



Sabine Loos | Felix Bickert | Marius Dotzel | Christian Tutschku | Simone Kaiser

Potenziale und Bedarfe des Quantencomputing-Ökosystems

Ergebnisse einer internationalen Interviewstudie

Hrsg: Oliver Riedel, Katharina Hölzle, Wilhelm Bauer, Bernd Bienzeisler

Mit Unterstützung der

Inhalt

Abbildungsverzeichnis	4
Management Summary	5
1 Game Changer Quantencomputing?!	7
2 Methodisches Vorgehen	8
3 Die Ökosystemarchitektur	12
3.1 Datenerhebung und Analyse	12
3.2 Nationale Quantencomputing-Zentren	13
3.3 Internationale Quantencomputing-Zentren	19
4 Potenziale und Bedarfe im Quantencomputing-Ökosystem aus Sicht von Expertinnen und Experten	22
4.1 Potenziale von Quantencomputing: langer Atem notwendig, um Wertschöpfungsversprechen einzulösen	22
4.1.1 Technologische Trends	23
4.1.2 Potenzielle Anwendungsfelder	24
4.1.3 Ökologische Potenziale durch Quantencomputing	25
4.2 Bedarfe mit Blick auf die weitere Entwicklung und Anwendung von Quantencomputing	26
4.2.1 Handlungsfeld I: Finanzierung und Förderung	27
4.2.2 Handlungsfeld II: Integration in Unternehmen	29
4.2.3 Handlungsfeld III: Bildung und Gesellschaft	31
4.2.4 Handlungsfeld IV: Internationale Kooperation und Technologiesouveränität	34
5 Fazit und Ausblick	37
6 Literatur	39

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Nationalitäten	9
Abbildung 2: Anzahl der Vertreterinnen und Vertreter der verschiedenen Sektoren	10
Abbildung 3: Methodik der Ökosystemanalyse	12
Abbildung 4: Such-String der Ökosystemanalyse	13
Abbildung 5: Beteiligung der einzelnen Bundesländer an Publikationen im Feld des Quantencomputing (Datenbank: Web of Science/KATI; Zeitspanne: 1999 bis 2024)	13
Abbildung 6: Anzahl der Publikationen in Abhängigkeit der Forschungseinrichtungen (Datenbank: Web of Science KATI; Zeitspanne: 1999 bis 2024)	14
Abbildung 7: Anzahl der Zitationen in Abhängigkeit der Forschungseinrichtungen (Datenbank: Dimensions; Zeitspanne: 1999 bis 2024)	15
Abbildung 8: Verteilung der öffentlich geförderten Unternehmen auf die bereits identifizierten wissenschaftlichen Kompetenzzentren (Datenbank: Aktivitätenlandkarte Quantencomputing; Stand: 15.01.2024)	17
Abbildung 9: Patentanmeldungen im Bereich Quantencomputing nach Organisationen (Datenbank: PatBase; Zeitspanne: 1999 bis 2024)	17
Abbildung 10: Regionale Verteilung öffentlich geförderter Akteure aus der Wirtschaft (Datenbank: Aktivitätenlandkarte Quantencomputing; Stand: 15.01.2024)	18
Abbildung 11: Regionale Verteilung öffentlich geförderter Akteure aus der Wissenschaft (Datenbank: Aktivitätenlandkarte Quantencomputing; Stand: 15.01.2024)	18
Abbildung 12: Globale Publikationsaktivitäten im Forschungsfeld Quantencomputing (Datenbank: Web of Science/ KATI; Zeitspanne: 1999 bis 2023).	19
Abbildung 13: Verteilung der publikationsstärksten Nationen in Abhängigkeit der Anzahl an Publikationen (Datenbank: Web of Science / KATI; Zeitspanne: 1999 bis 2024)	20
Abbildung 14: Ranking der führenden Forschungseinrichtungen in Abhängigkeit der Anzahl an Zitationen (Datenbank: Dimensions; Zeitspanne: 1999 bis 2024)	20
Abbildung 15: Verteilung der unternehmensreichsten Nationen in Abhängigkeit der Anzahl an Unternehmen (Datenbank: Crunchbase; Stand: 15.01.2024)	21
Abbildung 16: Zusammenfassung der Handlungsfelder des Quantencomputing-Ökosystems.	37
Abbildung 17: Ablauf des Roadmapping-Prozesses (angelehnt an Kerr et al. 2019).	38

Management Summary

Quantencomputing hat in den letzten Jahren aufgrund seines hohen disruptiven Anwendungspotenzials ein großes Interesse auf sich gezogen. Insbesondere die wissenschaftliche Community widmet sich dem Thema mit zunehmender Aufmerksamkeit und steht dabei im Spannungsfeld zwischen den perspektivisch vielzähligen Einsatzmöglichkeiten für komplexe, bisher teilweise unlösbare Probleme sowie dem Hype, der die Technologieentwicklung begleitet. In diesem Kontext entwickelt sich ein internationales Innovationsökosystem, bestehend aus Akteuren aus unterschiedlichen Sub-Ökosystemen und Sektoren, die in dynamischen Formen der Kooperation zur Entstehung von Wissen und Innovationen beitragen. Das Ziel der vorliegenden Interviewstudie ist es, die Potenziale und Bedarfe dieses internationalen Quantencomputing-Ökosystems zu analysieren und auf dieser Grundlage Ansatzpunkte für dessen Stärkung und Weiterentwicklung abzuleiten. Dadurch wird die Grundlage für einen sich noch anschließenden Roadmapping-Prozess geschaffen, der die Potenziale von Quantencomputing für die Region Heilbronn-Franken erschließen soll. Die Ergebnisse dieser Interviewstudie wurden auf Basis von Interviews mit 34 internationalen Expertinnen und Experten für Quantencomputing aus Wissenschaft, Wirtschaft und Politik erarbeitet und durch ein indikatorengestütztes Stakeholder-Mapping und eigene Expertise ergänzt. Es wurden Vertreterinnen und Vertreter u. a. aus Deutschland, USA, Kanada, Schweiz, Australien, Israel, Niederlande und Österreich befragt. Die wichtigsten Erkenntnisse aus der Studie sind:



Langer Atem notwendig, um technologische Potenziale zu heben

Quantencomputing birgt perspektivisch große Chancen für Wirtschaft, Industrie und Gesellschaft. Jedoch ist ein langer Atem im Innovationsprozess erforderlich, da sonst die Gefahr besteht, dass auf zu hochgesteckte Erwartungen schnell Ernüchterung folgt. Die Hardware-Anbieter befinden sich aktuell in einer Schlüsselrolle für die weitere Entwicklung der Technologie. Es existieren verschiedene Hardware-Plattformen mit unterschiedlichen Reifegraden, bei denen sich noch keine klaren Favoriten abzeichnen. Eine erfolgreiche Entwicklung sollte jedoch die gesamte Wertschöpfungskette berücksichtigen. Potenziale entstehen auch in der Komponenten- und Software-Entwicklung sowie in der frühzeitigen Vorbereitung der Unternehmensintegration bzw. Endanwendung.



Potenzielle Anwendungen beinhalten weitreichende Wertschöpfungsversprechen

In der aktuellen Phase, der »Noisy Intermediate-Scale Quantum« (NISQ) Ära, ist Quantencomputing noch ein Bereich der Grundlagenforschung, für den jedoch perspektivisch einige nutzenbringende Applikationen in Aussicht stehen. Besonders vielversprechende Anwendungsfelder für Quantencomputing sind vor diesem Hintergrund: Chemie und Materialentwicklung; Pharma, Biotechnologie und Medizinprodukte; Mobilität und Logistik; Finanzen und Versicherungen; Sicherheit; Klima und Energie; sowie Produktion. Die Effizienzvorteile von Quantencomputing kommen bei Simulations- und Optimierungsaufgaben, beim maschinellen Lernen sowie im Bereich Kryptographie besonders zum Tragen. Ökologische Potenziale könnten u. a. durch eine optimierte Ressourcenallokation entstehen. Dabei ist jedoch besondere Aufmerksamkeit im Hinblick auf mögliche Rebound-Effekte erforderlich.



Langfristige, entbürokratisierte und risiko-affine Finanzierungsmöglichkeiten schaffen

Die befragten Expertinnen und Experten schätzen das finanzielle Engagement von Bund und Ländern zur Förderung von Quantencomputing. Allerdings steigt der langfristige Kapitalbedarf aus Sicht der Expertinnen und Experten weiter und es gibt erhebliche strukturelle Hürden beim Kapitalzugang. Vor diesem Hintergrund braucht es mehr Bemühungen für flexible, dem aktuellen technologischen Entwicklungsstand angemessene Finanzierungsmöglichkeiten. Eine systematische Verzahnung von privatem und öffentlichem Risikokapital sollte erfolgen, auch um der Fragmentierung der Förderlandschaft entgegenzuwirken.



Frühzeitig Zugang zu Technologie und Wissen für Unternehmen ermöglichen

Um den Sprung von Quantencomputing in die Anwendung vorzubereiten und Unternehmen frühzeitig in die Lage zu versetzen, mögliche Potenziale für sich nutzbar zu machen, braucht es in der Breite der Wirtschaft eine höhere Bereitschaft und Aktivitäten zum Kompetenzaufbau. Spätere, kostenintensive »Aufholjagden« können so vermieden werden. Ein offener, neutraler Zugang zu Technologie und relevantem Wissen sowie gleichzeitig eine gut koordinierte Arbeitsteilung zwischen Forschung und Industrie kann dieses Vorhaben maßgeblich unterstützen.



Zahl der qualifizierten (Nachwuchs-) Fachkräfte steigern

Der Fachkräftemangel ist ein zentraler Bottleneck für die Entwicklung des Felds. Bereits heute ist die Nachfrage nach Akademikerinnen und Akademikern mit dem relevanten Fachwissen in Physik, Mathematik und Ingenieurwissenschaft sowie den notwendigen interdisziplinären Kompetenzen kaum zu decken. Noch intensivere Bemühungen, um die Zahl der qualifizierten Fachkräfte zu steigern – auch über neue Wege für die Weiterbildung von Fachkräften aus angrenzenden Bereichen – sind vor diesem Hintergrund essenziell. Dabei ist es notwendig, eine attraktive Umgebung für zukünftige Arbeitnehmende im Feld zu schaffen und möglichen gesellschaftlichen und ethischen Herausforderungen entgegenzuwirken.



Internationale Kooperationen fördern und Abhängigkeiten vermeiden

Erfolgreiche Ökosysteme sind auf das Wissen und die Vernetzung der weltweit besten Köpfe angewiesen. Dabei gilt es, durch kluge und angemessene Regulatorik dem berechtigten Interesse an technologischer Souveränität sowie dem Schutz individueller IP-Rechte Rechnung zu tragen und gleichzeitig internationale Kooperationen nicht nur weiter zu ermöglichen, sondern noch effizienter und systematischer zu gestalten.

Zusammenfassend lässt sich anhand der identifizierten Potenziale und Bedarfe des internationalen Quantencomputing-Ökosystems feststellen, dass die Handlungsfelder »Finanzierung und Förderung«, »Integration in Unternehmen«, »Bildung und Gesellschaft« und »Internationale Kooperation und Technologiesouveränität« die Grundlage für den sich dieser Interviewstudie anschließenden Roadmapping-Prozess in der Region Heilbronn-Franken bilden sollten. In diesem Prozess werden die identifizierten Bedarfe gemeinsam mit einem internationalen Advisory Board und Stakeholdern vor Ort auf Relevanz und Handlungsoptionen in der Region geprüft und Lösungsansätze entwickelt. Ziel ist die Formulierung der Quantencomputing-Roadmap im dritten Quartal 2024. Eine Veröffentlichung der Roadmap ist vorgesehen. Ein internationales Trendmonitoring mit Expertinnen und Experten soll eine kontinuierliche Berücksichtigung neuer Entwicklungen im Rahmen der Umsetzung der Roadmap ermöglichen.

1 Game Changer Quantencomputing?!

Strategische Relevanz und Zielstellung der Studie

Quantencomputing hat in den letzten Jahren aufgrund seines hohen disruptiven Potenzials ein massives Interesse auf sich gezogen. Insbesondere die wissenschaftliche Community widmet dem Thema zunehmende Aufmerksamkeit (vgl. Scheidsteger, Haunschild, Bornmann und Ettl, 2021). Im Spannungsfeld zwischen dem Hype, der den Technologiebereich begleitet, sowie neuen, disruptiven Ansätzen für komplexe, bisher teilweise unlösbare Probleme in Wissenschaft und Wirtschaft, stellt sich die Frage: Warum sollte sich eine bestimmte Region, in diesem Fall die Region Heilbronn-Franken mit einer solchen Technologie, die zum größten Teil noch der Grundlagenforschung zuzuordnen ist, auseinandersetzen? Das Forschungsfeld umfasst aktuell einige der bedeutendsten technologischen Fortschritte, die es ermöglichen könnten, Probleme zu lösen, die mit herkömmlichen Rechnerarchitekturen nur eingeschränkt oder gar nicht bearbeitbar sind. Als potenzielle Sprunginnovation könnte dies radikal neue Produktions- und Wertschöpfungsprozesse ermöglichen und Auswirkungen auf viele Bereiche des öffentlichen Lebens haben. Bereits heute werden unter anderem komplexe Simulationen von finanziellen Risiken, Optimierung von logistischen Problemen sowie molekularen Modellierungen zur Berechnung neuer Wirkstoffe diskutiert und prototypisch erprobt. Diese beispielhaften Anwendungen in der Finanz-, Mobilitäts- und Pharmabranche sind nur einige der Gründe für die derzeit große Aufmerksamkeit, die die Erforschung der Hard- und Softwareentwicklung aus Politik und Wirtschaft erfahren – auch wenn Quantencomputer und die damit verbundenen Technologien sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium befinden.

Um eine effiziente Zukunftsvorsorge für die Region zu betreiben, ist jedoch schon jetzt eine Auseinandersetzung mit der Technologieentwicklung notwendig. Dafür sollte beispielsweise diskutiert werden, wie die frühzeitige Auseinandersetzung der heimischen Unternehmen mit den Potenzialen der neuen Technologie aussehen könnte. Auch potenzielle Auswirkungen auf sicherheitskritische Bereiche der Informations- und Kommunikationsinfrastruktur bis hin zu Fragen für die Wahrung der nationalen Technologiesouveränität und zum Aufbau einer europäischen Technologieführerschaft, sind in diesem Zusammenhang relevant.

Um perspektivisch das strategische Potenzial von Quantencomputing für die Region Heilbronn-Franken zu bewerten und zu heben, zielt die vorliegende internationale Interviewstudie darauf ab, die **Potenziale und Bedarfe des internationalen Quantencomputing-Ökosystems** zu analysieren und auf dieser Grundlage **Ansatzpunkte für dessen Stärkung und Weiterentwicklung** abzuleiten. Dadurch liefert sie die empirische Grundlage und den analytischen Rahmen für einen sich noch anschließenden Roadmapping-Prozess, der die Potenziale von Quantencomputing für die Region Heilbronn-Franken erschließen soll. Aufbauend auf den Ergebnissen dieser Studie soll die Region in die Lage versetzt werden, entlang ihrer traditionellen Stärken die relevanten Kompetenzen und Ressourcen in einer strategisch wichtigen Schlüsseltechnologie zu erschließen. Durch ihren internationalen, übergeordneten Blick ermöglicht es die Studie, dass sich die Region perspektivisch als regionales Sub-Ökosystem wirkungsvoll in das internationale Quantencomputing-Ökosystem integrieren kann. Bei der Identifikation möglicher funktionaler Rollen und Aktivitäten werden Kriterien der internationalen Exzellenz genauso berücksichtigt wie standortspezifische Anforderungen.

Das entsprechende methodische Vorgehen wird im nächsten Kapitel detailliert beschrieben (Kapitel 2), anschließend wird ein Überblick zum Aufbau des Ökosystems und der regionalen Kompetenzzentren in Deutschland gegeben (Kapitel 3). Kapitel 4 umfasst schließlich die Ergebnisdarstellung der internationalen Interviewstudie und gibt die Potenziale und Bedarfe im Bereich Quantencomputing aus Sicht von Expertinnen und Experten wieder. Darin werden unter anderem das gegenwärtige und zukünftige Wertschöpfungsversprechen sowie die technologischen Trends, mögliche Anwendungsfelder und ökologische Potenziale diskutiert (Kapitel 4.1). Darauf folgend werden die, sich aus den Interviews explizit und implizit ergebenden, zentralen Bedarfe des internationalen Ökosystems vorgestellt. Dies schließt insbesondere die Bereiche Finanzierung und Förderung, Integration in Unternehmen, Bildung und Gesellschaft sowie internationale Kooperationen und Technologiesouveränität ein (Kapitel 4.2). Kapitel 5 fasst die empirischen Ergebnisse und den sich daraus für das Roadmapping ergebenden analytischen Rahmen nochmal zusammen und erläutert das weitere Vorgehen im Kontext des Projekts.

2 Methodisches Vorgehen

Das Ziel der vorliegenden Studie ist die Aufbereitung der Ergebnisse einer umfassenden Bedarfs- und Potenzialanalyse im Bereich Quantencomputing. Dazu wurde mit Hilfe der Perspektiven von Wissensträgerinnen und Wissensträgern aus unterschiedlichen Sektoren das aktuell sehr dynamische internationale Quantencomputing-Ökosystem analysiert. In diesem Zuge wurden Expertinnen und Experten für Quantencomputing aus Deutschland, den USA, Kanada, Schweiz, Australien, Israel, Niederlande und Österreich im Rahmen leitfadengestützter Interviews befragt (siehe Abbildung 1). Im Mittelpunkt der Interviews stand ihre Einschätzung zum aktuellen Stand der Forschung, Entwicklung und Anwendung von Quantencomputing, zu besonders relevanten Akteuren innerhalb des Ökosystems, den Potenzialen sowie zu Herausforderungen, offenen Bedarfen und potenziellen Risiken. Im Folgenden werden das theoretische Verständnis sowie das methodische Vorgehen, das der Bedarfs- und Potenzialanalyse zugrunde liegt, erläutert.

Innovationsökosystemverständnis

Die vorliegende Studie basiert auf dem Konzept sogenannter Innovationsökosysteme. Innovationsökosysteme sind Netzwerke bestehend aus Akteuren aus unterschiedlichen Sektoren, die in dynamischen Formen der Kooperation zur Entstehung von Wissen und Innovationen beitragen. Sie überschreiten dabei lineare Wertschöpfungs- und Innovationsprozesse und sind charakterisiert durch ihren dezentralen und iterativen Charakter (Adner, 2006; Gomes et al., 2018; Jütting, 2020). Granstrand und Holgersson (2020) beschreiben das Konzept als eine sich fortlaufend entwickelnde Zusammenstellung von Akteuren, Aktivitäten, Artefakten, Institutionen und Beziehungen. Erfolgreiche Innovationsökosysteme funktionieren entlang einer Quadruple-Helix-Logik, gemäß dieser neben Akteuren aus den Bereichen Wirtschaft und Wissenschaft gleichermaßen Akteure aus Politik und Gesellschaft am Innovationsprozess teilhaben. Dieser integrative Ansatz spiegelt die Überzeugung wider, dass erfolgreiche Innovationen nicht nur auf technologischem und wirtschaftlichem Fortschritt beruhen, sondern auch eine breite Akzeptanz und Unterstützung seitens der Gesellschaft und der politischen Entscheidungsträger erfordern (Carayannis und Campbell, 2009; McAdam

und Debackere, 2018). Indem die internationale Quantencomputing-Landschaft als ein transdisziplinäres Netzwerk verstanden wird, in dem Wissen sowohl durch wirtschaftliche und wissenschaftliche als auch gesellschaftliche und politische Quellen produziert wird, wird in dieser Studie auf die Idee der Quadruple-Helix-Innovationsökosysteme zurückgegriffen. In der konkreten Umsetzung spiegelt sich dies durch den Einbezug diverser Perspektiven aus den vier Helixen in der Befragung wider. In diesem Sinne verfolgt die vorliegende Studie einen umfassenden und integrativen Ansatz, der darauf abzielt, neben technologischen und wissenschaftlichen Fortschritten im Quantencomputing, auch politische und gesellschaftliche Dimensionen des Innovationsprozesses zu identifizieren.

Im Rahmen dieser Studie wird der Begriff »Ökosystem« synonym für »Innovationsökosystem«, im Sinne der Beschreibung oberhalb, verwendet. Gleichzeitig sprechen wir von »dem« internationalen Quantencomputing-Ökosystem, dass wir empirisch durch die internationalen Perspektiven und vielfältigen Hintergründe der interviewten Expertinnen und Experten abbilden. Dabei sind wir uns bewusst, dass das internationale Ökosystem sich fortlaufend dynamisch verändert und aus einzelnen, technologisch oder geografisch spezifischen Sub-Ökosystemen besteht. Aufgrund der weitreichenden Vernetzung im internationalen Forschungsfeld Quantencomputing ist der Bezugsrahmen für die Sub-Ökosysteme jedoch in der Regel die internationale Akteurslandschaft und deren Dynamik. Vor diesem Hintergrund müssen sich Sub-Ökosysteme – und damit auch die angestrebte Quantencomputing-Roadmap für die Region Heilbronn–Franken – in dieses internationale Ökosystem einbinden und dort ihre Rolle finden. Deshalb liegt der Fokus dieser Studie auf den übergeordneten internationalen Perspektiven als Referenzrahmen auch für zukünftige Aktivitäten in der Region Heilbronn-Franken.

Der Forschungsprozess umfasste dabei mehrere Schritte, um ein umfassendes Verständnis des Quantencomputing-Ökosystems zu erlangen. In den folgenden Abschnitten werden diese Schritte des Forschungsprozesses detailliert aufgeschlüsselt.

Stakeholder-Mapping

Der Auswahl der Expertinnen und Experten für die Interviews ging eine umfangreiche Stakeholder-Analyse voraus. Im Einklang mit der Quadruple-Helix-Logik wurden potenzielle Expertinnen und Experten aus den Bereichen Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Gesellschaft für die Interviews identifiziert. Daneben wurden noch zwei weitere Mechanismen zur Auswahl der Interviewpartnerinnen und Interviewpartner genutzt: (1) Empfehlungen der Expertinnen und Experten des Teams Quantencomputing des Fraunhofer-Instituts für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO und (2) Schneeballsystem, anhand dessen alle Befragten am Ende der Gespräche nach weiteren Empfehlungen für Interviewpartnerinnen und Interviewpartner befragt wurden. Um eine nuancierte Perspektive zu gewährleisten, wurden im Wirtschaftsbereich Unternehmen verschiedener Organisationsgrößen – von Startups bis hin zu etablierten Großunternehmen – einbezogen. Ferner wurden, um gleichermaßen Einblicke in die Entwicklungen im Bereich Software als auch Hardware zu erhalten, bei den Interviews mit Vertreterinnen und Vertretern aus Wirtschaft und Wissenschaft beide Forschungs- und Entwicklungsbereiche eingehend betrachtet. Darüber hinaus wurde darauf geachtet, ein umfassendes Verständnis der Technologieentwicklung zu erlangen, das globalen Gültigkeitsansprüchen entspricht und internationale Perspektiven berücksichtigt. Daher wurden Vertreterinnen und Vertreter aus unterschiedlichen Ländern, darunter Deutschland, USA, Kanada, Schweiz, Australien, Israel, Niederlande und Österreich, befragt (vgl. Abbildung 1).

Begleitend zu dieser Literaturrecherche und expertenbasierten Stakeholder-Analyse wurde eine indikatorengestützte Identifikation der zentralen Ökosystemknotenpunkte umgesetzt, die die Expertauswahl nochmals validierte. Basierend auf einer quantitativen Auswertung diverser Leistungsindikatoren und Datenquellen wurden die bedeutendsten nationalen und internationalen Akteure und Regionen im Bereich des Quantencomputings identifiziert und analysiert.

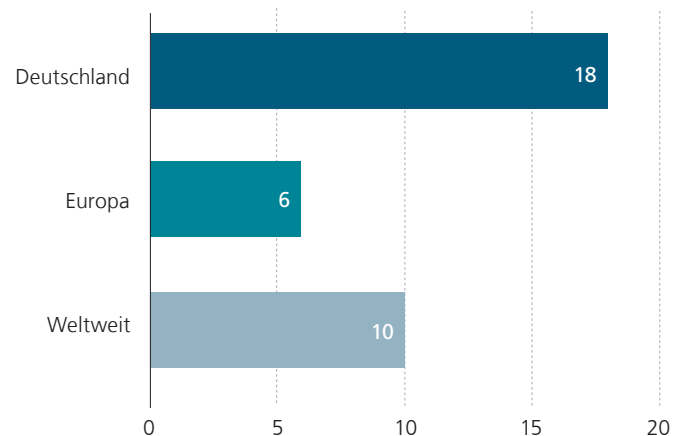


Abbildung 1: Nationalitäten

Die Interviewteilnehmenden repräsentierten dabei eine Gruppe führender Entscheidungsträgerinnen und Entscheidungsträger in ihren jeweiligen Organisationen. Im Unternehmensbereich handelte es sich überwiegend um Personen auf Geschäftsführungs- oder Managementebene mit fundierter Technologieexpertise, während im wissenschaftlichen Sektor renommierte Forscherinnen und Forscher, größtenteils in leitenden Positionen auf Bereichs- oder Institutsleitungsebene, vertreten waren. Auf politischer Ebene wurden für Quantencomputing verantwortliche Mitarbeitende aus Landes- und Bundesministerien befragt und die gesellschaftliche Perspektive wurde durch Expertinnen und Experten an der Schnittstelle von Quantencomputing und Gesellschaft abgedeckt. Die Berücksichtigung der Geschlechtervielfalt erwies sich im Feld Quantencomputing als Herausforderung, wurde aber soweit möglich berücksichtigt.

Insgesamt wurden 34 Personen befragt, darunter 19 Personen aus dem Bereich Wirtschaft (Startup: 7, KMU: 4, Netzwerke und Vereine: 4 und Großunternehmen: 4), 8 Personen aus dem Bereich Wissenschaft, 5 Personen aus dem Bereich Politik und 2 Personen, die sich als Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler vor allem mit den gesellschaftlichen Wirkungen von Quantencomputing befassen (vgl. Abbildung 2).

Thematische Schwerpunkte der Interviews

Als Grundlage für die semistrukturierten Interviews diente ein Interview-Leitfaden, der basierend auf einer im Vorfeld durchgeführten Recherche über wissenschaftliche Artikel und Branchen- sowie Marktforschungsberichte und entlang der zentralen Themenkomplexe für unsere Studie entwickelt wurde. Der Leitfaden umfasste die folgenden Themenblöcke:

- Stand der internationalen Forschung, Entwicklung und Anwendung von Quantencomputing,
- Herausforderungen im Hinblick auf die Entwicklung, Anwendung und Kommerzialisierung von Quantencomputing,
- Herausforderungen und Bedarfe im Hinblick auf Förderungs-, Forschungs- und infrastrukturelle Ressourcen,
- Anforderungen an erfolgreiche Quantencomputing-Ökosysteme,
- potenzielle gesellschaftliche und ökologische Risiken und Auswirkungen,
- Anforderungen an die Aus- und Weiterbildung im Bereich Quantencomputing.

Durchführung der Interviews

Im Durchschnitt dauerten die Interviews etwa 60 Minuten und wurden über die Plattform Microsoft Teams geführt. Die Interviews wurden nach erfolgter Zustimmung aufgezeichnet, um die spätere Auswertung zu ermöglichen. Im Einklang mit geltenden Datenschutzbestimmungen wurde eine entsprechende Datenschutzrichtlinie verfasst und an die Teilnehmerinnen und Teilnehmer versendet. Darin wurden detaillierte Informationen über den Forschungszweck, den Umgang mit personenbezogenen Daten sowie die Wahrung von Anonymität dargestellt. Eine ausdrückliche Einwilligungserklärung von allen Teilnehmerinnen und Teilnehmern wurde im Vorfeld der Interviews eingeholt. Im gesamten Prozess wurde sichergestellt, dass Datenschutz und Privatsphäre der Teilnehmenden in höchstem Maße respektiert werden.

Auswertung der Interviews

Die Auswertung der Interviews umfasste im ersten Schritt die schriftliche Transkription der Interviews durch einen externen Dienstleister. Der anschließende Auswertungsprozess startete mit der Anonymisierung der Transkripte und folgte eine strukturierte qualitative Inhaltsanalyse nach Mayring (2010) sowie Kuckartz und Rädicker (2020). Hierbei wurde ein mehrstufiges Verfahren durchgeführt, das sowohl aus induktiven und deduktiven Ansätzen bestand. Um eine strukturierte Grundlage für die Auswertung zu schaffen, wurde im Vorfeld ein Codebuch entwickelt, das sich aus dem Interview-Leitfaden ableiten ließ. Während des Codierprozesses wurde dieses Codebuch iterativ erweitert. Weitere Kategorien und

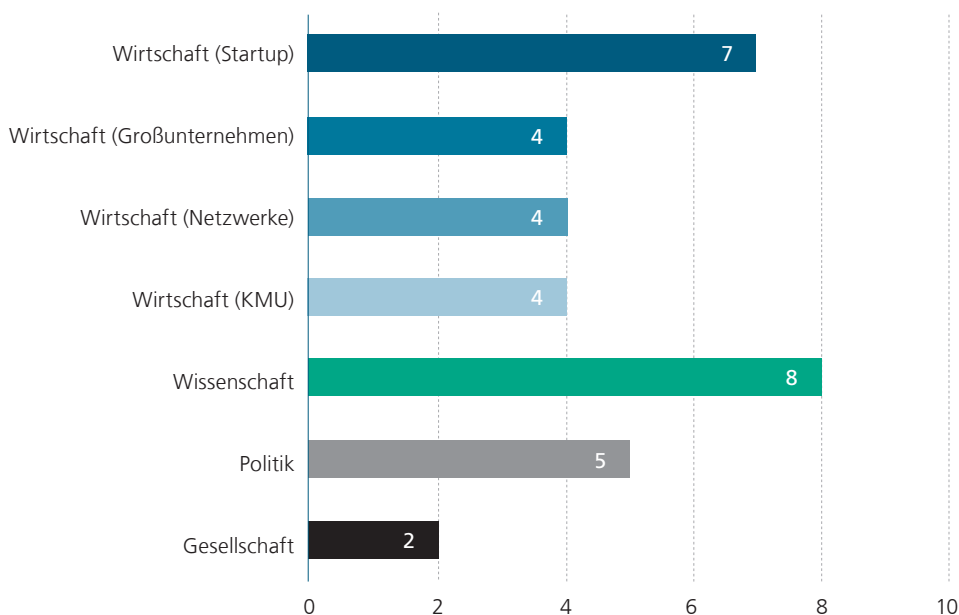


Abbildung 2: Anzahl der Vertreterinnen und Vertreter der verschiedenen Sektoren

Unterkategorien, die sich aus dem Datenmaterial ergaben, wurden ergänzt. Zur Unterstützung der Codierung des umfassenden Datenmaterials wurde die Software MAXQDA verwendet. Schließlich wurden die codierten Segmente systematisch und kategorienbasiert ausgewertet. Zentrale Erkenntnisse und Kernbotschaften wurden dabei basierend auf der wiederkehrenden und konsistenten Nennung der Befragten identifiziert.

Mit dem Ziel eine Potenzial- und Bedarfsanalyse für das internationale Quantenökosystem zu erstellen, wurden diese zentralen Erkenntnisse zusammengefasst und als »Potenziale« oder »Bedarfe« beschrieben. Unter Potenziale verstehen wir die technologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Möglichkeiten, welche sich aus der fortschreitenden Entwicklung des Quantencomputings ergeben können. Demgegenüber stehen die Bedarfe, welche die notwendigen Voraussetzungen zur Realisierung der Möglichkeiten aufzeigen.

Disclaimer zur Nutzung generativer künstlicher Intelligenz

Bei der Aufbereitung der Ergebnisse für diesen Bericht wurde punktuell das OpenAI-Sprachmodell GPT-3.5-turbo verwendet, um Textpassagen sprachlich bzw. stilistisch zu verfeinern. Es ist wichtig zu betonen, dass die inhaltlichen Aussagen ausschließlich auf den ursprünglich und eigenständig verfassten Texten basieren.

Chancen und Limitationen des methodischen Vorgehens

Durch das qualitative Vorgehen wurde eine explorative Erhebung individueller Perspektiven und Meinungen ermöglicht. Die verschiedenen Akteursgruppen lieferten insgesamt ein umfangreiches Bild des Quantencomputing-Ökosystems. Diese

Tiefe der Einblicke erlaubte es, ein umfassendes Kontextverständnis aufzubauen und Zusammenhänge und Wechselwirkungen innerhalb des Ökosystems zu erkennen. Durch die bewusste Wahl einer semistrukturierten Exploration konnten Flexibilität und der Freiraum gewährleistet werden, auf Impulse zu reagieren und weiterführende Fragen zu stellen. Die zugesicherte Anonymität garantierte einen Rahmen, der den Befragten erlaubte, ihre Perspektiven frei und subjektiv zu äußern. An dieser Stelle ist es wichtig zu betonen, dass mit dem Vorgehen keine statistische Repräsentativität und Quantifizierung der Aussagen erreicht werden konnte, sondern vielmehr ein Grundverständnis und die Basis für die Formulierung von Thesen, die im Nachgang weiter validiert und quantifiziert werden sollen.

Ausblick: Roadmapping für die Region Heilbronn-Franken

Die Ergebnisse der Bedarfs- und Potenzialanalyse sollen als Grundlage für die strategische Entwicklung und gezielte Anwendung von Quantencomputing in der Region Heilbronn-Franken fungieren. Um die Potenziale dieser aufstrebenden Technologie für die Region nutzbar machen zu können, wird aktuell ein Roadmapping-Prozess umgesetzt. Das Ziel besteht darin, in einem mehrstufigen Vorgehen und begleitet von einem internationalen Advisory Board sowie regionalen Stakeholdern, eine Strategie zu definieren, die die Entwicklung und Anwendung von Quantencomputing in der Region systematisch und bedarfsorientiert fördert. Dieses Vorgehen baut auf den in dieser Studie dargestellten Erkenntnissen auf und validiert diese. Potenzielle Lösungsansätze, die in den Interviews benannt und identifiziert wurden, werden dazu mit den Bedarfen und der Ausgangssituation in der Region abgeglichen und ggf. angereichert und ergänzt. Es ist geplant, die Roadmap im Spätsommer 2024 zu veröffentlichen.

3 Die Ökosystemarchitektur

Deutschland gestaltet die global fortschreitenden Trends im Bereich Quantencomputing in diversen Kompetenzzentren maßgeblich mit. Auf Basis verschiedener Datenquellen und Indikatoren werden in diesem Kapitel die wichtigsten Akteure und Regionen im Bereich des Quantencomputing identifiziert und analysiert. Das Kapitel fokussiert sich überwiegend auf das nationale Quantencomputing-Ökosystem Deutschland, wobei zusätzlich auch die relevantesten internationalen Akteure und Regionen beleuchtet werden.

3.1 Datenerhebung und Analyse

Im Anschluss an das im letzten Kapitel erläuterte Verständnis eines Innovationsökosystems wurden mittels einer Literaturrecherche geeignete Kriterien zur Identifikation zentraler Knotenpunkte im Quantencomputing-Ökosystem definiert. Aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums von Quantencomputing konzentriert sich die Analyse auf die Helix-Dimensionen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik. Die Datengrundlage bilden neben einer Literaturrecherche insbesondere die Projektlandkarten des VDI (2022) und die Aktivitätenlandkarte Quantencomputing des Fraunhofer IMW (2024) sowie die Rechercheplattformen KATI, Web of Science, PatBase, Questel, Crunchbase und Dimensions. Die nachfolgende Grafik veranschaulicht die Methodik der Analyse sowie die zugrundeliegenden Indikatoren und Quellen im Kontext der in Kapitel 2 erläuterten Quadruple-Helix Dimensionen.

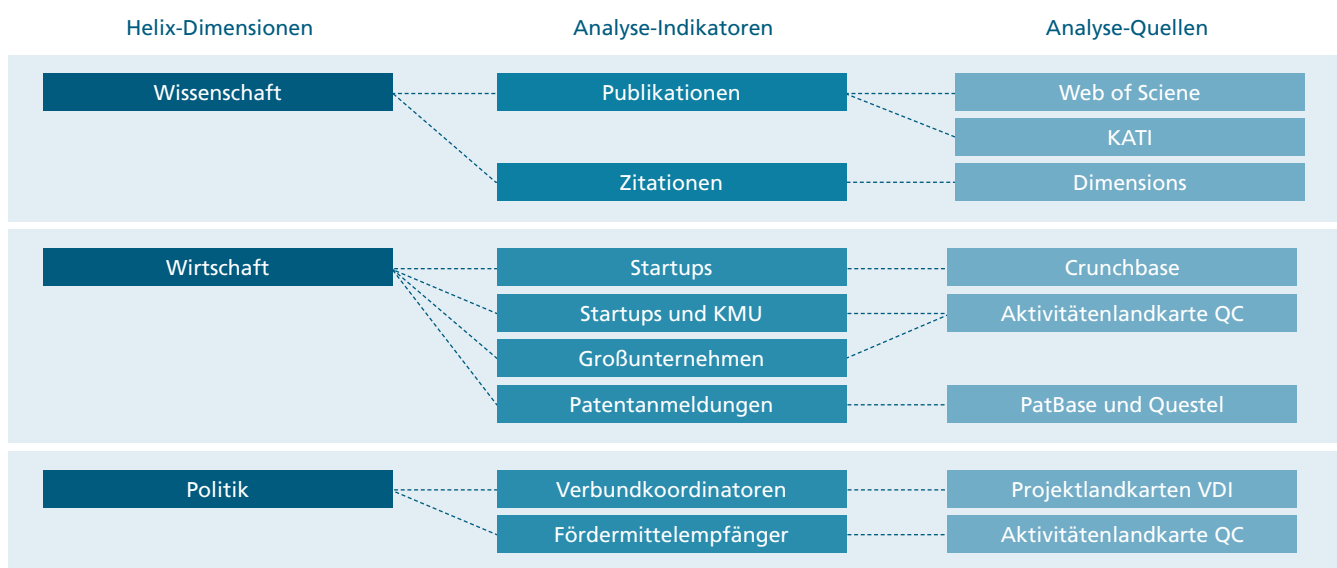


Abbildung 3: Methodik der Ökosystemanalyse

Zur Identifikation einer geeigneten Datenbasis wurde ein Suchstring definiert (Abbildung 4) und Limitationen festgelegt. Der Suchstring wurde auf der Grundlage vorangegangener systematischer Literaturanalysen und der Beschränkung auf Quantentechnologien der zweiten Generation entwickelt (vgl. Wang, Shen und Zhou, 2021; Scheidsteger, Haunschild, Bornmann und Ettl, 2021). Kleinere Anpassungen im Suchstring wurden vorgenommen, um den Anforderungen der einzelnen Plattformen zu entsprechen.

Suchstring

```
(( »quantum comput*« OR »quantum supremacy« OR
»quantum error correction« OR »quantum annealer« OR
»quantum hardware« OR »quantum device*« OR »quantum
circuit« OR »quantum processor*« OR »quantum register*«
OR (»quantum simulat*« AND (qubit* OR »quantum bit*«
OR »quantum comput*«)) OR »quantum algorithm*« OR
»quantum software« OR »quantum cod*« OR »quantum
program*« OR »quantum machine learning« OR »quantum
advantage« ) AND year:[ 1999 TO 2024 ] AND
(country:%Germany%)
```

Abbildung 4: Suchstring der Ökosystemanalyse

Die nachfolgende Auswertung gibt transparente Implikationen zur Identifikation nationaler und internationaler Hotspots bzw. Knotenpunkte im Quantencomputing-Ökosystem. Bedingt durch die teilweise eingeschränkte Verfügbarkeit und Transparenz der Datenbasis können kleinere Verzerrungen in der regionalen Zuordnung von Institutionen entstehen. Diese wurden nach Möglichkeit bereinigt, dennoch können weiterhin bestehende Verzerrungen nicht komplett ausgeschlossen werden.

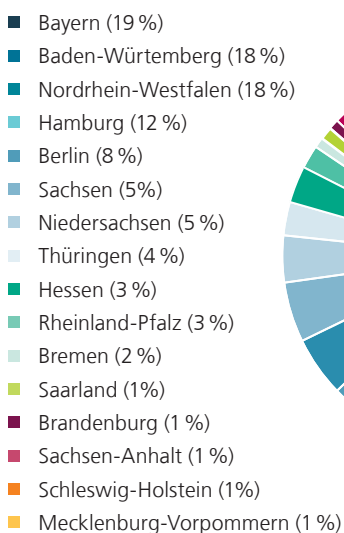


Abbildung 5: Beteiligung der einzelnen Bundesländer an Publikationen im Feld des Quantencomputing (Datenbank: Web of Science/KATI; Zeitspanne: 1999 bis 2024)

3.2 Nationale Quantencomputing-Zentren

In diesem Abschnitt werden die nationalen Knotenpunkte im deutschen Quantencomputing-Ökosystem bestimmt. Zunächst werden die Schlüsselakteure entlang der einzelnen Helix-Dimensionen anhand der in Abbildung 3 dargestellten Indikatoren identifiziert. Durch die Triangulation der Untersuchungsergebnisse in den Dimensionen Wissenschaft, Wirtschaft und Politik werden dann die wichtigsten regionalen Knotenpunkte definiert.

Helix-Dimension: Wissenschaft

Die Wissenschaft spielt insbesondere durch die Entwicklung und den Transfer von neuem Wissen eine entscheidende Rolle für Innovationen. Anhand von Publikations- und Zitationszahlen kann die wissenschaftliche Produktivität und Relevanz von Einrichtungen vor allem im Bereich der (Grundlagen-) Forschung gemessen werden. Weitere relevante Aktivitäten der Einrichtungen zum Beispiel in der Lehre und dem Transfer können durch die reine Betrachtung der Publikations- und Zitationszahlen nicht abgebildet werden. Hinzu kommt, dass sich die angewandte Forschung erst seit ein paar Jahren mit dem Thema Quantencomputing befasst und daher in der Publikationslandschaft aktuell noch unterrepräsentiert ist. Dementsprechend sind in der Publikations- und Zitationsanalyse insbesondere auf Grundlagenforschung fokussierte Einrichtungen besonders stark vertreten.

Nach Web of Science wurden in Deutschland seit 1999 im Forschungsfeld Quantencomputing insgesamt 5.776 wissenschaftliche Publikationen veröffentlicht. Die Anzahl der Veröffentlichungen hat in den letzten Jahren stark zugenommen. So wurden zwischen 2017 und 2023 fast 50 Prozent der Publikationen der letzten 25 Jahre veröffentlicht. Die im weiteren Verlauf des Kapitels vorgestellten Analysen betrachten die Publikationsaktivitäten verschiedener Einrichtungen und Organisationen im Zeitraum von 1999 bis 2024.

Die Abbildung auf der linken Seite gibt eine Übersicht darüber, an wie vielen Publikationen Akteure aus den einzelnen Bundesländern beteiligt waren. Es zeigt sich, dass der Großteil der Publikationen Entitäten aus Bayern, Baden-Württemberg und Nordrhein-Westfalen zuzuordnen ist. Auch Berlin und Hamburg zeigen sich besonders publikationsstark.

In der nachfolgenden Publikationsanalyse sind primär auf Grundlagenforschung fokussierte Einrichtungen, wie Universitäten oder die Helmholtz-Gemeinschaft und die Max-Planck-Gesellschaft vertreten. Aufgrund der verfügbaren Datenausgabe von Web of Science können deren Publikationen jedoch nicht immer den einzelnen Instituten direkt zugeordnet und somit regional verortet werden. Die folgende Abbildung präsentiert die 30 Organisationen mit der höchsten Publikationsaktivität in Deutschland.

Ein Vergleich der Analyse auf Länderebene (Abbildung 5) und Entitätsebene (Abbildung 6) offenbart ein konsistentes Bild. Besonders die Regionen um München, Stuttgart, Jülich und Berlin zeichnen sich durch eine hohe Anzahl an Publikationen

aus. Diese publikationsstarken Regionen können einerseits aus der räumlichen Ballung verschiedener Einrichtungen (z. B. Region Jülich: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), Forschungszentrum Jülich (FZJ) und Universität Köln), andererseits aus der Publikationsstärke einzelner Institute (z. B. Region Karlsruhe: Karlsruher Institut für Technologie (KIT)) resultieren. Des Weiteren zeichnet sich auch die Region Hannover aufgrund der physikalisch-technische Bundesanstalt (PTB) und der Leibniz Universität Hannover durch eine hohe Publikationszahl aus. Weitere wichtige Akteure sind unter anderem in Ulm, Bochum, Erlangen-Nürnberg, Heidelberg, Bremen, Würzburg, Dortmund, Essen, Mainz, Regensburg, Darmstadt, Hamburg, Dresden, Konstanz und Jena verortet.

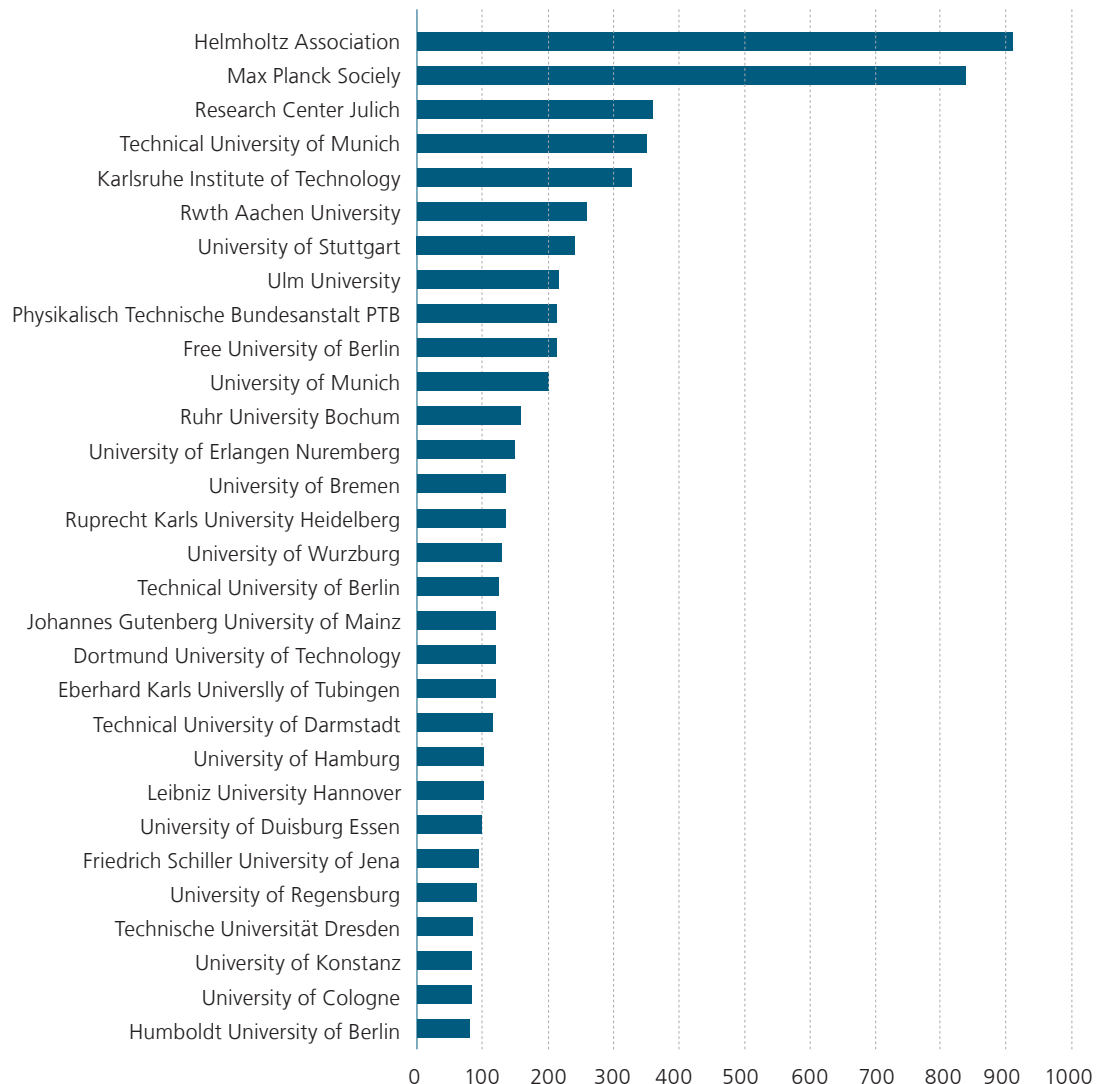


Abbildung 6: Anzahl der Publikationen in Abhängigkeit der Forschungseinrichtungen (Datenbank: Web of Science KATI; Zeitspanne: 1999 bis 2024)

Web of Science ist eine der umfangreichsten und ältesten wissenschaftlichen Datenbanken und eignet sich daher gut für die Analyse von Publikationszahlen (Pendlebury, Schnell und Adams, 2020). Eine Auswertung nach Zitationen kann aufgrund des besseren Benutzerinterfaces effizienter über die Plattform Dimensions durchgeführt werden. Es bleibt jedoch zu beachten, dass Dimensions im Vergleich zu Web of Science auf eine kleinere Datenbasis zugreift.

Die nachfolgende Abbildung 7 zeigt die Anzahl an Zitationen im Bereich des Quantencomputing auf Basis von Dimensions in Abhängigkeit der 30 relevantesten Universitäten und Forschungseinrichtungen.

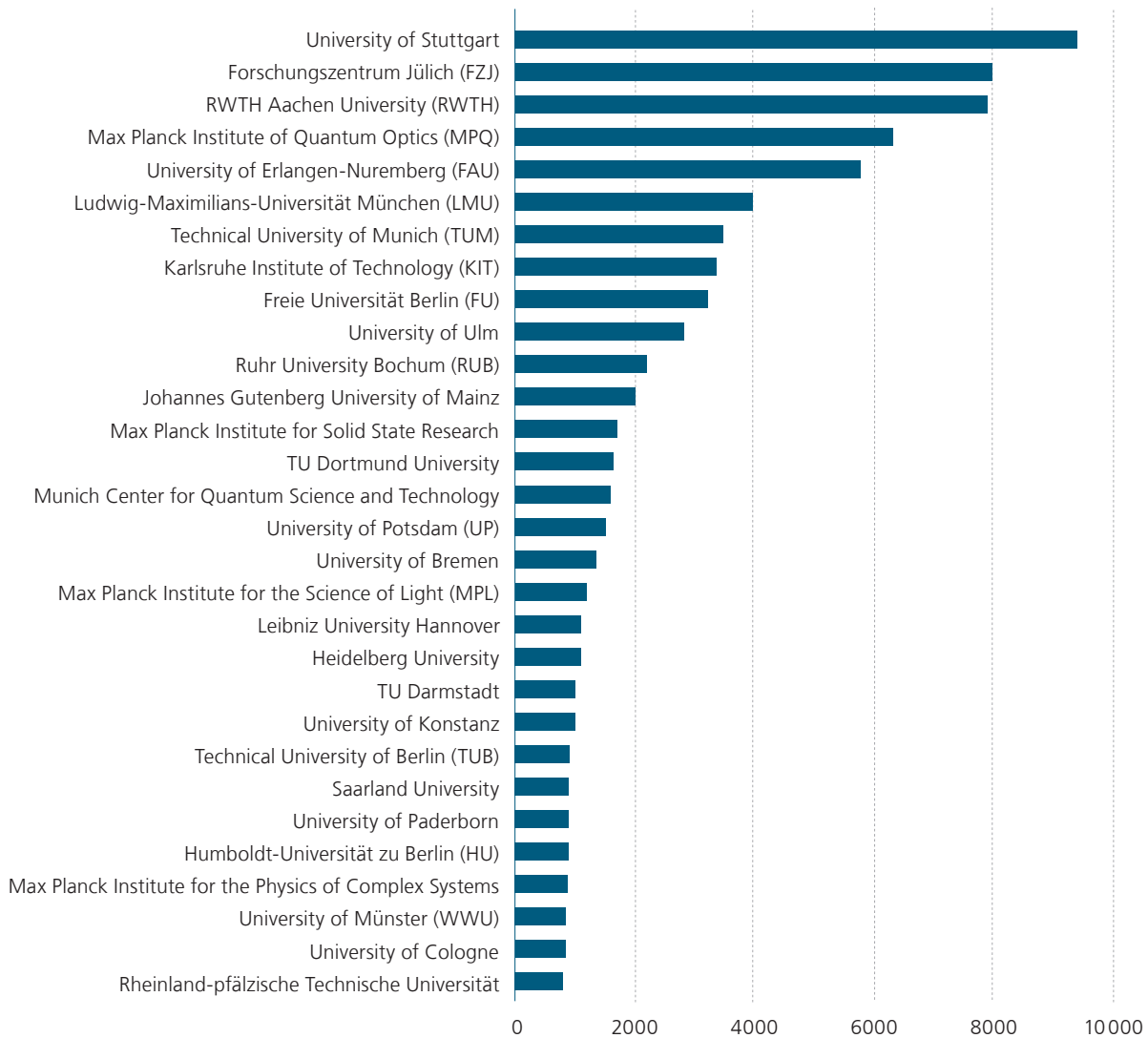


Abbildung 7: Anzahl der Zitationen in Abhängigkeit der Forschungseinrichtungen (Datenbank: Dimensions; Zeitspanne: 1999 bis 2024)

Auch in der Analyse der Zitationen zeigen sich ähnliche Implikationen wie bei den Publikationsanalysen. Die Universität Stuttgart ist die am häufigsten zitierte Einrichtung. Ebenso wie bei der Publikationsanalyse ist die Region Jülich und Umgebung mit den Akteuren RWTH, FZJ und Universität Köln mehrfach unter den 30 relevantesten Einrichtungen vertreten. Auch die Region München ist insbesondere durch die Technische Universität München (TUM) und Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) besonders stark und mehrfach gelistet. Die Max-Planck-Gesellschaft nimmt, wie bereits in der Publikationsanalyse deutlich wurde, eine wichtige Position in der Grundlagenforschung zu Quantencomputing ein. Im Vergleich zu Web of Science ermöglicht Dimensions.ai nun eine genauere Zuordnung der Zitationen zu den einzelnen Instituten. Dadurch wird sichtbar, dass die publikationsstarken Max-Planck-Institute insbesondere in den Regionen München und Stuttgart verortet sind. Die Metropolregion Berlin ist mit der FU, TUB, HU und im weiteren Sinne auch der Universität Potsdam ebenfalls mehrfach vertreten. Auch die Region Nürnberg-Erlangen ist mit den Akteuren FAU und MPL zweimal aufgeführt. Weitere wichtige Akteure sind unter anderem das KIT, Universität Ulm, Universität Heidelberg, Universität Bochum, TU Dortmund, Universität Mainz und TU Darmstadt.

Auf Basis der Publikations- und Zitationsanalyse lassen sich folgende sieben regionale wissenschaftliche Kompetenzzentren aus mehreren publikationsstarken Akteuren induktiv herleiten:

- Stuttgart und Umgebung
 - Zentrale Akteure: Universität Stuttgart, Universität Tübingen und Max-Planck-Institut für Festkörperforschung
- München und Umgebung
 - Zentrale Akteure: Technische Universität München, Ludwig-Maximilians-Universität München, Munich Center for Quantum Science and Technology und Max-Planck-Institut für Quantenoptik
- Berlin und Umgebung
 - Zentrale Akteure: Freie Universität Berlin, Technische Universität Berlin, Humboldt-Universität zu Berlin und Universität Potsdam
- Jülich und Umgebung
 - Zentrale Akteure: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Forschungszentrum Jülich, Universität zu Köln
- Hamburg und Umgebung
 - Zentrale Akteure: Technische Universität Hamburg, Universität Hamburg und Deutsches Elektronen-Synchrotron
- Hannover und Braunschweig
 - Zentrale Akteure: Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Leibniz Universität Hannover und TU Braunschweig
- Mainz und Darmstadt
 - Zentrale Akteure: TU Darmstadt und Johannes-Gutenberg-Universität Mainz

Weitere besonders publikationsstarke, überwiegend durch einzelne Akteure vertretene Kompetenzzentren finden sich unter anderem in Karlsruhe, Nürnberg, Ulm, Dortmund, Heidelberg, Würzburg, Jena, Bochum, Regensburg, Konstanz und Bremen.

Helix-Dimension: Wirtschaft

In Quantencomputing-Ökosystemen spielt die Wirtschaft eine zentrale Rolle, da sie Ressourcen für die praktische Anwendung von Forschungsergebnissen bereitstellt und so deren kommerzielle Verwertung fördert.

Laut der Unternehmensdatenbank Crunchbase sind in Deutschland zwanzig Startups ansässig, die ihren Geschäftszweck auf den Bereich des Quantencomputing konzentrieren. Der Großteil dieser Startups befindet sich in den Regionen München (9) und Berlin (4). In der Region um Mainz und Darmstadt sowie in Leipzig sind jeweils zwei weitere Startups ansässig. Die verbleibenden drei Unternehmen verteilen sich auf die Regionen Hannover, Siegen und Saarbrücken. Startups tragen zur Stärkung des deutschen Quantencomputing-Ökosystems bei, indem Sie die Kommerzialisierung und Anwendung der neuen Technologien vorantreiben. Auch wenn die absoluten Zahlen niedrig sind, kann dennoch eine Konzentration der Startups in den Regionen München und mit etwas Abstand auch Berlin ausgemacht werden.

Die Aktivitätenlandkarte Quantencomputing des Fraunhofer IMW (2024) visualisiert die regionale Verteilung aller Organisationen in Deutschland, die derzeit Förderung im Bereich des Quantencomputing erhalten. Neben Forschungseinrichtungen und Hochschulen unterscheidet der Atlas auch zwischen kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) bzw. Startups sowie Großunternehmen. In der Karte sind 83 KMU bzw. Startups und 55 Großunternehmen verzeichnet. Die nachfolgende Abbildung bietet einen Überblick darüber, wie sich die in dem Atlas abgebildeten Entitäten auf die bereits für die Wissenschaft identifizierten regionalen Kompetenzzentren verteilen. Der Großteil (65 Prozent) der öffentlich geförderten Unternehmen verteilt sich auf eines der sieben bereits identifizierten wissenschaftlichen Kompetenzzentren.

In den Regionen Stuttgart, München, Mainz und Darmstadt erhalten besonders viele Großunternehmen öffentliche Förderung. Bezüglich der kleineren Quantencomputing-Unternehmen weist die Region München mit 16 Akteuren die größte Anzahl an öffentlich geförderten kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) auf. Neben München erhalten auch aus Berlin, Stuttgart, Hannover und Jülich besonders viele KMU öffentliche Förderung.

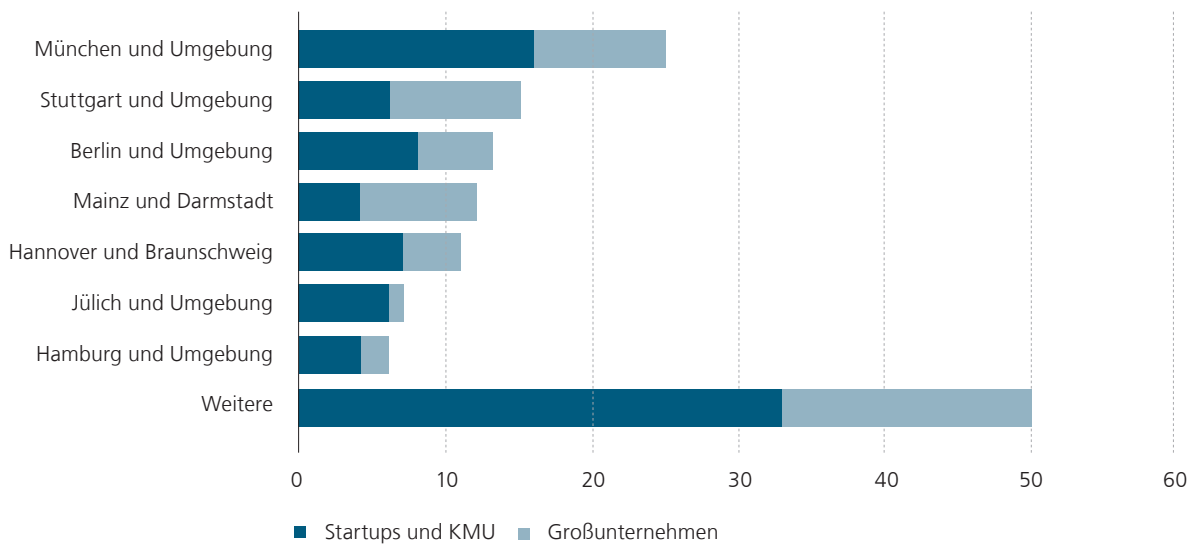


Abbildung 8: Verteilung der öffentlich geförderten Unternehmen auf die bereits identifizierten wissenschaftlichen Kompetenzzentren (Datenbank: Aktivitätenlandkarte Quantencomputing; Stand: 15.01.2024)

Die Anzahl der Patente in einer Region kann zusätzlich Aufschluss über deren Innovationskraft geben. In Deutschland konnten anhand einer Analyse von PatBase und Questel 39 aktive Patente identifiziert werden, die direkt im Kontext des Quantencomputing erteilt wurden. Die nachfolgende Tabelle bietet einen Überblick über die zehn bedeutendsten Patentanmelder in Deutschland. Zum einen stellt die Tabelle die bereits erteilten Patente (grün) sowie laufende Patentanmeldungen (blau) dar.

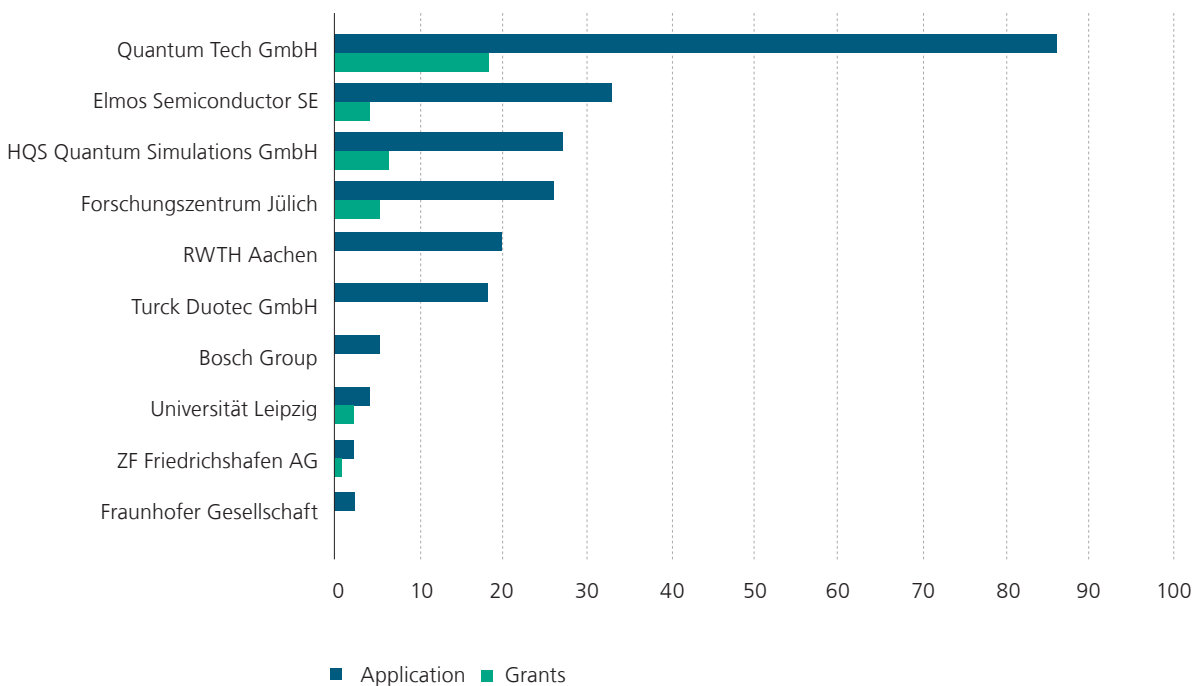


Abbildung 9: Patentanmeldungen im Bereich Quantencomputing nach Organisationen (Datenbank: PatBase; Zeitspanne: 1999 bis 2024)

Die Beschränkung der Suche auf das Gebiet des Quantencomputing erweist sich insbesondere im Rahmen der Patentanalyse als herausfordernd. Obwohl die Suche stark eingeschränkt wurde, ergeben sich dennoch Patente im Sample, die nicht eindeutig und ausschließlich dem Gebiet des Quantencomputing zugeordnet werden können. Dieser Umstand, zusammen mit der allgemein geringen Anzahl an identifizierten Patenten, lässt darauf schließen, dass Quantencomputing nach wie vor eine Technologie mit einem niedrigen Reifegrad darstellt. Insbesondere die anwendungsnahe Forschung und Entwicklung (FuE) im Bereich des Quantencomputing scheint auch in Deutschland noch nicht entsprechend weit fortgeschritten, weshalb die Aussagekraft der Patentanalyse als Indikator im Rahmen dieses Unterkapitels als gering einzustufen ist.

Helix-Dimension: Politik

Die Politik spielt eine entscheidende Rolle in der Entwicklung von Quantencomputing, da sie über ihre Fördermechanismen insbesondere für die FuE von forschungsintensiven Technologien mit einem niedrigen Reifegrad die notwendigen Rahmenbedingungen schaffen kann.

Einen umfassenden Überblick über die öffentliche Förderlandschaft im Bereich der Quantentechnologien und des Quantencomputing bieten die Websites quantentechnologien.de (BMBF, 2023-a) und quantencomputing-deutschland.de (Fraunhofer IMW, 2023). Beide Plattformen präsentieren auf verschiedenen Karten die geografische Verteilung der öffentlich geförderten Akteure im Bereich des Quantencomputing in Deutschland.

Die Website Quantentechnologien (BMBF 2023-a) bietet eine detaillierte Darstellung der Standorte der Akteure, die an den Verbundprojekten des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) im Bereich des Quantencomputing beteiligt sind. Diese Projekte umfassen »Anwendungsnetzwerk für das Quantencomputing«, »Quantencomputer-Demonstrationsaufbauten« und »Quantenprozessoren und Technologien für Quantencomputer«. Die Koordination der 27 Verbundprojekte konzentriert sich hauptsächlich auf die bereits identifizierten Kompetenzzentren. Den Großteil der öffentlichen Verbundprojekte koordinieren die Regionen München (8), Stuttgart (4), Hannover und Braunschweig (3), Jülich (2), Mainz und Darmstadt (2) sowie Hamburg (1). Lediglich 7 der 27 geförderten Verbundprojekte werden nicht aus einem der bereits identifizierten regionalen Kompetenzzentren koordiniert.

Die Aktivitätenlandkarte Quantencomputing der Website quantencomputing-deutschland.de bietet darüber hinaus einen umfassenden Überblick über die geografische Verteilung aller im Bereich Quantencomputing aktuell öffentlich geförderten Akteure. Die nachfolgenden Diagramme liefern eine detaillierte Aufschlüsselung der Verteilung der geförderten Akteure aus den Bereichen Wissenschaft und Wirtschaft nach den bereits identifizierten Kompetenzzentren.

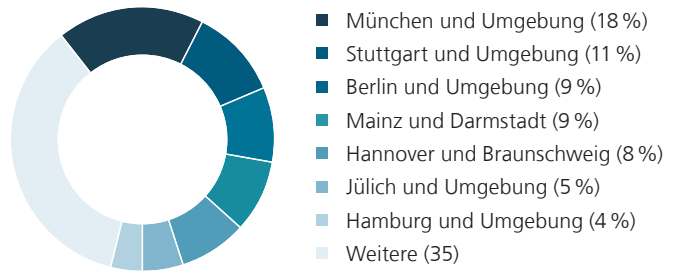


Abbildung 10: Regionale Verteilung öffentlich geförderter Akteure aus der Wirtschaft (Datenbank: Aktivitätenlandkarte Quantencomputing; Stand: 15.01.2024)

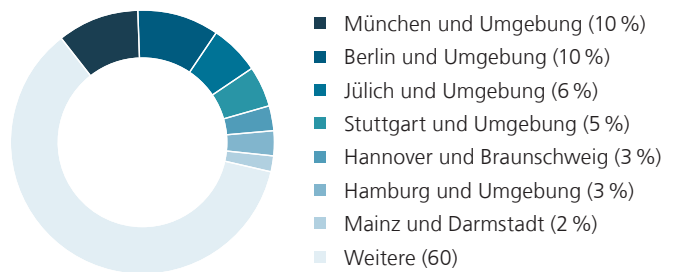


Abbildung 11: Regionale Verteilung öffentlich geförderter Akteure aus der Wissenschaft (Datenbank: Aktivitätenlandkarte Quantencomputing; Stand: 15.01.2024)

65 Prozent der Fördermittelempfänger aus der Wirtschaft können einem der ursprünglich anhand von Publikations- und Zitationsanalysen bereits identifizierten regionalen Kompetenzzentren zugeordnet werden. Der Großteil (55 Prozent) der geförderten Akteure aus der Wirtschaft ist in den Regionen um München, Stuttgart, Berlin, Mainz und Darmstadt sowie Hannover und Braunschweig ansässig. Dies impliziert eine starke regionale Konzentration wirtschaftlicher Akteure in ebendiesen Regionen.

Im Gegensatz dazu ist die Förderung wissenschaftlicher Akteure weniger regional konzentriert. Die identifizierten wissenschaftlichen Kompetenzzentren decken nur circa 40 Prozent aller wissenschaftlichen Fördermittelempfänger ab. Auch hier sind in den Regionen München und Berlin, allerdings auch Jülich und Stuttgart verhältnismäßig viele Fördermittelempfänger angesiedelt.

Somit zeigt sich, dass insbesondere in den Regionen München, Berlin und Stuttgart sowohl besonders viele wissenschaftliche als auch wirtschaftliche Akteure öffentliche Förderung erhalten.

Triangulation der Helix-Dimension

Abschließend werden die wichtigsten Quantencomputing-Knotenpunkte auf Basis einer Triangulation der Untersuchungsergebnisse definiert. Im Rahmen der Untersuchung wurde ein Zusammenhang zwischen forschungsstarken wissenschaftlichen Einrichtungen und der regionalen Konzentration weiterer im Bereich Quantencomputing aktiver Unternehmen festgestellt. Daher werden forschungsstarke wissenschaftliche Einrichtungen als Fundamente der Knotenpunkte betrachtet. Als forschungsstarke Einrichtungen werden besonders produktive und / oder häufig zitierte wissenschaftliche Einrichtungen verstanden (vgl. Abbildung 6 oder 7). Die Knotenpunkte können anhand der Anzahl der in Quantencomputing regional involvierten Unternehmen differenziert werden. Als im Bereich Quantencomputing involviert gelten Unternehmen, die entweder mit einer Ausrichtung auf Quantencomputing gegründet wurden oder im Zusammenhang damit öffentliche Förderung erhalten (vgl. Abbildung 8).

Es lässt sich festhalten, dass im Wesentlichen zwischen primär wissenschaftsgetriebenen Quantencomputing-Regionen mit wenigen wirtschaftlichen Akteuren und wissenschafts- und wirtschaftsgetriebenen Quantencomputing-Regionen mit einer moderaten oder großen Anzahl an wirtschaftlichen Akteuren unterschieden werden kann.

Zur Gruppe der primär wissenschaftsgetriebenen Regionen mit weniger als fünf wirtschaftlichen Akteuren zählen unter anderem Bremen, Paderborn, Münster, Konstanz, Dortmund, Nürnberg, Würzburg, Bochum, Essen, Regensburg und Dresden. Wissenschafts- und wirtschaftsgetriebenen

Quantencomputing-Regionen mit mindestens fünf wirtschaftlichen Akteuren finden sich in Jena, Karlsruhe, Hamburg sowie in der Region um Jülich. Gegenden mit mehr als zehn wirtschaftlichen Akteuren werden als große wissenschafts- und wirtschaftsgetriebene Quantencomputing-Region betrachtet. Zu diesen zählen neben den Regionen um Mainz und Darmstadt sowie Hannover und Braunschweig auch die Metropolregionen Berlin, Stuttgart und München.

3.3 Internationale Quantencomputing-Zentren

Quantencomputing hat in den letzten Jahren weltweit erheblich an Aufmerksamkeit gewonnen. Die rasante Entwicklung dieses Bereichs hat dazu geführt, dass verschiedene Regionen und Institutionen zu globalen Zentren für FuE von Quantencomputing geworden sind. In diesem Kapitel werden mithilfe einer Analyse von Web of Science/ KATI, Dimensions und Crunchbase die globalen wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Zentren für Quantencomputing identifiziert.

Abbildung 12 veranschaulicht den globalen Verlauf der Publikationen im Bereich des Quantencomputing. In den letzten 25 Jahren ist eine signifikante Zunahme der Forschungstätigkeit zu verzeichnen, insbesondere in den Jahren von 2017 bis 2023. Diese Entwicklung spiegelt das wachsende Interesse und Engagement an der Thematik in der globalen Forschungsgemeinschaft wider. Die steigende Anzahl von Veröffentlichungen deutet auf die anhaltende Relevanz und das zunehmende Potenzial dieses Forschungsfeldes hin.

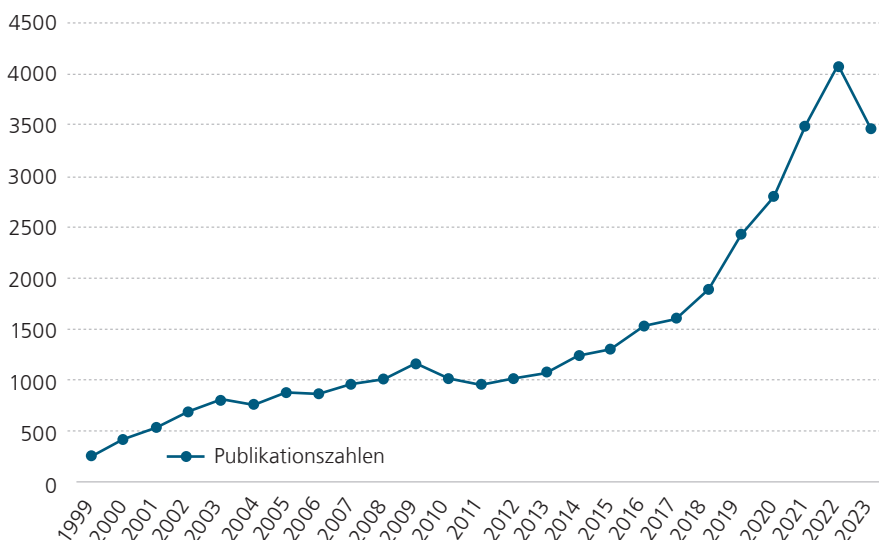


Abbildung 12: Globale Publikationsaktivitäten im Forschungsfeld Quantencomputing (Datenbank: Web of Science/ KATI; Zeitspanne: 1999 bis 2023)

Das Diagramm auf der rechten Seite (Abbildung 13) gibt eine Übersicht über die zehn publikationsstärksten Nationen weltweit. Es wird ersichtlich, dass sich insbesondere die USA und China in der Anzahl der Publikationen von allen weiteren Nationen deutlich abheben. So publizieren die USA fast ein Viertel aller Paper weltweit. Neben den USA und China nehmen insbesondere Deutschland, England, Japan und Kanada eine führende Rolle in der Veröffentlichung von Publikationen ein. Weitere wichtige Akteure sind Indien, Australien, Italien und Frankreich.

Die Abbildung unterhalb (Abbildung 14) präsentiert die 30 im Feld des Quantencomputing weltweit am häufigsten zitierten Forschungseinrichtungen. Sie verdeutlicht die dominante Stellung der USA, da sich nicht nur die fünf am häufigsten zitierten, sondern auch mehr als die Hälfte aller dargestellten Einrichtungen in den USA befinden. Neben den USA ist Deutschland mit drei Einrichtungen vertreten, während

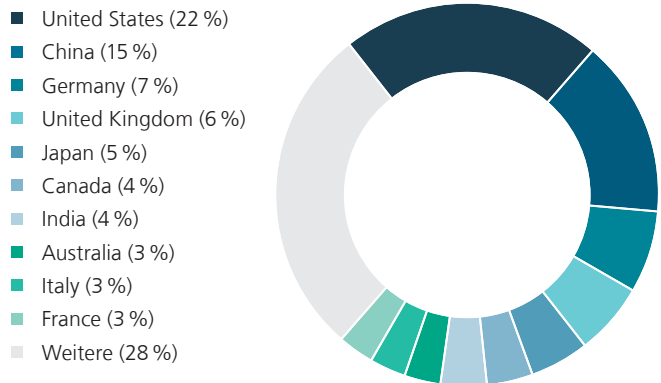


Abbildung 13: Verteilung der publikationsstärksten Nationen in Abhängigkeit der Anzahl an Publikationen (Datenbank: Web of Science / KATI; Zeitspanne: 1999 bis 2024)

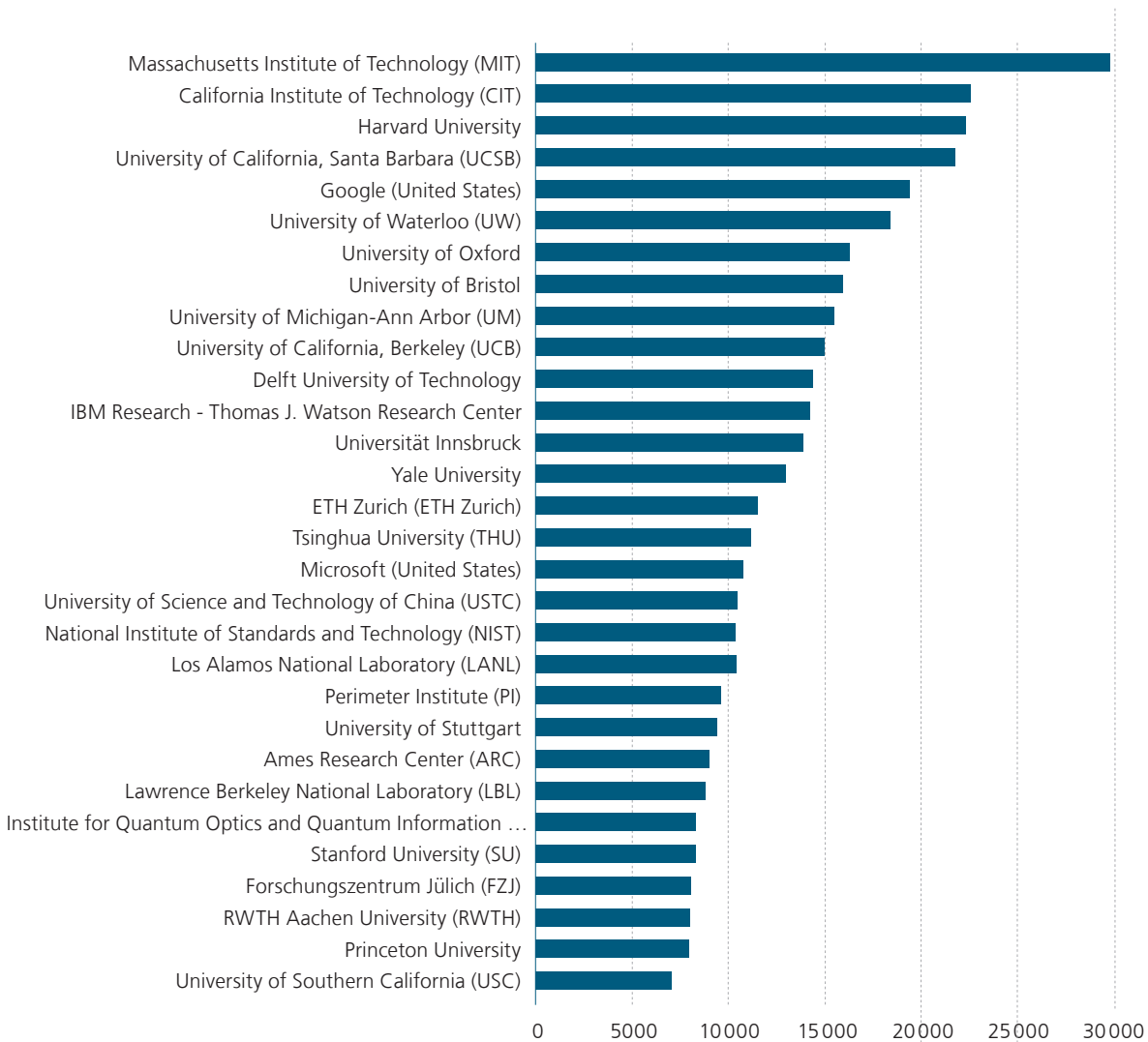


Abbildung 14: Ranking der führenden Forschungseinrichtungen in Abhängigkeit der Anzahl an Zitationen (Datenbank: Dimensions; Zeitspanne: 1999 bis 2024)

England, Österreich, Kanada und China jeweils zwei Einrichtungen in der Liste aufweisen. Darüber hinaus sind auch die Niederlande, Australien und Schweiz jeweils mit einer Einrichtung vertreten.

Innerhalb der USA sind an der Ostküste in Massachusetts insbesondere das Massachusetts Institute of Technology (MIT) und die Harvard University sowie an der Westküste in Kalifornien das California Institute of Technology (CIT) und University of California forschungstark. In Großbritannien liegt der Fokus auf der University of Oxford und der University of Bristol. In Österreich ist Innsbruck mit dem Institute for Quantum Optics and Quantum Information Innsbruck und der Universität Innsbruck führend. In Kanada sind die University of Waterloo und das Perimeter Institute in Waterloo hervorzuheben. In China ist die Region Peking mit der Tsinghua-Universität und der University of Science and Technology of China (USTC) führend. In den Niederlanden hebt sich insbesondere die Region Delft hervor.

Auf Crunchbase sind weltweit 342 Unternehmen im Bereich Quantencomputing verortet. Der Großteil (75 Prozent) dieser Unternehmen verteilt sich auf zehn Nationen (vgl. Abbildung 15). In diesem Abschnitt werden diese zehn unternehmensreichsten Nationen betrachtet. Es zeigt sich erneut die dominante Rolle der USA, aus denen fast ein Drittel aller globalen Quantencomputing-Unternehmen stammt. Der Großteil dieser Unternehmen hat seinen Sitz in Kalifornien, gefolgt von New York und Massachusetts. Nach den USA weist insbesondere Kanada eine hohe Anzahl an Unternehmen

auf, wobei sich diese vor allem in Ontario, Quebec und British Columbia konzentrieren. In Großbritannien sind die Unternehmen hauptsächlich um London und Cambridge angesiedelt, in den Niederlanden vor allem um Delft und Amsterdam. In Frankreich konzentrieren sich die Unternehmen in der Region Île-de-France, insbesondere um Paris. In Indien sind die Unternehmen weit verstreut, wobei ein Schwerpunkt in Neu-Delhi liegt, ähnlich verhält es sich in Japan mit einem Schwerpunkt in Tokio. In Australien sind die Unternehmen hauptsächlich um Sydney angesiedelt, in China vor allem um Shanghai.

Es lässt sich festhalten: Die USA nehmen eine deutlich führende Position sowohl im Bereich der Wissenschaft als auch der Wirtschaft ein. Dabei sind in den USA zwei klare Hotspots zu erkennen, Kalifornien an der Westküste und Massachusetts an der Ostküste. China zeigt sich auf Basis von Publikationsanalysen besonders produktiv in der Forschung, insbesondere um die Region Peking. Im Gesamtvergleich sind Kanada, das Vereinigte Königreich und Deutschland sowohl in Bezug auf die Anzahl ihrer Unternehmen als auch in der Forschung verhältnismäßig stark. In Kanada konzentriert sich die wissenschaftliche und wirtschaftliche Stärke insbesondere um Toronto in Ontario, gefolgt von Montreal in Quebec und Vancouver in British Columbia. Im Vereinigten Königreich sind die Unternehmen und führenden Forschungseinrichtungen hauptsächlich um Cambridge, Oxford und London angesiedelt. In den Niederlanden konzentrieren sich die wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Zentren vor allem auf Delft und Amsterdam, in Frankreich um Paris und Grenoble.

- United States (31 %)
- Canada (9 %)
- United Kingdom (8 %)
- Germany (6 %)
- The Netherlands (4 %)
- France (3 %)
- India (3 %)
- Japan (3 %)
- Australia (3 %)
- China (3 %)
- Weitere (27 %)



Abbildung 15: Verteilung der unternehmensreichsten Nationen in Abhängigkeit der Anzahl an Unternehmen (Datenbank: Crunchbase; Stand: 15.01.2024)

4 Potenziale und Bedarfe im Quantencomputing-Ökosystem aus Sicht von Expertinnen und Experten

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der Potenzial- und Bedarfsanalyse dargestellt. Unter Potenziale verstehen wir die technologischen, wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Möglichkeiten, welche sich aus der fortschreitenden Entwicklung des Quantencomputings ergeben können. Demgegenüber stehen die Bedarfe, welche die notwendigen Voraussetzungen zur Realisierung der Möglichkeiten aufzeigen.

Zur Verdeutlichung der jeweiligen Positionen und Einschätzungen der Expertinnen und Experten zu den einzelnen Themenfeldern werden diese mit prägnanten Zitaten ergänzt, die ausgewogen und beispielhaft Aussagen aus den Interviews wiedergeben. In einigen Fällen wurden die Original-Transkriptionen sprachlich geglättet und auf die Hauptaussage eingekürzt.

4.1 Potenziale von Quantencomputing: langer Atem notwendig, um Wertschöpfungsversprechen einzulösen

Das dargestellte Quantencomputing-Ökosystem bringt im Rahmen der derzeitigen »zweiten Quantenrevolution« neue technologische Versprechungen hervor, denen aktuell sehr viel Aufmerksamkeit zuteil wird. Die damit verbundenen Erwartungen führen zu Spekulationen über mögliche disruptive gesellschaftliche und ökonomische Wirkungen und zu erheblichen Investitionen durch öffentliche und private Akteure. So konnte einerseits dazu beigetragen werden, die soziale und materielle Unterstützung für die Quantenforschung zu sichern. Andererseits verbinden sich mit dieser Aufmerksamkeit – die oft auch als Hype wahrgenommen wird – aus Sicht der Expertinnen und Experten auch nachteilige Auswirkungen auf das Feld. Die Befragten gaben zu bedenken, dass durch unrealistische Erwartungen in kurzfristige Erfolge, das Vertrauen in die Technologieentwicklungen gemindert wird und so Spannungen zwischen den politischen bzw. ökonomischen Visionen und der akademischen Forschung entstehen. Unmöglich einzuhalten Versprechen können zu einer Ernüchterung führen und der Reputation langfristigen Schaden zufügen. Dies mündet in einer Abfolge von hochgesteckten Erwartungen und

darauffolgender Ernüchterung – einer sogenannten »Hype-Helix« (vgl. Roberson et al., 2023).

» If you're really optimistic and say ›Oh, we can build a quantum computer in two years and do X, Y and Z‹ and really hype up what you're going to do, you can get a lot of money and that's because the people funding you don't have the technical background to know whether your thing is really going to work or not. My thesis is, it's a lot harder [to build a quantum computer] than people think, it's a lot more subtle than people think, and it's going to take more time. So, if you're serious about solving the hard problems, then all the investors worry, your approach looks really difficult and may not work, and it may take a long time. So, if you're serious about solving the big problem, you don't look as profitable to the investors. And this is the reason why there is so much hype in the field.«

Interview Wissenschaft (30)

» Wenn es darum geht, einen Quantencomputer [einzusetzen], der als Universalrechner ganz beliebige Probleme lösen kann, dann reden wir von einer Dekaden-Perspektive. Spezialanwendungen werden wir sicherlich früher haben.«

Interview Wissenschaft (4)

Aus Sicht der Expertinnen und Experten ist vor diesem Hintergrund daher ein langfristiges Engagement und ein langer Atem notwendig, um die Potenziale der Technologie künftig auszuschöpfen. Die aktuell noch entstehenden, möglichen Zukünfte für Quantencomputing werden sich deshalb umso mehr in der realen Wertschöpfung beweisen müssen. Im Sinne der »Hype Helix« werden oft kurzfristige Wirkungen überschätzt und langfristige Wirkungen unterschätzt, so beispielsweise auch beim Einsatz zur Lösung von gesellschaftlichen Problemen. Die Einschätzung der befragten Expertinnen und Experten zur Debatte um die aktuellen technologischen Trends, möglichen Anwendungsfeldern und ökologischen Potenziale wird im folgenden Abschnitt dargestellt.

4.1.1 Technologische Trends

Wenn über technologische Trends von Quantencomputing gesprochen wird, liegt der Fokus der Diskussion häufig auf der dafür notwendigen Hardware. Für eine erfolgreiche Entwicklung von Quantencomputing und eine umfassende Bewertung ihrer Potenziale muss jedoch die gesamte Wertschöpfungskette betrachtet werden (vgl. Bitkom, 2022). Mit dieser ganzheitlichen Perspektive wurden die Expertinnen und Experten zu den aus ihrer Sicht zentralen aktuellen technologischen Trends befragt:

Komponentenentwicklung und Zuliefer-Ökosysteme erlangen zu wenig Aufmerksamkeit

Laut den befragten Expertinnen und Experten spielen zentrale Komponenten wie Kryotechnik, Steuerungssysteme, optische und photonische Systeme (sog. »Hilfs-Hightech«) eine wichtige Rolle, um die Quantencomputing-Hardware-Entwicklung zu ermöglichen und zu beschleunigen. Dabei sind oft einzelne Firmen entscheidende Zulieferer, um die Rohmaterialien, die technische Ausrüstung und Infrastrukturelemente für den Betrieb und die Steuerung zur Verfügung zu stellen oder um den Bau eines Quantencomputers bei Planung, Montage oder Verkabelung zu begleiten. Diese Firmen erlangen meist nicht die Aufmerksamkeit – auch nicht die der Kapitalgeber – die für den Aufbau eines Zulieferer-Ökosystems notwendig wären.

» Der komplette Quantencomputer, der braucht wahnsinnig viele verschiedene Teile, sodass es schwierig ist, da bei allem der Beste zu sein. Das heißt also auch Google und IBM die entwickeln ihre Kühlschränke nicht selbst, das können die gar nicht, das macht eine andere Firma.«

Interview Wissenschaft (4)

» What I've heard from these companies that say they want to build new fridges or the control, it's very difficult for them to get venture capital funding because they're not selling a vision, where they're going to be like »The One«. So, you need funding with grades of success. There will be some that are like the Microsoft of the future or the IBM of the future. But then you also need the funding that can make a vibrant successful company that is not going to have ridiculously large IPO.«

Interview Wirtschaft (Großunternehmen, 18)

Hardware-Unternehmen haben Schlüsselrolle inne

Um Qubits erzeugen, manipulieren und auslesen zu können, benötigt es eine Vielzahl an physikalischen Bauteilen, die im Folgenden als Hardware-Plattformen bezeichnet werden. Aktuell hat sich ein Pool an unterschiedlichen Hardware-Plattformen herausgebildet, bei denen es auf absehbare Zeit noch keine klaren Favoriten gibt. Zu den wichtigsten Technologien

gehören unter anderem supraleitende Plattformen, photonische Entwicklungen, Ionen-basierte Plattformen, Spin-Qubits, Neutral-Atom-Plattformen und NV-basierte Plattformen (»Nitrogen-Vacancy«) (vgl. auch McKinsey, 2023-a). Im Moment sind nach Einschätzung der Expertinnen und Experten supraleitende Plattformen am weitesten fortgeschritten, gefolgt von Ionen-basierten Plattformen. NV-basierte Plattformen, photonische Entwicklungen sowie neuartige Spin-Qubits und Neutral-Atom-Plattformen holen im Technologie-Reifegrad noch auf. In Europa entstehen durch den Schulterschluss zwischen Unternehmen, Startups und Forschungseinrichtungen die ersten heimischen Lieferketten für einzelne Hardwareplattformen (z. B. ImpaqT Consortium Delft). Auch in den USA, Kanada, Japan, Australien und China gibt es ähnliche Initiativen. Insbesondere in Nordamerika wird jedoch oft ein »monolithischer Ansatz« verfolgt, bei dem das Gesamtsystem von einer Partei bereitgestellt wird.

» So, we are in a position in which we provide real value today, but we understand that the ecosystem drivers, the real main drivers are still the hardware players.«

Interview Wirtschaft (Startup, 13)

» Also es sieht im Augenblick so aus, dass es unterschiedliche Hardware-Plattformen gibt, die jeweils unterschiedliche Reifegrade haben. Es beginnt bei Ionen-basierten Quantencomputing-Plattformen, die im Grunde zuerst da waren. Zweitens gibt es supraleitende Plattform-basierte Quantenarchitekturen. Die sind die, die im Augenblick, einen starken Boom erfahren, vor allen Dingen auch durch große Firmen wie IBM oder Google. Daneben gibt es photonische Entwicklungen, die noch etwas aufzuholen haben. Im Bereich der Neutral-Atome gibt es die sogenannten Rydberg-Atome. Das ist eine sehr neue Plattform, die erst seit vielleicht drei Jahren intensiv untersucht wird, aber enorme Fortschritte macht. Und dann gibt es noch die NV-basierten Plattformen, die aber sehr, sehr weit zurück sind und wo ich auch Zweifel habe, ob sich das jemals zusätzlich etablieren wird. Also wir haben, was die Hardware angeht, tatsächlich im Augenblick einen gewissen Pool an Plattformen, weil eben nicht abzusehen ist, welche Plattform tatsächlich nachher auch das Rennen machen wird in Fragen der Skalierung.«

Interview Wirtschaft (Netzwerke, 19)

Mehrschichtige Softwaresysteme für aktuelle und zukünftige Anwendungen in der Entwicklung

Um die beschriebenen Systeme sinnvoll einzusetzen, sind mehrere Schichten von Software notwendig. Zuerst bedarf es einer Firmware als Betriebssystem sowie Middleware, um die Quantum Processing Units (QPUs) in die externe Softwarelandschaft

einzubinden. Daneben werden Algorithmenbibliotheken und -module benötigt, um letztendlich eigenständige Softwaresysteme zu entwickeln, die relevante Probleme lösen können. Durch die geringe Größe und Fehleranfälligkeit der heutigen Quantencomputer lassen sich zwei größere Forschungsfelder voneinander abgrenzen (Tutschku et al., 2023): Variationelle Quantenalgorithmen, die sich in der aktuellen Noisy Intermediate-Scale Quantum-Ära (NISQ-Ära) als führende Strategie zur Umsetzung von Quantenanwendungen herausstellen (z. B. QAOA, VQE) und Algorithmen, die für zukünftige, fehlerkorrigierte Quantencomputer konzipiert sind (z. B. Grover, Shor, Harrow-Hassidim-Lloyd). Laut den Expertinnen und Experten ist der Shor-Algorithmus ein zukünftig vielversprechender Quanten-Algorithmus mit exponentiellem Geschwindigkeitszuwachs (insbesondere in der Post-NISQ-Ära). Dessen Einsatz ist allerdings bisher noch nicht absehbar. Heute – in der NISQ-Ära – steht die Suche nach dem Quantum Advantage über hybride Verfahren im Fokus (z. B. durch Quantum Machine Learning).

» We think about that work in two buckets, there's the work to discover applications for our current devices, you're probably familiar with the term NISQ, right, noisy intermediate-scale quantum devices [...]. And then there's also work to develop algorithms for fault-tolerant quantum computers, which we believe is really important as well.«

Interview Wirtschaft (Großunternehmen, 26)

» Und der theoretische Bottleneck besteht darin, dass man noch relativ wenig Software hat für die Quantencomputer. Da gibt es einige Software, die ganz berühmt ist. Da gibt es den Grover-Algorithmus, dann gibt es den Shor-Algorithmus. Und der Shor-Algorithmus insbesondere ist natürlich berühmt, weil man damit die Kryptografie ins Schwanken bringt. Aber man braucht eben noch mehr Software. Man braucht mehr Algorithmen.«

Interview Wissenschaft (27)

» I mean there are challenges in quantum algorithm research, there are not enough quantum algorithms at this point. On the hardware level, first of all, we need better qubits and better control systems for qubits and implementation of quantum operations that implement a quantum algorithm.«

Interview Wirtschaft (KMU, 29)

Integration und Endanwendung sollte frühzeitig vorbereitet werden

Noch ist Quantencomputing ein Feld der Grundlagenforschung, das sich allerdings zunehmend in die praktische Anwendung bewegt. Um den Brückenschlag in konkrete unternehmerische Anwendungen vorzubereiten und zu

unterstützen, werden aktuell unterschiedliche Strategien diskutiert. Um den Weg der Integration von Quantencomputing-Software in die IT-Landschaft von Unternehmen vorzubereiten, sind eine domänenspezifische Beratung sowie Anforderungsentwicklung und -analyse erforderlich. Die Zugänge dafür zu erleichtern, um nicht nur eine kleine Gruppe von Early Adopters zu erreichen, wäre aus Sicht der Befragten eine wünschenswerte und wichtige Entwicklung. Auch der ausgelagerte Betrieb und die Verwaltung eines Quantencomputers (sog. »QCaaS«) kann und soll Hürden in der Endanwendung abbauen. Die Bereitschaft von Unternehmen für die Einführung von Quantentechnologie kann zu einem entscheidenden Wettbewerbsvorteil führen, sobald die Hardware ausgereift ist.

» My focus is about making the technology easier for people to use, so that it is easier for them to leverage the powerful technologies [...] and a much wider group of people can interact with it.«

Interview Wirtschaft (KMU, 28)

» Die Einführung einer Innovation um der Innovation willen wird niemals Erfolg haben, erst wenn es sich konkret daran orientiert, was der Need der Organisation ist und wie es vor allem in der Organisation dann tatsächlich durch die Nutzenden verwendet wird, erst dann wird die Innovation tatsächlich erfolgreich sein.«

Interview Wirtschaft (Startup, 1)

4.1.2 Potenzielle Anwendungsfelder

Quantencomputing verspricht Anwendungsmöglichkeiten, die ein großes Innovationspotenzial in Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Gesellschaft freisetzen. Das Wertschöpfungspotenzial bis 2035, definiert als zusätzliche Einnahmen und eingesparte Kosten durch die Anwendung von Quantencomputing, wird in einschlägigen Quellen auf 576 Mrd. € bis 1.180 Mrd. € geschätzt (McKinsey, 2023-b). Nach der mehrheitlichen Einschätzung der Expertinnen und Experten sind die heutigen Maschinen jedoch noch nicht leistungsfähig genug, um praktikable Anwendungen und Use Cases abzubilden. Dennoch stehen perspektivisch einige nutzenbringende Applikationen in Aussicht. Laut den Expertinnen und Experten sind die Bereiche mit den größten Erwartungen an erste Anwendungsfälle insbesondere Chemie und Materialentwicklung, Lebenswissenschaften, Mobilität und Logistik sowie die Finanzbranche (siehe Bitkom, 2022):

Chemie und Materialentwicklung

Mögliche Use Cases umfassen u. a. die Simulation von chemischer Reaktivität oder die verbesserte Nachhaltigkeit chemischer Prozesse.

Pharma, Biotechnologie und Medizinprodukte

Mögliche Use Cases umfassen u. a. die Erforschung neuer Medikamente und Impfstoffe, die Beschleunigung der chemisch-pharmazeutischen Entwicklung sowie eine verbesserte MRT-Diagnostik durch Kombination mit Quantensensorik.

Mobilität und Logistik

Mögliche Use Cases umfassen u. a. die Verkehrsroutenoptimierung, die Fahrplanoptimierung bei der Bahn, eine verbesserte Logistik im Hafenbetrieb, die Lieferkettenoptimierung und Vorteile bei der Energieeffizienz von Flügen.

Finanzen und Versicherungen

Mögliche Use Cases umfassen u. a. die Portfoliooptimierung und das Risikomanagement für Kredite, die IT-Sicherheit, die Betrugserkennung und die Erhöhung der Genauigkeit von Rezessionsvorhersagen und Finanzkrisen.

Sicherheit

Mögliche Use Cases umfassen u. a. die abhörsichere Kommunikation, die Aufklärung durch Nachrichtendienste und Sicherheitsbehörden, eine militärische Aufklärung mit Quantenradar sowie flächendeckende Raketenabwehrsysteme.

Klima und Energie

Mögliche Use Cases umfassen u. a. die Düngemittelentwicklung, die Batterietechnik, genauere Energienutzungsvorhersagen und verbesserte Lastverteilungen sowie Klimamodellierung und Wettervorhersagen.

Produktion

Mögliche Use Cases umfassen u. a. die Produktionsplanung und -steuerung, die Optimierung von Bewegungsabläufen in der Robotik und Precision Agriculture.

» It's potentially going to be things like better materials, more efficient catalytic processes, which just means less environmental load, maybe more efficient air travel, a whole range of things that might be quite in the background to the average good citizen. And then things like government decision making. Governments use a lot of compute anyway. And if that compute to some extent gets better, then there's the possibility of making better decisions and smart cities, logistics, those sorts of things. So, sort of just improving the fabric of life in some way.«

Interview Wissenschaft (6)

4.1.3 Ökologische Potenziale durch Quantencomputing

Ein wesentlicher Aspekt, der sich im Zusammenhang mit den Potenzialen von Quantencomputing ergibt, ist das ökologische Potenzial dieser Technologien. Dabei ist wichtig zu betonen, dass die konkrete Klimabilanz der Technologien noch eine offene Frage ist (Umweltbundesamt, 2022). In den Interviews war es den Expertinnen und Experten aber ein Anliegen auf die möglichen positiven Wirkungen und Hebel von Quantencomputing für ökologische Nachhaltigkeit hinzuweisen. Damit unterstreichen sie die Ziele des Forschungsprogramms »Quantensysteme – Spitzentechnologie entwickeln« des BMBF, das unter anderem das Ziel verfolgt, »mit Quantensystemen Chancen für Ressourceneffizienz, Klima- und Umweltschutz« zu schaffen (BMBF, 2022). Die Befragten verdeutlichten die ökologischen Potenziale anhand einer Reihe von Faktoren, die im Folgenden erläutert werden.

Optimierte Ressourcenallokation perspektivisch durch Quantencomputing möglich

Ein wichtiger Hebel für positive ökologische Potenziale von Quantencomputing liegt für die Expertinnen und Experten in einer effizienteren Ressourcennutzung. Quantencomputer werden perspektivisch nicht nur in der Lage sein, umfangreiche und komplizierte Berechnungen durchzuführen, bei denen nicht nur klassische Computer, sondern selbst High-Performance-Rechner an ihre Grenzen gelangen. Sie sind indes fähig, diese in deutlich beschleunigter Form durchzuführen und dabei eine große Reihe an Variablen einzubeziehen. Mit dieser Fähigkeit, sowohl schneller als auch effizienter Berechnungen mit einem präziseren Ergebnis durchzuführen, verbinden die Expertinnen und Experten die Erwartung, sowohl den Energieverbrauch während der Rechenprozesse als auch den Ressourcenbedarf aufgrund effizienterer industrieller Prozesse verringern zu können.

» Das heißt, wenn ich einen Quantencomputer habe, der mir ermöglicht, schneller ein neues Material mit bestimmten Eigenschaften zu entwickeln, und ich kann das kostengünstiger tun, mit weniger Einsatz von Experimenten, und anderen Ressourcen, dann kann ich natürlich Zeit sparen, Geld sparen, Material sparen. Und schneller zu dem Ergebnis kommen, was ich eigentlich möchte. Und damit auch ein neues Produkt generieren, was eben auch ein neues Material hat, was vielleicht leichter ist, was dadurch weniger Energie im Transport benötigt.«

Interview Wissenschaft (20)

» Bereits heutzutage ist ein sehr relevanter Teil des Stromverbrauchs weltweit [...] mit klassischen Computern verbunden. Und ein Quantencomputer bietet hervorragende Möglichkeiten, um diesen Verbrauch stark zu reduzieren, so könnte indirekt, aber deutlich ein Vorteil entstehen für die Verwendung von Quantencomputern.«

Interview Politik (16)

Aufmerksamkeit im Hinblick auf potenzielle Rebound-Effekte erforderlich

Neben den ökologischen Hoffnungen aus Effizienzvorteilen mahnen die Expertinnen und Experten jedoch auch zur Vorsicht und warnen vor zu viel voreiligem Optimismus. Auch wenn Quantencomputer zweifellos das Potenzial haben, in unterschiedlichen Anwendungsszenarien innovative Wege für umweltverträglichere Praktiken und gesellschaftlichen Mehrwert zu erschließen, gibt es keine Garantie dafür, dass Quantencomputer in diesen Bereichen auch tatsächlich eingesetzt werden.

Gleichzeitig bringt der Einsatz dieser bahnbrechenden Technologien auch ökologische Herausforderungen mit sich. Die Anwendung von Quantencomputern in großem Maßstab erfordert nämlich selbst eine beträchtliche Menge an Energie, da eine Vielzahl der Technologien unter anderem hohe Anforderungen an ihre Betriebsbedingungen – wie niedrige Umgebungstemperaturen und Schutz vor Umgebungsstörungen – stellen.

Neben dem Energiebedarf werden außerdem weitere Rohstoffe für die Produktion der Rechner benötigt, die negative ökologische Auswirkungen haben können. Vorsicht sei daher vor Greenwashing oder gar einem Rebound-Effekt geboten. Letztendlich hängen die Auswirkungen von Quantencomputing davon ab, wofür die Technologien einerseits eingesetzt werden und andererseits davon, ob die erhöhte Effizienz bei der Nutzung auch tatsächlich zu einer Verringerung des Ressourcenverbrauchs führt oder durch eine verstärkte Nutzung kompensiert wird. Insofern sollte einerseits die Entwicklung von Quantencomputing mit Blick auf Energie- und Materialverbrauch optimiert werden und andererseits die systematische Erschließung von Anwendungsfeldern mit positiven Nachhaltigkeitswirkungen gefördert werden.

» For the ecological impact, for me I think the most interesting question is the energy consumption because if we are moving [towards a technology where] in the end to run an actual large scale quantum computer, you would need the energy output of a nuclear power plant, it's not really good for the environment or rather sustainable. So, it would

make sense to invest in higher quality qubits, better correcting codes, lower measurements and readouts, lower energy consumption techniques for measurement and readout. So, those kinds of things would be useful and meaningful.«

Interview Gesellschaft (2)

» Problematisch wird natürlich sein, was aber auch für all die anderen Rechner gilt, man wird Rohstoffe brauchen und der Bedarf, der erforderlich sein wird, ist erheblich, wenn die Systeme in größerem Stil verfügbar werden sollen.«

Interview Politik (14)

» Was ich auch als eine Gefahr sehe, ist das Thema Greenwashing. [...] Ob [...] uns ein Quantencomputer unterm Strich vom CO₂ hilft oder nicht, das wissen wir im Moment nicht. Es könnte auch sein, dass die Leute dann viel mehr rechnen und dadurch viel mehr Strom verbrauchen oder so. Es könnte auch sein, dass man die Quantencomputer nimmt, um Waldschutz-Technologien zu entwickeln, aber wir wissen es einfach im Moment nicht.«

Wirtschaft (Großunternehmen, 17)

4.2 Bedarfe mit Blick auf die weitere Entwicklung und Anwendung von Quantencomputing

Nach dem Blick auf die Potenziale in der Technologieentwicklung wird im folgenden Kapitel der Schwerpunkt auf aktuelle Bedarfe im Ökosystem gelegt. Unter Bedarfen verstehen wir dabei die aus Sicht der Expertinnen und Experten notwendigen Voraussetzungen, die zur Realisierung der bereits vorgestellten Potenziale noch notwendig sind. Dabei wurden durch die Expertinnen und Experten insbesondere vier übergeordnete Kategorien, im Folgenden als Handlungsfelder bezeichnet, eingebracht und besprochen: (1) Finanzierung und Förderinstrumente im Bereich Quantencomputing, (2) die Integration der neuen Technologie in die IT-Landschaft von Unternehmen, (3) Anforderungen an Bildung und gesellschaftliche Belange, sowie (4) die Ausgestaltung von internationalen Kooperationen und die Notwendigkeit von und Hürden im Feld Technologiesouveränität.

Im Folgenden wird der Kontext zu den Äußerungen kurz hergeleitet und dann eine in Unterkategorien unterteilte Zusammenfassung der Statements gegeben. Die angefügten Zitate – die anonymisiert und sprachlich geglättet wiedergegeben werden – belegen die kompakte Ergebnisdarstellung beispielhaft und stellen besonders prägnante Äußerungen heraus.

4.2.1 Handlungsfeld I: Finanzierung und Förderung

In den letzten Jahren erfährt die Schlüsseltechnologie Quantencomputing ein großes Interesse von Politik und Wirtschaft. Insbesondere den staatlichen Akteuren ist es ein Anliegen, passgenaue Förder- und Finanzierungsinstrumente zu entwickeln, um die vorhandene Forschungs- und Entwicklungslandschaft in Deutschland strukturell zu stärken und eine internationale Wettbewerbsfähigkeit sicherzustellen. So sieht beispielsweise das Handlungskonzept Quantentechnologien (BMBF, 2023-b) drei Handlungsstränge vor, die (1) den Einsatz der Technologien für gesellschaftlich relevante Fragestellungen stimulieren, (2) FuE mit einer klaren Anwendungsperspektive vorantreiben und (3) exzellente Rahmenbedingungen für ein starkes Ökosystem schaffen sollen. Für diese Zwecke wurden auf nationaler Ebene 3 Mrd. € bis zum Jahr 2026 angekündigt, die in der Folge teilweise wieder eingekürzt wurden. Auch auf europäischer Ebene wurden mit 6,8 Mrd. € größere Summen angekündigt (BMBF, 2023-b). Dagegen stehen jedoch im deutschen sowie im europäischen privaten Kapitalmarkt erheblich weniger Mittel zur Verfügung, insbesondere im Vergleich zu den USA (McKinsey, 2023-b). In diesem Kontext wurden in den Interviews eine Reihe von Herausforderungen und Bedarfen genannt:

Risikoaversion und geringer Bereitschaft zu langfristigen, kapitalintensiven Investitionen begegnen

Die befragten Expertinnen und Experten bewerten die verfügbaren monetären Ressourcen insbesondere aus der öffentlichen Hand in Deutschland grundsätzlich positiv und wertschätzen das Engagement von Bund und Länder zur Förderung von Quantencomputing und Quantentechnologien. Insbesondere die Förderprogramme im Bereich Grundlagenforschung werden positiv hervorgehoben. Diese staatlichen Fördermittel würden in der aktuellen noch frühen Phase der Innovationsentwicklung durch Forschungseinrichtungen, Ausgründungen oder Startups aufgenommen. So werden Produktansätze entwickelt, die in der Folge das Interesse am privaten Kapitalmarkt wecken oder zu Einnahmen aus der operativen Tätigkeit führen können.

Dem steht jedoch die Beobachtung eines großen Teils der Befragten gegenüber, dass eine weit verbreitete Vorsicht und Technologieskepsis in Wirtschaft und Politik eine Verlangsamung der Technologieentwicklung verursachen. Insbesondere in Deutschland schade eine risikoaverse Grundhaltung dem noch jungen Feld, da seine Potenziale in Finanzierungsentscheidungen nicht ausreichend betrachtet werden. Das schlägt sich vor allem darin nieder, dass sowohl bei Unternehmen als auch bei öffentlichen Kapitalgeberinnen und Kapitalgebern nur eine geringere Bereitschaft für langfristige Kapitalbindungen

und eine skeptische Einstellung aufgrund von wahrgenommenen Unsicherheiten bei der Technologieentwicklung bestehe. Ohne ausreichende langfristige finanzielle Planungssicherheit – auch über die klassischen drei Jahre der öffentlichen Projektförderung hinaus – wird jedoch die Durchführbarkeit von innovativen Projekten beeinträchtigt, wie beispielsweise die Arbeit an fehlertoleranten Anwendungen.

Die Befragten gehen des Weiteren künftig von steigenden Kapitalbedarfen aus. Das betrifft insbesondere Vorhaben, die eine hohe absolute Kapitalmenge erfordern. Im Vergleich zu den amerikanischen Marktführern (sog. »Cloud-Hyperscaler«) ist die Bereitschaft für große, langfristige Investitionen in Deutschland eher gering, obwohl solche Investitionen in die Technologieentwicklung nach Einschätzung der Expertinnen und Experten für einige hiesige Großunternehmen im Verbund mit der öffentlichen Hand stemmbar wären. Gelingt eine belastbare Finanzierung nicht, würde die internationale Konkurrenz eine zu große Dominanz auf die Wertschöpfungskette ausüben und eigene Ökosysteme schaffen, beispielsweise in Bezug auf ihre Nutzengruppen. In Deutschland und Europa sollten laut einzelnen Expertinnen und Experten mehr Anreize für Großunternehmen geschaffen werden, mit großen Kapitaleinsätzen risikoreiche Projekte voranzutreiben und so die Abhängigkeit von globalen Playern in kritischen Bereichen zu reduzieren und die technologische Souveränität zu stärken.

» Speziell in Deutschland hat man eine Art kulturelles Problem. Also diese amerikanische Risikobereitschaft oder auch fail fast genannt, das ist hier nicht der Fall. Hier heißt es eher never fail statt fail fast.«
Interview Wirtschaft (Großunternehmen, 5)

» So, one of the things we've pushed a lot for is for governments to fund more fault-tolerant applications' research because that will be useful across the board for many companies who don't have the resources to develop those applications because they're smaller and also because you can't make money next year from a fault-tolerant application, right? It's not going to pay off until further down the line, so it seems like a logical place for government investment.«
Interview Wirtschaft (Großunternehmen, 26)

» Bitte, wir müssen in Europa sagen: »Okay, jetzt machen wir mal fünf Milliarden von der Wirtschaft, fünf Milliarden vom Staat.« Ja, also von allen Staaten natürlich in Europa, das kann nur ein europäisches Projekt sein. Und wir bauen einen Hyperscaler. [...] da geht es um Marktdominanz.«
Interview Wirtschaft (Startup, 10)

Zugang zu öffentlicher und privater Finanzierung durch Bürokratieabbau erleichtern

Die Expertinnen und Experten gaben auch zu bedenken, dass die Verfügbarkeit und Möglichkeiten zur Aufnahme von privatem Wagniskapital in Deutschland im Vergleich zu den USA nur in geringerem Maße vorhanden seien. Das lässt sich aus Sicht der Expertinnen und Experten neben einer grundsätzlichen Risikoaversion von europäischen Wagniskapitalgebern (vgl. oben) auch auf langsame bürokratische Prozesse und Auflagen bspw. in Bezug auf das IP-Recht bei öffentlich geförderten Startups zurückführen. Für potenzielle private Kapitalgeber wird so eine große Hürde in der Zusammenarbeit geschaffen. Startups müssten teilweise abwägen, ob sie öffentliche Förderungen annehmen und sich dadurch möglicherweise die Zusammenarbeit mit ausländischen Wagniskapitalgebern erschweren. Da öffentliche Förderprogramme oft nur 2-3 Jahreszyklen abdecken und Wagniskapitalgeber die Unternehmensentwicklung in mehreren Finanzierungsrunden längerfristig begleiten, fällt die Wahl in manchen Fällen zugunsten der Partnerschaft mit dem privaten Geldgeber.

Zudem beschreiben die Befragten das Management der verfügbaren Fördermittel als sehr bürokratisch, aufwendig und nicht ausreichend risikotolerant. Neben einer besseren Organisation des Fördermittelmanagements bestehe ein zentraler Bedarf nach Langfristigkeit und größerer Flexibilität von Förderinstrumenten. Verwaltungsbezogene und regulatorische Hürden sollen abgebaut werden. So wurde in einzelnen Interviews beispielsweise der hohe Anteil von Eigenmitteln für Start-ups kritisiert oder die lange Wartezeit auf die Auszahlung von Fördermitteln, die für ein Startup untragbare Cashload-Belastungen mit sich bringt.

» Wagniskapital ist eine Herausforderung in Europa. In den USA hat man da andere Strukturen, da gibt es viel mehr verfügbares Wagniskapital. In Europa ist das ein bisschen schwieriger. Es geht sogar so weit, dass europäische Wagniskapitalgeber oft lieber in US-Firmen investieren als in europäische Firmen.«

Interview Wirtschaft (Großunternehmen, 17)

» Allerdings ist auch hier die Regulatorik von Forschungsprojekten so diffus, dass Wagniskapitalgeber insbesondere, wenn sie aus dem nicht deutschen Raum sind, automatisch in dem Moment, wo man sich bei ihnen mit einem Forschungsprojekt bewirbt, sagen, nein, fördern wir nicht, ist uns zu undurchsichtig, können wir nicht beurteilen. Durch die Aufnahme von Fördermitteln machen wir uns die Zusammenarbeit mit Wagniskapitalgebern kaputt, und da ich weiß, dass mich Wagniskapitalgeber im Zweifelsfalle länger entlang meiner Wertschöpfungskette oder meiner Unternehmensentwicklung begleiten, werde ich dann eher ausschließlich auf Wagniskapitalgeber setzen.«

Interview Wirtschaft (Startup, 1)

» Darüber hinaus ist eben insbesondere aus Sicht eines KMUs das Thema Fördermittelverwaltung katastrophal. Als kleines mittelständisches Unternehmen oder generell als Fördermittelempfänger warten sie teilweise bis zu neun Monate auf die Auszahlung von Fördermitteln eines Quartals. Das sind Cashload Belastungen die für ein kleines mittelständisches Unternehmen, das sich dem Erforschen moderner Technologien verschrieben hat, ehrlicherweise nicht tragbar ist.«

Interview Wirtschaft (Startup, 1)

Fragmentierung der Förderlandschaft und Schwankungen bei Verfügbarkeit von finanziellen Mitteln adressieren

Auch die Fragmentierung der Förderlandschaft in Deutschland stellt laut den befragten Expertinnen und Experten ein Problem dar. So seien auf Bundes- und Länderebene konkurrierende Programme geschaffen worden, die viele kleinere Projekte und Ausgründungen erzeugen und dadurch die verfügbaren Ressourcen und Talente sehr stark verteilen (sog. »Töpfchenwirtschaft«). Das führe zu Personal- und Kapitalknappheit für alle und zu einer langfristigen Reduktion der Wirksamkeit in den einzelnen Projekten. So wurde in einem Interview ein Fall beschrieben, in dem unnötigerweise Ausgründungen inkubiert wurden, die als Forschungsprojekt in ihrer ursprünglichen Form bessere Ergebnisse zum Ökosystem beitragen konnten. In öffentlich geförderten Aktivitäten sollte diesem Trend entgegen gewirkt werden und gleichzeitig die Kooperation über Projekte hinweg forciert werden. Ebenfalls könnten durch Kooperationen zwischen Industrie und Forschung unnötige Doppelanstrengungen minimiert werden.

In den Interviews wurde ebenfalls betont, dass die Verfügbarkeit von finanziellen Mitteln aufgrund externer Faktoren variieren kann. Ursachen sind u. a. Einsparungen im Haushalt, politischer Wandel und konjunkturelle Schwankungen. So wurde beispielsweise das Interesse von privaten Investoren durch Covid-19 oder den Krieg gegen die Ukraine beeinträchtigt. Diese externen Einflüsse können ein Unterangebot von finanziellen Ressourcen erzeugen und zu langfristigen Finanzierungslücken führen. Bei den langfristigen Investitionszeiträumen ist jedoch ein erhöhtes Maß an Planungssicherheit erforderlich, welches dadurch gefährdet wird.

» The problem in Germany right now is, there are too many programs everywhere. That has caused talent shortage, it has caused capital shortage and it has also incubated companies that were never meant to be companies. They were meant to be research projects instead and that has caused duplication in research effort that is not necessary.«

Interview Wirtschaft (Startup, 23)

» [Die fehlende Zusammenarbeit zwischen BMBF und] BMWi damals noch, [...] hat dazu geführt, dass das Budget zweigeteilt wurde auf miteinander konkurrierende Initiativen, was natürlich auch die Wirkungseffektivität halbiert hat. Wir leben immer noch mit diesem Problem [...] Und das führt natürlich zu einer sehr starken Reduzierung der Wirksamkeit von allen Initiativen auf Bundesebene.«

Interview Politik (16)

» Ein Nachteil ist, dass die Entscheidungszyklen und die Fluktuationen, die sich [durch politische Wendungen] ergeben, nicht wirklich zur wissenschaftlichen Zeitskala passen. Dann wird mal viel investiert, weil gerade ein Corona-Fond zur Verfügung steht. Und dann gibt es wieder die nächste Krise und es ist eine Ebbe im Haushalt. Und das wirft Sand ins Getriebe der Wissenschaft, weil man halt keinen klaren Planungshorizont hat.«

Interview Wissenschaft (15)

4.2.2 Handlungsfeld II: Integration in Unternehmen

Trotz des Hypes und der Ungewissheiten die Quantencomputing noch umgibt, sind auch die Führungsebenen großer Unternehmen immer mehr davon überzeugt, dass die potenzielle Wirkung der Technologie immens sein kann. So haben in einer Befragung von mehr als 500 Führungskräften in Großbritannien fast die Hälfte (48 Prozent) angegeben, dass Quantencomputing eine signifikante Rolle in ihrer Branche einnehmen wird und die große Mehrheit (97 Prozent) geht davon aus, dass bis 2027 zumindest in einem gewissen Maße ihre Branche mitsamt der britischen Wirtschaft dadurch verändert wird (EY, 2022). Doch um die Fortschritte aus FuE nutzen zu können, muss – aus Sicht der Expertinnen und Experten – die Integration in Unternehmen frühzeitig mitgedacht werden. In Deutschland gibt es dafür einen ausgeprägten industriellen Sektor, der viele potenzielle Anwenderinnen und Anwender umfasst. Welche Anforderungen und neuen Perspektiven mitgedacht werden sollten, wird in diesem Teilkapitel dargelegt.

Bereitschaft zur Veränderung auf dem Weg zur Quantum Readiness notwendig

Die befragten Expertinnen und Experten betonten, dass für Unternehmen ein früher Einstieg in Quantentechnologien ratsam ist. Die Mehrheit befürwortet das Konzept der Quantum Readiness, um für künftige Möglichkeiten und Durchbrüche gewappnet zu sein. Dieses bezeichnet die möglichst frühzeitige Vorbereitung von Unternehmen auf neue Potenziale von Quantencomputing, sowie mögliche Einsatzfelder und deren Anforderungen, sobald die Hardware ausgereifter ist (vgl. WEF, 2022; IBM, 2023). Dabei ist im ersten Schritt eine grundsätzliche Offenheit für die Veränderungen in der

Technologie-Landschaft erforderlich (sog. »Quantum Awareness«), bevor im zweiten Schritt konkrete mathematische Probleme und Use Cases identifiziert, deren Formulierungen angepasst und prototypisch optimiert werden können. Da vorerst jedoch aufgrund der aktuellen Leistungsfähigkeit von Quantencomputern nur eine mittel- bis langfristige Perspektive für die ersten Anwendungsmöglichkeiten besteht, ist die Bereitschaft dazu für viele Unternehmen noch nicht sehr ausgeprägt. Laut den Befragten ist es allerdings schon kurzfristig notwendig, einen unternehmensindividuellen Einstieg zu finden, um beispielsweise die richtigen Talente zu rekrutieren und auszubilden. Die allgemeine Bereitschaft der deutschen Industrie, sich auf Quantentechnologien vorzubereiten, wird aus Sicht eines Teils der Expertinnen und Experten eher als zu wenig ausgeprägt bewertet. Hier wird die Befürchtung geäußert, dass auch an dieser Stelle eine zu große Technologieskepsis zu einem verspäteten Einstieg führen kann. Disruptive Veränderungen in der Technologieentwicklung könnten den richtig aufgestellten Unternehmen zu einem immensen Wettbewerbsvorteil verhelfen oder umgekehrt heutige Marktführer in wenigen Jahren ihrer Stellung berauben. Diese Lücke dann zu schließen, kann zu kostspieligen, nachträglichen Investitionen führen (sog. »Aufholjagden«).

» Jetzt muss man die Firmen dazu zwingen sich mit Quantencomputing auseinander zu setzen, wo man häufig die Reaktion bekommt, ach, das ist ja was für in zehn, 15 Jahren, das ist ja Science-Fiction. Da muss man ihnen aufzeigen, dass das etwas ist, womit man sich heute auseinandersetzen sollte, damit man, wenn morgen, übermorgen der Schalter umgelegt werden kann, man als Firma auch sofort in der Lage ist von dieser Technologie zu profitieren.«

Interview Wirtschaft (Startup, 1)

» Also ich glaube, eine gewisse Risiko-Awareness von der Industrie kann natürlich auch dazu führen, dass Dinge verzögert werden. Wenn man nicht den richtigen Einstieg findet, wenn man nicht die richtigen Talente früh an Bord bringt... und diese neue Technologie auch in die Firmenstruktur mit einbindet, dann kostet das Zeit. Dann kann man irgendwann, wenn der Vorteil durch Quantencomputer gegeben ist, schnell in den Nachholmodus gelangen, der dann aber viel Geld kosten kann.«

Interview Gesellschaft (20)

» So, I would say one of the biggest barriers is really getting people the knowledge, the learning how to use large devices, but the expertise that is from those domains where those applications will be to start to map it to those problems. And that I say is one of the biggest. So, that is to get the commercialization going.«

Interview Wirtschaft (Großunternehmen, 18)

Faire und offene Zugänge zu Technologie, Kompetenzen und Wissen über Anwendungsmöglichkeiten in der Breite schaffen

Es ist zu beachten, dass der Einsatz von Quantencomputing bestimmten Voraussetzungen unterliegt. Laut den befragten Expertinnen und Experten gehören dazu beispielsweise ausreichende Finanzmittel, Kompetenzen in der Formulierung von Problemen für Quantencomputer und das Wissen über deren Anwendungsfelder. Falls dies nicht in der Breite der Industrie vorhanden ist, könnte der Zugang zu Quantencomputing wenigen Unternehmen einen signifikanten Wettbewerbsvorteil verschaffen und so einen umfassenden Digital Divide auslösen. So könnten manche Branchen Gefahr laufen, eine »Winner takes it all«-Dynamik zu entwickeln. Auf organisatorischer Ebene besteht die Gefahr, dass dies zu einem Rückstand von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) führt, während auf geopolitischer Ebene Staaten ohne entsprechenden Technologiezugang einen ökonomischen Rückstand erfahren würden. Um diese ethischen Erwägungen zu adressieren, ist eine faire Beratung von neutraler, unvoreingenommener Seite für Unternehmen wichtig, da sonst Einzelinteressen Vorrang gewährt wird (z. B. bestimmten Hardwareanbietern).

» But I really don't understand when people say that, quantum computing will solve climate change ... Quantum computing will not solve any of those [problems]. Quantum computing is a computational product. It will help other people that are working to solve these problems [...] You need to actually build the device, give it to the people that are trying to solve the problem and help them to formulate their problem in a way that actually runs on a quantum device.«

Interview Gesellschaft (2)

» So, I think it would be good to actually give people the materials and access to at least some basic forms of these devices, so that they can do their own testing because, you know, you can't teach tacit knowledge. It needs to be created tacitly through exercise and through repetition. So, in that sense, if we want companies to have a kind of a test experience of these devices, they need to be able to- at least some people from their research teams need to be able to access these devices, play with them, try to solve some, you know, mark problems with them and for that they need to see some promise in it.«

Interview Gesellschaft (2)

» It's not like electric cars where there's an alternative being the fossil fuel car. Here it might be so disruptive that it actually causes a huge divide. So, that's something that is considered a typical risk.«

Interview Gesellschaft (22)

Arbeitsteilung zwischen Forschung und Industrie im Ökosystem komplementär koordinieren

Nach Ansicht einiger Befragten ist eine komplementärer koordinierte Arbeitsteilung im Ökosystem eine wichtige Aufgabe. Dabei spielt insbesondere eine intensivere Kooperation zwischen Industrie und Forschung eine wichtige Rolle. In einzelnen Statements wurde die aktuelle Verteilung der Aufgaben im Ökosystem und im Innovationsprozess kritisiert, wie im Folgenden für den Bereich Hardware dargelegt wird. Demnach sollten sich öffentlich geförderte Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler, insbesondere die Akteure der Grundlagenforschung an den Universitäten, vorrangig mit der Erforschung einzelner, besonders guter Qubits befassen. Die grundsätzliche Technologie in der Tiefe zu verstehen, zu verbessern und weiterzugeben sei ein wissenschaftliches Problem, für das man im kleinen Team am effizientesten arbeiten kann. Sobald wiederum die Skalierung eine Rolle spielt, sollten Industriepartner einbezogen werden. Diese verfügen über die notwendigen Ressourcen, um großformatige ingenieurwissenschaftliche Herausforderungen zu lösen. Laut Meinung einzelner Expertinnen und Experten produziere die aktuelle Situation im Ökosystem Ineffizienzen, da diese Aufgabenteilung nicht durchgehalten wird. Zudem sei zu beachten, dass die dabei verwendeten Hardwareansätze stetig hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit und des Mehrwerts für Anwendungen evaluiert werden sollten.

» Es sind einfach schwierige Realitäten, die die Realität der Grundlagenforschung sind. Und das Einzige, was mir eben einfällt, was ich auch schon [öffentlichen Fördermittelgebern] und ähnlichen Leuten gesagt habe, [...] dass man halt durchaus in der Förderlandschaft gucken kann, dass man Förderung macht, wo Leute eben wirklich sich nicht im Ganzen mit Quantencomputing beschäftigen, sondern mit ein bis zwei bis ganz grundsätzliche Technologie, bevor man skaliert, nochmal zu verbessern und dann weiterzugeben, wenn andere Leute die Skalierung machen.«

Interview Wirtschaft (Startup, 3)

» Making ten great qubits is a scientific problem. Making 1000 qubits of the same type is mostly an engineering problem. And I think science is best done at universities because you can do it with a small team that just go very, very deep on the physics and the science. And then when you need to do large scale engineering projects, there a commercial company can bring to bear a lot more resources.«

Interview Wirtschaft (Startup, 21)

4.2.3 Handlungsfeld III: Bildung und Gesellschaft

4.2.3.1 Bildung

Das BMBF erläutert in den Leitlinien ihres Forschungsprogramms für Quantensysteme die Notwendigkeit des Aufbaus von Talenten und der Sicherung von Fachkräften. Denn die erfolgreiche Fortschreibung von Quantencomputing-Technologien hängt maßgeblich vom Personal ab, das diese (weiter) entwickelt (BMBF, 2022). Auch die Expertinnen und Experten in den Interviews wiesen auf eine Reihe von Herausforderungen und Bedarfen im Themenfeld Aus- und Weiterbildung hin, die im Folgenden zusammengefasst werden:

Dem Fachkräftemangel als zentrale Hürde für die Branche entgegenzutreten

Bei der Frage, vor welchen essenziellen Herausforderungen Quantencomputing steht, war sich der Großteil der Interviewpartnerinnen und Interviewpartner weitgehend einig: Der Fachkräftemangel bereitet dem Ökosystem große Schwierigkeiten und wird es auch in Zukunft tun. Denn fehlendes qualifiziertes Personal macht sich nicht nur in MINT-Bereichen generell bemerkbar, sondern ist in der Physik und im Quantencomputing besonders stark zu spüren. Diese Situation spitzt sich mit Blick auf die benötigten Fachkräfte mit hohen akademischen Abschlüssen weiter zu. Die anspruchsvolle Beschaffenheit dieses Fachgebiets und die Qualifikationsanforderungen führen dazu, dass der gegenwärtig wachsenden Nachfrage nicht ausreichend qualifizierte Fachkräfte mit fundiertem Fachwissen in der Physik und Mathematik gegenüberstehen.

Darüber hinaus sind mit dem Aufschwung der Branche künftig nicht nur hochqualifizierte promovierte Akademikerinnen und Akademiker mit fundierten Kenntnissen in der Quantenphysik gefragt, sondern genauso Fachkräfte aus dem Elektroingenieurwesen oder dem Maschinenbau – die nicht weniger stark bereits in anderen Bereichen händierend gesucht werden. Ferner beunruhigt die Expertinnen und Experten die Aussicht, dass es möglicherweise an ausreichend qualifiziertem Personal mangelt, um die Nachwuchskräfte angemessen auszubilden.

» I think quantum technology is actually something that's very difficult to understand. I think learning physics is already [hard] enough, learning quantum physics is another layer, and I think to really master the quantum technology you actually do need to understand physics. I do think there is going to be a very significant labor-shortage for this skill set.«

Interview Wirtschaft (Startup, 23)

» So, there's just a finite number of people who really understand it to be able to pass that knowledge on or innovate and take their own ideas forward. So, that, is perhaps in other areas of engineering less of an issue.«

Interview Wissenschaft (6)

» And as, you know, the size of our quantum computers gets bigger, as the number of quantum computers we have increases, we will need more of these technicians, engineering talent.«

Interview Wirtschaft (Großunternehmen, 26)

In der Ausbildung von Fachkräften Quantencomputing-spezifische Expertise mit interdisziplinären Kompetenzen verbinden

Wie zuvor beschrieben, stellt die Quantencomputing-Branche hohe Anforderungen an die Fachkräfte. Die Interviewpartnerinnen und Interviewpartner betonten, dass aufgrund der komplexen und anspruchsvollen Beschaffenheit des Felds einerseits zwingend ein tiefes Verständnis für die Quantenphysik vorausgesetzt wird, um in der Lage zu sein, Quantencomputing zu verstehen und die entsprechenden Technologien (weiter) zu entwickeln. Gleichzeitig wird erwartet, dass die Fachkräfte ein interdisziplinäres Verständnis haben sollten. Die Herausforderung besteht darin, diesen Balanceakt zwischen Tiefe und Breite erfolgreich in die akademische Ausbildung im Bereich Quantencomputing zu integrieren. Dies wird von den Interviewpartnerinnen und Interviewpartnern aktuell als Defizit wahrgenommen. Sie sehen die Notwendigkeit, neben der vertieften Ausbildung in quantenspezifischen Bereichen auch nicht-quantenspezifische Aspekte in die Ausbildung zu integrieren. Hierzu zählen:

- Kompetenzen im Bereich Künstliche Intelligenz sowie in der IT- bzw. Softwareentwicklung: Grundlegende Programmierkenntnisse, Grundausbildung in der Entwicklung von Algorithmen und Verständnis von maschinellem Lernen,
- Kenntnisse in Unternehmertum: Industriespezifisches Know-How sowie Fähigkeit für unternehmerisches Denken und für die Umwandlung technologischer Fortschritte in erfolgreiche Geschäftsmodelle und
- Bewusstsein für verantwortungsbewusste Technologieentwicklung: Berücksichtigung ethischer Grundsätze und Antizipation potenzieller gesellschaftlicher Risiken bei der Entwicklung und Implementierung von Quantencomputing-Technologien.

» Es [ist] immer noch so, dass die Studenten und Postdocs, die an Quantentechnologien arbeiten, nicht automatisch sich auch mit künstlicher Intelligenz auskennen. Das sollte aber automatisch sein. [...] Weil [...] das ist der Hauptmechanismus, mit dem die Quantentechnologien beschleunigt werden.«

Interview Wissenschaft (27)

» Man hat [bezüglich] der Ausbildung immer eine Art Konflikt zwischen Interdisziplinarität und der Tiefe des Wissens in einem Feld. Und grade bei Quantencomputing braucht es eben [...], auch eine sehr tiefe Ausbildung. Wenn ich zum Beispiel neue Algorithmen entwickeln möchte, dann hilft mir eigentlich die Interdisziplinarität gar nicht so viel, dann muss ich schauen, dass ich Quantencomputing und die Mathematik dahinter [in der Tiefe] begreifen kann. Und deshalb ist es immer wichtig, dass man einen guten Mix hat von der Tiefe der Ausbildung, die man für bestimmte Dinge braucht, und einer Überlappung, die man dann auch durch die Arbeit in Teams an realen Problemen gewinnt.«

Interview Wissenschaft (20)

» There needs to be a way to integrate not necessarily ethics education, but the societal impacts of these technologies to the educational programs like master's and PhDs.«

Interview Gesellschaft (2)

Wege ebnen für die Weiterbildung von Fachkräften angrenzender Fachbereiche

Neben der Integration interdisziplinärer Inhalte in die Ausbildung der Quantencomputing-Nachwuchskräfte wiesen die Expertinnen und Experten in der Befragung auf weitere Bedarfe zur Sicherung der Fachkräftebasis für Quantencomputing hin – darunter auch auf die Notwendigkeit von Weiterbildungsmaßnahmen und Umschulungsformaten für Fachkräfte aus anderen Fachbereichen wie der Softwareentwicklung oder dem Maschinenbau. Dabei ist es nicht trivial, qualifizierte Fachkräfte aus anderen Fachbereichen zunächst auf Quantencomputing und entsprechende Umschulungsmöglichkeiten aufmerksam zu machen und sie dafür zu begeistern, und sie anschließend gezielt in das Feld einzuführen und entsprechend weiterzubilden. Obwohl bereits verschiedene Wissenstransferformate über unterschiedliche Plattformen angeboten werden, besteht aus Sicht der Expertinnen und Experten weiterhin hoher Bedarf an solchen Maßnahmen. Für diesen Weiterbildungsbereich spielen auch Unternehmen eine wichtige Rolle, um Ressourcen und Infrastrukturen für die Weiterbildung ihrer Mitarbeitenden bereitzustellen.

» Wir müssen Weiterbildungsmaßnahmen schaffen, damit Personen sich mit dem Thema Quanten-Softwareentwicklung auseinandersetzen können. Das meine ich insbesondere darin: wie kodiere ich konkrete Industrieprobleme auf Quantenrechnern. Das alleine ist schon so, so viel Arbeit, wo es zu wenige Leute gibt.«

Interview Wirtschaft (Startup, 1)

» Was interessant sein kann, ist auch, wie kann man Mitarbeiter, die eigentlich schon im Betrieb sind, dazu motivieren, mehr über Quantencomputing zu lernen? Wie kann ich entsprechende Ausbildungs- oder entsprechende Motivations-Kurse und Veranstaltungen finden, dass ich Leute, [...] die vielleicht Optimierungsarbeiten durchführen, oder die programmieren, und die dann in Zukunft eben mit Quantencomputern arbeiten müssen, wie kann ich die noch näher an das Thema ranbringen?«

Interview Wissenschaft (20)

Frühkindliche MINT-Bildung zur Bekämpfung des Fachkräftemangels fördern

Angesichts des gegenwärtigen Fachkräftemangels und den rückläufigen Studierendenzahlen in MINT-Fächern plädierten die Befragten dafür, dass bereits in der frühkindlichen Bildung angesetzt werden sollte. Eine gezielte Vermittlung von MINT-Kenntnissen in dieser frühen Phase könnte das Interesse an MINT-Fächern generell und von Quantencomputing im Speziellen fördern. Gleichzeitig sollten junge Mädchen, die nach wie vor in naturwissenschaftlichen Fächern unterrepräsentiert sind, gezielt für diese Disziplinen begeistert werden.

» Was mir auch am Herzen liegt, ist, die ganz Kleinen, also die Kinder im Bereich von 4 bis 10 Jahren, dass man die begeistern kann für Quantencomputing, und für Naturwissenschaften. Weil ein großes Problem in Deutschland ist auch im Vergleich zu anderen Ländern, dass wir zu wenig Leute haben, die Naturwissenschaften und Technologie studieren. Und die sich damit gut auskennen. Und [...] wir haben auch viel weniger Mädchen, die das machen. [...] Wenn man in die Schulen geht, [...] wo man eigentlich alle noch abholen kann, und dann für Technologie begeistern kann, und eben speziell jetzt für diese Technologie, [können Kinder eine] gewisse Intuition entwickeln.«

Interview Wissenschaft (20)

» If you need people 15, 20 years from now, that means we need to attract young kids [...] at school into this area. [...] Suppose now someone who is ten, a girl or a boy is interested but doesn't go to academia, then it's a long, round trek to get there.«

Interview Gesellschaft (22)

» Eigentlich müssten wir aus meiner Sicht in der Schule ansetzen, um dort schon eine gewisse Basis für MINT-Fächer, vor allem für Informatik zu legen. Und auch für den gesellschaftlichen Umgang mit neuen Medien, mit neuen Technologien.«

Interview Politik (8)

Anforderungen der jungen Generation an die Arbeitswelt als Chance für das Quantencomputing-Ökosystem nutzen

In Bezug auf die jungen Nachwuchskräfte wiesen die Expertinnen und Experten zudem auf die veränderten Ansprüche der jungen Generation an ihre berufliche Tätigkeit und die transformative Wirkung des Quantencomputing hin. Denn laut den Expertinnen und Experten legt die junge Generation vermehrt Wert darauf, dass ihre Arbeit einen sinnvollen gesellschaftlichen oder ökologischen Beitrag leistet. Dieser Wandel wird den Arbeitsmarkt nicht nur maßgeblich verändern, sondern bietet auch bedeutendes Potenzial für den Bereich Quantencomputing. Denn besonders wenn mit der Technologie ökologische oder soziale Ziele verfolgt werden, könnten die Fachkräfte von morgen für das Feld begeistert werden. Vor dem Hintergrund fehlenden Fachpersonals und geburtenstärkerer Jahrgänge eröffnet sich eine einzigartige Chance für Quantencomputing.

» Das bringt uns wieder zu der Diskussion, welchen Mehrwert bringt das Quantencomputing zum Beispiel auch für die großen gesellschaftlichen Herausforderungen. [...] Das zeichnet sich ja für die neuen Generationen ab, die ja viele Kriterien an ihre Jobs, an die Professionen mittlerweile stellen und [...] wo es nicht nur darum geht, Geld zu verdienen oder so, sondern man ja auch einen gewissen Sinn in seiner Arbeit sucht. Und das könnte zum Beispiel so ein Hebel sein, wo man an die Nachwuchsgeneration oder eben auch das Thema, positiv aufstellen, ja, platzieren [könnte].«

Interview Politik (8)

» What motivates [...] the current people who are thirty, thirty-five is different than what motivated my generation – people who are fifty-five and above. And we need to understand that, and we need to make sure that they are excited about the work, they feel devoted with their work, so that they don't get disappointed and leave the industry and go somewhere else.«

Interview Wirtschaft (KMU, 9)

4.2.3.2 Gesellschaft

Neuartige und aufstrebende Technologien wie Nanotechnologien, künstliche Intelligenz, Neurotechnologien werfen und werfen zahlreiche ethische und gesellschaftliche Fragestellungen auf. Mit dem Aufstieg von Quantencomputing-Technologien, gehen nun ähnliche Fragestellungen einher. Die Notwendigkeit von Regularien und Leitlinien, mit diesen fortschrittlichen Technologien umzugehen, wird weltweit anerkannt, wie nicht zuletzt mit der Zustimmung zum AI Act der Europäischen Union verdeutlicht wurde.

Mögliche gesellschaftliche und ethische Herausforderungen erfordern verantwortungsvollen Einsatz von Quantencomputing

Quantencomputing repräsentiert eine aufstrebende Technologie, die – wenn sich ihre Versprechen realisieren lassen – nicht nur disruptiv für bestehende Industrien, Märkte und globale Kooperationen wirken wird, sondern auch neue ethische und gesellschaftliche Fragestellungen aufwerfen wird (Coenen und Grunwald, 2017; Holter et al., 2022; Kop et al., 2023; Possati, 2023; Seskir et al., 2023). Bei der Befragung nach potenziellen ethisch-gesellschaftlichen Risikofaktoren nannten die Interviewpartnerinnen und Interviewpartner folgende:

- Demokratisierung und technologische Souveränität: Die Gefahr besteht darin, dass der Zugang zu Quantencomputing und dafür benötigten Komponenten nicht demokratisch verteilt ist und bestimmte Länder unter einer technologischen Abhängigkeit leiden. Geopolitische Spannungen haben weitreichende Konsequenzen für die technologische Souveränität, und nationale Sicherheit.
- Winner-takes-all-Dynamiken: Monopolbildung und Marktbeherrschung durch einige wenige mächtige Länder oder Entitäten mit fehlender Bereitschaft für hohe kollaborative Qualität könnten weitreichende Konsequenzen für den gesamten Markt und die Gesellschaft haben.
- Datensicherheit und Quanten-Kryptographie: Herkömmliche Verschlüsselungstechniken könnten durch Quantencomputer gefährdet werden.
- Dual Use: Quantencomputer könnten für militärische oder Überwachungs-Zwecke eingesetzt werden mit enormen gesellschaftlichen und geopolitischen Folgen.
- Greenwashing and Rebound-Effekte: Trotz der potenziellen Anwendungsbereiche im Umweltbereich hängen die ökologischen Potenziale davon ab, wofür Quantencomputing schließlich verwendet wird und ob tatsächlich eine Ressourcenminderung entsteht oder diese mit erhöhter Nutzung kompensiert wird.
- Gesellschaftliche Ablehnung: Misstrauen in der Gesellschaft und fehlende Akzeptanz könnten die Entwicklung und Anwendung von Quantencomputing beeinträchtigen.

Vor dem Hintergrund, dass Quantencomputing noch eine junge Technologie ist, deren disruptiver Charakter schließlich stark von der Geschwindigkeit der Entwicklung und der konkreten Anwendungsbereiche abhängt, gestaltet sich eine präzise Vorhersage der tatsächlichen Risiken – analog zur genauen Abschätzung der Potenziale und Entwicklung – zum aktuellen Zeitpunkt als äußerst herausfordernd.

» [Die] Herausforderung, die ich sehe, ist, wenn wir es nicht schaffen, dass Quantencomputing eine Technologie ist, die durch Organisationen jeglicher Größenordnungen verwendet werden kann, dann laufen wir Gefahr, dass es eine prohibitiv teure Technologie wird, die ausschließlich diejenigen Unternehmen nutzen [werden], die die entsprechenden Bilanzen haben, die in der Lage sind, sich diese Technologie zu leisten und damit ihren Vorsprung gegenüber KMUs noch weiter ausbauen können.«

Interview Wirtschaft (Startup, 1)

» I worry that [quantum computing] could actually hurt the society in a bigger way in the sense of few people who have the technology and have access to it will have a huge advantage over those who don't have it, So, from a global perspective, are we going to make the disparity issues worse than what they are right now.«

Interview Wirtschaft (KMU, 9)

» Also ich denke das, was alle immer vor Augen haben und was definitiv eine Gefahr darstellt, ist die Tatsache, dass Verschlüsselungssysteme, wie sie heutzutage im Einsatz sind, bei einer hinreichenden Leistungstiefe von Quantencomputern anfällig sind. Dann ist all das, was wir heute aktuell nutzen für Verschlüsselung anfällig. Das heißt wir brauchen neue Verschlüsselungssysteme, Post Quantum Kryptographie.«

Interview Wirtschaft (Startup, 1)

In den vergangenen Jahren hat die Erforschung von Maßnahmen zur Vorausschau und zum Umgang mit potenziellen gesellschaftlichen und ethischen Risiken signifikant zugenommen und hat sich das Konzept des verantwortungsvollen Quantencomputing als wesentlicher Bestandteil der Forschungslandschaft etabliert (Coenen and Grunwald, 2017; Holter et al., 2022; Kop et al., 2023; Possati, 2023; Seskir et al., 2023). In diesem Zusammenhang haben Kop et al., 2023 ein Rahmenwerk mit zehn Leitlinien für die verantwortungsvolle Entwicklung von Quantentechnologien entwickelt. Die Kriterien lauten wie folgt: 1) Umgang mit Sicherheitsbedrohungen,

2) Antizipation von Dual-Use-Risiken, 3) Vorbeugung von »Winner-takes-all«-Dynamiken durch internationale Zusammenarbeit, 4) Zusammenarbeit mit Regierungen und Regierungsbehörden, 5) Offener Austausch mit Unternehmen und Expertinnen und Experten, 6) Transparente Dialoge mit der Gesellschaft, 7) Verbindung von FuE mit wünschenswerten gesellschaftlichen Zielen (SDGs), 8) Technologischer Fortschritt, 9) Förderung von verantwortungsvollen Quantentechnologien, 10) Dialoge zur Vorstellung möglicher Quantenzukünfte.

Dieses Rahmenwerk wurde im Zuge der Interviews einer Bewertung unterzogen. Dabei zeichnete sich grundsätzlich eine positive Resonanz ab, doch gleichzeitig äußerten die Befragten Unsicherheit hinsichtlich der Möglichkeiten der praktischen Umsetzung. Daher gilt es nun – wie von den Entwicklerinnen und Entwicklern des Rahmenwerks vorgeschlagen – diese theoretischen Richtlinien in Zusammenarbeit zwischen multidisziplinären Teams aus verschiedenen Stakeholdergruppen aus Wirtschaft, Wissenschaft, Politik und Gesellschaft weiterzuentwickeln und zu operationalisieren.

4.2.4 Handlungsfeld IV: Internationale Kooperation und Technologiesouveränität

Deutschland verfügte mit dem IBM Quantum System One in Ehningen schon früh über den europaweit ersten, kommerziell nutzbaren und DSGVO-konformen Quantencomputer. Darüber hinaus gilt der Standort als wichtiger Knotenpunkt für Fachkonferenzen, ist Gastgeber für einige wegbereitende Veranstaltungen (z. B. Quantum Effects Stuttgart, World of Quantum München), verfügt über eine gute Kollaborationskultur zwischen Wissenschaft und Wirtschaft im Rahmen von Verbundforschung und es laufen Forschungsarbeiten zu nahezu allen relevanten Technologieplattformen im Bereich Quantencomputing (BMBF, 2023-b). In diesem Kontext bietet die Einbettung in den europäischen Binnenmarkt Anknüpfungspunkte an eine Vielzahl von Unternehmen, prominente Forschungseinrichtungen und Demonstrationslabors. Das zieht verschiedenste Akteure im Bereich Quantencomputing an und macht den Standort zu einem idealen Ausgangspunkt für internationale Kooperationen und Netzwerke. Diese internationalen Kooperationen sind allerdings nicht immer reibungsfrei – ineffiziente Abstimmungsprozesse, nationale strategische Interessen, Anforderungen an die technologische Souveränität und Unterschiede im Umgang mit Intellectual Property können Hürden darstellen. In diesem Kontext wurden in den Interviews Bedarfe genannt, auf die im folgenden Teilkapitel näher eingegangen wird.

Internationalen Austausch systematischer gestalten

Die Expertinnen und Experten betonten, dass effektive und effiziente internationale Kooperationen besonders wichtig sind, um die Potenziale im Bereich Quantencomputing zu heben. So sollen sowohl die Kommunikation zwischen unterschiedlichen Sektoren (z. B. Chemie- und Finanzindustrie) verbessert, vielfältige Akteursgruppen aus Industrie und Forschung zusammengebracht, als auch globale Netzwerke in spezialisierten Fachdomänen befördert werden. Der Austausch sollte möglichst systematisch gestaltet werden. Dafür muss der jeweilige fachliche Fokus der einzelnen Akteure für die Zusammenarbeit im Ökosystem deutlich erkennbar sein, damit die Wahl der Kooperationspartner gut gelingen kann. So könnten beispielsweise einzelne Spezifikationen für Komponenten zwischen FuE-Vorhaben geteilt werden, die die nächsten Schritte der Technologieentwicklung innerhalb eines definierten Zeithorizonts vorzeichnen (z. B. Kryotechnik). Dadurch könnte ein konzertiertes Vorgehen über den gesamten Quantum-Stack entstehen, FuE-Kosten über mehrere Entitäten verteilt und wirtschaftliche Risiken minimiert werden. Falls dies nicht geschehe, laufen Konsortien Gefahr, dass die Zusammensetzung der Organisationen zu unterschiedlich ist und Ziele zu breit formuliert werden, um einen nutzenstiftenden Arbeitsmodus zu finden. Die Befragten betonten ebenfalls, dass besonders auf europäischer Ebene bei bi- und multilateralen Forschungsvorhaben ein offener Austausch zwischen Unternehmen und Expertinnen und Experten sowie Transparenz gegenüber der Gesellschaft gefördert werden sollte. Dieser Austausch sollte auch dann nicht abreißen, wenn einzelne Unternehmen in eine Vorreiterrolle gelangen.

» Das heißt, man muss auch dafür sorgen, dass am Ende des Tages so ein Return on Invest wieder da ist, sprich, dass genügend Geld in Deutschland verdient werden kann, um solche Forschung auch langfristig zu gewährleisten ... Deutschland hat eine sehr gute Grundlagenforschung. Aber ich glaube eben diese enge Zusammenarbeit zwischen Industrie und Academia, die könnte noch verbessert werden.«

Interview Wirtschaft (Großunternehmen, 5)

» There must be more communication between industry. We need to cause more awareness in various fields of industry, not just chemistry, not just chemical industry, but also financial industry that quantum computing can be successful. And in that way you need to convince big companies to basically provide investments.«

Interview Wirtschaft (KMU, 29)

» So, we've made a concerted effort to identify what specifications we can share about those components that we will need for the next generation, like in five years from now we will need wiring to the specifications dilution refrigerators to these specifications et cetera in the hope that if multiple members of the industry do that, some of these R&D costs can perhaps be like if we can align any of these specs and suppliers can create components that are useful for multiple companies that help them have more business and hopefully have spread R&D costs out.«

Interview Wirtschaft (Großunternehmen, 26)

Im Spannungsfeld zwischen Exportvorschriften, technologischer Souveränität und Schutz von IP effizient kooperieren

Die Expertinnen und Experten gaben im Kontext von internationalen Kooperationen auch zu bedenken, dass Quantencomputing weitestgehend als kritische Infrastruktur betrachtet wird. Somit wird die internationale Zusammenarbeit in Teilen eingeschränkt, um eigene Fortschritte aufgrund politischer Anforderungen an eine unabhängige, europäische Lieferkette oder erhoffte Wettbewerbsvorteile zu schützen. Durch geopolitische Spannungen und Polarisierungen wird der Trend weiter verstärkt. Eine große Hürde sind in diesem Zuge die bestehenden und entstehenden Exportkontrollen, die dem jungen – jedoch stark vernetzten – Feld schaden und die Technologieentwicklung verlangsamen. Insbesondere für spezialisierte Komponenten ist das problematisch und kann durch kurzfristige Änderungen in der politischen Landschaft zu mittelfristigen Hürden in der Beschaffung und langfristigen Innovationsrückständen führen. Ebenfalls sind politische Vorgaben auf europäischer Ebene für außereuropäische Unternehmen undurchsichtig und lassen beidseitig erwünschte Kooperationsprojekte versanden. Darüber hinaus könnten unabgestimmte nationale Standards und Normen ebenfalls Kooperationen erschweren. Initiativen zur Harmonisierung des Normen- und Rechtsrahmens sollten daher insbesondere auf europäischer Ebene vorangetrieben werden.

» Vielleicht ein Thema, das ich für kritisch einschätze, ist, dass an allen Ecken und Enden jetzt schon drüber diskutiert wird, wie da Exportkontrollen eingeführt werden. Das halte ich nicht für eine gute Idee, gegeben der doch immer noch sehr forschungslastigen Realität des Feldes, da jetzt schon Riegel vorzuschieben, wie Informationen oder auch Geräte weitergegeben werden, wäre sehr schlecht.«

Interview Wirtschaft (Startup, 3)

» Quantum, even though it's in its early days and its early history, is already seen by governments as something strategic, something important for sovereignty perspectives, and in this sense then could readily or relatively quickly become something that is protected. And doing so can be very counterproductive because the field is so young and already, we see that the supply chain is very interconnected. Being overly cautious, overly protective, creating barriers can actually slow the entire field, cause undue harm to the growth of the sector.«

Interview Wirtschaft (Netzwerke, 24)

» Therefore, I would say that one of the challenges has to be that there is a misalignment globally. Instead of being cooperative, you know, the German program is no longer working alongside the European flagship program, it's competing with it. ... On the software side I think it is less of an issue than on the application side because I think there's a closer alignment of interest.«

Interview Wirtschaft (KMU, 31)

Regionale Unterschiede beim IP-Recht innovationsfreundlicher regeln

In den Interviews wurde ebenfalls der Punkt des IP-Rechts aufgeworfen. So sind beispielsweise die Vorgaben zur Patentierung von Software in Europa und den USA unterschiedlich geregelt. Das wirke sich auf die regionale Entwicklung des Sektors aus, da Unklarheiten über die Rechtssicherheit von Patentvorhaben bzw. -schutz bestehen. Um dem entgegenzuwirken, sollten neue und einheitliche Rahmenbedingungen von neutralen Dritten geschaffen und kontrolliert werden, beispielsweise von größeren Industriekonsortien. Weitestgehend positiv wurde von den Befragten der Ansatz erwähnt, aus öffentlichen Mitteln Forschung von Unternehmen zu fördern, um im Gegenzug das Eigentum an den Patenten zu erlangen. Um das Geschäft des geförderten Unternehmens weiter zu ermöglichen, werden die Patente dann zurück lizenziert. Somit verlässt das geistige Eigentum nicht den geopolitischen Interessensraum – in diesem Fall die EU – und ist gleichzeitig bei einer unverkäuflichen Organisation verwahrt (z. B. DLR).

» Und natürlich gibt es auch rechtliche Rahmenbedingungen, zum Beispiel Intellectual-Property-Rechte und so weiter, wo wir merken, an der Schnittstelle zwischen öffentlich geförderter Forschung und industrieller Forschung gibt es immer auch Fragestellungen, die teilweise nicht so gelöst werden können und in der Geschwindigkeit gelöst werden können, wie das die technischen Entwicklungen benötigen würden.«

Interview Politik (8)

» There are not always the same rules for IP between different jurisdictions. There's a big difference, for instance, in software between Europe and the United States, not specific to quantum, but just software in general. The conceptualization of what is patentable in software is different between the US and Europe. That has a big impact for how the sector evolves, it cannot be understated.«

Interview Wirtschaft (Netzwerke, 24)

» This is the reason that we went in for the [public funding organisation] scheme because we liked it. The [public funding organisation] funds our research. But in return, they get the ownership on the patents. However, they license it back to us, right? So, when they give an X amount of money, [...] the people should get something in return. And that's the ownership of the patents. But still, they don't want to kill the business, so they license it back to the company provided it's not going to move away from the European Union, right? Because the money is coming from the European Union. The ownership of the patents stays with the [public funding organisation]. [...] If I get profited and then maybe I go to another country like China or something, they want to avoid it. So, for that reason, we are very comfortable to go into this program because the innovation is safe with the government because nobody can buy [public funding organisation]. So, we need a safe entity when it is public money.«

Interview Wirtschaft (Startup, 7)

5 Fazit und Ausblick

Von den Potenzialen und Bedarfen des internationalen Quantenökosystems zur Roadmap für Heilbronn-Franken

Ziel der vorliegenden Studie war es, die **Potenziale und Bedarfe des internationalen Quantencomputing-Ökosystems** aus der Perspektive von weltweit anerkannten Expertinnen und Experten für Quantencomputing zu analysieren.

Auf dieser Grundlage sind vier übergeordnete Handlungsfelder – »Finanzierung und Förderung«, »Integration in Unternehmen«, »Bildung und Gesellschaft« sowie »internationale Kooperationen« – für die Stärkung und Weiterentwicklung des internationalen Ökosystems und damit der Zukunftstechnologie insgesamt identifiziert worden. Abbildung 16 stellt diese und die darin zusammengefassten Bedarfe in einer Übersicht dar.

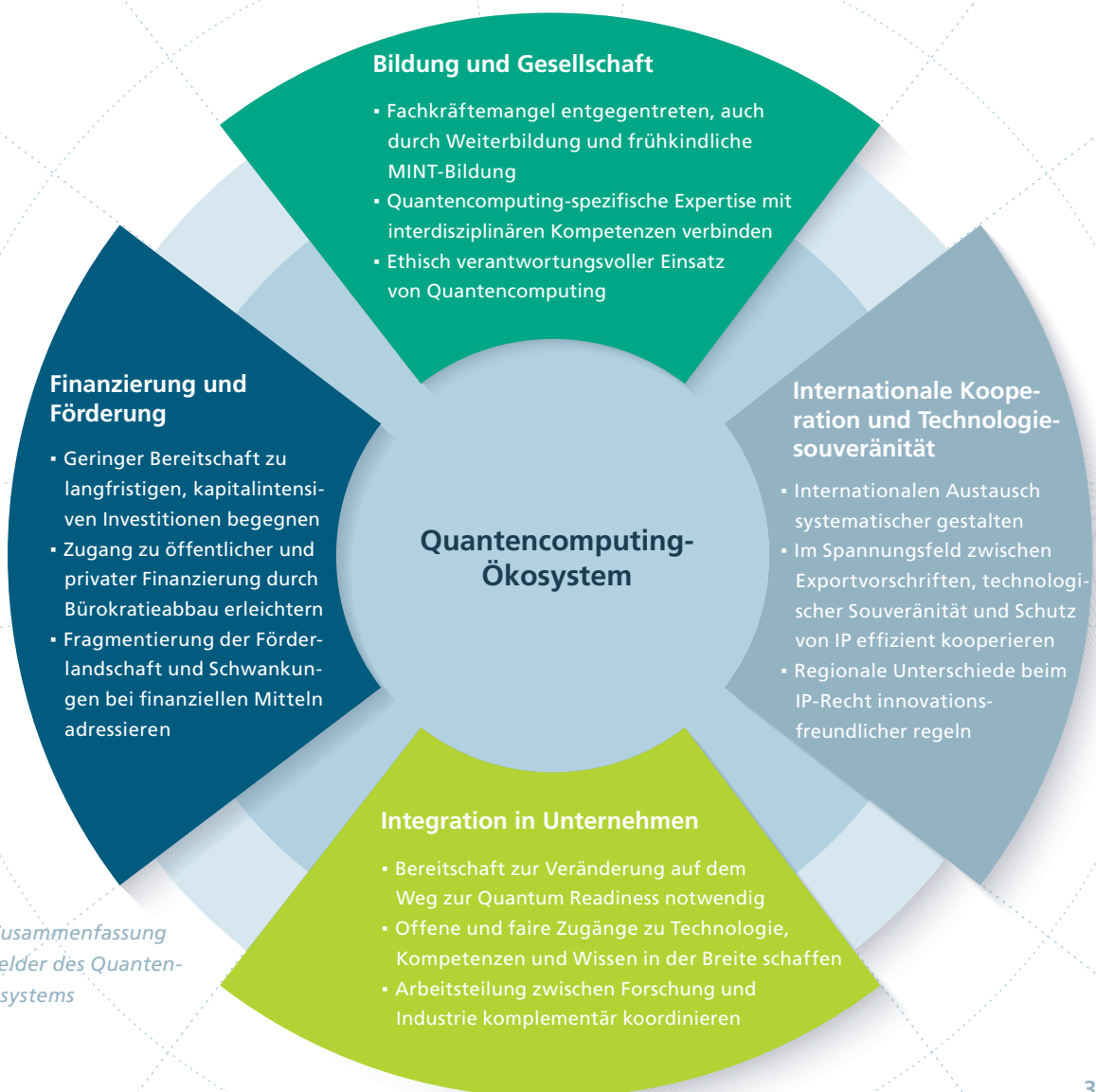


Abbildung 16: Zusammenfassung der Handlungsfelder des Quantencomputing-Ökosystems

Es wurde deutlich, dass noch ein langer Atem notwendig ist, um die technologischen Potenziale zu heben. Mögliche Anwendungsbereiche von Quantencomputing beinhalten perspektivisch weitreichende Wertschöpfungsversprechen in den Bereichen: Chemie und Materialentwicklung; Pharma, Biotechnologie und Medizinprodukte; Mobilität und Logistik; Finanzen und Versicherungen; Sicherheit; Klima und Energie; sowie Produktion. Dafür sollten jedoch langfristige, entbürokratisierte und risikoaffine Finanzierungsmöglichkeiten geschaffen werden. Für Unternehmen sollte ein frühzeitiger Zugang zu relevanter Technologie und Wissen ermöglicht werden. Daneben ist eine Steigerung der Zahl qualifizierter (Nachwuchs-) Fachkräfte genauso wichtig wie die Förderung von internationalen Kooperationen und die Sicherung der technologischen Souveränität.

Die vier identifizierten Handlungsfelder sowie die darin zusammengefassten Bedarfe sind als empirisch begründeter, analytischer Rahmen aktuell Grundlage für den anschließenden Roadmapping-Prozess in der Region Heilbronn-Franken, der gemeinsam mit einem internationalen Advisory Board und regionalen Stakeholdern die Potenziale und Bedarfe im Bereich Quantencomputing erschließen soll. So ist beabsichtigt, das dynamische und wachsende Innovationsökosystem in der Region weiter zu ergänzen und zu stärken. Im Kontext der übergreifenden Strategien auf Landes-, Bundes- und europäischer Ebene soll die Roadmap ebenfalls einen Beitrag zu deren Zielerreichung leisten. In diesem Prozess werden ausgehend von der Analyse der Potenziale und Bedarfe des übergreifenden, internationalen Quantencomputing-Ökosystems (»Why«) die identifizierten Handlungsfelder auf Relevanz und Handlungsoptionen für ein Sub-Ökosystem

in der Region Heilbronn-Franken geprüft (siehe Abbildung 17). Dafür wird eine Visionsbildung für die relevanten zukünftigen Leistungsbereiche (»What«) vorgenommen. Unterteilt in Themen-Roadmaps werden daraufhin Maßnahmen und Ressourcen definiert (»How«) und die Ergebnisse konkretisiert sowie eine Synthese gebildet (»When«, »Who« und »Where«). Ziel ist die Formulierung einer Quantencomputing-Roadmap bis Spätsommer 2024, die sich passgenau und regionenspezifisch in den bestehenden Kontext auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene einfügt. Eine Veröffentlichung der Roadmap ist geplant.

Um angesichts der dynamischen Entwicklungen des Quantencomputing-Ökosystems die zentralen technologischen Trends kontinuierlich zu monitoren und auch neuere Entwicklungen in die Umsetzung der Quantencomputing-Roadmap einzu beziehen, werden die im Rahmen dieser Studie identifizierten Trends und Einschätzungen der Expertinnen und Experten Ende 2024 – gut 18 Monate nach Beginn der dieser Studie zugrunde liegenden Interviews – im Rahmen eines **internationalen Trendmonitorings** durch internationale Expertinnen und Experten überprüft und ggf. aktualisiert. Im Rahmen einer online durchgeführten Delphi-Befragung haben die Interviewpartnerinnen und Interviewpartner und weiteren Wissensträgerinnen und Wissensträger aus dem internationalen Ökosystem die Möglichkeit, die Bedeutung der identifizierten Potenziale und Bedarfe erneut zu bewerten und wichtige neue Aspekte zu formulieren. Darüber hinaus sollen auch divergierende Einschätzungen identifiziert werden. Mit diesem Vorgehen wird die Quantencomputing-Roadmap und die sich daraus ergebenden Aktivitäten aktuell gehalten und kontinuierlich auf das sich verändernde Ökosystem abgestimmt.

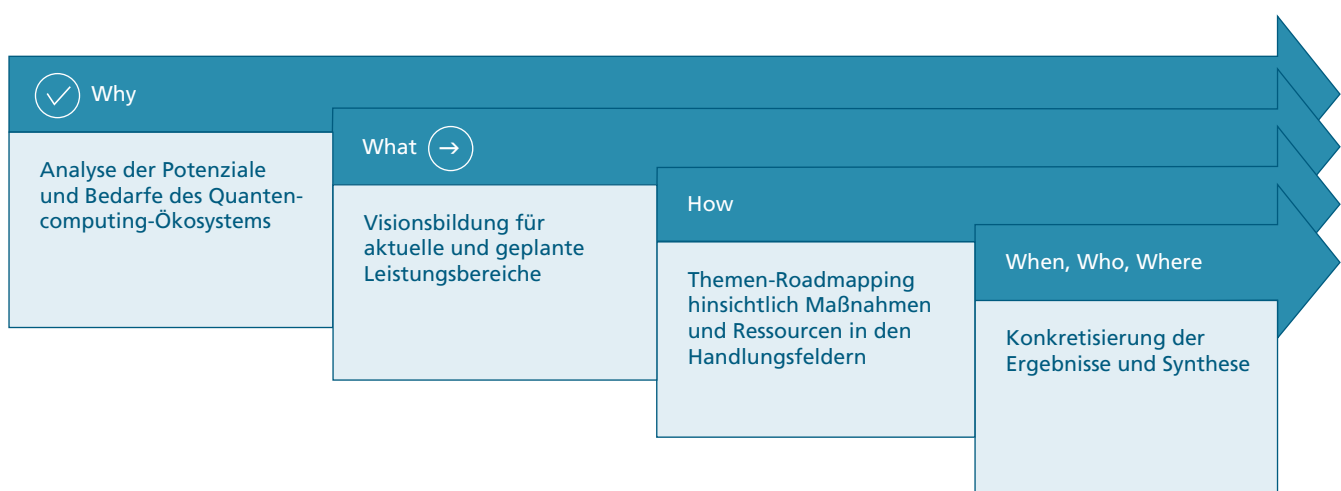


Abbildung 17: Ablauf des Roadmapping-Prozesses (angelehnt an Kerr et al., 2019)

6 Literatur

- Adner R. (2006). Match your innovation strategy to your innovation ecosystem. *Harvard business review*, 84(4), 98–148. www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/16579417
- Bitkom (2022). Quantentechnologien in Unternehmen. Potenziale, Orientierung, Use Cases. www.bitkom.org/sites/main/files/2022-05/220509_LF_Quanten-Leitfaden.pdf
- BMBF (2023) a. Quantentechnologien. www.quantentechnologien.de/
- BMBF (2023) b. Handlungskonzept Quantentechnologien. www.bmbf.de/SharedDocs/Downloads/de/2023/230426-handlungskonzept-quantentechnologien.html
- BMBF (2022). Quantensysteme: Zukunftstechnologien für Innovation und Fortschritt. https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/digitale-wirtschaft-und-gesellschaft/quantensysteme/quantensysteme_node.html
- Carayannis, E. G., und Campbell, D. F. J. (2009). ‚Mode 3‘ and ‚Quadruple Helix‘: Toward a 21st Century Fractal Innovation Ecosystem. *International Journal of Technology Management*, 46(3/4). <https://doi.org/10.1504/ijtm.2009.023374>
- Coenen, C., und Grunwald, A. (2017). Responsible research and innovation (RRI) in quantum technology. *Ethics and Information Technology*, 19, 277–294. <https://doi.org/10.1007/s10676-017-9432-6>
- Ernst & Young (2022). How can you prepare now for the quantum computing future? EY Quantum Readiness Survey 2022. National Quantum Computing Centre. ey-quantum-readiness-survey-2022.pdf
- Fraunhofer IMW (2024). Aktivitätenlandkarte Quantencomputing. www.quantencomputing-deutschland.de
- Gomes, L. A. d. V., Facin, A. L. F., Salerno, M. S., und Ikenami, R. K. (2018). Unpacking the Innovation Ecosystem Construct: Evolution, Gaps and Trends. *Technological Forecasting and Social Change*, 136, 30–48. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.11.009>
- Granstrand, O., und Holgersson, M. (2020). Innovation Ecosystems: A Conceptual Review and a New Definition. *Technovation*, 90–91. <https://doi.org/10.1016/j.technovation.2019.102098>
- IBM (2023): The Quantum Decade - A Playbook for Achieving Awareness, Readiness, and Advantage. IBM Institute for Business Value. www.ibm.com/thought-leadership/institute-business-value/en-us/report/quantum-decade
- Jütting, M. (2020). Exploring Mission-Oriented Innovation Ecosystems for Sustainability: Towards a Literature-Based Typology. *Sustainability*, 12(16). <https://doi.org/10.3390/su12166677>
- Kerr, C., Phaal, R., Thams, K. (2019). Customising and deploying roadmapping in an organisational setting: The LEGO Group experience. *Journal of Engineering and Technology Management*, Volume 52, Pages 48–60. <https://doi.org/10.1016/j.jengtecman.2017.10.003>
- Kop, M., Aboy, M., De Jong, E., Gasser, U., Minssen, T., Cohen, I. G., Brongersma, M., Quintel, T., Floridi, L., Laflamme, R. (2023). Towards Responsible Quantum Technology. Sageguarding Engaging and Advancing Quantum R&D. Harvard Berkman Klein Center for Internet and Society Research Publication Series #2023-1. <https://cyber.harvard.edu/publication/2023/towards-responsible-quantum-technology>

- Kuckartz, U., Rädiker, S. (2020). Fokussierte Interviewanalyse mit MAXQDA. *Schritt für Schritt*, 55–74.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-31468-2>
- Mayring, P. (2010). Qualitative Inhaltsanalyse. In: Mey, G., Mruck, K. (Hrsg.), *Handbuch Qualitative Forschung in der Psychologie*, 601–613. VS Verlag für Sozialwissenschaften.
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-31468-2>
- McAdam, M., Debackere, K. (2018). Beyond 'Triple Helix' toward 'Quadruple Helix' Models in Regional Innovation Systems: Implications for Theory and Practice. *R&D Management*, 48(1), 3–6. <https://doi.org/10.1111/radm.12309>
- McKinsey (2023) a. Potential and challenges of quantum computing hardware technologies. McKinsey Digital. www.mckinsey.com/capabilities/mckinsey-digital/our-insights/tech-forward/potential-and-challenges-of-quantum-computing-hardware-technologies
- McKinsey (2023) b. Quantum Technology Monitor. <https://www.mckinsey.de/news/presse/quantum-technology-monitor-2023-marktanalyse-quantencomputer-quantenkommunikation-quantensensorik>
- Pendlebury, C., Schnell, J. und Adams, J. (2020). Web of Science as a data source for research on scientific and scholarly activity. *Quantitative Science Studies*, 1(1), 363–376
https://doi.org/10.1162/qss_a_00018
- Possati, L.M. (2023). Ethics of Quantum Computing: an Outline. *Philos. Technol.* 36, 48.
<https://doi.org/10.1007/s13347-023-00651-6>
- Roberson, T., Raman, S., Leach, J., Vilkins, S. (2023). Assessing the journey of technology hype in the field of quantum technology. *Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis* 32(3), 17–21. www.ssoar.info/ssoar/bitstream/handle/document/91115/ssoar-tatup-2023-3-roberson_et_al-Assessing_the_journey_of_technology.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Scheidsteger, T., Haunschild, R., Bornmann, L. und Ettl, C. (2021). Bibliometric Analysis in the Field of Quantum Technology. *Quantum Rep.*, 2021(3), 549–575
<https://doi.org/10.3390/quantum3030036>
- Seskir, Z. C., Umbrello, S., Coenen, C., Vermaas, P. E. (2023). Democratization of quantum technologies. *Quantum Science and Technology*, 8(2), 024005.
<https://doi.org/10.1088/2058-9565/acb6ae>
- Ten Holter, C., Inglesant, P., Jirotko, M. (2021). Reading the road: challenges and opportunities on the path to responsible innovation in quantum computing. *Technology Analysis and Strategic Management*, 35(7), 844–856.
<https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1988070>
- Ten Holter, C., Inglesant, P., Srivastava, R., Jirotko, M. (2022). Bridging the quantum divides: a chance to repair classic(al) mistakes? *Quantum Science and Technology*, 7(4), 044006.
<https://doi.org/10.1088/2058-9565/ac8db6>
- Tutschku, C. K., Sturm, A., Knäble, F., Mummaneni, B. C., Pranjic, D., Stephan, C., mayer, D. B., Kosmann, G., Roth, M., Matt, P.-A., Grigorjan, A., Wellens, T., König, K. Beisel, M., Truger, F., Shagieva, F., Denninger, O., Garhofer, S. (2023). Quantencomputing in der industriellen Applikation. Vom Algorithmen-, Markt- und Hardwareüberblick hin zu anwendungszentriertem Quantensoftware-Engineering. <https://doi.org/10.24406/publica-805>
- UBA (2022). Von Quantencomputing über die Zukunft der Innenstädte bis zu einer neuen Weltordnung. Ergebnisse des zweiten Horizon Scanning-Zyklus für das Umweltressort. / www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/fb_umweltrelevante_zukunftsthemen_von_quantencomputing_ueber_die_zukunft_der_innenstaedte_bis_zu_einer_neuen_weltordnung.pdf
- VDI (2022). Projektlandkarte. www.quantentechnologien.de/projektlandkarten/anwendungsnetzwerk-fuer-das-quantencomputing.html
- Wang, J., Shen, L. und Zhou, W. (2021). A bibliometric analysis of quantum computing literature: mapping and evidences from scopus. *Technology Analysis and Strategic Management*, 33 (11), 1347-1363.
<https://doi.org/10.1080/09537325.2021.1963429>
- World Economic Forum (2022). State of Quantum Computing: Building a Quantum Economy. Insight Report. www3.weforum.org/docs/WEF_State_of_Quantum_Computing_2022.pdf

Impressum

Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation IAO

Hardenbergstraße 20
10623 Berlin
www.iao.fraunhofer.de

Kontakt

Felix Bickert
Tel. +49 30 6807969-128
felix.bickert@iao.fraunhofer.de

Satz und Layout

NetSyn, Joachim Würger

Titelbild

© atdigit – Adobe Stock

DOI (kostenlose PDF-Version)

<http://dx.doi.org/10.24406/publica-3013>

Alle Rechte vorbehalten

© Fraunhofer IAO, Mai 2024

Kontakt

Felix Bickert
Tel. +49 30 6807969-128
felix.bickert@iao.fraunhofer.de

Fraunhofer IAO
Center for Responsible Research and
Innovation
Hardenbergstraße 20
10623 Berlin

www.iao.fraunhofer.de