Sondern beide Disziplinen stehen für sich selbst und haben einen Austausch auf Augenhöhe. Im Idealfall. All das muss man begleiten. Es funktioniert auch nicht mit jedem. Aber wir haben festgestellt, dass es vor allen Dingen mit Quantenphysiker:innen besonders gut funktioniert, weil die diese Offenheit fürs Abstrakte haben. Und deswegen ist der Austausch sehr fruchtbar. [...] Ich habe auch immer das Gefühl, Quantenphysiker:innen sind sich besonders bewusst, im Gegensatz zu anderen Physikern oder anderen Wissenschaftler:innen, dass sie so viel selbst nicht wissen. Und auch Künstler:innen sind oft Suchende. Es gibt ja ganz oft in den Künsten überhaupt keine klare Antwort. Und deswegen [hat] die Kombination ehrlich gesagt ziemlich großes Potenzial.“ (Person 11)

Ein begleiteter Prozess, bei dem der „Pfad, der der Wissenschaft nutzt, nicht verlassen“ werde, könne für beide Seiten vorteilhaft sein (Person 12). Die Popkultur aus Büchern, Filmen o.ä. sei ein sehr wichtiger Weg, um Menschen abzuholen, zu inspirieren und zu informieren. Wenn dieser Entwicklungsprozess kritisch begleitet werde, könnte eine realistische oder positive Sicht auf QT gelingen.

Für eine Person aus den öffentlichen Einrichtungen und Behörden ist Kunst nicht nur extrem wichtig, um Gesellschaft zu erreichen, sondern auch um gesellschaftliche Sichtweisen auf die QT in die Entwicklung der QT mit einzubringen. Kunst sei hier ein enorm wichtiges Tool zur Reflexion:

“I certainly think that art in all its forms, from comic books to music to visual arts, concept art, and at all levels from basic popular, to sort of more intellectual, all of these levels can be very useful for engaging with society in both directions. Not just to create acceptance and appreciation, but also to reflect and to gain a new perspective on what we're doing. I think this is the main channel after all. What people do most, what people spend most of their time on, social media, is something which is related to visual or other types of art.” (Person 16)

Zusammenfassend wurden in diesem Abschnitt die Erkenntnisse aus dem Diskurs über Quantentechnologien bestätigt und um die Betonung, die breite Bildung und die Wissenschaftskommunikation von QT auszubauen, sowie die Künste als relevanten Akteur mit einzubinden, ergänzt. So sollten QT sowohl in der traditionellen Bildung stattfinden als auch über öffentlich verfügbaren Medien die breitere Gesellschaft erreichen. Hier bestand zwar teilweise der Wunsch, eine wissenschaftlich möglichst korrekte mathematische Sprache zu verwenden, jedoch wurde unter Verweis auf die Unzugänglichkeit dieser für die meisten Menschen, auf Metaphern, Analogien und sprachliche Bilder verwiesen. Die verbreitete Faszination für die Quantenphysik, die Schönheit der QT-Aufbauten und die Breite der Anwendungsmöglichkeiten sollten genutzt werden, um

mehr Menschen für ein Beschäftigen mit den QT zu begeistern. Auf diese Weise könnten sie die aktuellen Entwicklungen besser einschätzen, könnten (staatliche) Investitionen nachvollziehen und würden ein eher positives Bild über QT erhalten. Konkret wurde auch auf einen eher praktischen Zugang zu den QT hingewiesen, der niederschwellige Angebote zum ausprobieren beinhalten sollte. Und auch den Künsten käme eine relevante Rolle im breiteren gesellschaftlichen Verständnis von QT zu. Auch wenn sich einzelne Interviewte die Kunst als Ergänzung der Wissenschaftskommunikation wünschten, sahen die meisten Befragten die Künste als eigenständig und nicht steuerbar an, weshalb ein Austausch auf Augenhöhe zwischen (QT-)Wissenschaft und Kunst stattfinden müsse. Über solch einen – auch kritischen – Dialog könnten sowohl wissenschaftlich korrekte Kunstwerke geschaffen werden, mit denen mehr Menschen erreicht und für QT begeistert werden, als auch eine Reflexion über die QT-Entwicklungen angeregt werden. Hier stellt sich dann vor allem die Frage, wie sich solche Kollaborationen am besten gestalten ließen; und wie sich das auf die „scharfen Ecken“ Fokussierende der Kunst einbinden ließe ohne den QT in der gesellschaftlichen Akzeptanz zu schaden. Denn eins sei klar – Kunstschaffende würden sich eh mit der Physik und damit irgendwann auch mit den QT beschäftigen.

4.1.13 Bildung

Das Thema Bildung wurde zum einen anhand von Antworten auf die gezielten Fragen (23.), wie Quantentechnologien in die Bildungs- und Ausbildungssysteme integriert werden sollten und auf welchen Stufen des Lernens solche Inhalte eingeführt werden sollten, untersucht. Zum anderen wurden Antworten zu anderen Fragen einbezogen, in denen Bildung ausdrücklich erwähnt wurde.

In den Interviews betonten die Teilnehmenden, dass die **Bildung eine grundlegende Voraussetzung** für die gesellschaftliche Beteiligung an den QT sowie zur Sicherstellung ausreichend qualifizierter Arbeitskräfte

seien. Die Ansichten über die Tiefe, den Zeitpunkt und die Form, in der Bildung über QT stattfinden sollte, gingen jedoch auseinander.

Eine häufig geäußerte Meinung war, dass die QT schrittweise in die **Lehrpläne der Schulen** aufgenommen werden sollten, wobei mit grundlegenden Quantenkonzepten und Analogien und nicht mit formaler Mathematik begonnen werden sollte.

"Ich glaube bei den ganz Kleinen ist es einfach so, dass sie damit spielen können. [...] Und dann in der Schule muss es da natürlich auch in Physik und in allen diesen Bereichen was geben." (Person 14)

Andere betonten, dass die Quantenphysik, obwohl sie traditionell der **Sekundarstufe II** oder dem **Universitätsunterricht** vorbehalten sei, durch ansprechende Beispiele, vereinfachte visuelle Modelle und spielerische Ansätze zugänglich gemacht werden könne. *"Die Leute akzeptieren die seltsamen Regeln der Quantenmechanik wie die Regeln eines Computerspiels"*, bemerkte eine Person, *"und fragen erst später, was sie mit der Natur zu tun haben."* (Person 4) Das Ziel sei nicht, Quantenphysiker:innen im frühen Alter zu schaffen, sondern Quantenphänomene „zu entmystifizieren“ und frühes Interesse und Vertrautheit zu fördern.

Dennoch wurde **Skepsis** bezüglich einer frühen Integration geäußert. Einige Befragte wiesen auf strukturelle Beschränkungen innerhalb der Schulsysteme hin:

„Ich bin da ein bisschen zwiegespalten, weil wir es ja schon nicht schaffen, Informatik als Pflichtfach einzuführen. Und das ist, finde ich, etwas, was noch deutlich näher an Schülerinnen und Schülern dran ist als jetzt Quantentechnologien. Von daher ja, wie soll ich sagen, wenn wir das schon nicht schaffen, wie sollen wir es denn dann hinbekommen, Quantentechnologien in den Lehrplan zu packen?“ (Person 12)

Andere wiesen auf die konzeptionelle Herausforderung hin und erklärten, dass probabilistisches

Denken, das die Grundlage der QT bildet, für viele Schüler:innen bereits schwierig sei:

„Auch weiß ich nicht, wie ich das frühzeitig in die Schule einbringen soll, wenn die Leute noch gar nicht verstehen, was Quantum überhaupt ist, was Wahrscheinlichkeitsrechnung ist, was Zufall ist usw. Grundschule, Gymnasium sehe ich da ganz sicher skeptisch.“ (Person 10)

Trotz dieser Herausforderungen wurde nachdrücklich dafür plädiert, das **Bewusstsein für die QT** in der Bevölkerung zu schärfen und sie in den naturwissenschaftlichen Unterricht im weiteren Sinne zu integrieren. Mehrere Befragte sprachen sich dafür aus, die QT in interdisziplinäre oder ethische Bildungskontexte einzubinden, damit die Schüler:innen auch über die gesellschaftlichen Auswirkungen der neuen Technologien nachdenken:

„Ich sehe das als eine große Chance, auch so ein bisschen was neu zu machen oder um neu zu denken, wie unterrichtet wird und da quasi nicht eine Technologie oder Wissenschaft isoliert von der Gesellschaft isoliert zu unterrichten, sondern gesellschaftliche Auswirkungen und Interessen gleich mit aufzunehmen.“ (Person 6)

Auf universitärer Ebene, da waren sich die Teilnehmenden einig, seien **Lehrplanreformen** überfällig. Viele forderten eine Ausweitung der QT-Inhalte über die Physikfakultäten hinaus in die Ingenieur-, Informatik- und sogar geisteswissenschaftlichen Studiengänge. Die Vorschläge reichten von *"Quantum für Ingenieure"* bis hin zu *"Quantum für Literatur oder Quanten für Poeten"* (Person 4) und spiegelten die Forderung nach integrativen, anwendungsorientierten Lehrformaten wider. Ein Teilnehmer merkte an: *"Ich habe Quantum durch kalte, harte Mathematik gelernt. Das will nicht jeder."* (Person 4) Stattdessen könnten mehr anwendungsorientierte, metaphorische Unterrichtsformate dazu beitragen, das Engagement zu erweitern.

Darüber hinaus betonten mehrere Befragte, dass die derzeitige Struktur der QT-Ausbildung den

Bedürfnissen des entstehenden Ökosystems nicht gerecht werde. Traditionelle Kurse schlossen oft Inhalte aus, die heute für QT-Anwendungen von zentraler Bedeutung seien, wie z. B. Paradigmen der Quantenprogrammierung oder Konzepte der Quanteninformation. Eine Aktualisierung dieser Lehrpläne würde sicherstellen, dass die Studierenden nicht nur in der Quantentheorie fundiert sind, sondern auch darauf vorbereitet werden, in praktischen, multidisziplinären Kontexten zur QT beizutragen.

Neben der formalen Bildung betonten viele Befragte die Bedeutung des **lebenslangen Lernens**, der Öffentlichkeitsarbeit und gezielter Umschulungsprogramme:

“The second level is to avoid the consequences of unequal access. We have to get everyone educated, but we also have to get the infrastructure and the governance ready. We have to get the national initiatives ready. We have to get the national initiatives aligned. Which also means, education on a different level of the decision makers of the policymakers. [That] can influence the educational curricula in each of the countries as well.” (Person 15)

Es wurde auf bestehende Initiativen wie den deutschen *MINT-Zukunftscampus* (Person 12) und europäische Bestrebungen verwiesen, und angemerkt Mobilitäts- und Bildungsprogramme speziell für Quanten zu entwickeln, die dem Geist von Erasmus ähnelten (Person 19).

Mehrere Teilnehmende warnten jedoch davor, die QT im öffentlichen Diskurs überzubewerten oder sie zu einem von der wissenschaftlichen Realität losgelösten Schlagwort zu machen. Sie merkten an, dass eine Ausbildung erfordere, die kritisches Denken und wissenschaftliche Kompetenz fördere, anstatt zu mystifizieren. Eine Person warnte davor, dass der Begriff Quantum manchmal auf nicht-wissenschaftliche Weise verwendet werde:

“Quantum technologies or quantum physics, the concepts are not really easy to understand. And it's also undermined by the fact that some people use it

as a kind of occult science that can help people to heal at a distance [...] or you can do whatever miracles you believe it could do. You just put ‘quantum’ in your title and then suddenly it becomes sexy and you appear very smart and very knowledgeable, even if what you are saying is completely wrong.” (Person 19)

Schließlich wurde auch die **Gleichberechtigung** als ein zentrales Anliegen genannt. Die Befragten befürchteten, dass QT ohne proaktive Bildungsintegration die bestehenden Gräben vertiefen könnte. Die Sicherstellung des Zugangs zur QT-Ausbildung für verschiedene sozioökonomische Gruppen, Regionen und Geschlechter wurde sowohl für die Fairness als auch für die Entwicklung der Arbeitskräfte als wesentlich angesehen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die meisten Interviewten sich eine Unterstützung für die Integration der Quantenbildung in alle Ebenen des Lernens wünschten, von der frühzeitigen Sensibilisierung in der Schule bis hin zu spezialisierten Universitätskursen und der Ausbildung von Arbeitskräften. Dabei bestand Unsicherheit darüber, ob die derzeitigen Lehrpläne Raum für diese Integration vorwiesen und ob sich alle Heranwachsenden mit der Thematik beschäftigen könnten, jedoch überwog der Vorteil einer solchen Integration. Es zeigte sich jedoch auch die Notwendigkeit einer durchdachten, schrittweisen und kontextabhängigen Umsetzung. Wie eine Person anmerkte, “[...] kann ein schrittweises Vorgehen, das Hinzufügen zu den Lehrplänen, das Einbeziehen in die Bewusstseinsbildung und dieser entmystifizierende Aspekt [...] der zukünftigen Debatte und Umsetzung nur zugutekommen.” (Person 15) Bildungsstrategien müssten ein Gleichgewicht zwischen Zugänglichkeit und Strenge herstellen, ein interdisziplinäres Verständnis fördern und aktiv gegen Missverständnisse vorgehen. Die Einbettung der QT in einen breiteren gesellschaftlichen und ethischen Kontext wurde wiederholt als eine Möglichkeit vorgeschlagen, nicht nur Expert:innen, sondern auch eine informierte Öffentlichkeit vorzubereiten, die in

der Lage ist, sich mit diesem aufstrebenden Gebiet auseinanderzusetzen.

4.1.14 Anderes

Die abschließende Frage (25.) des Fragebogens lautete, welche weiteren Aspekte noch relevant seien bzw. im Laufe des Interviews noch nicht beachtet wurden. 14 von 20 Personen beantworteten diese Frage. Die Antworten deckten sich dabei teilweise mit vorher genannten Aussagen, womit diese Übersicht vor allem einen Eindruck liefert, welche Themen als besonders relevant angesehen wurden.

Zwei Personen nannten eine **vorrausschauende Betrachtung** der QT-Entwicklung als wichtig. Die Folgen für die internationale Stabilität abzuschätzen (Person 13) sowie eine informierte Debatte mit der breiteren Bevölkerung sicherzustellen, seien hier besonders wichtig (Person 15).

Für zwei andere Teilnehmende werden vor allem Fragen der **Energie- und Ressourcennutzung** bisher zu wenig beleuchtet (Person 8), wobei auch die Analysemöglichkeiten von thermischen oder ähnlichen Prozessen durch Quantencomputer weiter untersucht werden sollten (Person 16).

Eine Person legte einen spezifischen Fokus auf die notwendige **Umstellung der Kryptographie**. Hier müsse insbesondere in kleineren Unternehmen eine größere Aufmerksamkeit erreicht werden (Person 18).

Ein zentraler Fokus wurde auf Fragen der **Wirtschaftlichkeit, Förderung und Investition von QT** gelegt. So stehe zum einen noch aus zu zeigen, dass sich mit QT Geld verdienen ließe. Die Lücke zum wirtschaftlichen Produkt sei noch zu schließen (Person 17), was insbesondere beachtet werden müsse (Person 10). Dies könne auch über das Involvieren von Hochrisikofonds gelingen, mit Hilfe derer der Übergang von

Forschung in die Anwendung beschleunigt werden könne (Person 2). Hier liege das Problem nur nicht an der Verfügbarkeit des Geldes – dieses sei vorhanden – vielmehr müsse Aufmerksamkeit bei den Geldgebern erzeugt werden, damit breiter investiert werde (Person 19). Auch strategische öffentliche Investition in kritische Infrastruktur könne hier eingeschlossen werden, zu denen bspw. QT-gestützte Zeitnetze gehören (Person 1). Die zukünftigen öffentlichen Investitionen müssten dabei von einer Expertenrunde aus Wissenschaft, Wirtschaft, Zivilgesellschaft und evtl. Kunst ausgearbeitet oder begleitet werden, mit Hilfe der die nächsten Schritte der Förderung entwickelt werden könnten (Person 5).

Abschließend wünschten sich drei Personen eine **Verstärkung an Kollaboration**. Zum einen sollten interdisziplinäre Kooperationen gestärkt werden, da die Vielzahl an Blickwinkeln für die QT-Entwicklung und Abschätzung notwendig seien (Person 11). Innerhalb Europas sollten Kooperationen gestärkt werden, wobei die ausdrückliche Bitte mitgegeben wurde, dass BMBF auf die Hürden des deutschen föderalen Systems für europäische Kollaborationen hinzuweisen (Person 20). Schließlich wurden auch genannt, dass der Blick über Europa und die USA hinaus geweitet werden solle und bspw. asiatische Länder wie Japan oder Südkorea berücksichtigt werden sollten.

„Ich glaube, wir sind immer so stark fokussiert auf Europa. Dann schauen wir noch ein bisschen auf die USA, Gefahr aus China, das war's.“ (Person 14)

Zusammenfassend wurden außer Erweiterungen bereits gegebener Antworten keine grundsätzlich neuen Erkenntnisse geliefert. Es scheint jedoch der Wunsch nach einer vorausschauenden Betrachtung der allgemeinen Folgen von QT, der Energie- und Ressourcennutzung und der kryptographischen

Tabelle 4.2: Prozentuale Anteile der Codes in Bezug auf die Repräsentation in den einzelnen Interviews und die aus den Häufigkeiten der einzelnen Codesegmente insgesamt abgeleiteten Werte.

Code Name	Prozentsatz	Prozentsatz
Diskurs über QT	11.68	100
Konsequenzen ungleichen Zugangs zu QT/QC	10.79	100
Auswirkungen des Quantencomputings auf IT-Sicherheit	10.72	100
Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik	8.72	80
Gesellschaftliche Auswirkungen	8.20	100
Status Quo der Technikfolgenabschätzung in den QT	8.13	100
Nachhaltigkeit des Quantencomputing	5.99	100
Eigene Technikfolgenabschätzungs-Arbeiten zu QT	5.62	80
Wissenschaftskommunikation & Kunst	5.40	95
Unbeabsichtigte Nebeneffekte	5.32	95
Bildung	4.51	80
Rechtliche Aspekte	3.55	60
Einfluss auf andere Technologien	2.96	80
Philosophische Aspekte	2.00	80
Exportkontrollen	1.70	40
Förderung und Finanzierung	1.18	40
Soziale Aspekte	1.03	35
Ethische Aspekte	0.89	30
Anderes	0.81	35
GESAMT	100.00	100

Umstellung zu geben. Dazu scheint insbesondere die Frage, wie die deutschen und europäischen privaten und öffentlichen Investitionen in QT hochgehalten, evtl. erhöht, und zielgenau eingesetzt werden können, viele Teilnehmende umzutreiben. Außerdem wurden erneut Kollaborationen, innerhalb von Gesellschaften, im europäischen Kontext und über bestehende Partnerschaften hinaus als sehr wichtig genannt.

4.2 Statistische Ergebnisse des Interview-Kodierschemas

Nach der inhaltlichen Analyse der Interviews wurde die Verteilung der Codesegmente in Bezug auf die Dokumente und die Codehäufigkeiten überprüft, d.h. welche kodierten Segmente in wie vielen der Dokumente verwendet wurden und welche kodierten Segmente in allen Interviews am meisten bzw.

am wenigsten verwendet wurden. Auf diese Weise lässt sich ein allgemeines Verständnis davon ermitteln, welche Themen von den Befragten am meisten betont und diskutiert wurden.

Den Befragten wurde die Möglichkeit gegeben, einzelne Fragen nicht zu beantworten. Dies wurde von mehreren Befragten genutzt, um insbesondere die Beantwortung von Fragen außerhalb ihres eigenen Fachgebiets auszulassen. Wie aus Tabelle 4.2 hervorgeht, haben dennoch fast alle Befragten einen Beitrag zu den acht Hauptthemen geleistet. Allerdings wurden nicht alle Themen in gleicher Ausführlichkeit und Tiefe diskutiert. Themen wie Diskurs über Quantentechnologien, Folgen des ungleichen Zugangs zu QT/Quantencomputern und Auswirkungen von Quantencomputern auf die IT-Sicherheit waren in den kodierten Segmenten stärker vertreten als Themen wie unbeabsichtigte Nebenwirkungen oder Nachhaltigkeit von Quantencomputern.

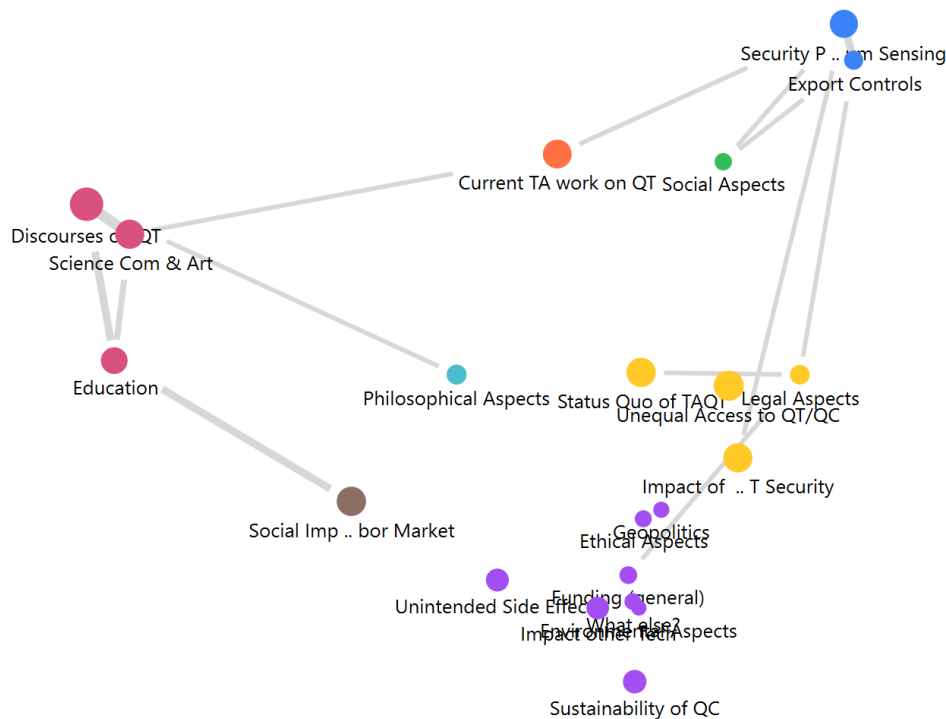


Abbildung 4.1: Code-Map der Kookkurrenzbeziehungen zwischen kodierten Segmenten.

Als Nächstes wurde die Code-Map-Funktion von MAXQDA verwendet, um die Hauptcodes zu clustern und übergreifende Verbindungen zwischen den Themen hervorzuheben. Hierzu wurden alle Zitate und politikrelevanten Subcodes weggelassen und die minimale Koinzidenzhäufigkeit der Links auf drei gesetzt (Abbildung 4.1).

Es zeigt sich, dass bestimmte Codes, wie *Diskurse über QT, Wissenschaftskommunikation & Kunst* und *Bildung* oft zusammen auftreten (d. h. im selben Absatzsegment verortet sind). Auch die *sicherheitspolitischen Implikationen von Quantensensoren* und *Exportkontrollen* waren eng miteinander verbunden. Abbildung 4.1 zeigt auch, dass bestimmte Themen wie *soziale Auswirkungen/Arbeitsmarkt* und *philosophische Aspekte* zwischen verschiedenen Clustern liegen, so dass sie als Zwischenthemen für mehrere Themencluster relevant sind. In ähnlicher Weise zeigt die Tatsache, dass der *Status Quo der TA für QT* im Cluster mit den *rechtlichen Aspekten*, dem *ungleichen Zugang zu QT* und den *Auswirkungen von QC*

auf die *IT-Sicherheit* angesiedelt ist und gleichzeitig eine gewisse Nähe zu den *philosophischen Aspekten* aufweist, während die (eigene) *aktuelle TA-Arbeit zu QT* zwischen den Clustern *Diskurse/Bildung/Wissenschaftskommunikation* und *Sicherheitspolitik/Exportkontrollen* liegt.

Um die Beziehung zwischen den Codes noch deutlicher hervorzuheben, wurde in einem nächsten Schritt mittels des Tools Code Relations Browser eine Heatmap der Codesegment-Koinzidenzen innerhalb derselben Absätze erstellt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.2 dargestellt (links) und wurden um identifizierte Cluster erweitert (rechts). Dabei sei darauf hingewiesen, dass die Codes an der Diagonalen gespiegelt auftreten und sich nur auf die obere rechte Hälfte bezogen wird. Weiterhin entsprechen die Liste und damit Anordnung der Codes der Reihenfolge des Fragebogens, womit in der Folgenden Auswertung insbesondere ein Fokus auf die direkten Überlappe zweier Codes gelegt wurde.

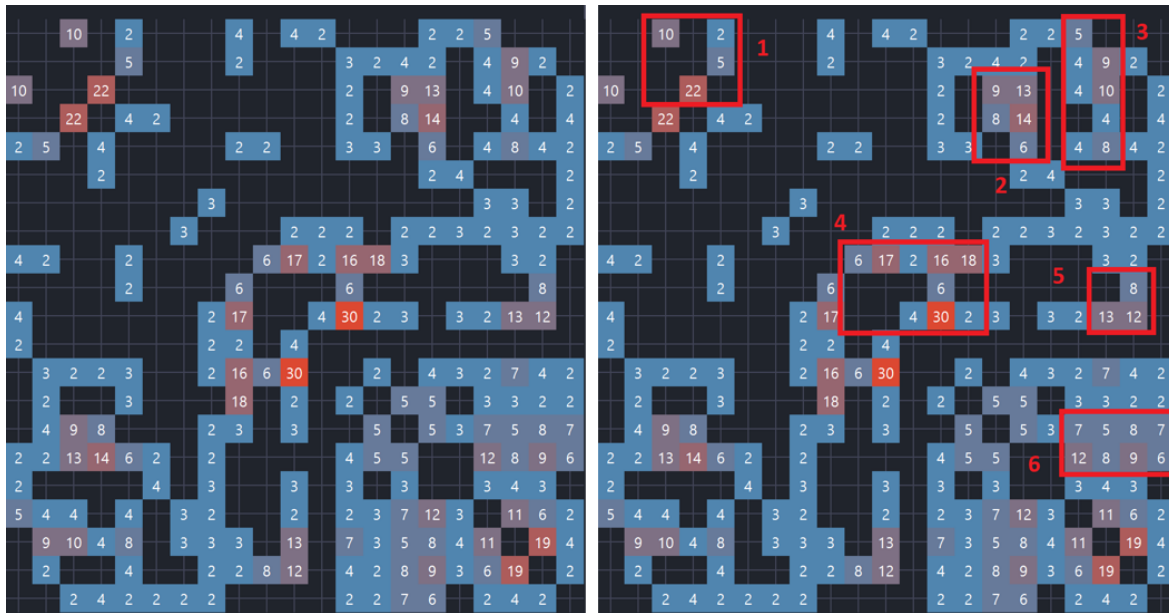


Abbildung 4.2: Heatmap der Koinzidenzen zwischen Hauptcodeabschnitten innerhalb desselben Absatzes (links) und mit identifizierten Clustern (rechts). Die Codes entsprechen denen aus Abbildung 4.1 die jeweils aufsteigend von links nach rechts bzw. oben nach unten aufgetragen wurden.

In den so markierten Clustern aus besonders deutlichen 1:1 Verbindungen zweier Codes dominieren folgende Themen:

Cluster 1

- *Rechtliche Aspekte* in Verbindung mit *Finanzierung* und *Ausfuhrkontrollen*
- *Ethische Aspekte* gemeinsam mit *sozialen Aspekten*

Cluster 2

- *Ungleicher Zugang* tritt zusammen mit *rechtlichen Aspekten* und *Exportkontrollen* auf
- *Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik* geht einher mit *rechtlichen Aspekten* und *Exportkontrollen*

Cluster 3

- *Der Status Quo von TA für QT* geht einher mit *ethischen, rechtlichen und sozialen Aspekten*
- *Auswirkungen von QC auf die IT-Sicherheit* in Verbindung mit *Förderung und Finanzierung*

Cluster 4

- *Bildung* tritt zusammen mit *philosophischen Aspekten*, *Wissenschaftskommunikation & Kunst*, *Diskurs über QT* und *Soziale Auswirkungen/Arbeitsmarkt* auf
- *Diskurs über QT* tritt zusammen mit *Wissenschaftskommunikation & Kunst* und *philosophischen Aspekten* auf

Cluster 5

- Die *derzeitige TA-Arbeit an QT* treten gemeinsam mit *Wissenschaftskommunikation & Kunst* sowie *philosophischen Aspekten* statt.
- *Status Quo von TA für QT* in Verbindung mit *Wissenschaftskommunikation & Kunst*

Cluster 6

- *Ungleicher Zugang zu QT* tritt zusammen mit *Auswirkungen von QC auf die IT-Sicherheit*, *Status Quo der TA für QT* und *aktuellen TA-Arbeiten zu QT* auf
- *Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik* in Verbindung mit den *Auswirkungen von QC auf die IT-Sicherheit*, *Status Quo der TA für QT* und *aktuelle TA-Arbeiten zu QT*

Die deutlichsten Übereinstimmungen gab es zwischen *Wissenschaftskommunikation & Kunst* und *Diskurs über QT* (30), *rechtlichen Aspekten* und *Exportkontrollen* (22), *Bildung* und *sozialen Auswirkungen/Arbeitsmarkt* (18), *Bildung* und *Wissenschaftskommunikation & Kunst* (17) sowie *Bildung* und *Diskurs über QT* (16). Dies stimmt auch mit der visuellen Clusterdarstellung in Abbildung 4.1 überein und hebt die Bedeutung der gesellschaftlichen Aspekte sowie der Kommunikation über QT hervor.

Weiterhin wird mittels dieser Auswertung deutlich, dass insb. der *Status Quo der TA für QT* eng mit den *Auswirkungen von QC auf die IT-Sicherheit* sowie mit den *Diskursen über QT* zusammen auftreten. Diese beiden Thematiken – *IT-Sicherheit* und *Diskurs* – wurden damit nicht nur besonders umfangreich kommentiert (vgl. Abbildung 4.1), sondern von den Befragten als besonders relevant in Hinblick auf die Technikfolgen von QT eingeschätzt.

4.3 Ergebnisse der Umfrage

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Umfrage in Bezug auf die acht Hauptthemen und einige weiterführende Fragen wiedergegeben. Zusätzlich zu den auch in den Interviews gestellten thematischen Fragen, bestand die Umfrage aus Fragen der Form *"Welche Rolle sollten Ihrer Meinung nach die folgenden Akteure bei [...] spielen?"*, welche für jede der Haupt- und weiterführenden Themen gestellt wurden. Abgefragt wurden dabei alle vier Stakeholder aus Wissenschaft, Wirtschaft und Industrie, Zivilgesellschaft, und Behörden und andere öffentliche Einrichtungen. Es füllten jedoch nicht alle Befragten alle 32 offenen Fragen aus.

Im Folgenden sind die Antworten zu jedem der acht Hauptthemen pro Stakeholdergruppe zusammengefasst sowie um Zitate ergänzt. Für die ersten beiden Themen werden einige kurze Informationen über die numerische Einstufung der Wichtigkeit durch die Befragten gegeben, um ein Verständnis dafür zu schaffen, wie diese Zahlen in diese Analyse eingeflossen sind. Die auf diesen Erhebungsergebnissen

aufbauenden Erkenntnisse werden im nächsten Kapitel 5 Übergreifende Thematische Erkenntnisse in kombinierter Form dargestellt.

4.3.1 Status Quo der Technikfolgenabschätzung in den Quantentechnologien

Die Befragten nannten eine breite und vielfältige Palette von Akteuren und Ressourcen, die die Bewertung der sozialen und ethischen Auswirkungen der Quantentechnologien vornehmen. Nationale und internationale Initiativen wie das EU-Quantenflaggschiff, nationale Quantenstrategien (z. B. das deutsche Handlungskonzept) und Organisationen wie das Open Quantum Institute, WEF, IEEE, QulC, QUTAC und BSI wurden häufig als wichtige institutionelle Akteure genannt, die ethische Rahmenbedingungen und Governance-Diskussionen gestalten.

Zu den Akteuren gehören auch Basisnetzwerke, Organisationen der Zivilgesellschaft, nationale Laboratorien, Denkfabriken sowie informelle Dialoge zwischen Wissenschaft, Industrie und öffentlichem Sektor. Eine Reihe von Befragten wies auf den Einfluss früherer Studien zu neuen Technologien (z. B. Nanotechnologie oder KI) und die Verwendung von Analyseinstrumenten aus den Bereichen *TA*, *Science and Technology Studies (STS)* und *Responsible Research and Innovation (RRI)* hin.

Die Rolle der Wissenschaft: Die meisten Teilnehmenden betonten die entscheidende Rolle der Wissenschaft bei der Bewertung gesellschaftlicher Auswirkungen von QT. Nur ein:e einzige:r Befragte:r bewertete die Rolle mit nur 3 von 5 Punkten und meinte, die Wissenschaft solle sich in erster Linie auf die technologische Entwicklung und Ausbildung konzentrieren, was eine begrenzte Rolle bei der ethischen Bewertung bedeute. Alle anderen Befragten vergaben entweder 4 oder 5 von 5 Punkten. Die Wissenschaft habe ein großes Potenzial in der Bewertung, jedoch wurden auch Einschränkungen wie (bisher) unzureichende Beteiligung, (fehlende) Finanzierung und nicht ausreichende Bandbreite eingeräumt.

“Academia can provide external frameworks for assessing the impact of technology and potential risks, as well as a sense of neutrality or vetted information. Experts in ethics, technology, commercialization, historians etc. exist in these academic institutions, and are best placed to do these deep-dives in an impartial and informative way.” (Umfrage 21)

“The scientific research on quantum technologies is relevant for technical work, discovery, invention and innovation of quantum technologies. On the other hand, academia should also do research on ethical and societal impacts of this transformative technology. Here the former is the physics and engineering departments, but the latter is more social science departments. I also believe that the societal impact of quantum technology is not substantially different than other groundbreaking tech such as AI. How the society uses and reacts to these technologies is an important aspect to be studied.” (Umfrage 20)

Die Rolle der Wirtschaft und Industrie: Die Befragten waren in dieser Frage unterschiedlicher Meinung: Während viele 4 oder 5 von 5 Punkten vergaben, gab es ebenso viele, die 3 von 5 Punkten vergaben, und eine Person vergab 2 von 5 Punkten. In einigen Antworten wird deutlich darauf hingewiesen, dass die Industrie ethische Erwägungen in die Produktgestaltung und -strategie einbeziehen sollte, während in einer Antwort ausdrücklich darauf hingewiesen wurde, dass es nicht die Aufgabe der Industrie sei, gesellschaftliche Auswirkungen zu berücksichtigen. Es wurden Bedenken hinsichtlich potenzieller Voreingenommenheit und praktischer Beschränkungen (insbesondere bei Start-ups) geäußert.

“...creating a gigantic overhead if this would be mandatory and the quantum industry doesn't make any money at this point. Mostly Start-ups with very few employees who don't have time to do this.” (Umfrage 13)

“Industry has best knowledge of how technological processes occur, but there may be a conflict of interest or lack of neutrality unless cross-company

forums exist. There also need to be external incentives to create transparency around getting information from companies.” (Umfrage 21)

“Incorporate social and ethical considerations into the design, development, and deployment of new technologies, new products, and new services. Develop and adhere to industry-wide ethical standards and guidelines for quantum technologies. Invest in responsible innovation practices and processes. Be transparent about potential impacts of their technologies, products, and services.” (Umfrage 27)

Die Rolle der Zivilgesellschaft: Ähnlich zur Wirtschaft und Industrie bewerteten die meisten Befragten die Rolle der Zivilgesellschaft mit 4 oder 5 von 5 Punkten, aber es gab auch einige 3er und 2er von 5 Punkten. Die Hauptrolle der Zivilgesellschaft wurde darin gesehen, eine informierte öffentliche Debatte zu ermöglichen, als Wächter zu fungieren und die Rechenschaftspflicht anderer Interessengruppen sicherzustellen. Es wurde betont, dass die NGOs *“Meinungen aus der realen Welt”* und empirische Beweise liefern können. Es gab jedoch Bedenken hinsichtlich des begrenzten technischen Verständnisses der Zivilgesellschaft und ihrer Anfälligkeit für wirtschaftlichen Druck.

“In comparison to academia, they bring the empirical evidence and the affection. While academia can articulate general perspectives, NGOs can talk from their niche perspective.” (Umfrage 3)

“I believe NGOs will be suppressed by the economic forces in cases where they will point to negative impacts.” (Umfrage 20)

Die Rolle der öffentlichen Einrichtungen und Behörden: Fast alle Befragten vergaben hier 4 oder 5 von 5 Punkten. Es wurde deutlich, dass die Behörden als wesentlich für die Festlegung von Vorschriften, die Durchsetzung ethischer Standards und die Steuerung einer verantwortungsvollen Entwicklung der QT durch Finanzierungsentscheidungen und die Einbeziehung verschiedener Stakeholder angesehen werden. Es wurde angemerkt, dass sie gesellschaftliche

Interessen mit nationalen Sicherheits- und Wirtschaftszielen in Einklang bringen sollten.

“Public authorities set the agenda with how they decide to use public funds. In this case, the investment into QT has been disproportionately from public funding, therefore public authorities have both a right and responsibility to ensure that the developed technology does good. In this sense, governments and the civil sector must create incentives and accountability processes to ensure that industry develops in a responsible way, and create regulation that anticipates potential issues and encourages sustainable and innovative growth, instead of waiting and implementing things retroactively.” (Umfrage 21)

“Public authorities should be the balancing force behind the industrial and economic resources and the use of this technology. However, since quantum technologies are of concern for national security, public authorities see this technology as another means of power between nations, hence driving the deployment of the tech is more of a priority than the societal impact.” (Umfrage 23)

Die Rolle anderer Interessengruppen: Anderer Interessengruppen, die nicht unter die vier vorherigen fallen (Wissenschaft, Industrie, Zivilgesellschaft, Behörden), wurden nur vereinzelt genannt. Hier dominierten insb. internationale Organisationen wie die UN.

“Media and Journalists could play a critical role in raising awareness and fostering public understanding of quantum technologies. International Organizations should establish global norms and principles for the responsible development of quantum technologies and facilitate cooperation on ethical and societal challenges. Think Tanks, Policy Institutes, and Professional Organizations could provide independent analysis and long-term foresight on the societal implications of quantum technologies.” (Umfrage 27)

4.3.2 Auswirkungen des Quantencomputings auf IT-Sicherheit

Im Allgemeinen gaben die Befragten an, dass ein Q-Day-Szenario, d. h. der Zeitpunkt, an dem Quantencomputer die derzeitigen kryptografischen Systeme brechen können, weitreichende und schwerwiegende Folgen hätte, vor allem für die nationale Sicherheit, den Datenschutz und die globale digitale Infrastruktur.

Wiederholt wurden Risiken für die nationale Sicherheit hervorgehoben: Die Befragten warnten vor verstärkten Cyberangriffen, der Entschlüsselung sensibler Informationen und einer möglichen Destabilisierung aufgrund von militärischen Präventivschlägen. Einige sagten eine neue Welle internationaler Spannungen und Machtverschiebungen zugunsten von Ländern mit fortgeschrittenen Quantenfähigkeiten voraus, was zu einer geopolitischen Fragmentierung oder Polarisierung im Stil des Kalten Krieges führen könnte.

Bezüglich der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Auswirkungen rechneten mehrere Befragte mit größeren Störungen der kritischen Infrastruktur, des Bankwesens, der öffentlichen Kommunikation und des öffentlichen Vertrauens in digitale Systeme. Der Zusammenbruch oder die Zerteilung des Internets wurde als ernsthafte Möglichkeit genannt, wobei der sichere Zugang zu einem Privileg wohlhabenderer Staaten oder Akteure werden könnte, während andere mit grassierender Cyberkriminalität und Fehlinformationen konfrontiert sein könnten.

Die kryptografischen Schwachstellen wurden allgemein anerkannt, insbesondere das Risiko der nachträglichen Entschlüsselung gespeicherter Daten („store now, decrypt later“). Während einige der Ansicht waren, dass dies in bestimmten historischen Kontexten zu Gerechtigkeit führen könnte, sahen die meisten darin eine ernsthafte Bedrohung, die eine sofortige Umstellung auf PQC erfordere. Einige wiesen darauf hin, dass PQC und andere quantensichere Lösungen bereits in der Entwicklung seien

und bei rechtzeitiger breiter Anwendung die schlimmsten Folgen abgemildert werden könnten.

Andere Befragte betonten, dass die Folgen von der Bereitschaft zur Umsetzung abhängen würden. Diejenigen, die optimistisch waren, dass ein präventiver Übergang zu einer quantensicheren Verschlüsselung möglich sei, sahen nur begrenzte Auswirkungen, während andere einen übereilten Übergang zu reaktiven Maßnahmen und weitreichende Störungen befürchteten.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass weitestgehend Einigkeit herrscht, dass der Q-Day ein Wendepunkt mit weitreichenden Auswirkungen auf die nationale Sicherheit, die Wirtschaft, die digitale Infrastruktur und das gesellschaftliche Vertrauen sein wird, der dringende Maßnahmen zur frühzeitigen Einführung quantenresistenter Technologien erfordert.

Die Rolle der Wissenschaft: Die Befragten waren generell der Ansicht, dass die akademische Welt eine wichtige Rolle bei der Bewertung der Auswirkungen des Quantencomputings auf die IT-Sicherheit spielt, insbesondere bei der Forschung, der interdisziplinären Zusammenarbeit und der öffentlichen Kommunikation. Die meisten Befragten vergaben 4 oder 5 von 5 Punkten, während einige wenige die Note 3 vergaben. Einige äußerten jedoch Bedenken hinsichtlich möglicher Interessenkonflikte und unterschiedlicher Zuständigkeiten in den verschiedenen akademischen Disziplinen.

“Academia is one of the major driving force in the development, they should take at least some responsibility of it. For example, in assessing the exaggerated claims, or to better communicate the state (and expectation) of the research to the public.” (Umfrage 35)

Die Rolle der Wirtschaft und Industrie: Die Befragten waren sich weitgehend einig, dass die Industrie bei diesem Thema eine Schlüsselrolle spielt, insbesondere durch Umsetzung, Vermarktung und Normung sowie durch Investitionen. Fast alle Befragten

vergaben 5 von 5 Punkten. Es bestehe hier ein tiefes Verständnis der realen Praktiken und der Schwachstellen. Darüber hinaus betonten die Befragten die Verantwortung der Industrie für die Gewährleistung des Datenschutzes, die marktorientierte Produktentwicklung und die Ausrichtung neuer Technologien an öffentlichen Werten. Es wurde jedoch auch hier auf mögliche Interessenkonflikte hingewiesen.

“Here, industry is more important as they hold key information on real practices.” (Umfrage 15)

“Most IT has been developed by industry and therefore the vulnerabilities of companies are best known by them.” (Umfrage 21)

“Surely the driving force and the principal responsible for developing methods for IT security.” (Umfrage 20)

“Industry also stands in a conflict of interest but is likely to present realistic numbers to assess realistic market opportunities, which will be useful information.” (Umfrage 34)

Die Rolle der Zivilgesellschaft: Viele Befragten bewerteten diese mit 4 von 5 Punkten, es gab aber auch mehrere 2er und 3er sowie eine 1. Die Zivilgesellschaft wurde als wichtig für die Sensibilisierung, das Eintreten für den Schutz der Privatsphäre und die Förderung der Rechenschaftspflicht angesehen, auch wenn es ihr an technischem Fachwissen fehle. Einige waren der Meinung, dass ihre Rolle deshalb begrenzt sein sollte, während andere die vielfältigen Perspektiven bei der Identifizierung blinder Flecken schätzten.

“They act as a means which publics can use to conglomerate. At least, civil society should facilitate this conglomeration to position the publics better asses and debate.” (Umfrage 35)

“Without the correct expertise, it is difficult to fully and realistically gauge these implications. But civil society will have the greatest diversity of awareness of potential aspects of their everyday that may be

affected by IT security. Engagement will help to cover blind spots.” (Umfrage 34)

Die Rolle der öffentlichen Einrichtungen und Behörden: Die meisten Befragten vergaben 4 oder 5 von 5 Punkten, mit einer einzigen Ausnahme (2). Sie waren der Meinung, dass die öffentlichen Behörden bei der Regulierung, Finanzierung und Festlegung von Strategien zur Bewältigung der Auswirkungen des Quantencomputings auf die IT-Sicherheit eine führende Rolle spielen sollten. Ihre Rolle wird als zentral angesehen, rechtliche Rahmenbedingungen zu schaffen, die Forschung zu unterstützen und die nationale Infrastruktur zu schützen. In mehreren Antworten wurde auch die Bedeutung einer globalen Koordination und eines rechtzeitigen Handelns hervorgehoben. Einige wenige äußerten sich skeptisch oder unsicher über die Effektivität der öff. Einrichtungen und Behörden, aber die allgemeine Erwartung war, dass sie für die Festlegung von Regeln und das Management kollektiver Risiken verantwortlich sind.

“Should be aware of how to mitigate risks on a collective scale. Under the assumption of trustable governance (big assumption) it is vital to have the most sensible decision making positioned here.” (Umfrage 36)

“They set the rule, they ought to somehow regulate the playing field to prevent any malicious usage.” (Umfrage 35)

Die Rolle anderer Interessengruppen: Es gab nur wenige Antworten zu diesem Thema, was eine übergreifende Auswertung nicht zuließ.

“International Organizations could facilitate global coordination in addressing quantum security risks. Standardization Bodies should introduce quantum-safe standards and protocols. Media could raise awareness about the possible impact of quantum computing on IT security and help raise public awareness.” (Umfrage 27)

4.3.3 Nachhaltigkeit des Quantencomputing

Die Antworten deuten darauf hin, dass der Ressourcenverbrauch des Quantencomputers im nächsten Jahrzehnt wahrscheinlich hoch bleiben wird, was auf die Komplexität der technischen Entwicklung, der Kühlsysteme, der Materialien und des Infrastrukturbedarfs zurückzuführen ist. Mehrere Teilnehmer gaben an, dass Nachhaltigkeitsaspekte zunehmend in die Forschung und Entwicklung von Quantencomputern einfließen würden, die derzeitigen Bemühungen sich jedoch noch in einem frühen, eher theoretischen Stadium befänden.

Es herrschte weitgehend Einigkeit darüber, dass die Skalierbarkeit weiterhin oberste Priorität habe und dass die Bemühungen um Nachhaltigkeit begrenzt sein würden, solange Quantencomputer nicht ihren konkreten wirtschaftlichen Nutzen und ihre technische Machbarkeit unter Beweis stellten. Einige Teilnehmer äußerten die Befürchtung, dass der Kühlungsbedarf und die Fehlerkorrektur in Echtzeit den Energieverbrauch erheblich in die Höhe treiben werden, insbesondere wenn große Quantensysteme mit einer leistungsstarken klassischen Infrastruktur gekoppelt werden müssen.

Andere merkten an, dass das Auftreten klarer, wertvoller Anwendungsfälle gezielte Anstrengungen zur Optimierung der Ressourcennutzung und zur Verringerung der Energieverschwendung ermöglichen werde. Solange jedoch die vorherrschenden Hardware-Technologien und -Architekturen noch nicht feststünden – was noch einige Jahre dauern könnte – sei eine detaillierte Nachhaltigkeitsstrategie verfrüht. In einigen Antworten wurde auch die Notwendigkeit hybrider Systeme und erschwinglicherer Quantencomputermodelle auf dem Weg zu einer nachhaltigen Nutzung betont.

Im Ergebnis scheint ein Konsens zu bestehen, dass das Quantencomputing in naher Zukunft weiterhin beträchtliche Ressourcen verbrauchen wird, wobei bedeutende Nachhaltigkeitsgewinne

unwahrscheinlich sind, bis die Technologie eine größere Reife erreicht hat.

Die Rolle der Wissenschaft: Die meisten Befragten waren der Ansicht, dass die Hochschulen gut positioniert sind, um die Nachhaltigkeit des Quantencomputings zu bewerten und durch Forschung, Ausbildung und Innovation zu dieser beizutragen. Zu den häufig genannten Aufgaben gehörten die Entwicklung energieeffizienter Systeme, die Erforschung nachhaltiger Materialien und die Ausbildung künftiger Expert:innen. In einigen Antworten wird die Fähigkeit der Wissenschaft zur unabhängigen Bewertung und zur Entwicklung langfristiger Perspektiven hervorgehoben, während in einer Antwort betont wurde, dass zunächst die zentralen technischen Herausforderungen gelöst werden müssten, bevor man sich mit der Nachhaltigkeit befassen könne. Insgesamt wurde die akademische Welt als natürlicher Bereich für dieses Thema angesehen, wobei es keine größeren Meinungsverschiedenheiten zwischen den Antworten gab.

“Academia can help developing energy-efficient quantum architectures and explore alternative materials that reduce environmental impact, educate future scientists and engineers on sustainable practices. Researchers can conduct independent studies on the lifecycle environmental impacts of quantum computers.” (Umfrage 29)

Die Rolle der Wirtschaft und Industrie: Die meisten Befragten sahen die Industrie als Schlüsselakteur bei der Umsetzung nachhaltiger Praktiken im Quantencomputing, insbesondere durch energieeffizientes Design, nachhaltige Lieferketten und die Forschungsfinanzierung. Während einige das Potenzial und die Verantwortung der Industrie betonten, Gewinne mit Nachhaltigkeit in Einklang zu bringen, wiesen andere darauf hin, dass rein wirtschaftliche Anreize letztlich bestimmend sein werden. Einige Antworten waren deshalb eher skeptisch und gaben an, dass Nachhaltigkeit erst dann eintreten werde, wenn es kommerziell nutzbare Systeme gäbe oder eine starke Marktnachfrage bestehe.

“Companies can fund research into sustainable materials, cooling systems, and low-energy quantum platforms. As the technology matures, industry could develop energy-efficient quantum systems.” (Umfrage 27)

“[Industry] should be incentivized to couple economic benefits with sustainability.” (Umfrage 34)

Die Rolle der Zivilgesellschaft: Die meisten Befragten sahen die Zivilgesellschaft als unterstützenden Akteur bei der Förderung der Nachhaltigkeit im Quantencomputing, vor allem durch Interessenvertretung, Bewusstseinsbildung und Rechenschaftspflicht anderer Akteure. Allgemein herrschte die Auffassung, dass die Zivilgesellschaft Zugang zu Informationen erhalten und einbezogen werden sollte, auch wenn es sich hier um ein hochtechnisches Thema handele. Einige Antworten deuteten darauf hin, dass die Zivilgesellschaft eine begrenzte oder passive Rolle spielen könnte, bis die Technologie ausgereift sei, während andere ihr Potenzial hervorhoben, unethischen Ressourcengewinnung zu benennen und zu bekämpfen.

“Civil society can monitor and critique the actions of academia, industry, and public authorities regarding sustainability.” (Umfrage 29)

“This should be channel that can be used by the public if they want to report unsustainable practice, for example mining for rare earth metal without giving back to the community that live near the mine.” (Umfrage 35)

“Too technical, but [civil society] should be involved.” (Umfrage 33)

Die Rolle der öffentlichen Einrichtungen und Behörden: Die meisten Befragten waren sich einig, dass die Behörden eine Schlüsselrolle bei der Regulierung und Förderung der Nachhaltigkeit im Quantencomputing spielten, indem sie klare Standards festlegten, nachhaltige Forschung finanzierten und die Praktiken der Industrie lenkten. Sie wurden im Allgemeinen als verantwortlich für die Festlegung von

Nachhaltigkeitszielen und die Berücksichtigung des allgemeinen gesellschaftlichen Nutzens angesehen. In einigen Antworten wurde jedoch diesbezüglich Skepsis geäußert und darauf hingewiesen, dass Behörden die technologischen Entwicklungen durch zu starkes Regulieren behindern könnten.

“Governments can mandate sustainability standards for quantum computing, such as energy efficiency or material sourcing requirements. Public authorities can provide funding for sustainable quantum R&D and promote private-sector investments in sustainability.” (Umfrage 29)

“Well, authorities are always behind. And if they will be in front, they will kill quantum computing.” (Umfrage 16)

Die Rolle anderer Interessengruppen: Andere Akteure wurden als wertvoll für die Festlegung von Standards und die Überbrückung von Lücken zwischen den Sektoren angesehen, um die Nachhaltigkeit im Quantencomputing zu unterstützen. Ihre Flexibilität und sektorübergreifende Reichweite wurde von einigen Befragten erwähnt.

“International Organizations can integrate sustainability considerations for quantum technologies into broader environmental initiatives.” (Umfrage 29)

“Institutes, funds, and initiatives that merge boundaries between different actors cover the greatest range of angles with the greatest amount of expertise and may be more intrinsically motivated.” (Umfrage 24)

4.3.4 Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik

In den Antworten wurde ein breites Spektrum potenzieller sicherheitsrelevanter Anwendungen für Quantensensoren genannt. Es wurde erwartet, dass Quantenbeschleunigungsmesser und -gyroskope eine GPS-unabhängige Navigation ermöglichen, die für militärische Operationen in Umgebungen ohne

GPS entscheidend ist. Diese Fähigkeit könnte zu höheren Verteidigungsinvestitionen führen und den globalen technologischen Wettbewerb verschärfen. Quantenmagnetometer könnten das Aufspüren von U-Booten und die Fähigkeit zur Abwehr von Tarnkapentechnologien verbessern, während Quantengravimeter das Aufspüren von unterirdischen Einrichtungen, Tunneln und Bunkern unterstützen könnten, die für den Nachrichtendienst, die Grenzkontrolle und die Waffenüberwachung von Bedeutung seien. Seismische Quantensensoren wurden als Hilfsmittel für die Erdbebenfrühwarnung und die Entdeckung unterirdischer Atomtests genannt, was für die Katastrophenhilfe und die Durchsetzung von Rüstungskontrollverträgen von Bedeutung sein könnte. Quantenradar könnte die Erkennung von Tarnkappenflugzeugen und anderen schwer zu verfolgenden Zielen verbessern, was möglicherweise eine Aktualisierung der Luftverteidigungssysteme und der internationalen Luftfahrtnormen erforderlich machen könnte.

Einige Teilnehmer äußerten sich besorgt über den Einsatz von Quantensensoren zur Überwachung und Waffenverfolgung und warnten, dass eine schnellere und präzisere Erkennung mobiler strategischer Waffen die nuklearen Zweitschlagskapazitäten gefährden könnte. Dies könnte die strategische Instabilität erhöhen. Andere merkten an, dass Sensordaten an sich keine Bedrohung darstellten, dass aber die Fähigkeit, diese Daten zu schützen, entscheidend sei. Eine Minderheit der Teilnehmer war sich über etwaige Auswirkungen unsicher.

Die Zeitschätzungen für die Einführungen variierten: Die quantengestützte Navigation werde bereits zeitnah eingesetzt und dürfte innerhalb von 1 bis 3 Jahren ausgereift sein; die Magnetometrie könnte innerhalb eines Jahres einsatzbereit sein; die Gravimetrie und die Bildgebung könnten 3 bis 5 Jahre Entwicklung in Anspruch nehmen; und die Fähigkeiten zur Aufspürung von U-Booten würden voraussichtlich in 5 bis 10 Jahren oder mehr eingesetzt werden. Eine breite strategische Wirkung dieser Technologien wurde im Allgemeinen nach 2030 erwartet. Die meisten Befragten stimmten darin überein, dass

Quantensensoren in fast allen sicherheitsrelevanten Bereichen eine zunehmend wichtige Rolle spielen werden, auch wenn ihre kurzfristigen Auswirkungen auf bestimmte Anwendungsfälle beschränkt bleiben könnten.

Die Rolle der Wissenschaft: Die meisten Befragten sahen die Rolle der Wissenschaft in der Bereitstellung von Forschung, Fachwissen und Bildung zur Unterstützung einer evidenzbasierten Sicherheitspolitik für Quantensensoren. Obwohl die Wissenschaft für ihre grundlegenden und beratenden Beiträge geschätzt wird, weisen mehrere Antworten darauf hin, dass sie nicht direkt politische Entscheidungen treffen könnte oder sollte.

“Academia provides foundational research into quantum sensing technologies, their potential applications, and associated risks... Academic institutions can conduct independent studies to inform evidence-based security policies...by training experts in quantum technologies and security, academia ensures a pipeline of qualified personnel to address emerging challenges.” (Umfrage 27)

“[Academia] is important, but do not take decisions at this level.” (Umfrage 31)

Die Rolle der Wirtschaft und Industrie: Die meisten Befragten waren sich einig, dass die Industrie eine zentrale Rolle bei der Entwicklung von Quantensensoren spiele und an der Gestaltung und Umsetzung von Sicherheitsmaßnahmen beteiligt werden müsse. Obwohl dies für praktische Erkenntnisse und die Einführung von Standards notwendig sei, wurde auch eine gewisse Skepsis deutlich. In einer Antwort wurde beispielsweise auf die Wahrscheinlichkeit hingewiesen, dass die Industrie Lobbyarbeit gegen solche Regulierungen betreibe.

“Industry must be at the forefront of developing and deploying quantum sensing technologies, making it a key player in identifying and mitigating associated risks. Businesses can inform policymakers about the practical implications of regulations, ensuring they

are realistic and do not stifle innovation.” (Umfrage 29)

Die Rolle der Zivilgesellschaft: Die Befragten sehen die Zivilgesellschaft in einer unterstützenden Rolle, wenn es darum geht, für eine ethisch vertretbare Entwicklung einzutreten, die Öffentlichkeit zu sensibilisieren und die Rechenschaftspflicht im Zusammenhang mit Quantensensoren zu fördern. Sie wurde zwar als wichtig für die Aufsicht und Konsultation angesehen, aber es bestand Einigkeit darüber, dass die Zivilgesellschaft nicht geeignet sei, die Politikentwicklung in diesem Bereich zu beeinflussen.

“Civil society groups play a vital role in educating the public about the societal and security implications of quantum sensing technologies.” (Umfrage 31)

“[Civil Society is] not appropriate for full involvement, but some consultation.” (Umfrage 33)

Die Rolle der öffentlichen Einrichtungen und Behörden: Öffentliche Einrichtungen und Behörden wurden als die Hauptakteure angesehen, die für die Regulierung von Quantensensoren, das Management nationaler Sicherheitsrisiken und die Leitung internationaler Vereinbarungen verantwortlich sind. Es bestand weitgehend Einigkeit darüber, dass es sich hierbei um ein politisches und strategisches Thema handele, das eine Aufsicht auf staatlicher Ebene erfordere, insbesondere angesichts des Dual-Use-Charakters der Technologie. Die Regierenden wurden als geeignete und notwendige Führungspersönlichkeiten in diesem Bereich angesehen.

“[Public Authorities are] entitled to set rules and conclude international limitation agreements.” (Umfrage 32)

“Governments should lead efforts to incorporate quantum sensors into existing arms control treaties and export regulations... Public authorities should evaluate and mitigate risks posed by quantum sensors to national security, particularly in military or espionage contexts.” (Umfrage 27)

Die Rolle anderer Interessengruppen: In der Umfrage wurden keine nennenswerten anderen Interessengruppen zu diesem Thema genannt.

4.3.5 Konsequenzen ungleichen Zugangs zu Quantentechnologien/Quantencomputing

Die Befragten stimmten darin überein, dass die ungleiche Entwicklung und der ungleiche Zugang zu Quantentechnologien, insbesondere zu Quantencomputern und Quantenkommunikation, die globalen Ungleichheiten vermutlich verstärken werden. Wohlhabendere Länder könnten große Vorteile in den Bereichen Cybersicherheit, Pharmazeutika und industrielle Innovation erlangen, während andere Länder zu abhängigen Verbrauchern oder zu Zielscheiben quantengestützter Bedrohungen, wie etwa kryptografischer Angriffe, werden könnten.

Die Quantensensorik könne bei der Katastrophenhilfe einige globale Vorteile bieten, aber ihr Einsatz bei der Überwachung oder bei militärischen Anwendungen könne zu internationalen Spannungen führen. Ein ungleicher Zugang könne sich voraussichtlich auf die nationale Sicherheit, die wirtschaftliche Unabhängigkeit und den wissenschaftlichen Fortschritt auswirken, insbesondere in wirtschaftlich benachteiligten Regionen.

Einige wiesen darauf hin, dass technologische Ungleichheit nicht neu und vielleicht sogar unvermeidlich sei, aber die meisten betonten, dass die QT ohne Anstrengungen zur gemeinsamen Nutzung von Wissen und Infrastrukturen geopolitische Trennungen verstärken und die Möglichkeiten der globalen Zusammenarbeit einschränken könnten.

Beim Thema Exportkontrollen waren sich die meisten einig, dass solche Kontrollen und restriktiven Maßnahmen dazu beitragen können, die Verbreitung von Quantentechnologien zu verzögern, insbesondere durch die Beschränkung des Zugangs zu kritischen Materialien, Komponenten oder geistigem Eigentum. Dies könne führenden Ländern einen

vorübergehenden Vorteil verschaffen, um ihre Position in Teilsektoren der Quantentechnologien zu festigen.

Allerdings wiesen mehrere darauf hin, dass solche Kontrollen wohl kaum einen dauerhaften technischen Vorsprung sichern würden, da der Wissensaustausch in der Wissenschaft, die internationale Zusammenarbeit und die eigenständige Entwicklung in anderen Ländern die Lücke schließlich schließen würden. Kompetente Nationen könnten alternative Wege finden, um ihre eigenen Fähigkeiten in den QT zu verbessern.

Einige warnten davor, dass eine allzu restriktive Politik negative Auswirkungen haben könne, indem sie die globale Innovation verlangsamt und den wirtschaftlichen und technologischen Fortschritt – selbst in technologisch führenden Staaten – beeinträchtigen könne. Es wurde auch befürchtet, dass solche Maßnahmen geopolitische Spannungen verstärken und zu gegenseitigem Misstrauen führen könnten.

Die Rolle der Wissenschaft: Die allgemeine Meinung über die Rolle der Wissenschaft bei diesem Thema war unterschiedlich. In mehreren Antworten wurde die wichtige Rolle der Wissenschaft bei der Erarbeitung datengestützter, objektiver und forschungsbasierter Erkenntnisse über die sozialen, wirtschaftlichen und sicherheitspolitischen Folgen des ungleichen Zugangs zu Quantentechnologien anerkannt. Einige betonten die Notwendigkeit einer interdisziplinären Zusammenarbeit zwischen Physiker:innen und Sozialwissenschaftler:innen, um diese Ungleichheiten zu verstehen und abzumildern. Eine Person spielte die Relevanz der Frage sogar ausdrücklich herunter und bezeichnete sie als ideologisch motiviert oder "woke-like", während eine andere die Verantwortung eher den politischen Akteuren und nicht der Wissenschaft zuschrieb.

“Academic research and output are not straightforward to transfer. Countries with already established levels of academic success will thrive while others

will lag behind. Hence there is not much of a role for academia to play a vital role.” (Umfrage 20)

Die Rolle der Wirtschaft und Industrie: Die Antworten spiegeln insgesamt eine pragmatische Sicht auf die Rolle der Industrie wider. In mehreren Antworten wurde anerkannt, dass die Industrie eine Schlüsselrolle bei der Bewertung realer Folgen eines ungleichen Zugangs spiele, insbesondere in Bezug auf Lieferketten, Innovationspotenzial und Marktdynamik. Es wurde anerkannt, dass die Industrie in erster Linie auf der Grundlage wirtschaftlicher Anreize handle, die zumindest teilweise von der öffentlichen Politik gesteuert würden. In einer Antwort wurde der entscheidende Einfluss von Investitionen betont, was bedeutet, dass der Zugang weitgehend von Finanzierungsentscheidungen abhängt. Es gab jedoch auch Skepsis bzw. Ambivalenz: Einige Antworten deuteten auf ein begrenztes Interesse oder fehlende Fähigkeiten der Industrie hin, sich mit dem Thema zu befassen, sofern diese nicht mit Gewinnmotiven in Einklang stünden.

“Industry can assess the practical implications of unequal access on supply chains, innovation, and global markets.” (Umfrage 27)

“Industries will be the main distributor of such technology and will make choices based on economic benefit, led by public authorities.” (Umfrage 20)

Die Rolle der Zivilgesellschaft: Die Befragten äußerten sich zurückhaltend zu den Möglichkeiten und Grenzen der Zivilgesellschaft. Mehrere Antworten unterstützten die Idee, dass die Zivilgesellschaft eine Rolle bei der Sensibilisierung, der öffentlichen Debatte und dem Eintreten für ethische Überlegungen und einen gerechteren Zugang zu QT spielen sollte. Es wurde anerkannt, dass die Zivilgesellschaft dazu beitragen könne, Kommunikationslücken zu schließen und die Integration zu fördern. Andere äußerten sich jedoch skeptischer und wiesen darauf hin, dass zivilgesellschaftliche Akteure wahrscheinlich nationalen Interessen den Vorrang geben würden,

insbesondere im Kontext des zunehmenden Nationalismus und der rechtsgerichteten Politik.

Die Rolle der öffentlichen Einrichtungen und Behörden: In den Antworten wurde die Rolle der Regierungen als zentraler und maßgeblicher Akteur bei der Bewältigung der globalen Auswirkungen des ungleichen Zugangs zu Quantentechnologien betont. Die meisten Antworten stimmten darin überein, dass die Staaten die Verantwortung und die Macht hätten, internationale Regeln festzulegen, den Technologietransfer zu regulieren und die geopolitische und wirtschaftliche Stabilität zu sichern. Mehrere betonten die Notwendigkeit, dass die Regierungen ihre nationalen Interessen mit der globalen Zusammenarbeit in Einklang bringen müssten, obwohl ihre Bereitschaft, dies zu tun, skeptisch gesehen wurde. Einige Befragte wiesen darauf hin, dass bestimmte Regierungen einseitig handeln oder den Zugang einschränken könnten, um strategische Vorteile zu wahren. Es wurde auch anerkannt, dass das Verhalten von Regierungen je nach politischem und wirtschaftlichem Kontext schwanke, was langfristige Vorhersagen schwierig mache.

“Public authorities have a major role in deciding export controls and regulations between borders. However, these regulations may be adjusted less or more frequently depending on the global political environment and economical relations. I don't think it is easy to describe a conjecture as of today for future.” (Umfrage 20)

“[Public authorities are] entitled to set rules, conclude international agreements; responsibility for stable economic relations.” (Umfrage 32)

Die Rolle anderer Interessengruppen: Auch hier wurden internationale Organisationen als Akteure genannt, die *“... einen gerechten Rahmen für die gemeinsame Nutzung von Technologien erleichtern und sicherstellen können, dass die Entwicklungsländer nicht zurückbleiben.”* Ausdrücklich erwähnt wurden auch die europäischen politischen Behörden (d.h. die Europäische Kommission) als Akteure, die *“[...]*

für eine gleichmäßige Verwaltung und Verteilung dieser Ressourcen zwischen den verschiedenen Mitgliedsländern sorgen können. Während sie die nationalen Strategien unterstützen und versuchen, mit unterschiedlichen Investitionsniveaus zu fördern, besteht der Wettbewerb hauptsächlich in der Entwicklung dieser Technologie, nicht aber in der Nutzung und dem Nutzen der Quantentechnologie."

4.3.6 Gesellschaftliche Auswirkungen

Aus den Antworten lässt sich schließen, dass unterschiedliche Ansichten bestehen, wie sich die Quantentechnologien auf verschiedene Bevölkerungsgruppen in Deutschland oder Europa auswirken werden. Einige Befragte waren der Meinung, dass Ungleichheiten in Bezug auf Bildung, wirtschaftliche Ressourcen und technologischen Zugang die Zahl derer, die in vollem Umfang davon profitieren könnten, einschränken werden. Einige wenige merkten an, dass sich die Auswirkungen nicht wesentlich von denen anderer fortschrittlicher Technologien unterscheiden und sich möglicherweise auf Gruppen wie Kleinunternehmer oder ältere Menschen auswirken.

Es wurde auch gefragt, inwieweit sich die Entwicklung der QT auf den Arbeitsmarkt auswirken könnten. Für Deutschland erwartete die Befragten hier, dass sich die Entwicklung der Quantentechnologien positiv auf den deutschen Arbeitsmarkt auswirken würden. Die Schaffung von Arbeitsplätzen sei dabei deutlich als die Vernichtung solcher. Zu den wichtigsten Themen gehörten die Notwendigkeit von Investitionen in Bildung und Ausbildung von Arbeitskräften, z. B. in spezialisierten Universitätsprogrammen, Berufsausbildung und MINT-Förderung. Einige betonten auch die Rolle der Gewerkschaften und der Industrie bei der Bewältigung der QT-Transformation, was auch eventuelle Arbeitszeitanpassungen bedeuten könnte. Obwohl keine größeren negativen Auswirkungen erwartet wurden, betonten mehrere Befragte die Dringlichkeit proaktiver staatlicher Unterstützung und strategischer Planung, um eine

umfassende und effektive Integration in den Arbeitsmarkt zu gewährleisten.

Für die Europäische Union betonten die Befragten die Bedeutung proaktiver Arbeitsmarktstrategien zur Bewältigung der Auswirkungen der Quantentechnologien, insbesondere durch Umschulungs- und Weiterbildungsinitiativen. Es wurde anerkannt, dass nicht jede:r tiefgreifendes technisches Fachwissen benötige, aber ein weit verbreitetes Bewusstsein und praktisches Verständnis in allen Sektoren von entscheidender Bedeutung sein werde. In einer Antwort wurden aus geopolitischen Erwägungen geäußert, den Zugang zu sensiblen oder als geheim eingestuften Quantenprojekten nur auf EU-Bürger zu beschränken. Insgesamt wurde davon ausgegangen, dass die Entwicklung des QT-Arbeitsmarktes ein frühzeitiges, koordiniertes Handeln von Industrie, Regierung und Zivilgesellschaft erfordere.

Es wurde erwartet, dass der QT-Sektor weltweit mit einem großen Mangel an qualifizierten Fachkräften, insbesondere an Quanteningenieuren, konfrontiert sein werde. Um dies zu beheben, betonten die Befragten die Notwendigkeit einer integrativen Innovationspolitik, die kleine Unternehmen und regionale Innovationen durch gezielte Finanzierung unterstütze. Darüber hinaus wurden starke öffentlich-private Partnerschaften als wesentlich angesehen, um die Ausbildung und die Entwicklung der Arbeitskräfte auf die sich entwickelnden Bedürfnisse von Industrie und Forschung abzustimmen.

Die Rolle der Wissenschaft: Die allgemeine Erwartung der Befragten war, dass die Wissenschaft ihre Rolle bei der Analyse der sozialen Auswirkungen der Quantentechnologien, bei der Vorhersage der Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt und bei der Vorbereitung künftiger Arbeitnehmer durch Bildung und Lehrplanentwicklung spiele. Mehrere Antworten betonten die Fähigkeit der Wissenschaft zur interdisziplinären Zusammenarbeit und zur langfristigen Folgenabschätzung.

Die Rolle der Wirtschaft und Industrie: Von der Industrie wurde erwartet, dass sie eine proaktive Rolle bei der Ermittlung des Qualifikationsbedarfs, bei der Schaffung von Beschäftigungsmöglichkeiten und bei der Unterstützung von Ausbildungsbemühungen spiele, um den Übergang der Arbeitskräfte zu den Quantentechnologien zu fördern. In mehreren Antworten wurde die Verantwortung der Industrie bei der Bewertung der sozialen Folgen und der Nutzung der verfügbaren Instrumente betont. In zwei Antworten kam diesbezüglich jedoch deutliche Skepsis zum Ausdruck: Es wurde zum einen genannt, dass die sozialen Auswirkungen der Industrie derzeit minimal seien. Auf der anderen Seite wurde die Vertrauenswürdigkeit der Industrie in Frage gestellt, da die wirtschaftlichen Gewinne häufig schwerer als soziale Erwägungen wögen.

“Industry should be involved due to its role in the development of quantum technology.”
(Umfrage 33)

“In this age, companies should really assess what are the social consequences of their technology. There are tools that can provide good starting point.” (Umfrage 35)

Die Rolle der Zivilgesellschaft: Allgemein wurde die Zivilgesellschaft als entscheidender Akteur angesehen, der marginalisierte Stimmen vertrete, den gleichberechtigten Zugang zu Quantentechnologien gestalte und arbeitsbezogene Ergebnisse durch öffentliches Engagement beeinflusse. Es wurde befürwortet, dass die Zivilgesellschaft eine proaktive, ja sogar führende Rolle spiele, insbesondere wenn es darum ginge, Inklusivität zu gewährleisten und durch strukturierte Feedback-Mechanismen an der politischen Entscheidungsfindung teilzunehmen. Im Allgemeinen wurde eine starke Beteiligung der Zivilgesellschaft befürwortet, aber es gab auch einige Hinweise darauf, dass unklar sei, wie aktiv oder einflussreich die Zivilgesellschaft derzeit in diesem Bereich ist.

Die Rolle der öffentlichen Einrichtungen und Behörden: In den Antworten wurde von den Regierungen

erwartet, dass sie eine zentrale, koordinierende Rolle spiele, indem sie Vorschriften ausarbeite, einen gerechten Zugang sicherstelle und die Entwicklung der Arbeitskräfte durch Bildung, Umschulung und sozialen Schutz unterstütze. Der Schwerpunkt liege auf der Festlegung klarer Regeln und der Schaffung einer formalen Struktur für die Zusammenarbeit zwischen Wissenschaft, Industrie und Zivilgesellschaft. Die meisten Antworten unterstrichen die Notwendigkeit der Beteiligung der öffentlichen Einrichtungen und Behörden, sowohl als Regulierungsbehörde als auch als Vermittler.

“Governments must craft policies that balance economic growth with social equity, providing funding for education, retraining, and social protections.”
(Umfrage 29)

“The very hard but must to do task to provide the 3 actors [referring to academia, industry, civil society] above with a formal setting to deliberate, and to force the result of that deliberation.” (Umfrage 37)

Die Rolle anderer Interessengruppen: Internationale Gremien wurden ebenfalls erwähnt, da sie möglicherweise zur Harmonisierung der Arbeitspolitik und zur Vermeidung globaler Ungleichheit beitragen könnten, während Gewerkschaften zum Einsetzen faire Arbeitsübergänge genannt wurden.

4.3.7 Diskurs über Quantentechnologien

In den Antworten wurde genannt, dass der aktuelle Diskurs über QT von einer Mischung aus Hype, technischem Optimismus und strategischen Ängsten geprägt sei. Häufig wurde das transformative Potenzial der Quantentechnologien für wirtschaftliches Wachstum, militärische Vorteile und wissenschaftlichen Fortschritt hervorgehoben, wobei häufig Vergleiche mit früheren technologischen Revolutionen gezogen wurden. Begriffe wie *“Quantenvorherrschaft”* signalisieren sowohl erwartete technologische Meilensteine als auch politische Ambitionen. Der Schwerpunkt liege auf dem Wettbewerb, insbesondere im Hinblick auf den globalen Wettlauf und

die Sicherheitsbedrohungen, während soziale, ethische und regulatorische Aspekte unterentwickelt blieben. Der Diskurs in der Industrie stütze sich stark auf das Investitionspotenzial und das disruptive Versprechen, während die wissenschaftlichen Diskussionen immer noch auf Komplexität und Unsicherheit beruhten. In der Zwischenzeit koexistierten Metaphern eines Quantenmystizismus und übertriebene Behauptungen mit echter Begeisterung und Inspiration über die Richtung und die Auswirkungen des Feldes.

In ihren Antworten auf die Frage, inwieweit sich der Diskurs über Quantentechnologien ändern solle und ob es neue oder andere Sprache, Metaphern oder Erzählungen bräuchte, gaben die Befragten an, dass der Diskurs über QT hin zu integrativeren, sozialeren und global kooperativeren Erzählungen verlagert werden sollte. Die Befragten schlugen vor, sich von einer mystifizierenden oder allzu technischen Sprache zu verabschieden und stattdessen Begriffe zu verwenden, die die Zusammenarbeit, die ethische Entwicklung und den gesellschaftlichen Nutzen betonten, wie z. B. *"Quantum for Global Good"* oder *"Sustainable Quantum Innovation"*. Es wurde auch darauf gedrängt, Diskussionen über Frieden, internationale Sicherheit und breitere soziale Auswirkungen zu integrieren, die über den dominierenden Fokus auf Wettbewerb und militärische Anwendungen hinausgehen. Letztlich solle sich der Diskurs weiterentwickeln, um mehr Resonanz in der Öffentlichkeit zu finden und verantwortungsvolle, transparente Innovationen zu fördern.

Die Rolle der Wissenschaft: Die Befragten sahen die Wissenschaft in der zentralen Rolle, den Diskurs über QT durch unvoreingenommene Forschung, kritische Analyse und Kommunikation zu gestalten. Es bestand Einigkeit darüber, dass sie künftige Wege aufzeigen und eine Brücke zwischen Wissenschaft und Gesellschaft schlagen sollte. Einige mahnten an, nicht zu früh zu viel zu versprechen, und wiesen darauf hin, dass das Feld noch wachsen könne. Es bestünde ein leichtes Spannungsverhältnis zwischen der Förderung einer kritischen Aufsicht und der

Ermöglichung von Flexibilität während der frühen Entwicklung.

"Scientific research will keep the technical discourse. However, social sciences would generate methods to communicate this scientific advancement to the public." (Umfrage 20)

Die Rolle der Wirtschaft und Industrie: Die allgemeine Meinung war, dass die Industrie eine dominante Rolle bei der Gestaltung der öffentlichen Wahrnehmung von QT spiele, vor allem durch Vermarktung dieser. Die Befragten stellten fest, dass ihr Einfluss durch wirtschaftliche Ziele und eine wettbewerbsorientierte Positionierung bestimmt werde, die oft durch übertriebene Versprechungen gekennzeichnet sei. Während ihre Rolle als notwendig für Innovation und praktischen Einsatz angesehen wurde, bestand Skepsis gegenüber ihren Botschaften, was auf die Notwendigkeit einer ausgewogeneren und verantwortungsvolleren Kommunikation hindeutet.

"Industry will find ways to communicate benefits of this tech to public, and I guess this will be mostly for marketing purposes." (Umfrage 22)

"[...] the narrative focuses a lot on the technology. The social aspects are ignored." (Umfrage 33)

Die Rolle der Zivilgesellschaft: Die Befragten waren insgesamt der Ansicht, dass die Zivilgesellschaft als Wächter und Bewusstseinsbildner fungieren sollte. Die Befragten betonten ihre Rolle bei der Verstärkung marginalisierter Stimmen, der Gestaltung von Narrativen und der Förderung verantwortungsvoller Innovationen. Die Zivilgesellschaft könnte außerdem mittels moderner Medienformate die Öffentlichkeit einzubeziehen und eine informierte Debatte fördern.

"Civil society, including NGOs and advocacy groups, can highlight social, ethical, and environmental implications [...] moreover, they can pressure other actors to prioritize responsible development." (Umfrage 29)

Die Rolle der öffentlichen Einrichtungen und Behörden: Die Ansichten zur Rolle der öff. Einrichtungen war sehr verschieden. Einige sahen sie als Schlüsselakteure bei der Steuerung der Gesamtentwicklung, der Finanzierung sowie der Gewährleistung, dass technische Innovationen mit dem öffentlichen Interesse, der Sicherheit und der Nachhaltigkeit in Einklang stünden. Andere waren deutlich skeptischer und sahen ihre Rolle auf den geopolitischen Wettbewerb und wirtschaftlichen Entwicklung beschränkt, womit wenig Einfluss auf den breiteren gesellschaftlichen Dialog bestünde.

Die Rolle anderer Interessengruppen: Die Medien wurden im Hinblick auf die Gestaltung des öffentlichen Verständnisses erwähnt, während internationale Organisationen (z. B. UN oder OECD) die globale Zusammenarbeit und ethische Standards fördern könnten. Beide könnten den integrativen und verantwortungsvollen Diskurs über QT und ihre Anwendungen verstärken.

4.3.8 Unbeabsichtigte Nebenfolgen

Die Befragten wiesen auf mehrere potenzielle unbeabsichtigte Folgen der QT hin, darunter einen erheblichen Energiebedarf für Kühlsysteme, die Abhängigkeit von seltenen Materialien, die zu Ressourcenknappheit und geopolitischen Spannungen führen könnte, sowie gesellschaftliche Störungen wie die Destabilisierung von Branchen, die von der klassischen Kryptografie abhängig sind. Es wurden auch Bedenken über Dual-Use-Anwendungen geäußert, und Befürchtungen über Überwachung und Aushöhlung der Privatsphäre, die das öffentliche Vertrauen untergraben könnten. Einige Teilnehmer betonten die Schwierigkeit, langfristige Auswirkungen vorherzusagen, und zogen historische Parallelen zu Technologien wie dem Internet. Sie unterstrichen, wie wichtig es sei, angesichts der Ungewissheit das Bewusstsein und die Anpassungsfähigkeit zu bewahren.

Die Rolle der Wissenschaft: Die Befragten betonten, dass akademische Forschende Schlüsselakteure bei der Erkennung und Bekämpfung unbeabsichtigter

Nebenwirkungen der QT-Entwicklung seien. Die Befragten waren sich weitgehend einig, dass die Wissenschaft eine Verantwortung für die Durchführung unabhängiger, frühzeitiger Untersuchungen und langfristiger Bewertungen trage. Es bestand die geteilte Überzeugung, dass Nebenfolgen aktiv identifiziert und transparent kommuniziert werden sollten.

Die Rolle der Wirtschaft und Industrie: In Bezug auf die Rolle der Industrie wurde betont, dass sie eindeutig dafür verantwortlich sei, die mit der Entwicklung und Verbreitung von QT verbundenen Risiken zu bewerten, einschließlich unbeabsichtigter Anwendungen und weiterreichender Auswirkungen, wie auf Lieferketten. Von der Industrie wurde erwartet, Sicherheits- und Nachhaltigkeitsüberlegungen in die Innovationsprozesse einzubeziehen. Wie der akademische Sektor wurde auch von der Industrie erwartet, dass sie Nebenfolgen aktiv erkenne und kommuniziere.

Die Rolle der Zivilgesellschaft: Die Zivilgesellschaft wurde erwähnt, bei der Bewusstseinsbildung, beim Eintreten für schutzbedürftige Gruppen und beim Erkennen von Risiken, die andere Akteure möglicherweise übersehen, involviert zu sein. Die Zivilgesellschaft sei Wachhund und ethisches Gegengewicht zu den Interessen der Industrie und des Staates. Obwohl Schwierigkeiten im Fällen technischer Urteile bestünden, wurde ihr Beitrag als wichtig eingeschätzt, insbesondere wenn es darum ginge, übersehene gesellschaftliche und ökologische Probleme aufzudecken.

Die Rolle der öffentlichen Einrichtungen und Behörden: In den Antworten zu den öffentlichen Einrichtungen war die geteilte Einschätzung erkennbar, dass diese eine zentrale, regulierende Rolle bei der Bewältigung unbeabsichtigter Nebenwirkungen der Quantentechnologien spielen. Diese seien für die Durchsetzung einer ethischen und nachhaltigen Entwicklung, der Aufstellung und Durchsetzung von Regeln, und der generellen Aufmerksamkeit für Entwicklungen verantwortlich. Es bestand ein Konsens darüber, dass die Behörden Nebenwirkungen aktiv

erkennen und kommunizieren sollten. In einigen Antworten wurden sie als proaktive Regulierungsbehörden bezeichnet, während andere sie eher als beobachtende Instanz beschrieben, ähnlich zur Zivilgesellschaft.

Die Rolle anderer Interessengruppen: Es wurde hervorgehoben, dass internationale Gremien globale Standards für den Umgang mit Risiken festlegen könnten, während die Medien unbeabsichtigte Nebenwirkungen aufzeigen und Druck auf die verschiedenen Beteiligten ausüben könnten.

4.3.9 Wie beeinflusst die Entwicklung der Quantentechnologien den Fortschritt anderer Technologien?

Aus den Antworten auf die Umfrage sticht die Vermutung hervor, dass sich die QT und andere technische Bereiche stark gegenseitig beeinflussten. Es wurde erwartet, dass die Quanteninformatik den Fortschritt in Bereichen wie der KI, der Arzneimittelforschung, der Materialwissenschaft und der Optimierung erheblich beschleunigen werde, während die Quantenkommunikation und -sensorik die Cybersicherheit, die medizinische Bildgebung und autonome Systeme verändern könnte. Umgekehrt wurden Fortschritte in der KI, der Nanotechnologie, der Kryotechnik, der Photonik und der Materialwissenschaft als entscheidende Voraussetzungen für die QT-Entwicklung angesehen, da sie Fehlerkorrektur, Skalierbarkeit der Hardware und Systemeffizienz verbesserten. Die Befragten betonten die wechselseitigen Synergien, insbesondere mit KI und Elektronik, und verwiesen auf die Bedeutung spezialisierter Komponenten wie Kryoelektronik, ASICs und Foundries für die Herstellung von QT. Integrationsprobleme und der Bedarf an fortschrittlicher Middleware wurden ebenfalls als aktuelle Engpässe genannt. Die Ko-Evolution von Quanten- und anderen Technologien wurde als unvermeidlich und transformativ angesehen.

4.3.10 Könnte es zu unerwarteten Durchbrüchen in einem der oben genannten Teilbereiche der Quantentechnologien kommen?

Die Befragten waren sich generell einig, dass unerwartete Durchbrüche in allen Teilbereichen der Quantentechnologien nicht nur möglich, sondern wahrscheinlich seien. Mögliche Beispiele waren neuartige Qubit-Materialien oder Fehlerkorrekturtechniken, die die Skalierbarkeit von Quantencomputern drastisch verbessern würden; Durchbrüche bei hybriden Systemen, die einen breiteren Einsatz in Edge-Cloud-Infrastrukturen ermöglichen; und andere bahnbrechende Fortschritte wie kompakte oder Helium-3-freie Kryosysteme. Auf der Softwareseite wurden Entdeckungen wie hocheffiziente Algorithmen, die in der Lage sind, bestehende kryptografische Standards zu brechen, ebenfalls als plausibel und bedeutsam angesehen.

4.3.11 Wie lässt sich die Gesellschaft am besten über Fortschritte und Entwicklungen in der Quantentechnologien informieren?

In den Antworten wurde vorgeschlagen, die Gesellschaft am besten über die Entwicklungen der QT zu informieren, indem man zugängliche und vertraute Medienplattformen wie Fernsehen, soziale Medien, Blogs, Podcasts und Online-Kurse nutze, um verständliche Inhalte zu präsentieren, die sich auf aktuelle, greifbare Fortschritte und nicht auf ferne Zukünfte konzentrierten. Auch die Einbindung der Öffentlichkeit durch Veranstaltungen, Presseartikel und Interviews mit Quantenwissenschaftlern wurde hervorgehoben. Während einige anmerkten, dass die QT immer noch ein Nischenthema seien, waren sie der Meinung, dass die derzeitige Berichterstattung im Allgemeinen angemessen sei, aber durch gezieltere Bemühungen in der Wissenschaftskommunikation erweitert werden könne.

4.3.12 Welche wirksamen Formate könnten genutzt werden, um die Gesellschaft in die Entwicklung von Quantentechnologien einzubeziehen?

Um die Gesellschaft wirksam in die Entwicklung von Quantentechnologien einzubeziehen, empfahlen die Befragten Formate, die die Zugänglichkeit und den Dialog fördern. Dazu gehörten öffentliche Veranstaltungen, die eine umfassende Diskussion über ethische und gesellschaftliche Auswirkungen ermöglichen. Eine klare Kommunikation sowohl der Vorteile als auch der Risiken sei unerlässlich. Der Einsatz verschiedener Medien, wie populäre Artikel, Nachrichtenberichte und Inhalte von YouTube, könnten dazu beitragen, verschiedene Teile der Öffentlichkeit zu erreichen, während die direkte Auseinandersetzung mit Wissenschaftlern Vertrauen und Verständnis fördern könne.

4.4 Ergebnisse des Workshops

Die Ergebnisse des zweitägigen Workshops zu Visionen für QT in Deutschland und Europa im Jahr 2045 sowie politischen Handlungsempfehlungen werden im folgenden Abschnitt beschrieben.

Wie in Abschnitt 0 beschrieben, war der Workshop zweistufig konzipiert worden. Am ersten Tag („Envision“) wurden Visionen (= wünschenswerte Zukünfte) für QT in Deutschland und Europa im Jahr 2045 entwickelt, für die am zweiten Tag („Reflection“) politische Handlungsempfehlungen abgeleitet wurden. Es wurden zunächst **individuelle Visionen (1.A)** entwickelt, und mittels einer **STEER-C-Kategorisierung (1.B)** (Social, Technological, Economical, Ecological, Political und Cultural sowie Other) konkrete Aspekte dieser Visionen herausgearbeitet. Diese Visionen und Aspekte wurden in eine **gemeinsame Vision (1.C)** überführt und **von den Stakeholdergruppen angepasst (1.D)**. Am zweiten Tag wurden in den fünf Stakeholdergruppen relevante Akteure zum Erreichen der gemeinsamen Vision über ein **Stakeholder-Mapping (2.A)** identifiziert und mittels **Backcasting**

(2.B) die notwendigen Schritte auf dem Weg zur Vision visualisiert. Abschließend wurden kritische Punkte auf dem Weg zum Erreichen der Vision herausgearbeitet und **politische Handlungsempfehlungen (2.C)** abgeleitet, wie sich diese Punkte beheben ließen.

4.4.1 Entwicklung einer QT-Vision (Envision)

1.A – Individuelle Visionen für QT in 2045

Im Folgenden sind fünf der in den gemischten Gruppen individuell entworfenen und von den Gruppenmitgliedern am besten bewerteten Visionen wiedergegeben. Diese fünf Visionen vereinen 45% der für alle 17 Visionen abgegebenen Stimmen auf sich.

Wissenschaft – 5 Stimmen

“20 years from now we all sit in some nice wooden armchairs still buzzing from the last quantum workshop in Karlsruhe. Sean Carrlo’s vision of everyone talking over dinner about quantum field theory has become true – at least as long as the people have connected via “Quantum Tinder – more random than wedding guest seating”.

Encryption has been solved as the US in the 2030s has established PQC standards while raising their power to a maximum. However, due to a highly improved education system, the expertise of Europe in developing quantum algorithms has improved the life quality of the majority. As the school system has been transformed in the future every child is equipped to help Europe back to being competitive and winning with every algorithm more ground. Thinking about the near future everyone smiles ... cheers!”

Wirtschaft und Industrie – 4 Stimmen

“Ria wakes up by the sound alarm clock noise. It gets louder and louder based on a pattern specifically calculated to match her waking-up signs like movements, pulse, skin temperature measured by the smart trackers integrated in her PJ’s. As an

effect she feels really motivated to get up and doesn't feel the need to snooze the alarm clock. The pattern is calculated by an AI assisted quantum computer in the backend of her clock's system that is linked to the sensors in her cloths. But Ria actually doesn't know this. She just bought the system because it was recommended to her by her doctor. After getting up, she used the cream, curated to her skin profile that she got in the local shop where she does a skin screen every 2 weeks and the recipe gets adjusted. The analysis is also done via a quantum computer in the backend which again Ria doesn't realize. Her bus is on time – because guess what-traffic flow is optimized by quantum. There are other products and services that use quantum in the backend, but to the ensures this is not visible. Ria know about quantum via art, education and media, but the full extent of how it is used by industry in products she consumes is something she is not consciously aware of."

Zivilgesellschaft – 7 Stimmen

"A still democratic Germany and Europe will have organized a process of embedding QT in society that has created widespread, realistic knowledge about the field in large segments of society. Germany and Europe will not be marginal bystanders or suppliers to other world regions in the global quantum information society, but have their own global players and a strong and diverse innovation landscape. QT will provide German and EU policy makers with new tools to base policy-making on large-scale data evidence. Quantum-technological progress will foster progress in such key areas as energy efficiency, clean tech and IT. Europe may lead new international activities to build novel trust architectures in international politics, in order to proactively mitigate possible disruptive effects of QT on cryptography."

Öff. Einrichtungen und Behörden – 4 Stimmen

"In twenty years: QT as both linear and disruptive technologies will have created income, wealth,

social security by advancing technological progress. In Europe it will have enabled progress in medical services, new materials and medication. It will have demystified the atomic level and enabled progress in sensors, computing, and communication, among others. It will have motivated young people to join STEM-related studies and will have helped (but not solved) to solve sustainability challenges, such as energy consumption. It will have stabilized democratic structures ensuring data safety. QT is four other technology of reason with new, however rational, structures. It will be by then "classical" technology like optoelectronics + microelectronics, today."

Kunst und Kultur – 3 Stimmen

"After overcoming the first obstacles of the quantum age, like the egoistic national use or the need for seldom minerals, the golden age of QA began. The leaders of the world understood that there was no need for a self-interest driven politics anymore, but that the new technology finally provided global wealth. Germany played a major role in this development to a golden global quantum age of peace and prosperity. By internationally sharing its results in new tech and peach philosophy on an open source base it was able to work with bright minds from everywhere to establish the major gains of QT. These are: (a) A global energy grid which enables cheaper renewable energy for everybody, anytime. (b) Better medical solutions through sensing tech and pharmaceuticals. (c) Global education proclaims to create a QT literacy. (d) Investments inter-cultural encounters to share cultural events with music, art, dances and empowering people to express themselves."

Aus der **Analyse aller 17 individuellen Visionen** sind thematische Parallelen und Stakeholder-spezifische Unterschiede erkennbar. Aus dem Abstimmungsverhalten wird deutlich, dass einzelne Visionen als deutlich wünschenswerter als andere angesehen werden (Top 5 mit 45% der Gesamtstimmen, untere 5 mit 9%).

Die Visionen unterscheiden sich in **Stil und Form**. Während einzelne Geschichten mit dezidiertem Witz (s. Wissenschaft) oder persönlichen Erfahrungen einer zukünftigen Person formuliert wurden (s. Wirtschaft und Industrie), fokussierten sich andere Teilnehmende auf eine neutrale Beschreibung der QT-Zukunft. Da sowohl die erzählerischen Visionen als auch die deskriptiven signifikante positive Bewertungen erhalten haben, erscheint der Stil jedoch als kein entscheidendes Kriterium für die Zustimmung zu den Visionen.

Der thematische Fokus unterscheidet sich zwischen den Visionen, wobei eine Entwicklung anhand der **Stakeholdergruppen** erkennbar ist. Während Teilnehmende der Wissenschaft einen gewissen Fokus auf Bildungsthemen und technische Anwendungen legen, verschiebt sich der Fokus für Teilnehmende der Wirtschaft und Industrie in Richtung technische Anwendung, Unternehmen und Marktaspekte. Personen der Zivilgesellschaft entwickelten hingegen Visionen mit einem breiteren Fokus, inkl. gesellschaftlicher Auswirkungen und politischer Entscheidungen, die mit Bildungsaspekten, Anwendungen und ökonomischer Fragen verbunden wurden. Möglicherweise erklärt dieser weitere Blick bereits die insgesamt größte Zustimmung zu Visionen der Zivilgesellschaft (18/51 Stimmen = 35%). Die Personen der öff. Einrichtungen und Behörden verbanden in ihren Visionen wissenschaftlichen Fortschritt in den QT sowie deren (industrielle) Anwendungen mit politisch-regulatorischen Entscheidungen auf verschiedenen Verwaltungsebenen. Die Teilnehmenden der Kunst und Kultur hingegen verbanden einzelne technische Entwicklungen mit möglichen Auswirkungen auf Kunst und Kultur, wobei hier oftmals die Rolle der Kunst als verbreitendes Medium für ein Verständnis und Akzeptanz der QT genannt wurde. Mit insgesamt nur sieben Stimmen (14%) wird hier bereits eine teilweise kritische Sicht der anderen Stakeholder auf Kunst und Kultur deutlich, die sich im Laufe des Workshops jedoch teilweise auflöste.

Inhaltlich gab es trotz dieser verschobenen Foki wenige klar divergierende Vorstellungen einer QT-

Zukunft, sondern vielmehr stark überlappende Vorstellungen. Es wird zunächst davon ausgegangen, dass Quantentechnologien in 2045 ausreichend entwickelt sein und einen breiten Einsatz finden werden. Da dies jedoch unter der Aufgabenstellung einer (positiven) Vision für QT folgerichtig sein muss, ist eher die **Form des Einsatzes von QT** interessant. QT werden als im Hintergrund agierend („*quantum in the backend*“), als technologische Entwicklung unterstützend („*advancing technological progress*“) und verstärkend („*enabling technologies will be seeing a boost of innovation*“) beschrieben. Dabei sollen sie „*linear und disruptiv*“ sein, was zu der Einschätzung von QT als „*normale Technologien*“ in 2045 passt. Diese Vision von QT als unterstützende, im Hintergrund agierende Technologien, wurde in den anschließenden Diskussionen mehrfach aufgegriffen und mit der Frage nach „*was macht QT besonders*“ verbunden.

In vielen Visionen werden konkrete **technische Entwicklungen** beschrieben. Diese beziehen sich dabei meist auf im Hintergrund agierende Quantencomputer, Quantensensoren in anderen technischen Geräten oder Verbindungen dieser, die bspw. verbesserte Analyse von körperlichen Daten sowie Optimierungen von bestimmten Prozessen ermöglichen („*calculated by an AI assisted quantum computer*“). Viele genannte Anwendungen entsprechen dabei heutigen Ideen oder sind eher lineare Fortschreibungen bekannter Entwicklungsrichtungen.

Die **Bereiche der Anwendung** bezieht sich in sehr vielen Visionen auf medizinische Möglichkeiten (in sieben Visionen vertreten) oder die Energieversorgung (neunmal), welche durchweg positive soziale, ökonomische und ökologische Veränderungen bringen sollen. Weiterhin wird mehrmals von einem verbesserten Verständnis des Universums oder der atomaren Ebene durch QT gesprochen. Davon abweichend wurde in einigen Fällen über Veränderungen im Kunst- und Kulturbereich berichtet („*art events*“, „*intercultural exchange*“).

Die sich aus der QT-Anwendung ergebenden positiven Auswirkungen werden in den meisten Fällen mit der Frage nach **Möglichkeiten für Deutschland und/oder Europa** verbunden. So nimmt Deutschland oftmals eine wichtige Rolle in der QT-Entwicklung („Germany, which was able to foster the development of QT“), der ökonomischen Verwertung („Germany emerges as a global leader, leveraging its early investment“) und der sozialen Integration von QT ein („Germany and Europe will have organized a process of embedding QT in society“). Praktisch alle Teilnehmenden wünschen sich hier eine aktive Rolle Deutschlands („Germany played a mayor role in this development to a golden global quantum age“) und Europas („Germany and Europe will not be marginal bystanders“), die in einer „europäischen Quanten-Ökonomie“ mündet. Dabei wird auch die Rolle Deutschlands und Europas in der Welt beleuchtet, die ausgleichend und Vertrauen aufbauend beschrieben wird („Europe may lead new international activities to build novel trust architectures in international politics“) und dabei Standards setzt („[the EU] policy agenda in quantum made it a key player in the global quantum industry“).

Erkennbare Unklarheiten bestehen hingegen in Bezug auf die genaue **Ausgestaltung der deutschen und europäischen Quanten-Ökonomie** und ihrer Wichtigkeit im globalen Ökosystem: Während einzelne auch Europa als Entwickler von Hardware sehen („This positioned EU as an indispensable player in the global Q- supply chain, which has been dominated by the large US tech firms“), wird mehrmals pessimistischer auf eine weiterhin bestehende Hardwareabhängigkeit von den USA hingewiesen („Main provider of hardware however will be US companies“). Einigkeit hingegen scheint es hier über die wichtige deutsche und europäische Rolle als Algorithmenentwickler zu geben („novel algorithmic approaches will be at hand, developed by German startups and

implemented into valuable software, sold to US corporals“; „Germany’s quantum algorithms revolutionize industries worldwide“).

Diese Ansichten decken sich mit weitreichenden positiven Entwicklungen zu **Bildung und Wissen**: die Bildung soll im Allgemeinen verbessert („highly improved education system“) und jedes Kind verbesserte Voraussetzungen erhalten („every child is equipped to help Europe back to being competitive“), welche auch durch eine Push durch die QT eintraten („The schools received a new push in STEM-education“). Das Wissen über QT hat dabei einen breiten Einzug in die Gesellschaft gefunden („society that has created widespread, realistic knowledge about [QT]“), was auch durch Kunst und Medien erfolgte („know about quantum via art, education and media“) und zu einer globalen „Quantum Literacy“ führte. All dies soll dadurch ein Vertrauen in die QT liefern („new solution, fostering trust and stability“) und auch Vertrauen in Wissenschaft und Politik stärken („increase trust in science and public authorities“).

Ein letzter, teils kontroverser Punkt ist der Blick auf die heutigen und zukünftigen **geopolitischen Verschiebungen**. Während einzelne wenige Teilnehmende von Monopolen durch QT sprechen („worldwide monopoly in a wide range of economic fields“), sich verstärkenden globalen Ungleichheiten benennen („quantum information colonialism“), oder Hardwareabhängigkeiten von den USA monieren, formulieren viele eine positive Vision aus verstärkter globaler Zusammenarbeit („global energy grid“), und „neuen Kollaborationen in F&E“, die in einer „Globalen Quanteninformationsgesellschaft“ münden. Interessant ist hier, dass insbesondere Akteure aus Kunst und Kultur den globalen, interdisziplinären und auf Open-Source beruhenden Charakter der QT hervorheben.

Tabelle 4.3: STEEP-C Aspekte mit höchstbewerteter Präferenz.

STEER-C Kategorie	Text	Präferenz	Plausibili- tät
Social	Positive Auswirkungen durch verbesserten Gesundheitstechnologien	12	6
Social	Bessere Instrumente für die Gesundheitsfürsorge, z. B. MRT	10	5
Technological	Ermöglichende (enabling) Technologien aller Art, z. B. Detektoren, Laser, Kryogenik	12	6
Technological	Mit QT wurde eine Lösung für die globale Verfügbarkeit erneuerbarer Energie gefunden	11	4
Economical	Deutschland nutzt das wirtschaftliche Potenzial und findet einen neuen Leitmarkt, z.B. anstelle der Automobilindustrie neue Wertschöpfung in Pharma, Werkstoffen	8	4
Economical	Steigerung der Effizienz des Vertriebs -> Senkung der Kosten	7	1
Ecological	Energieeinsparung durch Quantencomputing	11	3
Ecological	Cleantech gedeiht durch QT	10	4
Political	Globale Kooperationen konzentrieren sich auf die Forschung	15	2
Political	Internationale Bemühungen zur Aufspürung/Lokalisierung von mobilen (nuklearen + konventionellen) Waffenträgern. Je nach erwartetem/wahrscheinlichem Erfolg, Zunahme der Anzahl der Waffen, Diversifizierung. Bemühungen, in militärische Kommando-/Kontroll-/Kommunikationslinien einzudringen, je nach Erfolg, Bemühungen, diese sicher zu halten. Kommunikation: besserer Schutz der Privatsphäre für Bürger, Unternehmen – vielleicht weniger für staatliche Geheimdienste.	10	7
Cultural	Ein besseres Verständnis des Universums	10	6
Cultural	Kunst kann zu einem besseren Verständnis komplexer Prozesse beitragen	9	3
Other	Deutsche Bahn verbessert sich dank Quantentechnologien	12	0
Other	Etabliertes Quanten-Sci-Fi-Subgenre	4	2

1.B – Aspekte von QT-Visionen (STEER-C-Kategorisierung)

Neben den individuellen Visionen wurden Aspekte einer QT-Zukunft in gemischten Gruppen entworfen. Ein Ausschnitt dieser Aspekte, die anhand der STEER-C-Kategorien entworfen (*Social*, *Technological*, *Economical*, *Ecological*, *Political* und *Cultural* sowie *Other*) und anschließend auf ihre Präferenz und Plausibilität hin bewertet wurden, ist im Folgenden wiedergegeben.

Es wurden insgesamt 68 Aspekte mit folgender Verteilung entworfen: Social 10, Technological 10, Economical 10, Ecological 9, Political 12, Cultural 11,

Other 6. Die in der anschließenden Abstimmung am besten bewerteten Aspekte sind in Tabelle 4.3 und 4.4 dargestellt. Das summierte Abstimmungsverhalten ist in Abbildung 4.3 dargestellt.

Die **Analyse der STEER-C-Aspekte**, die in den Gruppen ausgearbeitet und anschließend von allen Teilnehmenden bewertet wurden, bestätigt viele Erkenntnisse der individuellen Visionen.

Mittels der STEER-C-Daten lassen sich besonders gut die Wünsche und Hoffnungen der Workshopeteilnehmenden von den erwarteten Entwicklungen unterscheiden, konsensfähige Szenarien identifizieren und Handlungsoptionen aufzeigen. So deutet ein

Tabelle 4.4: STEEP-C Aspekte mit höchstbewerteter Plausibilität.

STEER-C Kategorie	Text	Präferenz	Plausibilität
Social	QT erfordert neues Wissen in der Belegschaft (workforce)	3	8
Social	Instabilität aufgrund von Brüchen/neuen Krypto-Verbindungen	0	7
Technological	Ermöglichende (enabling) Technologien aller Art, z. B. Detektoren, Laser, Kryogenik	12	6
Technological	Neue Berechnungsansätze -> neue Software und Daten	8	6
Technological	Die Übertragung der Quantenwissenschaft in die Technik hat stattgefunden. Es gibt große, noch unbekannte Innovationen. "Immer wieder neue Dinge werden erfunden"	4	6
Technological	Verbesserte Informationstechnologie (Internet, Blockchain, Web 3)	1	6
Economical	Europa ist gut in Software, muss aber Hardware kaufen	4	10
Economical	Wenn es einen Quantensprung gibt und die europäischen/deutschen Akteure weiterhin marginal sind, wird der Quantensprung andere Akteure wie die USA (Big Five) und China (Big Four) weiter stärken.	0	9
Ecological	Mehr Energieverbrauch und QC für dumme Anwendungsfälle nutzen	2	6
Ecological	Globales Klima-Engineering/-Kontrolle	5	5
Political	Machtverschiebungen hin zu Technologieunternehmen; Technologieunternehmen als Governance-Akteure	0	10
Political	Umwälzungen und (möglicher Reset) der Geopolitik	0	9
Cultural	Ein besseres Verständnis des Universums	10	6
Cultural	Quantentechnologien schaffen neue Kunst und werden zum Weltkulturerbe	4	6
Cultural	Interesse an Wissenschaft und Technik, Verständnis und Wertschätzung für die Wissenschaft im Entstehen, großer Schub für MINT-Bildung, andere Ästhetik	5	6
Other	Etabliertes Quanten-Sci-Fi-Subgenre	4	2
Other	BitQoin (Ersetzt Bitcoin, da es abgestürzt ist (kein PQC))	2	2

Überwiegen von bewerteter Präferenz über Plausibilität auf ein wünschenswertes, aber unrealistisches Szenario hin, während ein umgekehrtes Abstimmungsverhalten wahrscheinliche, aber unerwünschte Zukünfte aufzeigt. Für Aspekte, deren Präferenz und Plausibilität groß sind, scheint es eine große, gewünschte Eintrittswahrscheinlichkeit zu geben, was wiederum die notwendigen (politischen) Handlungen einschränkt.

Wenn zunächst die Summe dieser Zahlen pro STEEP-C-Kategorie untersucht werden (Abbildung 4.3), so lässt sich bereits sagen, dass **ökologische Aspekte (E)** als gewünscht, aber weniger wahrscheinlich

angesehen werden. In bis auf zwei Fällen überwiegt die Präferenz über die Plausibilität, wobei alle eine Plausibilität über Null aufzeigen und damit nicht unwahrscheinlich sind. Insbesondere gedeihende Cleantechs (Präferenz 10: Plausibilität 4), Energieeinsparungen durch Quantencomputer (11:3) und bessere Vorhersagen des Klimawandels (9:4) stechen positiv heraus.

Kulturelle Aspekte (C) werden ebenfalls eher als wünschenswert eingeordnet. Hier wird vor allem ein besseres Verständnis des Universums (10:6) für gewünscht und wahrscheinlich eingeschätzt, wobei Kunst hier einen Beitrag zum Verstehen komplexer

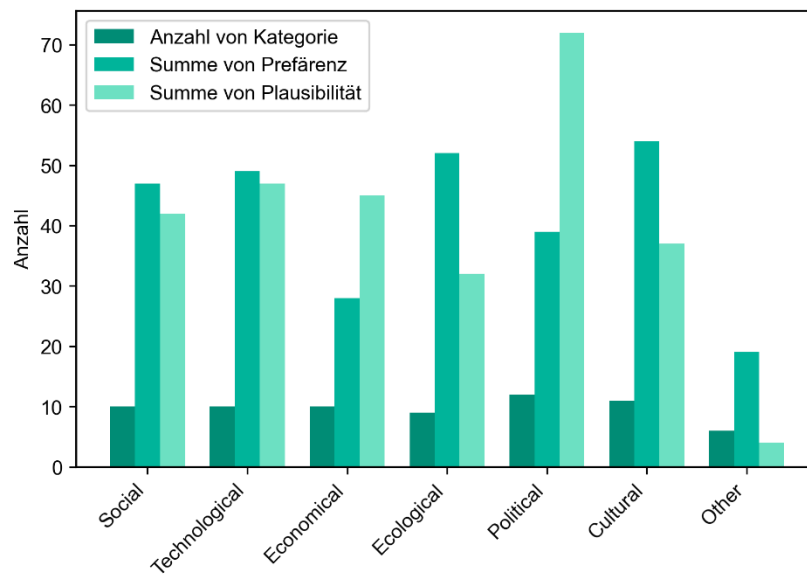


Abbildung 4.3: Summiertes Abstimmungsverhalten zu den STEEP-C Kategorien.

Prozesse leisten (9:2) und das Interesse an Wissenschaft und Technik stärken könnte (5:6). Vermutlich auch durch eine mehrfach genannte neue Quantenkunst.

Deutlich am wahrscheinlichsten erscheinen hingegen **politische Aspekte (P)**, wobei es sich dabei um eine Vielzahl an möglichen Negativszenarien handelt. Von den fünf wahrscheinlichsten Aspekten weist keines einen einzigen Punkt für Präferenz auf. Es handelt sich um Machtverschiebungen zu Technologieakteuren (0:10), negative geopolitischen Auswirkungen (0:9), Hacken bestehender Verschlüsselung durch einzelne Länder (0:8), Instabilität und Misstrauen durch Abhören und Waffen (0:8) und Online-Einfluss auf Wahlen (0:8). Auf der anderen Seite sehr positiv und teilweise realistisch werden internationale Bemühungen zur Waffenkontrolle (10:7), Stärkungen der europäischen Verbindungen (7:3) und globale Kooperationen genannt (15:2).

Die **ökonomischen Aspekte (E)** zeigen ebenfalls ein Ungleichgewicht hin zu weniger gewünschten, aber wahrscheinlichen Szenarien auf. Besonders groß scheint die Sorge vor einer amerikanischen Dominanz der QT zu sein (0:9), sowie einer Zugangskontrolle und Gewinnmaximierung von großen

Technologieunternehmen (0:8). Nicht durchweg positiv, aber wahrscheinlich wird eine starke Rolle Europas in der Software von Quantencomputern bewertet (4:10). Gewünscht und möglich ist, dass Deutschland sein wirtschaftliches Potenzial nutzt und neue Absatzmärkte erreicht (8:4) und als eine Utopie kann das gleichmäßige Nutzen von QT durch alle Länder der Welt angesehen werden (6:0).

Die **technologischen Aspekte (T)** wurden ausgeglichen bewertet und erscheinen damit in Summe gewünscht und wahrscheinlich. Bei genauerem Hinschauen werden jedoch manche als eher favorisiert, aber unwahrscheinlich angesehen – Optimierung des Energieverbrauchs (10:5) und der Energieverfügbarkeit (11:4), und neue technischen Geräte wie Laser (12:6) – und andere als wahrscheinlich, aber eher unerwünscht – verbesserte Informationstechnologie wie Internet und Blockchain (1:6). Einig scheinen sich alle zu sein, dass der Einsatz von QT in anderen Technologien in 2045 stattgefunden hat.

Die Entwicklungen im **sozialen Bereich (S)** sind insgesamt eher ausgeglichen und weniger kontrovers. Die Relevanz des MINT-Bereichs steigt durch QT (5:3) und insbesondere die Gesundheitsversorgung wird sich durch QT verbessern (10:5 und 12:6, 3:2). Auch

hier besteht Sorge vor Nachteilen durch Knacken der Verschlüsselung (0:7) und die Hoffnung, dass QT ein besseres wissenschaftliches Verständnis auslösen werden (7:1).

Abschließend sei auf die weitere Kategorie **Anderes (Other)** verwiesen, in dem neben technischen Spielereien wie SpaceQ, BitQoin und einem Quantum-Sci-Fi-Genre vor allem die Hoffnung auf eine verbesserte Deutsche Bahn durch QT heraussticht (12:0). Dies mag jedoch eher den Verdruss über den Status Quo als beschreiben.

1.C – Generieren einer gemeinsamen QT-Vision

Aus den gewichteten individuellen Visionen, den bewerteten STEEP-C-Aspekten sowie den der anschließenden Diskussion wurde im Anschluss vom Projektteam eine gemeinsame Vision entworfen. Diese sollte alle aufgetretenen wichtigen Aspekte beinhalten und von allen Workshopeteilnehmenden als mögliche QT-Zukunft in Deutschland und Europa im Jahr 2045 akzeptiert werden können. Es handelt sich somit um einen Kompromiss, für den im Anschluss vergleichbare politische Handlungsempfehlungen abgeleitet werden konnten.

Diese **gemeinsame Vision** lautet:

“We are in 2045. Quantum technologies work! New technologies, like Quantum Computing and Sensing, are an additional available backend. As an invisible but important infrastructure, it has changed industries and optimized different sectors, leading to among others an efficiency increase in various fields. As an enabling technology, it is also followed by new applications...”

Further, these technological advancements have also led to environmental, cultural and social changes. Not only on the national but also on the global scale.

The pioneers of the field, i.e. the companies and countries that supported the development and research early on, are now harvesting the fruits of their efforts.”

Die in der Vision enthaltenen Aspekte spiegeln die Ergebnisse der vorherigen Abschnitte wider. So sind QT in 2045 ausreichend für einen Einsatz entwickelt, agieren jedoch unterstützend für andere Technologien und allgemein eher im Hintergrund. Die in Diskussionen immer wieder aufkommende Fragen nach „dem Spezifischen“ von QT, nach „Unterschieden zu anderen (disruptiven) Technologien“, welche mögliche „philosophische Folgen“ nach sich ziehen könnten, konnte nicht beantwortet werden. Auch wenn eine Person den Vergleich zog, dass Quantencomputer eventuell ähnliche Veränderungen im Vergleich zum klassischen Computer liefern könnte, wie ein Laser zur Glühbirne lieferte, so konnte die Frage nach eindeutigen, durchschlagenden Veränderungen nicht beantwortet werden. Vielmehr seien QT nicht-disruptive langweilige Technologien („*boring technology*“), die einen „Boost“ für andere Technologien geben könnten. Passend erscheint hier der Kommentar „*maybe QT are not special, but the things they are developing are special*“. Dies könnte eine andere Formulierung für das disruptive Potential von QT geben.

In Bezug auf konkrete Anwendungsfelder von QT gab es hingegen klarere, konsensfähige Antworten: Verbesserungen und Effizienzsteigerungen in Gesundheit- und Energiebereichen wird allgemein erwartet und gewünscht. Die konkreten Auswirkungen auf Umwelt und Gesellschaft hingegen waren eher unklar bzw. kontrovers und wurden von den Stakeholdern unterschiedlich eingeschätzt, weshalb die gemeinsame Vision hier vage verblieb.

Klare Übereinkunft gab es in Bezug auf die Marktmacht und Relevanz zukünftiger QT-Akteure. Heute bereits aktive Akteure würden in Zukunft die Anwendungsmöglichkeiten wie Effizienzsteigerungen in einer Vielzahl an Bereichen monetarisieren und sich einen deutlichen Marktvorteil schaffen. Hier wurde ausdrücklich die Sorge vor einer Abhängigkeit von nicht-europäischen Akteuren geäußert sowie die zu geringen privaten Investitionen und eine fehlende Fehlerkultur moniert.

Weiterführende, nicht in der Vision eingehende Fragen sind die Auswirkungen der Geopolitik und Deutschlands/Europas Rolle in dieser, die Fragen nach Breite und Tiefe der Bildung („we don't need a whole society to understand QT“ vs „you need to have people to touch it [to understand and trust it]“), sowie der zentralen Frage nach wer die zukünftige Quanten-Hardware herstellen wird. Hier reichten die Aussagen von „was heißt das Hardware-Rennen gewinnen überhaupt?“ bis „wir brauchen ein VW/SAP der QT in Deutschland“.

1.D – Stakeholder-spezifische Anpassungen der gemeinsamen Vision

Da die gemeinsame Vision von manchen Teilnehmenden als zu unspezifisch angesehen wurde, wurden Erweiterungen um bis zu fünf Aspekte pro Stakeholdergruppe zugelassen. Diese bildeten jeweils zusammen mit der gemeinsamen Vision das Zielbild für den Abschnitt 2 – Reflection.

Wissenschaft

„Es erfolgte bis 2045 zusätzlich ein Push für MINT-Bildung als Grundlage für QT-Spezialisten. Die öffentliche Forschung wird möglichst open-source gestaltet und wichtiges QT-Wissen ist weiterhin öffentlich verfügbar. Quantencomputer haben über die Anwendungen hinaus ein weitreichendes Verständnis des Universums geliefert. Über wissenschaftliche Kooperationen wurde die europäische Zusammenarbeit gestärkt und enabling technologies haben eine Wertschöpfungskette über ganz Europa geschaffen.“

Wirtschaft und Industrie

„Deutsche Unternehmen entwickeln Hardware und Software und generieren so neue Märkte, welche sich durch passende Regulierungen entwickeln konnten. Die Industrie behält dabei die IP und unterhält eine starke Verbindungen zu politischen Entscheidungsträger:innen. Eine starke und unabhängige Wertschöpfungskette konnte sich entwickeln, die Deutschland unabhängig von äußeren

Einflüssen macht. Die Bevölkerung nimmt an diesem Wachstum teil und die MINT-Bildung weitet sich aus. Energie wird durch eine effizientere Erzeugung frei zugänglich und optimierte Preisvorhersagen durch QT verbessern Businessentscheidungen.“

Zivilgesellschaft

„Anwendungen in erneuerbaren Energien, Gesundheitstechnologien und enabling technologies werden ermöglicht und führen bspw. zu einem geringeren Energieverbrauch. QT stärken die Verbindungen innerhalb Europas und weltweit und ein Push für MINT-Fächer geschieht. Gleichzeitig werden problematische militärische Anwendungsfälle international limitiert.“

Öff. Einrichtungen und Behörden

„QT führen zentral für neue industrielle Innovationen. Starke KMUs in Europa sind dabei das Rückgrat der neuen Industrie, die aufgrund globalen Wertschöpfungsketten und gegenseitigem Vertrauen floriert. Viele Anwendungsbereiche profitieren von QT und bilden ein reichhaltiges Ökosystem. Öffentliche Förderung führte zu einer Vielzahl industrieller Anwendungen im Gesundheitsbereich, der Energieversorgung und Materialien, sowie einer gut ausgebildeten Arbeitnehmerschaft.“

Kunst und Kultur

„In 2045 wird eine globale Quanten-Kunst-Bewegung etabliert sein. Diese Kunst sorgt für ein besseres Verständnis von komplexen Prozessen und wird als eigenes Kulturgut etabliert. Durch eine verbreitete QT-Bildung werden Kunst-generierende Prozesse ein üblicher Weg eines bi-direktionalen Austausches zwischen Wissenschaft und Gesellschaft, die letztlich in einem besseren gesellschaftlichen Verständnis des Universums mündet.“

Zusammenfassend konnte eine gemeinsame, wünschenswerte Vision für QT im Jahr 2045 in Deutschland und Europa entwickelt werden, deren große Linien aufgrund von ähnlichen Sichtweisen der Teilnehmenden für alle konsensfähig war. Alle

imaginieren eine Zukunft, in denen die QT funktionieren und breiten Einsatz finden. Es wird davon ausgegangen, dass QT dabei eher unterstützend für andere Technologien fungieren, im Hintergrund eingesetzt werden und keine besondere öffentliche Auffälligkeit zeigen. Obwohl sie dadurch eher „boring“ wirkten, würden sie viele Anwendungsbereiche beeinflussen. Insbesondere der Gesundheitsbereich, die Materialwissenschaften und die Energiewirtschaft würden neue Möglichkeiten hervorbringen. Viele Teilnehmende wünschten sich explizit, dass QT die Energie nachhaltiger, breiter verfügbar und eventuell sogar kostenlos machen würden. Weiterhin gehen viele von einem verbesserten Verständnis des Universums aus, ob durch direkte QT-Anwendungen oder die Beschäftigung mit den QT. Verbunden damit wünschen sich viele einen Push für die MINT-Bildung, welche die gestiegene Nachfrage nach ausgebildeten Arbeitskräften für QT decken würden. Die Gesellschaft wird dabei auch über künstlerische Elemente von den Entwicklungen informiert werden, erlange dadurch ein besseres Verständnis von komplexen Prozessen und intensiviere den Austausch mit der Wissenschaft.

Neben diesen durchweg positiven Elementen, zeigten die Visionen und Antworten jedoch auch Sorgen vor Auswirkungen durch QT-Anwendungen, QT-Märkte bzw. allgemeine geopolitische Veränderungen. Es bestand die Sorge, dass QT sicherheitspolitische Probleme durch das Hacken bestehender Verschlüsselungen bringen könnten. Die Antworten darauf – Open Source, Verbreitung von PQC und internationale Kooperationen – wurden als wünschenswert, aber nicht so wahrscheinlich angesehen. Auch wurde allgemein eher von Machtverschiebung hin zu amerikanischen (Groß-)Unternehmen ausgegangen, die den QT-Markt kontrollieren und den Status Quo aus europäischen Abhängigkeiten von US-IT-Unternehmen verstärken könnten. Hier entwickelte sich einer der zentralen Diskussionspunkte: Können „wir“ das „Hardware-Rennen“ in den QT, insb. im Quantencomputing „gewinnen“? Über alle Aspekte dieser Aussage konnte kein Konsens gefunden werden.

Während die Teilnehmenden der Wirtschaft und Industrie explizit eine in Deutschland entwickelte QT-Hardware und -Software imaginieren, wurde von den anderen Teilnehmenden eine vollständige europäische Wertschöpfungskette gewünscht. Auch eine komplett globale Wertschöpfungskette, mit starken europäischen KMUs in dieser, war eine Vision. Diese wirtschaftlich-politischen Gedanken waren außerdem überlagert von einem sorgenvollen Blick auf aktuelle (Ende Januar 2025) geopolitische Entwicklungen. Abhängigkeiten müssten deshalb auf der einen Seite reduziert, jedoch gleichzeitig der Kontakt zu außereuropäischen Akteuren durch wissenschaftlichen Austausch und Märkte erhalten bleiben.

Abschließend lässt sich sagen, dass eine konsensfähige Lösung in passender Regulierung, Förderung und europäischer Integration der QT liege, wobei die genauere Ausgestaltung im zweiten Teil des Workshops „Reflection“ gefunden werden sollte.

4.4.2 Herleitung politischer Handlungsempfehlungen (Reflection)

2.A – Stakeholder-Mapping

Das Stakeholder-Mapping diente zum Identifizieren der zu zentralen Akteure, welche die angepasste gemeinsame Vision realisieren sollten. Die Relevanz der jeweiligen Akteure wurde über die Anordnung im äußeren (geringe Relevanz = 1), mittleren (mittlere Relevanz = 2) und inneren Ring (hohe Relevanz = 3) bestimmt. Die Ergebnisse der Stakeholdergruppe *öff. Einrichtungen und Behörden* ist in Abbildung 4.4 exemplarisch dargestellt.

Insgesamt wurden von den fünf Stakeholdergruppen 120 Stakeholder identifiziert (21 von Wissenschaft, 33 von Wirtschaft und Industrie, 22 von Zivilgesellschaft, 16 von öff. Einrichtungen und Behörden, und 28 von Kunst & Kultur). Am meisten Akteure wurden aus der Wirtschaft und Industrie genannt (39 der gesamten 120 Akteure). Die anderen Stakeholdergruppen haben mit 17 bis 24 Akteuren eine ähnliche Verteilung, womit alle Gruppen eine gewisse Häufigkeit

aufzeigen. Die durchschnittliche Relevanz ist für Akteure aus Kunst und Kultur (2,2) und öff. Einrichtungen und Behörden am größten (2,2), wobei der Unterschied zu der am geringsten bewerteten Gruppe der Zivilgesellschaft (1,8) klein ausfällt.

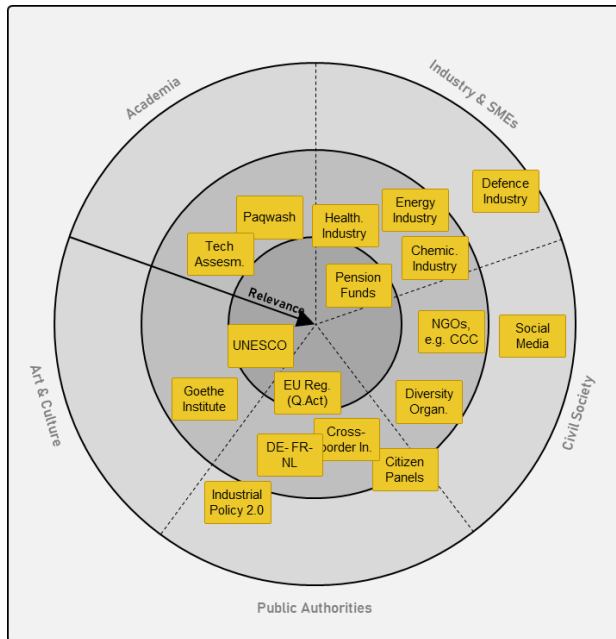


Abbildung 4.4: Stakeholder-Map der öffentlichen Einrichtungen und Behörden.

Die einzelnen 120 Stakeholder wurden anschließend thematisch geclustert und verglichen. Es stechen Universitäten/Forschende mit einer durchschnittlichen Relevanz von 2,8 bei fünf Nennungen heraus, was die aktuellen Entwicklungsstand der QT als weiterhin forschungsgetrieben unterstreicht. Als ähnlich relevant werden Akteure der Wissenschaftskommunikation (2,7 bei sechs Nennungen) sowie Museen eingeschätzt (2,3 bei 4 Nennungen), womit das bisher noch fehlende breite Verständnis von QT in der Gesellschaft deutlich wird. Verschiedene deutsche Ministerien (2,6 bei 5 Nennungen), die EU-Administration (2,5 bei zwei Nennungen), öff. Fördereinrichtungen wie die DFG (2,5 bei zwei Nennungen) sowie Investoren wie Pensionsfonds (2,4 bei sieben Nennungen) zeigen die Wichtigkeit von regulatorischen, unterstützenden und fördernden Beiträgen. Auffällig ist, dass außer Basistechnologien (Enabling Tech.) (2,7 bei drei Nennungen) keine industriespezifischen

Akteure als ähnlich zentral bewertet werden (Relevanz > 2,0, Nennung >1) und auch Akteure der Zivilgesellschaft weniger Relevanz zugeordnet wird. Zum heutigen Zeitpunkt scheinen vor allem Forschende, öff. Einrichtungen und Behörden sowie Förder-/ und Finanzierungseinrichtungen zentrale Akteure zu sein.

2.B – Backcasting

Im nächsten Schritt wurden in den Stakeholdergruppen zentrale Ereignisse und Aktionen zum Erreichen der Visionen für QT in Deutschland und Europa in 2045 identifiziert. Ausgehend von der angepassten gemeinsamen Vision wurde zeitlich rückwärts überlegt, welche Ereignisse nötig seien, um die finale Vision zu erreichen. Die Ereignisse wurden dabei jeweils einer der fünf Stakeholdergruppen zugeordnet und farblich markiert. In Abbildung 4.5 sind die Ergebnisse der Gruppen öff. Einrichtungen und Behörden sowie der Kunst & Kultur zu sehen.

Eine gekürzte Version der Vorstellung des Backcasting der **öff. Einrichtungen und Behörden** ist im Folgenden abgedruckt.

*“Our scenario until 2045 is a **pretty optimistic scenario for Europe.***

The academia supports the entire process as we come from a very high standard anyway. Industry is able to thrive, grow over the years. Civil society enables all these developments because there is more trust and a way to collaborate globally. [...] For example, America, European Union and China as Ireland's operating the public authorities basically are able to pull off something that you'd call Industrial Policy 2.0.

And the art and culture is able to support the sentiment of broad sentiment in society that is positive towards what quantum can do. [...] there's a couple of light, interesting art and culture projects, such as a quantum light festival, [...] traveling roadshow all over the world. [...] it sort of generates a lot of attention as something that really, creates a baseline

*You have the European Innovation Council that has a significant increase for **deep tech investments**. That is something that is embraced by all the member states. [...] At the same time, there are trilateral Project between France, Germany and the Netherlands, which already exists, but these are being deepened and increased so that you don't have to wait for the entire European Union to do one. [...] At the same time, you have European processes such as the **Quantum Act**, for example, we're now in*

2033, which is not necessarily only regulation, but it's also something that reflects the idea of industrial policy, where do we want to go with this? And not only how do we want to regulate it? [...] And it also goes hand in hand with the fact that the European Union Quantum Standards, Industrial Standards Task Force is being ended by the time 2037. And that is just before, if you look at the industry up here. The first quantum advantage in 2038. And that is basically the starting point of a lot of developments in the industry where energy grid demand startups become a unicorn. You have fertilizer production that improves by 50% thanks to quantum simulation. You have a great battery technology

made in Germany. Ranking top one in the world is really creating this new **ecosystem of quantum enabled technology sectors** that are visible and successful in Europe in the rest of the world.

One of the things that we see very early on in our scenario is, that the **pension funds**, spend 1% on deep tech in general. That really drives the industry growth. And there's a lot of nothing in here. [...] This is going to drive itself pretty much if you have such a major trigger here early on, for example 2028. This would make a major difference and will **basically create a market push**. So, you don't need a lot of public authority interference in that sense. You need the facilitation of the public authorities rather than the money.

One of the things we think is critical is the **ratio of women, the diversity in the quantum sector**. We're seeing in 2030, 20% already in the quantum education. That's up by more than double as we come from 2025. And all the way in the back 2040, we end up with about 50% of women in the quantum education.

At the same time, you see things like **Paqwash**, [...] the idea is that you have major summits bringing together quantum experts that work on going to use for quantum meeting internationally and exchanging knowledge, which is very different to where we are in 2025. So, you see that there is increase in trust, not necessarily on the political level, but on the academic level. [...] So, we have channels that create global collaboration opportunities, not necessarily on the highest TRL levels, but on fundamental science, on the milestones that are needed for quantum sensing, for quantum communications, and for quantum computing.

In the academia, the **tech assessments**, being a steady force throughout, [...] What does this technology do? How do we benefit as a society and really trying to think through where do we want to go over the next ten, 20 years? [...] [This includes a] fully functional UN office for Tech Assessments. We

really think that in this scenario you have found a way to integrate the thinking about what happens if this technology hits the markets, hits the societies. How do we deal with this? How do we anticipate and how do we agree internationally on what we think about these things? So, it has a bit to do with the ethics. It has also a little bit to do with the regulation of the quantum act, but it has something that is on a global scale that enables the channel of discussion and again, creates more trust across the different countries and the different quantum clusters and the different verticals where quantum is being used.

And I think that's key in the scenario that you really have an **industry push**. In the one hand, you have a trusted system of international collaboration, even though not everything is possible even in this scenario. And you have a very proactive public authority sector where you have a vision and an ambition That is maybe not super detailed, but it's very clear in terms of direction.

In 2035, the **Chaos Computer Club** publishes its first annual report on quantum use in the military in European nations. That is something that represents the argument of trust. It's the ultimate proof of transparency. If you have an NGO such as Computer Club being asked by authorities, for example, by the Bundestag, to report on how quantum is being used in the military, that is pretty much the gold standard of transparency. So, you can think about different ways how this could end up. But I think something like this also belongs in the scenario, because if you don't include civil society and critical voices in a meaningful way, you're not going to end up where we want to be. And that's a thriving quantum economy in Europe."

Die Beschreibung des Backcasting der Kunst & Kultur lässt sich über folgende Aspekte zusammenfassen: Der Fokus der QT-Vision liegt klar auf dem Sektor **Kunst und Kultur**, welcher heute einen breiten Push von allen Stakeholdergruppen bekommt und sich anschließend selbstständig entwickelt. Mit dem Ziel

einer Zukunft, in der alle QT verstehen und einbauen, ist die Kunst ein Treiber dieser Entwicklung. Dazu müssen Stakeholder wie Stiftungen (Zivilgesellschaft), Medienunternehmen (Wirtschaft und Industrie, Zivilgesellschaft), Investoren, Start-ups (Wirtschaft und Industrie) und Kunstförderung (öff. Einrichtungen und Behörden) zeitnah aktiv werden, damit sich zwischen 2025 und 2030 eine Quanten-Kunst-Szene mit Quantum-Art Kurator:innen, Start-ups, Arts & Industry Co-Labs entwickeln kann. Das diese Kunst aufgreifende „*fröhliche Publikum*“ sorgt für ein Verbreiten des Wissens über QT und ein intuitives Verstehen von QT. Münden wird diese Vision in einer Quanten-Kunst-Bewegung in 2040.

Das Backcasting der anderen Stakeholder wird im Folgenden jeweils zusammengefasst:

Für die Teilnehmenden der **Wissenschaft** lag auf dem Weg zur QT-Vision in 2045 ein großer Fokus auf Forschenden und dem Nachwuchs. MINT-Bildung müsste ausgebaut, der Übergang in den QT-Arbeitsmarkt gestärkt und das Bildungssystem reformiert werden. Der Austausch zwischen Forschenden sollte über Hubs und Cluster gestärkt und eine langfristige Strategie für diese entwickelt werden. Open Source sollte stets einen großen Anteil haben und auch Kunst mit einbezogen werden.

Das Backcasting der Teilnehmenden aus **Wirtschaft und Industrie** war sehr ausdifferenziert und mit vielen technologischen Einzelschritten versehen. So sollte zeitnah die Fehlerkorrektur von Quantencomputern erreicht werden, die Algorithmenentwicklung und Miniaturisierung bis 2030 geschehen, Anfang der 2030er das Benchmarking abgeschlossen und später Remoteaccess und Benutzeroberflächen geschaffen werden. Mehrfach wurde auf die Energienutzung und -einsparung verwiesen. Investitionen in QT sollten früh, priorisiert und in Kombination aus öffentlichen und privaten Mitteln geschehen. Die

Wissenschaft habe früh einen gewichtigen Anteil an der QT-Entwicklung, später sei sie jedoch weniger relevant. Den öffentlichen Akteuren wurde insbesondere die Rolle, Richtlinien zu entwickeln, zugewiesen, wobei explizit nicht überreguliert werden solle. D.h. die Förderung solle hoch bleiben, Standards müssten früh gesetzt werden und später Zertifizierungen vorgenommen werden – all das in enger Absprache mit der Industrie. Der Kunst wurde keine wirkliche Rolle in der QT-Entwicklung zugesprochen.

Die Teilnehmenden der **Zivilgesellschaft** verzichteten auf eine zeitliche Einordnung, da die notwendigen Schritte parallel ablaufen müssten. Hier stünden für die Wissenschaft weiterhin Forschung, MINT-Bildung und Austausch im Vordergrund; die Industrie solle Anwendungen im Bereich Energie, Gesundheit und High Performance Computing entwickeln; und die öff. Einrichtungen und Behörden Standards setzen, Benchmarks prüfen, und Grundlagenforschung sowie Lösungen für erneuerbare Energien fördern. Es wurde dazu eine neue Version eines Quantum Flagships imaginiert. Die Kunst und Kultur wiederum solle als verbindendes Element Menschen unterschiedlicher Hintergründe zusammenbringen, neue Menschen auf die QT aufmerksam machen und QT und Wissenschaft „*cool machen*“.

2.C – Politische Handlungsempfehlungen

Der finale Schritt des Workshops bestand daraus Engstellen und kritische Punkte im Backcasting zu erkennen und Handlungsempfehlungen zu entwickeln, wie die Politik einzelne Akteure unterstützen könnte, diese Engstellen zu entschärfen. Von jeder Stakeholdergruppe wurden fünf solche Engstellen (Problembeschreibungen) identifiziert und Handlungsempfehlungen für konkrete Adressaten entworfen. Die ins Deutsche übersetzten Ergebnisse sind in Tabelle 4.5 gelistet.

Tabelle 4.5: Politische Handlungsempfehlungen der verschiedenen Stakeholdergruppen, aus dem Englischen übersetzt.

Stakeholder- gruppe	Problembeschreibung	Adressat	Handlungsempfehlungen
<i>Wissenschaft</i>	Öffentlich finanzierte F&E-Stellen an Universitäten sind nicht attraktiv genug	Bundesländer	Bessere Entlohnung, Arbeitsbedingungen, mehr Flexibilität für die Zusammenarbeit mit der Industrie
<i>Wissenschaft</i>	MINT-Bildung ist nicht von hoher Qualität	BMBF + Länder	Qualitätsstandards für MINT-Fächer, Ausweitung der Studienprogramme
<i>Wissenschaft</i>	Der formelle und informelle Austausch in der Forschungsgemeinschaft wird durch das geopolitische Klima eingeschränkt	Politische Entscheidungsträger, EU	Keine Überregulierung, z. B. Exportkontrollen
<i>Wissenschaft</i>	Die Forschungslandschaft ist fragmentiert	Intern. und nationale politische Entscheidungsträger	Aufbau von Knotenpunkten und zentralen Clustern
<i>Wissenschaft</i>	Geringe Wissensbasis außerhalb des akademischen Bereichs (Bewusstsein)	BMWK	Wissenstransfer, z. B. Basisschulungen für Endnutzer
<i>Wirtschaft und Industrie</i>	Kunst und Kultur sowie die Zivilgesellschaft sind beleidigt, weil sie nicht zu unseren Prioritäten für 2025-2035 gehören	Behörde/Akademie	Sie sollten Kunst und Gesellschaft finanzieren, weil die Industrie im Moment kein Geld in diese Bereiche investieren wird -> private (reiche Leute) Investoren. Die Teile der Industrie, die Kunst, niedrigere Bildungsabschlüsse usw. finanzieren werden, sind Anbieter wie QC-Hardware. Zuerst sind es Anbieter wie QC-Hardware, nicht die Endverbraucherindustrie.
<i>Wirtschaft und Industrie</i>	Zielkonflikt in Bezug auf geistiges Eigentum (IP) mit der akademischen Welt	Wissenschaft/Behörden	Frameworks für IP in Kooperationen
<i>Wirtschaft und Industrie</i>	Kluft zwischen Spielzeugbeispielen und realen Anwendungsfällen	Wissenschaft/Behörden	Rahmen für Datenspende und Datenschutz in Anwendungsfällen
<i>Wirtschaft und Industrie</i>	(Wieder-)Investition von Geldern aus der Industrie/privaten Einkünften in die akademische Forschung (einschließlich Industriepraktika, Sponsoring, Mittel für Universitätsanteile)	Behörde/Industrie	Regeln für die Zahlung nach x Jahren einfügen, wenn die Forschung erfolgreich ist
<i>Wirtschaft und Industrie</i>	wir haben nicht genügend private Mittel, z. B. aus Pensionsfonds, weil sie blockiert sind	staatliche Behörden	die Beschränkungen für Investitionen der Pensionsfonds zu verringern
<i>Zivilgesellschaft</i>	Woher kommt in Zukunft eine verlässliche Finanzierung?	Öffentliche Behörden, Zivilgesellschaft (Stiftungen)	Ermutigung von Stiftungen und Risikokapitalgebern zur Beteiligung. Fortsetzung der

			öffentlichen Finanzierung. Finanzierungszeiträume verlängern
<i>Zivilgesellschaft</i>	Waffenstillstand, Risiken/Gefahren für die internationale Sicherheit	Regierung(en), Forschungsförderungseinrichtungen	Stärkung der Bewertung von Militärtechnologie und der Forschung zur präventiven Rüstungskontrolle. Stärkung der Wissenschaftlergewerkschaften
<i>Zivilgesellschaft</i>	Unbegrenzter und unnötig hoher Energieverbrauch von QT (insbesondere QC) (unterstützt Cleantech + Health Tech)	Öffentliche Behörden, Hochschulen, Industrie	Finanzierung von Forschung zu offenen Fragen. Unterstützung der Einführung von Benchmarking und Forderung nach transparenten Standards (einschließlich des aktuellen Stands der Technik) (IEEE P3329). Unterstützung der Integration von HPC-Zentren, um die Entwicklung energieeffizienter Compiler zu motivieren, die zwischen GPU und QPU abrechnen. Auch Kohlenstoffpreise
<i>Zivilgesellschaft</i>	Wissenstransfer	Kunst/Kultur, Medien, Schule/Bildungseinrichtungen, Behörden, Wissenschaft, Stiftungen	Erleichterung der Interdisziplinarität und diverser Gremien zu verschiedenen Themen. Aufrechterhaltung einer vielfältigen Medienlandschaft. MINT-Einrichtungen/Studentenprogramme fördern/finanzieren. Finanzierung von Disseminationsinitiativen. Breite Öffentlichkeiten/Bürgerpanels
<i>Zivilgesellschaft</i>	Zugänglichkeit und Förderung des vorhandenen Materials, um neue Zielgruppen zu erreichen	alle	Mehr Integration zwischen Wissenschaftskommunikatoren, Kuratoren, Designern und Marketing
<i>öff. Einrichtungen und Behörden</i>	Mangelndes Vertrauen der Öffentlichkeit in neue Technologien als „Nutzer“	Behörden, EU + Mitgliedsstaaten	Öffentliche Beschaffung von Start-up-Angeboten und Sandkästen (= Innovation in der öffentlichen Verwaltung) mit den Schwerpunkten (1) Energie und Klima, (2) Gesundheitswesen, (3) Materialien und Chemie
<i>öff. Einrichtungen und Behörden</i>	Talentproblem/Brain Drain von der akademischen Welt zur Industrie	Behörden, Mitgliedsstaaten, Provinzen, Universitäten	Verbesserung der Arbeitsbedingungen für Forscher: (1) Verträge, (2) Einrichtungen, (3) Einbeziehung von Open-Source-Formaten
<i>öff. Einrichtungen und Behörden</i>	Fehlende Anreize für Pensionsfonds, in Deeptech/Quantum zu investieren	Öffentliche Behörden, nationale Regierungen + EU	Gesetzliche Verpflichtung für Pensionsfonds, mindestens 1 % in Deeptech in Europa zu investieren
<i>öff. Einrichtungen und Behörden</i>	Lücken in den Lieferketten der QT	Öffentliche Behörden, nationale Regierungen + EU	Ermöglichung kreativer Wege, um festgestellte Lücken in den Lieferketten zu schließen: (1) ausgewählte Finanzierung, (2) Ausnahmen von den Vorschriften für staatliche Beihilfen

<i>öff. Einrichtungen und Behörden</i>	Quantenvisionen beschränken sich oft auf Computer und Sensorik. Die EU ist weltweit führend in der Quantenkommunikation und sollte dies fest in die Gesamtvision integrieren.	Öffentliche Behörden, nationale Behörden, die sich mit Quantenfragen beschäftigen	Stärkung der Position der Quantenkommunikationstechnologie als eine der Stärken der EU und der gesamten Quanten-KMU-Landschaft
<i>Kunst & Kultur</i>	Kein Bewusstsein für die große Kraft der Kreativwirtschaft	Industrie und Wissenschaft	Stärkere Kommunikation und Lobbybildung der Kreativwirtschaft, Denken über den Tellerrand hinaus
<i>Kunst & Kultur</i>	„Kunst ist nicht notwendig“	Industrie und Wissenschaft	Sehen Sie die Kunst als eine attraktive Landkarte, um die Attraktivität der EU zu vermitteln. Stil, Freiheit, futuristisches Aussehen (siehe Shanghai Skyline)
<i>Kunst & Kultur</i>	Instrumentalisierung der Kunst. Kunst als Dienstleistung	Akademien und öffentliche Behörden	Einladen von Künstlern zu Veranstaltungen, bei denen die Stakeholder zusammenkommen. Künstler Teil des Prozesses sein lassen.
<i>Kunst & Kultur</i>	„Kunst ist nirgendwo“. Viele Leute denken, sie konsumieren keine Kunst	Alle	„Kunst ist überall“! Film, Bücher, Spiele, Theater, Museen, Design, Grafik. Brücken zur Wissenschaft bauen und reden
<i>Kunst & Kultur</i>	Kunst wird nicht ernst genommen	Industrie, Hochschulen, öffentliche Behörden	Kunst kann helfen, Wissenschaft zu vermitteln und zu erklären, kann helfen, Gründer zu überzeugen, kann neue Einsichten und Perspektiven vermitteln. Sie kann komplexe Themen auf attraktive Weise vermitteln.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die angepassten Visionen der Stakeholder einer QT-Zukunft in Deutschland und Europa im Jahr 2045 zwar recht ähnlich waren, auf dem Weg zum Erreichen dieser, jedoch sehr verschiedene Wege herausgearbeitet wurden. Während die Teilnehmenden der Wissenschaft, die der Wirtschaft und Industrie, und die aus Kunst & Kultur sich auf ihnen naheliegende Akteure fokussierten, wiesen die Teilnehmenden der Zivilgesellschaft und der öff. Einrichtungen und Behörden einen etwas breiteren Blick auf. Dies mag auf die Heterogenität der Teilnehmenden der letzten beiden Gruppen zurückzuführen sein. In den daraus abgeleiteten politischen Handlungsempfehlungen werden deshalb auch von den ersten drei Stakeholdergruppen der Schwerpunkt auf wissenschaftliche, wirtschaftliche bzw. kulturelle Aspekte gelegt. Die

Empfehlungen der Zivilgesellschaft und der öffentlichen Einrichtungen und Behörden ist hingegen auf verschiedene Stakeholder fokussiert.

Dennoch lassen sich übergreifende Handlungsempfehlungen identifizieren: Da die Forschung an öffentlichen Einrichtungen zu unattraktiv sei, sollten Vergütung und Arbeitsbedingungen verbessert und die Zusammenarbeit mit der Industrie flexibilisiert werden. Der Austausch zwischen Forschenden in Deutschland, aber auch europaweit sollte gefördert und über Cluster und Knotenpunkte effektiver gestaltet werden. Auch der internationale Austausch solle trotz geopolitischer Spannungen erhalten bleiben und nicht überreguliert werden, damit auch gesellschaftlich problematische Entwicklungen erkannt und verhindert werden könnten. Notwendigkeiten

wurden für einen Ausbau der MINT-Bildung erkannt, aber vor allem der Wissenstransfer in die breite Gesellschaft müsse gestärkt werden. Mehr Menschen müssten über Formen der Wissenschaftskommunikation, welche über ein Stärken der breiten Medienlandschaft erhalten bleiben sollte, auf das Thema QT aufmerksam gemacht und informiert werden. Formate wie Bürgerdialoge zum Verbreiten von Wissen und Zugang sowie ein interdisziplinärer Dialog über die QT sollten öffentlich aktiv unterstützt werden. Hier seien neben Ministerien u.a. auch Stiftungen in der Pflicht. Über Basisschulungen für Bürger:innen könnten diese wiederum einen ersten praktischen Zugang zu den QT erhalten. Und auch dem Kunstbereich käme hier eine wichtige Rolle zu: Kunst sollte als ein wichtiger, anziehender Faktor für die EU angesehen werden, da sie die europäische Idee der Freiheit besonders deutlich mache. Es müsste ein Bewusstsein geschaffen werden, dass Kunst überall sei, insbesondere für Akteure aus Wissenschaft und Wirtschaft. Hierzu sollte eine Vernetzung von Kunst, Wissenschaft und allen QT-Stakeholdern öffentlich gestärkt werden, damit die Kunst nicht instrumentalisiert, sondern zur QT-Entwicklung aktiv beitragen könne. Auch die Industrie sei über die Kreativwirtschaft gefragt QT-Kunst als relevanten, wachsenden Wirtschaftszweig anzusehen, der QT-Wissen verbreite und neue Ideen generiere.

Um den Übergang der QT in die Anwendung zu vereinfachen und die QT-Industrie in Deutschland und Europa zu stärken, sollte die öffentliche Beschaffung genutzt werden, QT-Leistungen von Start-ups zu nutzen. Hier würden sich besonders der Energiesektor,

der Gesundheitsbereich und die Materialwissenschaften eignen. Offene Fragen zum Energieverbrauch von und Einsparungen durch Quantencomputer sollten dabei weiter untersucht, diese Forschung öffentlich unterstützt und Standards entwickelt werden. Auch sollte ein Rahmen für Datenschutz und Datenspende öffentlich definiert werden, um QT-Leistungen in die Anwendung zu überführen. Für Ausgründungen der QT wird auch ein Zielkonflikt zwischen Wissenschaft und Wirtschaft zu geistigem Eigentum (IP) gesehen, der über Frameworks für IP in Kooperationen gelöst werden sollte. Es sollten weiterhin Lücken in den Lieferketten analysiert und über „kreative Lösungen“ wie spezifische Förderung oder Verzicht auf bestimmte Vorschriften geschlossen werden. Auch wurde genannt, dass die europäische Stärke in der Quantenkommunikation aktiv genutzt und weiter gestärkt werden sollte. Neben diesen spezifischen Fördermechanismen wurde darauf hingewiesen, dass die öffentliche Förderung in QT auf deutscher und europäischer Ebene fortgesetzt und die Finanzierungszeiträume verlängert werden sollten. Hier sollte aber vor allem auch versucht werden, private Gelder zu involvieren. Mehrfach wurde darauf hingewiesen, Pensionsfonds für Investitionen in QT und andere Hochtechnologien zuzulassen, solche durch verlässliche öffentliche Finanzierungen zu ermutigen, oder sogar verpflichtend zu regeln. Es bräuchte notfalls Vorschriften dazu Gewinne aus solchen Investitionen erneut in Forschung und Entwicklung zu investieren.

5 Übergreifende thematische Erkenntnisse

In diesem Kapitel werden die zentralen empirischen Erkenntnisse der Studie thematisch gebündelt, eingeordnet und hinsichtlich ihrer gesellschaftlichen, politischen und strategischen Relevanz reflektiert. Ziel ist es, wesentliche Spannungsfelder, Steuerungsbedarfe und offene Flanken der Quantentechnologienentwicklung sichtbar zu machen – und Orientierungswissen für politische Gestaltung bereitzustellen. Die Darstellung folgt der Logik des Fragebogens, wurde jedoch punktuell angepasst, um thematische Bezüge besser herauszuarbeiten.

5.1 Status Quo der Technikfolgenabschätzung in den Quantentechnologien

Dieser Abschnitt des Fragebogens diente dazu, die wichtigsten Akteure in der Abschätzung der Technikfolgen von Quantentechnologien zu identifizieren, und deren Aktivitäten zu listen. Durch die Kombination der Studienergebnisse (Interviews, Umfrage, Literaturrecherche, Workshop) mit dem Wissen der Studienautor:innen über die Beziehungen zwischen diesen Organisationen, wurden die drei am häufigsten genannten Organisationen in jeder Stakeholder-Kategorie identifiziert.

Tabelle 5.1: Die drei häufigsten genannten Organisationen zur TA von QT aller Stakeholder in allen Quellen

Stakeholder-Typ	Drei meistgenannten Organisationen pro Stakeholdergruppe
Wissenschaft	<ul style="list-style-type: none"> • QDNL Action Line 4 efforts (TU Delft, Universiteit van Amsterdam, Center for Quantum & Society) • University of Oxford (RTI) • Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS) des KIT

Wirtschaft und Industrie	<ul style="list-style-type: none"> • IBM
Zivilgesellschaft	<ul style="list-style-type: none"> • Open Quantum Institute (OQI) • Quantum Energy Initiative (QEI) • Studio Quantum des Goethe Institut
Öffentliche Einrichtungen und Behörden	<ul style="list-style-type: none"> • European Quantum Flagship • NATO • Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI)
Andere	<ul style="list-style-type: none"> • Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD) • World Economic Forum (WEF) • UNESCO

Diese Liste bietet zwar eine erste Übersicht über die wichtigsten Akteure, doch betonten viele der Befragten, dass sich der Bereich der TA im Zusammenhang mit QT insgesamt noch in einem sehr frühen Entwicklungsstadium befinde. Obwohl eine Reihe von Institutionen genannt wurden, waren sich die Befragten weitgehend einig, dass die Zahl der Akteure und Projekte, die sich derzeit mit den gesellschaftlichen Folgen von QT befassen, begrenzt sei, es nur wenige systematische Untersuchungen gebe und nur begrenzte internationale Koordinierung vorliege. Zwar beginnen einige Akteure aus Wissenschaft und Industrie, sich mit sozialen und ethischen Bewertungen von QT zu befassen, doch seien diese Bemühungen nach wie vor fragmentiert und unterfinanziert.

“At the moment there are not so many other actors in this. And in fact, it is one of the reasons why, since this is a very important topic, I am trying to stimulate it, to encourage a broader engagement.”
(Person 16)

Die Befragten waren sich einig, dass die Relevanz von TA für QT anerkannt sei, aber strukturierte Anstrengungen fehlten. Insbesondere die Behörden wurden als unzureichend vorbereitet angesehen, um TA-Ergebnisse in die Politik zu integrieren, obwohl sie durch ihre Finanzierung einen erheblichen Einfluss auf die Gestaltung der Quantenlandschaft hätten.

"Public authorities set the agenda with how they decide to use public funds. In this case, the investment into QT has been disproportionately from public funding, therefore public authorities have both a right and responsibility to ensure that the developed technology does good." (Umfrage 21)

Der wahrgenommene Mangel an umfassenden TA-Bemühungen war auch auf internationaler Ebene offensichtlich. Es fehle bspw. an supranationalen Initiativen:

„[...] es gibt also kein wirklich mir bekanntes europäisches Projekt [...]. Oder auch außereuropäisch, USA oder darüber hinaus. Spezifisch aufgesetzte Projekte [zu den gesellschaftlichen und ethischen Folgen von QT], die übernational sind, gibt es – soweit ich es weiß – in dem Sinne nicht.“ (Person 6)

Derzeitige Initiativen im Bereich TA für QT konzentrierten sich weitgehend auf wenige Länder wie Österreich, Deutschland und die Niederlande, aber die internationale Koordinierung und die Rahmenbedingungen auf europäischer Ebene seien noch unterentwickelt. Einige Teilnehmende – auch aus dem Workshop – schlugen vor, dass Bemühungen auf der Ebene eines EU- oder UN-Büros für Technikfolgenabschätzung diese Lücken schließen könnten, indem sie sektorübergreifende Leitlinien und strukturierte Überwachungsmechanismen bereitstellten, insbesondere für Risikobereiche wie Anwendungen mit doppeltem Verwendungszweck und militärische Auswirkungen. Die entsprechenden Gremien in der EU wären die *European Technology Assessment Group (ETAG)* und das *Science and Technology*

Options Assessment (STOA) Komitee, während die TA-Bemühungen der UN eher verteilt und dezentralisiert sind, aber die *Konferenz der Vereinten Nationen für Handel und Entwicklung (UNCTAD)* könnte ein relevanter Akteur sein. *UNESCO* wurde während der Datenerhebung ebenfalls mehrfach erwähnt (siehe Tabelle 5.1).

Die Befragten aus der Industrie äußerten gemischte Meinungen zur Notwendigkeit der Betrachtung gesellschaftlicher Auswirkungen. Einige betonten das Risiko einer Überlastung von Start-ups, was auch dadurch deutlich wird, dass außer IBM kein anderer Vertreter der Industrie ausdrücklich genannt wurde:

"[...] creating a gigantic overhead if this would be mandatory and the quantum industry doesn't make any money at this point. Mostly Start-ups with very few employees who don't have time to do this." (Umfrage 13)

Mehrere Teilnehmende sprachen sich ausdrücklich dafür aus, TA enger in die Politik- und Investitionsagenda zu integrieren, um eine verantwortungsvolle Innovation sicherzustellen. TA könne als strategisches Instrument zur Steuerung von Investitionen und zur Bewältigung von Risiken in der Lieferkette dienen:

"We can drive the creation of the shaping of a European quantum market. We don't have to just let it happen if we are serious about industrial policy." (Person 20)

Weitere Empfehlungen umfassten die Einrichtung spezieller branchenübergreifender Foren, die Entwicklung gemeinsamer Leitlinien und die Verknüpfung von TA-Ergebnissen mit Finanzierungs- und politischen Entscheidungen, um einen umfassenderen und wirkungsvolleren TA-Rahmen für QT zu schaffen, sobald der Bereich reifer werde.

5.2 Auswirkungen des Quantencomputings auf IT-Sicherheit

Die Auswirkungen des Quantencomputers auf die IT-Sicherheit wurden allgemein als tiefgreifend, systemisch und potenziell destabilisierend angesehen. Zwar sind Quantencomputer, die bestehende Verschlüsselungssysteme knacken können, noch nicht realisiert, doch die Expert:innen gingen davon aus, dass dies innerhalb der nächsten zehn bis 20 Jahre geschehen könnte. Es seien auch Beschleunigungen der Hardware-Entwicklung sichtbar und neue Algorithmen denkbar, die bisherige Zeitskalen verändern könnten. Es bestehe deshalb dringender Handlungsbedarf – vor allem bei der PQC-Implementierung – auch da manche Akteure bereits heute verschlüsselte Daten abfangen und archivieren würden, um sie später entschlüsseln zu können.

„Staatliche Akteure fangen ja sowieso schon jetzt an, alles zu speichern, zu sammeln, damit sie es dann, wenn es geknackt werden kann, auslesen und alles auswerten können“ (Person 10).

Die potenziellen Folgen eines Hackens der Kryptografie durch Quantencomputer könnten nicht nur den Datenschutz, sondern auch kritische Infrastruktur und Finanztransaktionen gefährden. Vulnerable Systeme, eingebettet in das Internet der Dinge, könnten ausgenutzt werden, um Störungen wie Stromausfälle oder Fehlfunktionen des Verkehrssystems zu verursachen.

„Man kann sich auch solche Szenarien vorstellen. [...] Wenn Sie IoT-Geräte haben und man die hacken kann. [...] Wenn man die rhythmisch ein- und ausschaltet, das Stromnetz zum Zusammenbruch bringt, also Herde oder sowas. Ich glaube da fehlt uns eigentlich im Moment auch noch die Fantasie. Um überhaupt zu sehen, was alles möglich ist.“ (Person 18)

Trotz dieser hohen Risiken sei das Bewusstsein dafür nach wie vor ungleichmäßig verteilt, insbesondere im privaten Sektor. Es wurde vermutet, dass viele

Unternehmen diese Entwicklungen „verschlafen werden“, wobei besonders die begrenzte Vorbereitung von KMUs im Vergleich zu größeren Unternehmen und öff. Einrichtungen hervorgehoben wurde.

Während PQC als die praktikabelste Verteidigungsstrategie angesehen wurde und deshalb eine zeitnahe Implementierung empfohlen wurde, bestanden weiterhin Bedenken hinsichtlich der langfristigen Robustheit und Zuverlässigkeit. Ein mathematischer Beweis fehle bisher. Diese Unsicherheit könnte durch das Aufkommen potenziell neuer Quanten- oder klassischer Algorithmen noch verstärkt werden, die die aktuellen kryptografischen Standards untergraben könnten. Daher seien neben einer zeitnahen Implementierung kontinuierliche Forschung und Wachsamkeit unerlässlich, um den sich entwickelnden Bedrohungen einen Schritt voraus zu sein.

In Bezug auf die Vorbereitung gelte Europa bei der Festlegung umfassender quantensicherer Standards und regulatorischer Rahmenbedingungen als hinter den USA zurückliegend. Trotz Initiativen wie EuroQCI bestünden weiterhin Lücken in den Beschaffungsstrategien und der regulatorischen Angleichung. Darüber hinaus sei die Kommerzialisierungslandschaft mit Risiken behaftet. Mehrere Start-ups und Unternehmen stünden im Verdacht, ihre Verbindungen zu verschleiern, um so bei potentiellen Kunden als vertrauenswürdig zu erscheinen:

„Bei einzelnen Firmen wissen wir auch, dass sie [...] durchaus einen russischen Hintergrund haben, den sie im Moment verbergen. Die Russen sind plötzlich Finnen geworden“ (Person 18)

Die Herausforderung, IT-Systeme gegen QT zu sichern, sei daher nicht nur eine technologische, sondern auch eine regulatorische, kommerzielle und geopolitische Aufgabe. Um diesen vielschichtigen Risiken zu begegnen, seien dringend koordinierte und umfassende Strategien erforderlich, die technische Abwehrmaßnahmen, regulatorische Aufsicht und öffentlich-private Partnerschaften in ganz Europa und darüber hinaus integrierten.

5.3 Nachhaltigkeit des Quantencomputings

Die Nachhaltigkeit des Quantencomputings wurde von den Studienteilnehmenden als ein sehr wichtiges Thema angesehen, auch wenn der regulatorische Umgang, notwendige Förderungen und Forschung dazu unterschiedlich bewertet wurden.

In vielen Interviews wurden die generellen Fragen der Nachhaltigkeit – insbesondere in Bezug auf Klima und Energieverbrauch – als einer der gesellschaftlich relevantesten Themen angesehen. Dies äußerte sich auch in den Visionen der Workshopteilnehmenden, die nachhaltigere Energieversorgung, optimierte Energienetze und günstige bis kostenfreie Energie als wünschenswerte Zukünfte imaginierten. Dass solche Wünsche eventuell erfüllt werden könnten, wurde in den Interviews und Umfragen deutlich: So waren sich einige Teilnehmende sicher, dass die effizientere Operation von Quantencomputern für Energieeinsparungen im Vergleich zu herkömmlichen Computern sorgen müssten, und dass auch mit Anwendungen zu rechnen sei, die nachhaltige Technologien optimierten. Für diese Personen war eine heutige Betrachtung von Nachhaltigkeitsaspekten in Regulierung oder Förderung nicht notwendig. Diese Betrachtung käme zu früh und zunächst seien Quantencomputer zur Anwendung zu bringen:

„Technische Entwicklung muss der erste Weg sein. Ich muss erst einmal zeigen, dass ich performance-seitig eine klassische Simulation überholen kann. Und dann die Kosten-Diskussion starten.“ (Person 9)

Für eine größere Gruppe der Interviewten wiederum sei mit solchen Einsparungen zwar zu rechnen, jedoch wurden noch kleinere bis größere Unsicherheiten genannt. Die Abhängigkeit von verwendeten Qubit-Plattformen oder mögliche Entwicklungen in der Algorithmenforschung seien abzuwarten. Man solle deshalb nicht blind auf die kommenden Energieeinsparungen vertrauen und von Anfang an die

technische Entwicklung mit Nachhaltigkeitsaspekten verschränken:

“I think with many other technologies in the past, this question was not posed. Like ‘oh, as long as this thing gets to work, you know, we’ve got to worry about energy consumption and environmental pollution and sourcing the raw materials later on’. We don’t have the luxury to do that. And I would argue, in times of digital sovereignty and increasing tensions across supply chains in the world, we have a responsibility to think about these things in advance.” (Person 20)

Da diese Position, welche von einzelnen sogar mit erkannten Greenwashing-Tendenzen von manchen Unternehmen verstärkt wurde, sehr konträr zu dem obigen nachgelagerten Ansatz liegt, erscheint eine ausführliche Analyse der Vor- und Nachteile von proaktiver regulatorischer Beachtung sinnvoll. Unter der Prämisse auch die Verwendung von Ressourcen wie seltenen Erden oder Helium mit einzubeziehen, könnten technische Aspekte und Pfadabhängigkeiten, Energieverbräuche von Rechenoperationen, sowie mögliche energiesparende Anwendungsmöglichkeiten systematisch untersucht werden:

“The BMBF could make a public funded project to investigate these questions in detail. But I think before a lot of money is spent in the moment, we really have to find out whether it is already time to do this or if this is still too early. I think the first question, we have to answer is, ‘could we take such an initiative to success or do we still have to wait a few years to learn more about quantum computers, to be able to answer these questions in sufficient detail and quality?’” (Person 8)

Ob dann im Ergebnis die Förderung der Entwicklung nachhaltiger Qubit-Ansätze, die Regulierung von energieintensiven Ansätzen, oder „nur“ eine freiwillige Angabe des Energieverbrauchs das Ergebnis sein sollte, könnte anschließend fundiert begründet werden.

5.4 Sicherheitspolitische Auswirkungen der Quantensensorik

Die Quantensensorik wurde als sowohl zivil als auch militärisch einsetzbar beschrieben (Dual-Use), wobei die Vielfalt an möglichen militärischen Anwendungen erhebliche Auswirkungen auf die Sicherheitspolitik haben könnte, und deshalb proaktiv begleitet werden müssten.

In den Interviews wurde allgemein festgestellt, dass die hohe Sensitivität der Quantensensoren zwar vielversprechende zivile Anwendungen wie GPS-unabhängige Navigation und Umweltüberwachung (z. B. für Vulkanaktivitäten oder Wasserkreisläufe) biete, ihre militärischen Einsatzmöglichkeiten jedoch bestehende Sicherheitsstrukturen erheblich stören könnten – beispielsweise bei der Bunkererkennung, der U-Boot-Ortung und sogar für spekulative Überwachungsszenarien.

„Erster Anwendungsbereich ist natürlich PNT, also Positionen, Navigation, Timing. [GPS-unabhängige Systeme] werden ermöglichen, dass man deutlich unabhängiger [wird] und dass man neue Operationsszenarien für seine Streitkräfte entwickeln kann. Das wird taktische Vorteile geben.“ (Person 1)

Dies könne Auswirkungen auf nukleare Gleichgewichte haben oder auch potenziell Überwachungs-dystopien ermöglichen. Eine umfassende, systematische Abschätzung der technologischen Möglichkeiten und der sich daraus ergebenden sicherheitsrelevanten und militärischen Auswirkungen solle deshalb angestoßen werden, um gesellschaftlich besonders negative Entwicklungen vorzusehen und diese über internationale Abkommen und evtl. auch Rüstungskontrollen auszuschließen.

“If you can [build] an array of quantum sensors which can read into neurons in real time. This could even lead in some dystopian scenario to a situation in which some sort of malevolent power might be able to read the thought of people.” (Person 16)

Ob man auf solche Entwicklungen auch mit Exportkontrollen reagieren müsste, wurde hingegen von den Teilnehmenden unterschiedlich bewertet. Während Konsens herrschte, dass militärfähige Quantensensoren nicht in Länder wie Nordkorea exportiert werden sollten, gaben einige an, dass breite Exportkontrollen langfristig nicht funktionieren könnten:

„Dieser Protektionismus ist nur begrenzt möglich und hilft nur kurzfristig [...] Gerade im Zeitalter der Informationstechnologie lassen sich solche Wissensvorsprünge nicht unendlich lange halten.“ (Person 9)

Es scheint wichtiger zu sein, dass Europa seine Abhängigkeiten bei besonders sicherheitsrelevanten Quantensensoren – insbesondere für kritische Infrastruktur wie Zeitnetze – von außereuropäischen Akteuren reduzieren solle und dazu sowohl existierende Firmen vor Aufkäufen schützen als auch fehlende strategisch aufbauen solle. Auch hier seien andere Länder weiter und strategisch besser aufgestellt. Export solcher kritischen Technologien könne dann eventuell eingeschränkt werden, wobei einige Interviewteilnehmende anstatt für starre Regeln vielmehr für ein Bewusstsein der Forschenden plädierten. So oder so sei jedoch eine europäische Harmonisierung von Exportbeschränkungen notwendig, welche über eine kontinuierliche Analyse der derzeitigen technischen Möglichkeiten stets angepasst werden könnten.

5.5 Konsequenzen ungleichen Zugangs zu Quantentechnologien/Quantencomputing

Der ungleiche Zugang zu Quantentechnologien und insbesondere Quantencomputing wird als ein zentrales Risiko für Regionen des „Globalen Südens“ angesehen. Aber auch Europas sei potenziell betroffen, weshalb Kollaborationen gestärkt, Abhängigkeiten reduziert und eigene Ökosysteme strategisch aufgebaut werden sollten.

Die Teilnehmenden der Interviews gaben an, dass der Zugang zu Quantencomputern ab dem Zeitpunkt besonders relevant würde, wenn Quantum Advantage gezeigt werde. Ab diesem Moment, der zwar nicht über Nacht geschehe, jedoch deutlich einen Kipppunkt darstelle, würden alle Akteure profitieren, die Zugang zu den aktuellsten Quantencomputern und einem ausgebauten Quantenökosystem hätten. Unternehmen, die dann entsprechende Algorithmen und Anwendungen vorbereitet hätten, würden u.a. durch Zeit- und Energieeinsparungen profitieren:

„In dem Moment kann es Kipppunkte in den Ländern und den Regionen geben wo ein Quantenökosystem frühzeitig aufgebaut wurde. In dem Moment, wo es Quantum Advantage gibt, kann ich mir gut vorstellen, dass es einen Kipppunkt gibt. Aber den gibt es eben nur, wenn die Industrie vorher weiß, was sie machen möchte und quasi fertig ist mit den Algorithmen. Oder wenn Teile des Ökosystems bereits Algorithmen haben und nur noch darauf warten, die Algorithmen auf den Systemen mit entsprechender Hardware Kapazität laufen lassen zu können.“ (Person 6)

“The pioneers of the field, i.e. the companies and countries that supported the development and research early on, are now harvesting the fruits of their efforts.” (Vision aus Workshop)

Deutlich benachteiligt würden hingegen alle, die nicht über solch einen Zugang verfügten. Dies könnte insbesondere den „Globalen Süden“ treffen,

wodurch sich Unterschiede in wirtschaftlicher Stärke, Cybersicherheit und wissenschaftlicher Entwicklung verstärkten. Im schlimmsten Falle ließen sich diese Unterschiede geopolitisch von Akteuren wie China ausnutzen:

“One of the consequences that I could imagine is that you create dependencies. And these dependencies, depending on who develops this technology successfully, can create a digital divide, a fragmented landscape. Think about the way, for example China, made deals with pretty much any African nation on building railroads. In exchange for that, you could do that with AI cloud. You can do that with post-quantum encryption. You can do that with quantum computer access. So, that quantum in that sense is not something totally different. It would just be additional, a digital version of the railway.” (Person 20)

Kooperationen mit Ländern des „Globalen Südens“ in den QT seien deshalb heute schon notwendig – aus humanitären Gründen, aber auch aus strategischen Erwägungen. Internationale Ausbildungsprogramme, Initiativen für Open--Source-Entwicklungen und eine proaktive, europäische Koordinierung von Kooperationen wurde empfohlen.

Viele Interviewte, und vor allem die Teilnehmenden des Workshops, sahen jedoch auch Europa potenziell benachteiligt in einem aufziehenden Quantum Divide. Es herrsche bereits heute eine Abhängigkeit von US-amerikanischen Technologieunternehmen im Quantencomputing, weshalb sich einige vor einer wachsende Marktmacht und Zugangsbeschränkungen sorgten. Eine Diskussion über eigene Exportkontrollen sei deshalb nicht sinnvoll, sondern es müsse eine Strategie entwickelt werden, wie über kontinuierliche Partnerschaften mit den USA Zugänge zu diesen Systemen gesichert, und gleichzeitig Abhängigkeiten durch den Aufbau eigener QT-Industrien reduziert werden könnten. Offen blieb jedoch die Frage, ob dies eindeutig bedeute, dass Deutschland oder Europa zwingend eine eigene Quantencomputer-Hardware entwickeln müssten.

5.6 Gesellschaftliche Auswirkungen

Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass QT zwar einige Möglichkeiten zur Schaffung von Arbeitsplätzen bieten könnten, die Vorteile jedoch ohne proaktive Bemühungen zur Demokratisierung des Zugangs auf Akteure mit guten Ressourcen konzentriert bleiben könnten.

Von QT wurde seitens der Interviewteilnehmenden erwartet, dass sie in gesellschaftlich relevanten Sektoren, insbesondere im Gesundheitswesen, im Energiesektor und in der Materialwissenschaft, erhebliche Vorteile bringen werden. Die Workshopteilnehmenden gaben an, dass, wenn Negativszenarien, wie sie bspw. für die Quantensensoren geäußert wurden (s. Abschnitt 5.4), über regulatorische Eingriffe verhindert würden, die breite Bevölkerung von der Verwendung von QT profitieren könnte. Die Daten deuten jedoch auch darauf hin, dass Early Adopters mit größeren finanziellen Ressourcen oder einer höheren Bildung voraussichtlich überproportionale Vorteile erzielen werden, was bestehende sozioökonomische Unterschiede verschärfen könnte.

“What you see already, the Quantum manifesto of Europe is framed as something where quantum technologies are developed by governments for their autonomy and their sovereignty. And related to that defense and economic. So, who benefits? Governments and defense industry. And quantum internet will probably not soon be attached to our normal houses.” (Person 3)

Wichtig sei deshalb vor allem der breite Zugang zu den QT. Dies schließe zum einen eine Aufmerksamkeit und gewisse QT-Grundkenntnisse ein, die über verschiedene Programme der breiten Bevölkerung vermittelt werden könnten (s. Abschnitt 5.8). Doch auch direkte Zugänge zu den QT, von Unternehmen bereitgestellt, sollten gestärkt werden:

„Die Amerikaner machen das ja immer recht klug, dass sie das sofort allen kostenlos zur Verfügung stellen. Für einen gewissen Zeitraum und dann für Geld dafür verlangen.“ (Person 14)

Für den Arbeitsmarkt hingegen wurden grundsätzlich eher positive Entwicklungen erwartet, da im Gegensatz zu KI Arbeitsplätze geschaffen werden sollten. Dennoch wurden mehrfach Bedenken geäußert, dass eher geringqualifizierten Arbeitskräften der Zugang zu QT erschwert werden könnte, weshalb die Integration von QT-Konzepten in umfassendere Bildungs- und Umschulungsrahmen und die Finanzierung integrativer Ausbildungsinitiativen von entscheidender Bedeutung seien. Nur so ließe sich ein möglicher sozialer Quantum Divide verhindern und ein gerechter Zugang zu neuen quantenbasierten Karrierewegen gewährleisten. Auch Bessergebildeten, wie in der Medizin- oder Materialforschung, sollten QT-Grundkenntnisse gelehrt werden, damit auf neue QT-Entwicklungen reagiert werden könnte. Als Leitlinie für die notwendigen Kenntnisse wurde dabei auf das europäische Competence Framework verwiesen.

„Das European Competence Framework for Quantum Technologies [...] Da gehe ich voll mit. Das ist, glaube ich, eine sehr gute Analyse.“ (Person 17)

Um Mittelfristig außerdem einem Arbeitskräftemangel in den QT entgegenzuwirken – besonders in der universitären Forschung – müssten gezielte Maßnahmen entwickelt werden, mit denen diese Stellen attraktiver gestaltet würden. So wünschten sich besonders die Teilnehmenden des Workshops verbesserte Arbeitsbedingungen, längerfristige Verträge und eine bessere Entlohnung, sowie spezifische Programme über welche bisher in den QT marginalisierte Gruppen wie Frauen besser mit einbezogen würden.

5.7 Diskurs über Quantentechnologien

Der Diskurs über Quantentechnologien wurde als sehr gespalten zwischen einigen spezialisierten Expert:innen und einer breiten, wenig informierten Gesellschaft beschrieben, was Sorgen vor uninformierten Diskussionen schürte. Eine Kombination aus Eindämmen übertriebener Versprechungen und Sorgen, verbunden mit dem Entwickeln wünschenswerter Zukünfte sei deshalb notwendig.

Es herrschte unter allen Teilnehmenden der Eindruck, dass der Diskurs über QT von einer sehr kleinen Gruppe Informierter geführt werde und viele noch keine Berührung zu QT hätten:

“I think, most people don't know what quantum is, and that will remain so for a long time.” (Person 3)

Dieser Zustand enthalte die Gefahr einer uninformierten Debatte. Vor allem, wenn viele Menschen durch eine breitere Anwendung der QT plötzlich auf QT aufmerksam würden, könnten Ängste vor negativen Anwendungsszenarien überhandnehmen und viele Menschen durch falsche Versprechungen manipuliert werden. Wenn zu diesem Zeitpunkt noch kein breites Verständnis über QT in der Gesellschaft vorläge, könnte es einen Backlash – ähnlich zur Gentechnik oder den Nanotechnologien – geben, der die QT-Entwicklung nachhaltig beschädigen könnte. In diesem Zuge seien auch esoterische Entwicklungen und Verschwörungstheorien denkbar, wobei diese Gefahr als eher geringer angesehen wurde.

Von allen Teilnehmenden – Interviews, Umfragen und Workshops einbezogen – wurde deshalb gefordert, dass das Informationsniveau über QT in der Gesellschaft gehoben werden müsse. Während die genauen Wege dazu im nachfolgenden Abschnitt 5.8 diskutiert werden, wurde die Schwierigkeit durch die Tiefe der QT deutlich:

„Beim Thema Quantencomputer und Quantentechnologien stößt der klassische Wissenschaftsjournalismus auch an seine Grenzen. Zum einen ist es schwierig, über Fortschritte zu berichten, wenn man eigentlich jedes Mal bei Adam und Eva anfangen muss und erstmal wieder erklärt, was das eigentlich ein Qubit. Wie funktioniert das? Was ist Superposition, Was ist Verschränkung? Was ist daran jetzt besonders? Kann das den Computer ersetzen? Also eigentlich jedes Mal wieder alles exerziert. [...] Bevor man eigentlich zum Kernpunkt kommt. Das andere ist natürlich genau die Frage, Und wenn ich es jetzt erkläre, wie erkläre ich es? Wie schaffe ich es das so klar zu erklären?“ (Person 12)

Es müssten deshalb über verschiedenen Wege, wie formaler Bildung, aber auch informellen Angeboten, die einzelnen Teile der Gesellschaft erreicht werden und anstatt vollständigem QT-Verständnis zunächst realistische Bilder über QT verbreitet werden. Gleichzeitig wurde aber darauf hingewiesen, dass eine gewisse Begeisterung oder sogar Aspekte eines Hypes zum Involvieren von mehr Personen und Investor:innen notwendig seien, weshalb das Entwickeln und Verbreiten wünschenswerter QT-Visionen sinnvoll sei:

“But we might have to bring in better examples of what we hope it's going to achieve. We're not going to promise that it does, but we're saying these are the ambitions that we want. [...] If you don't [share ambitions], you're not going to get investors. You're not going to get ministers who understand what it is. We're not going to get people who can meaningfully communicate what this technology can do.” (Person 20)

Solch eine Kombination aus realistischen, positiven Visionen, der die Vielzahl der QT-Anwendungsmöglichkeiten beinhalte, gesellschaftliche Ziele formuliere und falsche Vorstellungen ausschließe, könnte langfristig zu einem realistischen oder positiven Diskurs über QT führen.

5.8 Gesellschaftliche Wahrnehmung und Wissenschaftskommunikation

Wie das im Abschnitt 5.7 erkannte geringe Informationsniveau der Gesellschaft in den Quantentechnologien nachhaltig gehoben werden könne, ohne Sorgen und falsche Versprechungen zu verstärken und gleichzeitig positive Bilder zu vermitteln, wurde besonders entlang der Frage passender Formate und der richtigen Sprache diskutiert.

Als ein grundlegend wichtiger Weg wurde die traditionelle Bildung in Schule und Universität genannt. Hier sollten grundlegende Konzepte der QT gelegt und insbesondere auch Frauen für QT interessiert werden, weshalb auch eines der Ergebnisse des Workshops nicht überrascht, dass ein Push für die MINT-Bildung notwendig sei (vgl. Abschnitt 5.13). Da sich dadurch jedoch nicht (mehr) alle Menschen erreichen ließen, sei eine Fülle an weiteren Programmen notwendig, in denen die Wissenschaftskommunikation eine wichtige Rolle einnehme:

„Das heißt, die Wissenschaft, und da gibt es tatsächlich nur die Wissenschaftskommunikation, hat eine besondere Verantwortung bei einem Bereich wie den Quantentechnologien. Besonders sicher zu kommunizieren und klar zu kommunizieren [...].“
(Person 11)

Hier sei jedoch wichtig, eine inklusive Sprache zu verwenden, die die Eintrittsschwelle für die breite Bevölkerung senke und Menschen einen ersten Zugang zu den QT gewähre. Ein komplettes Verständnis der QT wurde als kein sinnvolles Ziel für alle formuliert, weshalb Forschende in ihrer Kommunikation sich Mühe zum Übersetzen ihrer Arbeit geben sollten:

„[Wir benötigen] definitiv weniger Arroganz. Es gibt die Unart, dass seitens der Expert:innen Floskeln

genutzt werden wie ‚das versteht ihr jetzt eh nicht, oder?‘ Allein auch kleine Floskeln wie ‚Oh, jetzt wird es kompliziert‘ und ‚oh, das ist jetzt das Technische‘ sollten einfach weggelassen werden. Es wäre besser die Sachverhalte einfach, mit ganz konkreten Analogien (wie z.B. dem Münzbeispiel) zu erklären.“
(Person 6)

Weiterhin wurden von den Workshopteilnehmenden interdisziplinäre Formate für Menschen verschiedener Hintergründe vorgeschlagen, in denen sich mit Forschenden ausgetauscht werden könne. Insbesondere praktische Zugänge wurden favorisiert: Ob Menschen Zugang zu Laboren zu geben und damit zu zeigen, was QT wirklich sind, oder Unternehmen dazu zu motivieren Benutzeroberflächen für einen b2c-Kontakt zu entwickeln – QT müssten nah an die Menschen geholt werden:

“I think for societal engagement, we need to be interactive in a good way. Lower the bar by things that people can consume, and if they're really interested, try to have some good exchange with researchers. I think the lowering of the bar is important because otherwise you're always seeing the usual suspects – the stereotypical retired high school teachers.” (Person 4)

Insgesamt sollte ein Fokus auf die Anwendungsmöglichkeiten der QT gelegt werden, womit eine Begeisterung für diese geschaffen werden könne. Welche Formate und Medien hierzu genau verwendet werden sollten, scheint nicht besonders relevant zu sein. Ob klassische Wissenschaftskommunikation, praktische Projekte oder soziale Medien – die gesamte Breite erscheint notwendig, um die gesamte Gesellschaft zu informieren. Denn erst so würde auch bei Investoren das Bewusstsein geschaffen, was alles in Europa im QT-Bereich passiert und welche Investitionsmöglichkeiten sich ergeben könnten.

5.9 Rolle der Kunst in Vermittlung, Gestaltung und Reflexion von Quantentechnologien

Die Frage nach einer möglichen Rolle der Kunst wurde in den Interviews und Workshops lebhaft diskutiert, weshalb die Erkenntnisse in diesem Abschnitt gesondert beschrieben werden. Trotz kritischer Anmerkungen und bestehender Sorgen oder Berührungsängsten, deutete sich insgesamt eine positive Betrachtung der Teilnehmenden an.

Die einfachste Antwort auf die Frage, ob die Künste eine Rolle in der QT-Entwicklung spielen sollten, lässt sich damit beantworten, dass sie es so oder so tun werden.

„Hat es immer gegeben, dass Künstler Physik aufnehmen.“ (Person 18)

Da diese Einschätzung mehrfach bestätigt wurde und die Kunstschaffenden des Workshops explizit von einer sich formenden QT-Kunst-Bewegung sprachen, erscheint ein proaktives Einbinden dieser in die QT-Entwicklung nur sinnvoll. Hier sei vor allem der eher assoziative Zugang der Künste zu den QT interessant, der ein ganz anderes gesellschaftliches Publikum abholen und für die QT interessieren könne. Dabei wurde aus eigener Erfahrung der Teilnehmenden angegeben, dass Kunstwerke das Interesse an den Mechanismen hinter ihrer Erzeugung durch QT wecken und so einen ganz anderen Zugang liefern würde.

Der einzelne Wunsch nach „Kunst für Wissenschaftskommunikation“ wurde jedoch mehrfach abgelehnt, da die Künste nicht zum Illustrieren da seien und man sie eh nicht kontrollieren könne. Kunst dürfe „ja eh alles“ und man solle deshalb lieber die Vorteile der Kunst über eine aktive wissenschaftliche Begleitung hervorrufen. Wenn ein wirklicher Austausch auf Augenhöhe stattfinde, könnten interessante, Aufmerksamkeit generierende Werke entstehen. Hier wiesen die Kunstschaffenden des Workshops darauf hin, dass alle Menschen durchgehend Kunst

konsumierten – ob in Form von Büchern, Serien oder Sozialen Medien. Diese Vielzahl an kreativen Möglichkeiten sollten auch wirtschaftlich betrachtet und zusammen mit der Kreativwirtschaft ökonomisch verwertet werden.

Es wurde jedoch auch explizit darauf hingewiesen, dass Kunst meist keine ausgleichende Rolle einnehme, sondern vor allem auf Brüche und Ecken hinweise:

“Policy makers try to bring in some normality by adding art. I think it might even backfire [...] because they expected something else. They expected mediation, but they now they have provocation or speculation or basically highlighting of these sharper edges. And [policy makers] might dislike it.” (Person 3)

Hier wird jedoch auch deutlich, dass, falls allen diese betonende und reflektierende Rolle der Künste klar ist, viele positive Entwicklungen für die QT möglich sind. So wurde im Workshop darauf hingewiesen, dass neue Ideen für die QT in Zusammenarbeiten mit Kunstschaffenden entwickelt werden könnten. Solche Austauschformate zwischen Wissenschaft, technischer Entwicklung und Kunst sollten gezielt unterstützt werden. Denn in solchen Projekten würden nicht nur neue Ideen generiert, sondern es könnte auch der Charakter der Kunst „Reflexionen über aktuelle Entwicklungen anzuregen“ als weitere Form der Technikfolgenabschätzung genutzt werden:

“I certainly think that art in all its forms, from comic books to music to visual arts, concept art, and at all levels from basic popular, to sort of more intellectual, all of these levels can be very useful for engaging with society in both directions. Not just to create acceptance and appreciation, but also to reflect and to gain a new perspective on what we're doing. I think this is the main channel after all. What people do most, what people spend most of their time on, social media, is something which is related to visual or other types of art.” (Person 16)

5.10 Unbeabsichtigte Nebenfolgen

Unbeabsichtigte Nebenfolgen von QT wurden sowohl als nicht abschätzbar bezeichnet als auch sehr konkret über Beispiele beschrieben, wobei sich aus der erkannten fehlenden Vorbereitung vieler Stakeholder die Notwendigkeit eines kontinuierlichen Dialogs ergebe. Konkrete technische Aspekte werden im nachfolgenden Abschnitt 5.11 beschrieben.

Mehrere Befragte betonten die inhärente Unvorhersehbarkeit solcher Nebenfolgen:

“I find it quite impossible to answer about that, because unintended spinoffs can be unexpected, even when you try with your best intent to do anticipation.” (Person 15)

Andere wiederum gaben eine Reihe möglicher technischer Entwicklungen an, welche zum einen ähnlich zu bereits beschriebenen eher negativen Möglichkeiten der Überwachung oder militärischen Anwendungen waren. Störende Auswirkungen auf Lieferketten oder fehlende Ressourcenverfügbarkeit erschienen möglich. Positive Entwicklungen könnten zum anderen bei quanteninspirierten Algorithmen, Kühlsystemen und integrierter Photonik entstehen, was gezielt gefördert werden könnte.

Die Vorbereitung auf diese Risiken bzw. Möglichkeiten ist je nach Stakeholdergruppe unterschiedlich bewertet worden. Wissenschaft und Industrie wurden als relativ agil eingeschätzt, während Behörden und Zivilgesellschaft als weniger gut vorbereitet angesehen wurden.

“I think we are not prepared for an unforeseen development, but I really I have no clue.” (Person 8)

Die Daten der Umfrage unterstreichen erneut die Rolle von Wissenschaft und Industrie bei der Identifizierung und Kommunikation von aufkommenden Risiken, während die Zivilgesellschaft als Wachhund fungiere, der das Bewusstsein für übersehene Probleme schärfe. Von den Behörden wurde erwartet, dass sie Regelungsrahmen zur Bewältigung von Nebenwirkungen durchsetzen. Sie wurden jedoch als weniger proaktiv angesehen.

Mehrere Teilnehmende empfahlen deshalb auch die Einrichtung strukturierter, kontinuierlicher Überwachungsmechanismen, um neu auftretende Risiken zu identifizieren und eventuelle Möglichkeiten wirtschaftlich zu verwerten.

“What is the way to approach this kind of issue, I think is to have a constant and frequent dialog between science and society.” (Person 16)

Hierzu müssten die richtigen Personen zur richtigen Zeit zusammengebracht werden und ihre unterschiedlichen Positionen in die Diskussionen einbringen. Da man jedoch noch recht früh in der QT-Entwicklung sei, könnten einige negative Szenarien früh erkannt und verhindert, sowie die QT-Entwicklung eher hin zu positiven Szenarien gelenkt werden. Damit einhergehend sollte eine aus QT-Expert:innen besetzte Politikberatung stattfinden, um politische Entscheidungen fundiert treffen zu können. Klare, strukturierte, aber einfache Rahmenbedingungen für die Risikoerkennung und -reaktion könnten dazu dienen, dass anstatt reaktiver Mechanismen proaktives Handeln bestehen bliebe.

5.1.1 Einfluss auf andere Technologien

Interviews, Umfragedaten und Workshop zeigen, dass QT sich nicht isoliert entwickeln, sondern eng mit anderen technischen Bereichen wie KI, Kryotechnik, Photonik und Materialwissenschaften verknüpft sind. Die Befragten beschrieben QT wiederholt als „Werkzeugkasten“ oder „langweilige“ „Schnittstellentechnologie“, die im Hintergrund agiere und andere Technologiebereiche sowohl verbessere als auch selbst verbessert werden könne.

“We are in 2045. Quantum technologies work! New technologies, like Quantum Computing and Sensing, are an additional available backend. As an invisible but important infrastructure, it has changed industries and optimized different sectors, leading to among others an efficiency increase in various fields. As an enabling technology, it is also followed by new applications...” (entwickelte Vision des Workshops)

So wurde beispielsweise erwartet, dass Quantencomputing Fortschritte in den Bereichen KI, Arzneimittelforschung und Optimierung vorantreiben werde, während Quantensensorik und -kommunikation Bereiche wie Cybersicherheit und autonome Systeme verändern könnten. Viele Teilnehmer betonten jedoch, dass diese Auswirkungen wechselseitig seien. Innovationen in der Photonik, Kryotechnik und Materialwissenschaft, die ursprünglich für klassische Systeme entwickelt wurden, seien heute entscheidende Wegbereiter für QT-Hardware und die Skalierbarkeit von Systemen. Mehrere Befragte hoben konkrete Beispiele für diese Ko-Evolution hervor. Photonisch integrierte Schaltkreise, die für Quantenprozessoren entwickelt wurden, würden bereits für breitere Anwendungen angepasst, und Fortschritte in der Kryotechnik, die ursprünglich für Quantensysteme gedacht waren, könnten die klassische Elektronik mit geringerem Stromverbrauch verbessern.

„Alles gegenseitig. Das sind sich gegenseitig bedingende Systeme.“ (Person 9)

Die Materialwissenschaften wurden wiederholt als wichtiger Bereich gegenseitiger Beeinflussung genannt. Durchbrüche bei supraleitenden Materialien, Josephson-Kontakten und Halbleitern erleichterten nicht nur die Entwicklung von Qubits, sondern bieten auch potenzielle Spin-offs für die Batterietechnologie, die Pharmazie und fortschrittliche Sensoren. Insbesondere die Quantensimulation wurde als vielversprechendes Werkzeug für die Entdeckung neuartiger Materialien mit optimierten Eigenschaften genannt. Während die Verbindung von QT und KI als bedeutender Synergiebereich hervorgehoben wurde, äußerten sich einige skeptisch hinsichtlich des aktuellen Stands von QML und verwiesen auf den Mangel an formalen Beweisen für dessen Vorteile. Dennoch wurde herausgestellt, dass man hartnäckig bleiben müsse:

„[...] Es gibt immer mehr Skeptiker [im QML]. Aber meiner Meinung nach müssen wir tatsächlich weiter am Ball bleiben und das weiter untersuchen. [...] Es hat in bestimmten Bereichen der Wissenschaft oft 40 Jahre gebraucht, um dahin zu kommen, wohin man wollte. [...] Das heißt, man muss weiter daran arbeiten.“ (Person 5)

Die Befragten wiesen darauf hin, dass spezialisierte Komponenten wie Kryoelektronik und ASICs nach wie vor kritische Engpässe darstellten, was die Notwendigkeit einer koordinierten Entwicklung über mehrere Sektoren hinweg unterstreicht, um Integrationsherausforderungen zu bewältigen. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass QT als Katalysator für umfassendere technologische Veränderungen dienen könnten, aber eine effektive Integration eine nachhaltige interdisziplinäre Zusammenarbeit und gezielte Investitionen erfordere, um diese Synergien effektiv nutzen zu können. Es wurden auch Forderungen nach einer aktiveren Erforschung dieser Synergien laut, jedoch gab es keinen Konsens darüber, wie diese Erforschung durchgeführt werden sollte.

5.12 Philosophische Aspekte

Das Thema der philosophischen Implikationen von Quantentechnologien löste bei den Befragten vielfältige und polarisierte Reaktionen aus.

Ein erheblicher Teil der Befragten hielt die Vorstellung, dass QT gesellschaftliche Debatten grundlegend verändern oder „binäres Denken“ aufbrechen könnten, für spekulativ oder nicht zielführend. Solche Fragen seien „nicht sinnvoll“, und die meisten Menschen hätten generell kein Interesse daran, die tieferen Mechanismen von Technologien zu verstehen.

“In this sense, I am afraid that quantum does not have a lot to offer. It is in other aspects, other areas of society and our sort of common life that we have to look.” (Person 16)

Andere räumten zwar ein, dass die Prinzipien der QT, insbesondere diejenigen, die sich auf Wahrscheinlichkeit und Dualität beziehen, letztendlich neue Denkweisen inspirieren könnten, betonten jedoch, dass solche Veränderungen kurzfristig kaum Auswirkungen auf die gesellschaftlichen Strukturen haben dürften. Für einige könnten diese Effekte nur durch eine nachhaltige Auseinandersetzung mit Quantenprinzipien entstehen, die möglicherweise zu einem differenzierteren Verständnis von Wahrscheinlichkeiten und Komplexitäten führen würde. Ein frühzeitiges Erlernen von Quantenprinzipien könnte vielleicht eine andere Sicht auf die Welt schaffen, obwohl diese Perspektive als eher spekulativ angesehen wurde.

Eine kleinere Gruppe von Befragten äußerte sich hingegen fest überzeugt vom Potenzial der QT, gesellschaftliche Paradigmen zu beeinflussen. Sie argumentierten, dass eine stärkere Auseinandersetzung mit der Quantenmechanik Quantenkonzepte wie

Unschärfe und Superposition allmählich in den gesellschaftlichen Diskurs einfließen lassen und damit festgefahrene Binärsysteme in Frage stellen könnten.

“Whenever we study in detail the world and we come up with new paradigms, we make new analogies to relate them to our way of thinking, or new paradigms of thinking, it always informs the world. It always enriches the world. So yes, it's going to.” (Person 15)

Weiterhin sei solch eine breitere Akzeptanz der quantenphysikalischen Denkprozesse sogar notwendig und hilfreich für die Entwicklung der QT selbst, da dadurch der Zugang zur QT-Entwicklung eher intuitiv geschehen könnte.

„Es gibt jetzt schon eine neue Generation, die sich mit Quantencomputern auskennt und die intuitiv Quantencomputing begreift. Für mich braucht es einen weiteren Schritt, dass wir wirklich viel mehr Quantencomputing denken und von dem binären Denken weggehen, wenn wir Quantentechnologien wirklich sinnvoll und effizient einsetzen wollen.“ (Person 5)

Diese optimistischeren Perspektiven blieben jedoch in der Minderheit. Die Befragten waren sich einig, dass die QT zwar philosophische Überlegungen anregen könnten, dass aber für einen wesentlichen gesellschaftlichen Einfluss eine umfassende kulturelle Integration und Bildungsmaßnahmen erforderlich wären, sodass solche Veränderungen in naher Zukunft unwahrscheinlich seien. Die Befragten sind sich allgemein einig, dass die Quantenprinzipien zwar interessante philosophische Denkmodelle bieten würden, ein praktischer Einfluss auf gesellschaftliche Strukturen und Diskurse jedoch spekulativ und in weiter Ferne liege.

5.13 Bildung

Die Integration von QT in das Bildungssystem, insbesondere im Schullevel, wurde mit leichter Skepsis diskutiert, jedoch überwogen letztlich die Argumente, durch eine Integration ein breiteres Bewusstsein über QT zu schaffen und möglichen Ungleichberechtigungen proaktiv zu begegnen.

QT wurden als grundsätzlich für viele Menschen sehr faszinierend angesehen. Insbesondere jüngere Schüler:innen könnten dafür spielerisch begeistert werden. Auch wenn einzelne Befragte skeptisch bzgl. Vermitteln der Komplexität von QT an Jugendliche waren, gaben viele an, dass eine graduelle Integration der QT-Grundlagen in den Physikunterricht ein breites Verständnis in der Schule gelegt werden könnte:

“I don't think it's risky to implement them. I think doing it gradually, adding it to the curricula, making it a natural part of the awareness raising and this demystifying aspect, such that people experience the fact that quantum world may even be different to the classical world, the macroscopic level, can only benefit the future debate and the future implementation. I think, a gradual change integrating it into the current curricula, not too rapidly and not too deeply into the early stages, because a certain level of appreciation of the macroscopic world as it is, is necessary before you actually have this extra insight on top of it. So, I'm all for it.” (Person 15)

Unklarheiten bestand deshalb eher darin, ob solch eine Integration in bestehende Lehrpläne aus Zeitgründen überhaupt möglich sei:

„Ich bin da ein bisschen zwiegespalten, weil wir es ja schon nicht schaffen, Informatik als Pflichtfach einzuführen. Und das ist, finde ich, etwas, was noch deutlich näher an Schülerinnen und Schülern dran ist als jetzt Quantentechnologien. Von daher ja, wie

soll ich sagen, wenn wir das schon nicht schaffen, wie sollen wir es denn dann hinbekommen, Quantentechnologien in den Lehrplan zu packen?“ (Person 12)

Da jedoch die Vorteile dieser Integration überwogen und sich auch die Workshopteilnehmenden mehrfach für eine Integration sowie Stärkung der MINT-Fächer äußerten, erscheint eher die Frage, wie solch eine Lehrplananpassungen gelingen könnte, als die entscheidende.

Verbunden wurden diese Einschätzung meist mit einer notwendigen Integration der QT-Grundlagen in die universitäre Bildung – insbesondere für Fächer, in denen QT in Zukunft genutzt werden könnten – und in Formen des lebenslangen Lernens. Wie in Abschnitt 5.8 beschrieben, müssten nicht nur zukünftige Generationen vorbereitet, sondern auch heute Lebende und im Arbeitsleben Stehende abgeholt werden. Es müsste versucht werden, für ein QT-Grundverständnis in der Gesellschaft zu sorgen, damit sich durch die QT keine weitere Spaltung der Gesellschaft in Form eines sozialen Quantum Divides ausbilde:

“The second level is to avoid the consequences of unequal access. We have to get everyone educated, but we also have to get the infrastructure and the governance ready. We have to get the national initiatives ready. We have to get the national initiatives aligned. Which also means, education on a different level of the decision makers of the policymakers. [That] can influence the educational curricula in each of the countries as well.” (Person 15)

Dies schließe auch ganz explizit Entscheidungsträger:innen auf allen Ebenen ein, die über ein gewisses Verständnis und den Kontakt zu QT-Expert:innen, der Entwicklung und Bildungsintegration der QT einen weiteren Schub geben könnten.

5.14 Anderes

Die Frage danach, welche Aspekte sonst noch relevant seien, liefert sowohl Hinweise auf die den Befragten besonders wichtigen Themen, als auch über die Güte des Fragebogens. Da diese Frage nur von einer knappen Mehrheit überhaupt beantwortet wurde, lässt sich vermuten, dass die obigen Themen die Technikfolgen von Quantentechnologien in genügender Breite abdecken.

Ein Fokus wurde auf einzelne Anwendungen, insbesondere im Bereich Energie- und Ressourcenverbrauch gelegt. Sowohl mögliche Einsparungen sollten verstärkt untersucht als auch Forschung zu nachhaltigen Anwendungen intensiviert werden. Ebenfalls besonders genannt wurde die notwendige Umstellung der Kryptographie auf PQC von kleineren Unternehmen.

Die im Rahmen dieser Studie durchgeführte vorausschauende Betrachtung der QT-Entwicklung wurde ebenfalls als wichtig genannt. Diese sei besonders für die internationale Stabilität sowie eine informierte Debatte der Bevölkerung wichtig.

Mit einem Fokus auf Wirtschaftlichkeit, Förderung und Investition nannten mehrere Interviewte bei dieser Frage ein in dieser Studie nicht explizit befragtes Thema. So stehe die QT-Entwicklung in Deutschland und Europa heute – vor allem durch enorme öffentliche Förderungen – gut dar, müsse jetzt jedoch den Übergang in die wirtschaftliche Nutzung schaffen. Skalierungen und Implementierung wurden als Herausforderung genannt. Damit diese gelingen könne, äußerten insbesondere die Teilnehmenden des Workshops eine Vielzahl an zu unternehmenden Schritten: Die öffentlichen Investitionen sollten weiterhin hoch bleiben und strategisch ausgebaut

werden. Hier wurde sich auch explizit eine Begleitung durch Expertengremien aus Wissenschaft, Wirtschaft und Zivilgesellschaft gewünscht. Gleichzeitig sollten private Investitionen, wie aus Hochrisikofonds, stärker involviert werden. Dies könne bspw. dadurch gelingen, dass die Errungenschaften der QT-Entwicklung in Europa mehr verbreitet würden (s. Abschnitt 5.8), aber auch verpflichtende Regelungen zum (Re-)Investieren in Forschung und Entwicklung seien notwendig. Da es an den verfügbaren Geldmitteln nicht mangle, sollten bspw. auch Pensionsfonds ermutigt bzw. verpflichtet werden in Hochtechnologie zu investieren. Ebenfalls sollte die öffentliche Hand Investitionen in QT-Infrastruktur, wie Zeit- oder QT-Kommunikations-Netze, erwägen, die Wertschöpfungskette in Europa analysieren und gezielt stärken, und über die öffentliche Beschaffung die Abnahme von QT-Entwicklungen von Start-ups garantieren.

Damit teilweise verbunden war ein zweites große Thema: Kollaboration – interdisziplinär, innereuropäisch und international. So wünschten sich Teilnehmende der Interviews und Workshops vermehrt interdisziplinäre Kooperationen, welche neue Ideen generieren und eine kritische Betrachtung ermöglichen könnten. Forschende sollten dazu, laut Aussagen der Workshopteilnehmenden, über Knotenpunkte oder Cluster besser vernetzt werden. Dies sollte am besten paneuropäisch gestaltet werden, wobei explizit moniert wurde, dass die föderale Struktur Deutschlands derzeit oft eine effektive Kooperation behindere. Abschließend wurde empfohlen den deutschen und europäischen Blick etwas zu weiten und auch Länder wie Japan oder Südkorea als „Like-Minded Countries“ in Kollaborationen mit einzuschließen.

6 Referenzen

- 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. (2018). The quantum technologies roadmap: A European community view. *New Journal of Physics*, 20(8), 080201. <https://doi.org/10.1088/1367-2630/aad1ea>
- Aiello, C. D., Awschalom, D. D., Bernien, H., Brower, T., Brown, K. R., Brun, T. A., Caram, J. R., Chitambar, E., Felice, R. D., Edmonds, K. M., Fox, M. F. J., Haas, S., Holleitner, A. W., Hudson, E. R., Hunt, J. H., Joynt, R., Koziol, S., Larsen, M., Lewandowski, H. J., ... Zwickl, B. M. (2021). Achieving a quantum smart workforce. *Quantum Science and Technology*, 6(3), 030501. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/abfa64>
- 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., ... Martinis, J. M. (2019). Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. *Nature*, 574(7779), 505–510. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1666-5>
- Atik, J., & Jeutner, V. (2021). Quantum computing and computational law. *Law, Innovation and Technology*, 13(2), 302–324. <https://doi.org/10.1080/17579961.2021.1977216>
- Auffèves, A. (2022). Quantum Technologies Need a Quantum Energy Initiative. *PRX Quantum*, 3(2), 020101. <https://doi.org/10.1103/PRXQuantum.3.020101>
- Barad, K. (2007). *Meeting the Universe Halfway: Quantum Physics and the Entanglement of Matter and Meaning*. Duke University Press. <https://doi.org/10.2307/j.ctv12101zq>
- Bhaskar, M. K., Riedinger, R., Machielse, B., Levonian, D. S., Nguyen, C. T., Knall, E. N., Park, H., Englund, D., Lončar, M., Sukachev, D. D., & Lukin, M. D. (2020). Experimental demonstration of memory-enhanced quantum communication. *Nature*, 580(7801), 60–64. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2103-5>
- Chen, Z., Satzinger, K. J., Atalaya, J., Korotkov, A. N., Dunsworth, A., Sank, D., Quintana, C., McEwen, M., Barends, R., Klimov, P. V., Hong, S., Jones, C., Petukhov, A., Kafri, D., Demura, S., Burkett, B., Gidney, C., Fowler, A. G., Paler, A., ... Google Quantum AI. (2021). Exponential suppression of bit or phase errors with cyclic error correction. *Nature*, 595(7867), 383–387. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03588-y>
- Coenen, C., & Grunwald, A. (2017). Responsible research and innovation (RRI) in quantum technology. *Ethics and Information Technology*, 19(4), 277–294. <https://doi.org/10.1007/s10676-017-9432-6>
- Collingridge, D. (1982). The Social Control of Technology. *Journal of the Operational Research Society*, 33(8), 771–772. <https://doi.org/10.1057/jors.1982.168>
- Cuhls, K., Beyer-Kutzner, A., Bode, O., Ganz, W., & Warnke, P. (2009). *The BMBF Foresight Process*. https://www.academia.edu/24556783/The_BMBF_Foresight_Process
- de Wolf, R. (2017). The potential impact of quantum computers on society. *Ethics and Information Technology*, 19(4), 271–276. <https://doi.org/10.1007/s10676-017-9439-z>
- Degen, C. L., Reinhard, F., & Cappellaro, P. (2017). Quantum sensing. *Reviews of Modern Physics*, 89(3), 035002. <https://doi.org/10.1103/RevModPhys.89.035002>
- Dyakonov, M. (2019). When will useful quantum computers be constructed? Not in the foreseeable future, this physicist argues. Here's why: The case against: Quantum computing. *IEEE Spectrum*, 56(3), 24–29. IEEE Spectrum. <https://doi.org/10.1109/MSPEC.2019.8651931>
- Genenz, U., Anne, N., Kılıç, Z., Mathews, D., Ok, O., Schmidt, A., & Seskir, Z. C. (2025). Why teach quantum in your own time: The values of grassroots organizations involved in quantum technologies education and outreach. *EPI Quantum Technology*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1140/epiqat/s40507-025-00345-2>

- Georgiou, L. (1996). The UK technology foresight programme. *Futures*, 28(4), 359–377. [https://doi.org/10.1016/0016-3287\(96\)00013-4](https://doi.org/10.1016/0016-3287(96)00013-4)
- Gerçek, A. A., & Seskir, Z. C. (2025). Navigating the Quantum Divide(s). *IEEE Engineering Management Review*, 1–19. <https://doi.org/10.1109/EMR.2025.3547927>
- Grunwald, A. (2003). Technology assessment at the German Bundestag: ‘Expertising’ democracy for ‘democratising’ expertise. *Science and Public Policy*, 30(3), 193–198. <https://doi.org/10.3152/147154303781780515>
- Grunwald, A. (2018). *Technology Assessment in Practice and Theory*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429442643>
- Grunwald, A. (2024). Introduction to the Handbook of Technology Assessment. In *Handbook of Technology Assessment* (pp. 1–10). Edward Elgar Publishing. <https://www.elgaronline.com/edcollchap/book/9781035310685/book-part-9781035310685-6.xml>
- Gupta, S., Modgil, S., Bhatt, P. C., Chiappetta Jabbour, C. J., & Kamble, S. (2023). Quantum computing led innovation for achieving a more sustainable Covid-19 healthcare industry. *Technovation*, 120, 102544. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2022.102544>
- Hughes, C., Finke, D., German, D.-A., Merzbacher, C., Vora, P. M., & Lewandowski, H. J. (2021). *Assessing the Needs of the Quantum Industry* (No. arXiv:2109.03601). arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2109.03601>
- Inglesant, P., Ten Holter, C., Jirotko, M., & Williams, R. (2021). Asleep at the wheel? Responsible Innovation in quantum computing. *Technology Analysis & Strategic Management*, 33(11), 1364–1376. <https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1988557>
- Kantsepolsky, B., Aviv, I., Weitzfeld, R., & Bordo, E. (2023). Exploring Quantum Sensing Potential for Systems Applications. *IEEE Access*, 11, 31569–31582. IEEE Access. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3262506>
- Krelina, M. (2021). Quantum technology for military applications. *EPJ Quantum Technology*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.1140/epjqt/s40507-021-00113-y>
- Kumar, A., Augusto de Jesus Pacheco, D., Kaushik, K., & Rodrigues, J. J. P. C. (2022). Futuristic view of the Internet of Quantum Drones: Review, challenges and research agenda. *Vehicular Communications*, 36(C). <https://doi.org/10.1016/j.vehcom.2022.100487>
- Li, W., Yin, Z., Li, X., Ma, D., Yi, S., Zhang, Z., Zou, C., Bu, K., Dai, M., Yue, J., Chen, Y., Zhang, X., & Zhang, S. (2024). A hybrid quantum computing pipeline for real world drug discovery. *Scientific Reports*, 14(1), 16942. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-67897-8>
- Li, Y., Cai, W.-Q., Ren, J.-G., Wang, C.-Z., Yang, M., Zhang, L., Wu, H.-Y., Chang, L., Wu, J.-C., Jin, B., Xue, H.-J., Li, X.-J., Liu, H., Yu, G.-W., Tao, X.-Y., Chen, T., Liu, C.-F., Luo, W.-B., Zhou, J., ... Pan, J.-W. (2025). Microsatellite-based real-time quantum key distribution. *Nature*, 640(8057), 47–54. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08739-z>
- Möller, M., & Vuik, C. (2017). On the impact of quantum computing technology on future developments in high-performance scientific computing. *Ethics and Information Technology*, 19(4), 253–269. <https://doi.org/10.1007/s10676-017-9438-0>
- Oh, E., Gregoire, M. D., Black, A. T., Jeremy Hughes, K., Kunz, P. D., Larsen, M., Lautier-Gaud, J., Lee, J., Schwindt, P. D. D., Mouradian, S. L., Narducci, F. A., & Sackett, C. A. (2024). Perspective on Quantum Sensors from Basic Research to Commercial Applications. *AIAA Journal*, 62(11), 4029–4053. <https://doi.org/10.2514/1.J.062707>
- Preskill, J. (2018). Quantum Computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2, 79. <https://doi.org/10.22331/q-2018-08-06-79>
- Preskill, J. (2025). Beyond NISQ: The Megaquop Machine. *ACM Transactions on Quantum Computing*, 6(3), 1–7. <https://doi.org/10.1145/3723153>
- QURECA. (2025, July 9). Quantum Initiatives Worldwide 2025. *Qureca*. <https://www.quireca.com/quantum-initiatives-worldwide/>
- Roberson, T., Leach, J., & Raman, S. (2021). Talking about public good for the second quantum revolution: Analysing quantum technology narratives in the context of national strategies. *Quantum Science and Technology*, 6(2), 025001. <https://doi.org/10.1088/2058-9565/abc5ab>
- Scheidsteger, T., Haunschild, R., Bornmann, L., & Ettl, C. (2021). Bibliometric Analysis in the Field of

- Quantum Technology. *Quantum Reports*, 3(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/quantum3030036>
- Schmidt, A. (2021). *Quantencomputer: Umsetzung und technologische Entwicklungslinien* [Unpublished Master's Thesis]. Leibniz University Hannover.
- Seskir, Z. C., & Aydinoglu, A. U. (2021). The landscape of academic literature in quantum technologies. *International Journal of Quantum Information*, 19(02), 2150012. <https://doi.org/10.1142/S021974992150012X>
- Seskir, Z. C., Korkmaz, R., & Aydinoglu, A. U. (2022). The landscape of the quantum start-up ecosystem. *EPI Quantum Technology*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1140/epiq/s40507-022-00146-x>
- Seskir, Z. C., & Willoughby, K. W. (2023). Global innovation and competition in quantum technology, viewed through the lens of patents and artificial intelligence. *International Journal of Intellectual Property Management*, 13(1), 40–61. <https://doi.org/10.1504/IJIPM.2023.129076>
- Svore, K. M., & Troyer, M. (2016). The Quantum Future of Computation. *Computer*, 49(9), 21–30. Computer. <https://doi.org/10.1109/MC.2016.293>
- Taylor, R. D. (2020). Quantum Artificial Intelligence: A “precautionary” U.S. approach? *Telecommunications Policy*, 44(6), 101909. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2020.101909>
- Ten Holter, C., Inglesant, P., & Jirotko, M. (2023). Reading the road: Challenges and opportunities on the path to responsible innovation in quantum computing. *Technology Analysis & Strategic Management*, 35(7), 844–856. <https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1988070>
- Umbrello, S., Seskir, Z. C., & Vermaas, P. (2024). Communities of quantum technologies: Stakeholder identification, legitimation and interaction. *International Journal of Quantum Information*. <https://doi.org/10.1142/S0219749924500126>
- van Eck, N. J., & Waltman, L. (2017). Citation-based clustering of publications using CitNetExplorer and VOSviewer. *Scientometrics*, 111(2), 1053–1070. <https://doi.org/10.1007/s11192-017-2300-7>
- Vermaas, P. E. (2017). The societal impact of the emerging quantum technologies: A renewed urgency to make quantum theory understandable. *Ethics and Information Technology*, 19(4), 241–246. <https://doi.org/10.1007/s10676-017-9429-1>
- Wehner, S., Elkouss, D., & Hanson, R. (2018). Quantum internet: A vision for the road ahead. *Science*, 362(6412), eaam9288. <https://doi.org/10.1126/science.aam9288>
- Weinberg, S. J., Sanches, F., Ide, T., Kamiya, K., & Correll, R. (2023). Supply chain logistics with quantum and classical annealing algorithms. *Scientific Reports*, 13(1), 4770. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31765-8>
- Wolbring, G. (2022). Auditing the ‘Social’ of Quantum Technologies: A Scoping Review. *Societies*, 12(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/soc12020041>

