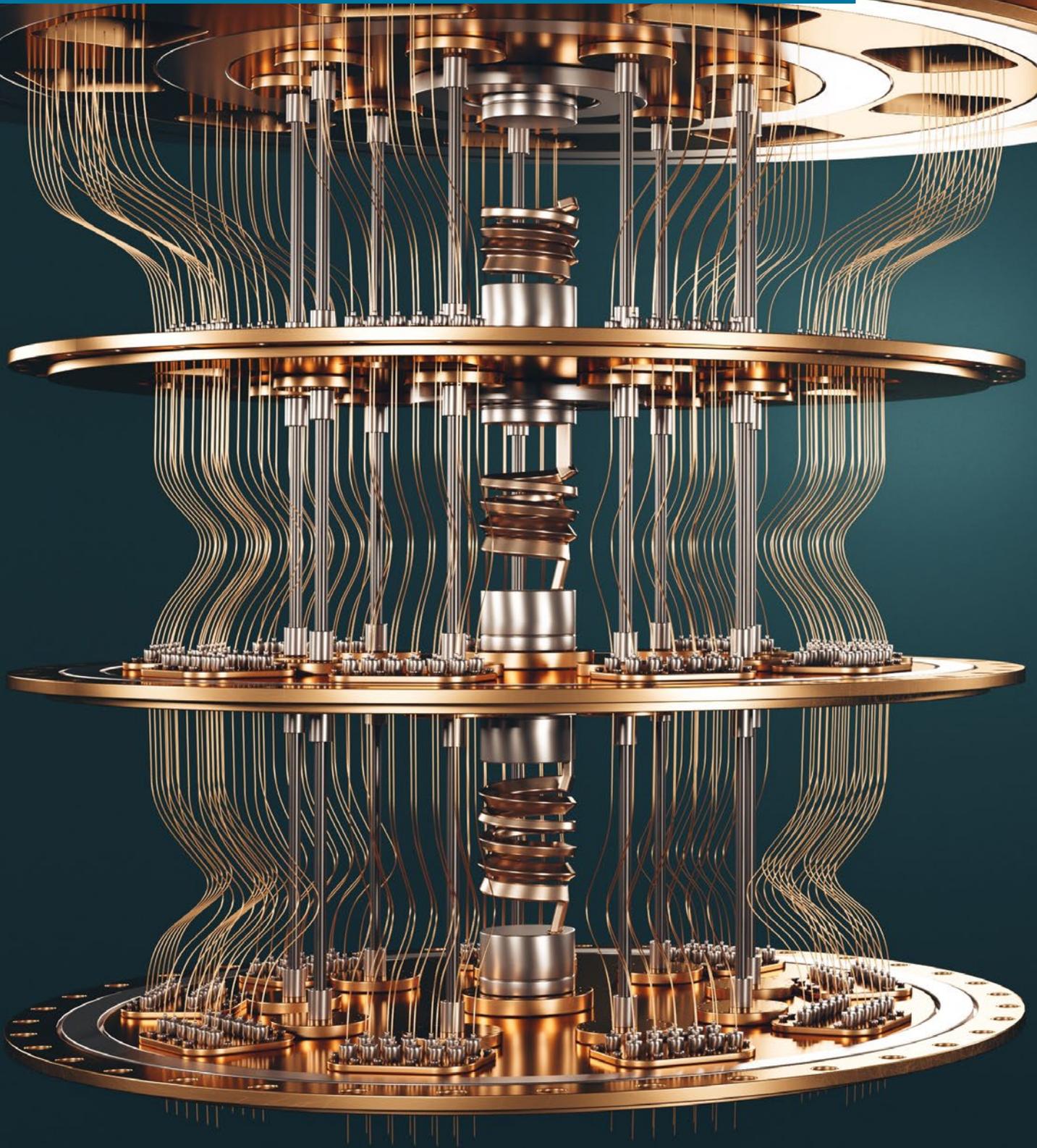


ROADMAP QUANTENCOMPUTING



Inhalt

Vorwort	4
Executive Summary	6
Motivation und Vision	8
Herausforderungen und Lösungen	10
Status quo und Herausforderungen	11
Wettbewerb orchestrieren und Quantencomputer-Systeme realisieren	14
Vision	14
Konkrete Ziele.....	14
Handlungsempfehlungen und wettbewerbliche Kriterien	15
Eingruppierung der Technologieplattformen nach Herausforderungen: „Quantenvorteil“ beziehungsweise „Skalierbarkeit“	15
Software und Anwendungen	15
Infrastruktur	16
Wirtschaftliche Umsetzung	16
Ausbildung und Gesellschaft	17
Allgemeine Anforderungen	17
Ein ganzheitliches Ökosystem schaffen	18
Unsere Vision für ein erfolgreiches Ökosystem	18
Unser Ziel: ein kompetitives Ökosystem	19

Unser Weg: die Kräfte wirksam bündeln in Hubs und Kompetenznetzwerken	22
<hr/>	
Schneller Start und langer Atem	23
Hubs: Auswahl, Struktur, Eigenschaften und Inhalte	23
Kompetenznetzwerke.....	24
Dachorganisation: Deutsche Quantengemeinschaft (DQG).....	26
Finanzierungsinstrumente.....	27
Kompetenzen ausbauen, Komponenten verfügbar machen, Intellectual Property schützen	28
<hr/>	
Strategischer Aufbau von Komponenten	28
Zielsetzung.....	29
Handlungsempfehlungen.....	29
Strategischer Aufbau von Kompetenzen	30
Zielsetzung.....	30
Handlungsempfehlungen.....	30
Intellectual Property (IP).....	31
Handlungsempfehlungen zur Stärkung der IP-Position Deutschlands und Europas	31
Expertenrat	33
<hr/>	
Impressum	
<hr/>	



Prof. Dr. Stefan Filipp



Dr.-Ing. E. h. Peter Leibinger

Vorwort

Die Quantentechnologie besitzt ein enormes Potenzial für Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft. Besondere Bedeutung kommt hierbei dem Quantencomputing zu: Es ist nicht nur ein faszinierender Gedanke, in naher Zukunft Aufgaben zu lösen, an denen heute selbst die leistungsfähigsten Supercomputer scheitern. Es ist für einen führenden Technologiestandort auch ein „Must do“. Für unsere Hightech-Industrie kann der Zugang zu dieser Technologie existenziell sein.

Quantencomputer bieten das Potenzial, hochkomplexe Systeme für die Entwicklung neuartiger Batterien oder für die Erforschung medizinischer Wirkstoffe zu simulieren. Darüber hinaus können Quantencomputer weitreichende Effizienzsteigerungen in zahlreichen relevanten Anwendungen ermöglichen, von der Optimierung von Verkehrsflüssen oder Produktionsabläufen bis hin zu Modellrechnungen in der Klimaforschung.

Es liegt deshalb auf der Hand, dass mit der Quantentechnologie eine enorme Dynamik im globalen Innovationswettbewerb verbunden ist. Deutschland und Europa sind hierbei gefordert, ihre Anstrengungen in den kommenden Jahren deutlich zu intensivieren. Der Umgang mit dem Thema Quantencomputing ist dabei durchaus eine Frage der technologischen Souveränität im globalen Wettbewerb mit starken Mitbewerbern vor allem in Asien und den USA.

Was Deutschland tun kann, ist, sich auf seine Stärken zu konzentrieren und diese strategisch auszubauen. Die vielleicht wichtigste Stärke liegt in einer integrierten Landschaft aus Wissenschaft und Industrie mit großen und kleineren Unternehmen. Kaum anderswo auf der Welt existiert eine so eng verzahnte Kette von der Grundlagenforschung über die Entwicklung von Schlüsseltechnologie in vielen „Hidden Champions“ bis hin zur industriellen Anwendung. Darauf dürfen wir uns jedoch nicht ausruhen, sondern müssen vor allem Geschwindigkeit und Konsequenz erhöhen, mit der Forschungsergebnisse in den Markt gebracht werden. Hierin liegt

in vollem Bewusstsein der vorhandenen Vorzüge des „deutschen Weges“ noch immer ein gewisses „deutsches Dilemma“, was den Technologietransfer angeht.

In diesem Bewusstsein hat sich ein Expertenrat aus Forschung und Industrie zusammengeschlossen und erstmals eine breit angelegte Roadmap zur Quantentechnologie vorgelegt. Wir wollen den gemeinsamen Weg skizzieren und ein Signal setzen für einen noch engeren, am Markt orientierten Schulterschluss von Wirtschaft, Wissenschaft und Politik. Dabei ist es eine Binsenweisheit: Wenn wir im globalen Wettbewerb mit zum Teil staatlich unterstützten Akteuren die besten Köpfe gewinnen und starke Teams zusammenbringen wollen, braucht es dafür attraktive, leistungsfähige Strukturen – und ein Handeln aus einem Guss.

Die Herausforderungen, vor denen wir stehen, sind darum enorm. Aber wir machen uns jetzt auf den Weg und bringen Akteure unterschiedlicher Branchen zusammen, die sich einem Ziel mit hoher Tragweite für die deutsche Volkswirtschaft verpflichtet fühlen. In diesem Zusammenhang gilt unser großer Dank den federführenden Ministerien für das Vertrauen und die Unterstützung dieser Initiative.



Prof. Dr. Stefan Philipp

Professor für Technische Physik – Technische Universität München

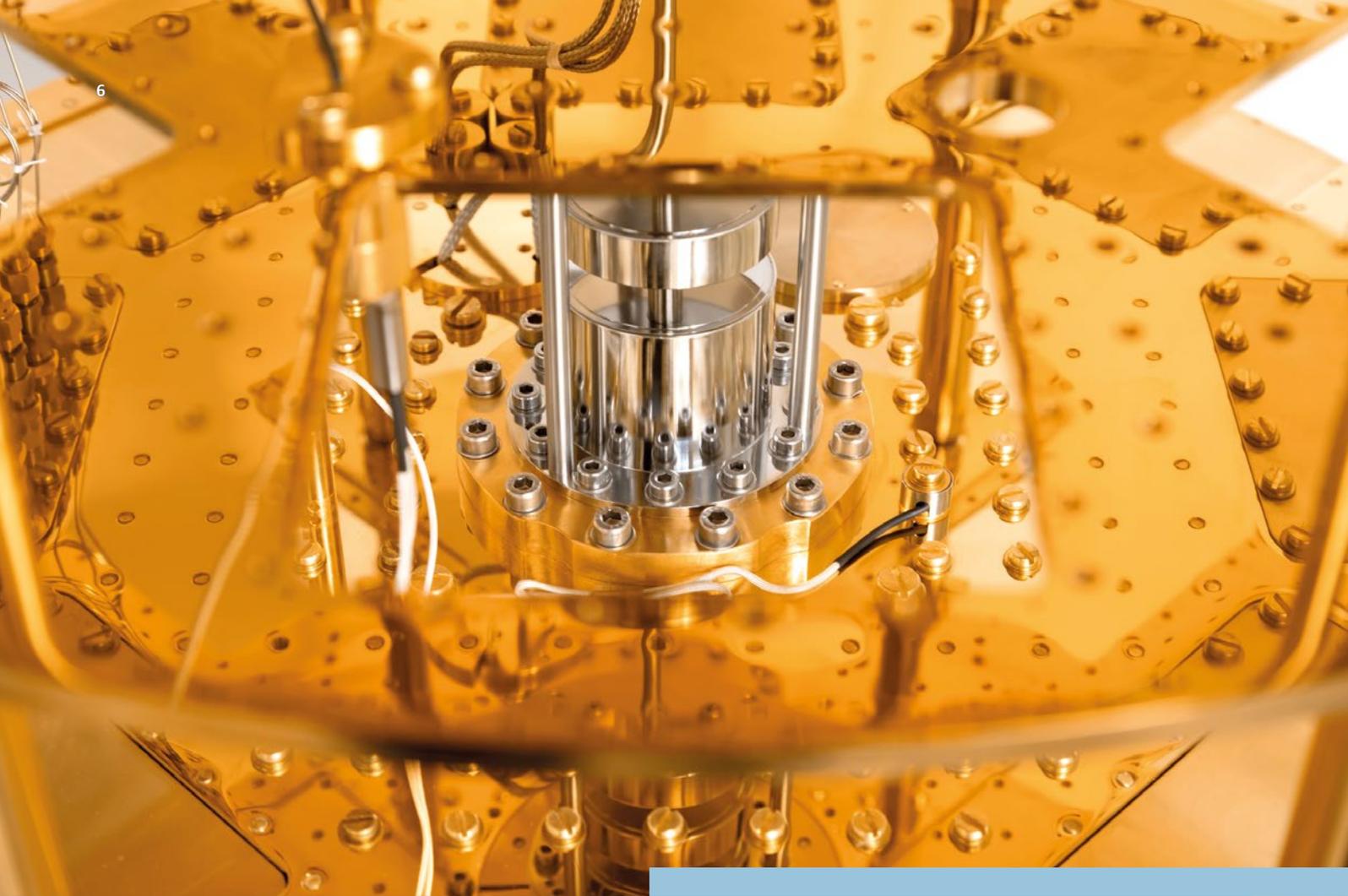
Direktor am Walther-Meißner-Institut der Bayerischen Akademie der Wissenschaften



Dr.-Ing. E. h. Peter Leibinger

Geschäftsführender Gesellschafter und Chief Technology Officer (CTO)

TRUMPF GmbH + Co. KG



Executive Summary

Erste Quantenrechner sind schon jetzt in der Lage, einfache Aufgaben zu bewältigen, und eine Vielzahl von Unternehmen sieht auf diesem Gebiet großes wirtschaftliches Potenzial. Dieses Potenzial reicht von effizienten Algorithmen für Anwendungen über Komponenten bis zum Bau und Betrieb kompletter Systeme. Weltweit hat der Wettbewerb der verschiedenen Technologieplattformen begonnen. Hierbei haben sich Vorreiter etabliert – vor allem aufgrund der Fortschritte von Unternehmen aus dem nordamerikanischen Raum. Der Gewinner auf lange Sicht steht jedoch noch nicht fest. Um Deutschland im Bereich des Quantencomputings in eine weltweit führende Position zu bringen und gemeinsam mit seinen europäischen Partnern technologische Souveränität längerfristig zu gewährleisten, gilt es, jetzt die Kräfte zu bündeln und die Systemintegration ausgewählter Technologieplattformen fokussiert voranzutreiben.

Unsere Ziele:

- **kurzfristig: niederschweligen Zugang zu heutiger Technologie schaffen; in fünf Jahren ein umfassendes Ökosystem** und fokussierte Strukturen aufbauen. Der Meilenstein: ein **international wettbewerbsfähiger Quantenrechner mit mindestens 100 individuell ansteuerbaren Qubits**. Das System soll auf mindestens 500 Qubits skalierbar sein.
- **mittelfristig: in fünf bis zehn Jahren einen Quantenvorteil für praxisrelevante Anwendungen** demonstrieren. Nach zehn Jahren wollen wir mit souveräner Technologie mit an der Spitze des internationalen Wettbewerbs stehen.
- **langfristig: in zehn bis fünfzehn Jahren ein fehlerkorrigiertes System zur Lösung einer universellen Klasse an Problemen** zur Verfügung stellen. Damit wollen wir einen breiten Nutzen für Wirtschaft und Gesellschaft erzielen.

Der Expertenrat kommt nach eingehender Analyse der Ist-Situation zum Ergebnis, dass Deutschland über hervorragende wissenschaftliche Kompetenzen sowie eine Fülle an potenziellen Nutzern der Technologie verfügt, **es aber heute keinen einzelnen Akteur und auch keinen Wissenschaftsverbund gibt**, der die Entwicklung eines Quantencomputer-Systems übernehmen könnte. Die Kompetenzen sind verteilt und es sind Lücken in der skalierbaren Hardwareentwicklung, der Systemintegration, dem Software-Stack und der IP-Generierung zu erkennen. Weitere Herausforderungen sind Bildungsmaßnahmen zum Aufbau und Erhalt von Kompetenz in Wirtschaft und Wissenschaft. Defizite bestehen außerdem bei der Verfügbarkeit digitaler und technologischer Infrastruktur und es fehlen die Instrumente und Rahmenbedingungen für einen raschen Technologietransfer von der Forschung in die Industrie.

Um hier schnellstmöglich voranzukommen, empfiehlt der Expertenrat:

- den umgehenden **wettbewerblichen Aufbau von Hubs und Kompetenznetzwerken**. Unternehmen müssen wir von Beginn an einbinden, um die notwendige Wirtschaftsorientierung zu gewährleisten und Anreize für private Investitionen zu schaffen. Ebenso müssen Universitäten und Forschungseinrichtungen als wissenschaftliche Kompetenzträger eingebunden werden. Hubs haben den vertikalen Aufbau eines Quantencomputing-Systems von Technologieplattformen bis hin zur Software zum Ziel. Hubs sind teilautonom und dadurch agil, geben sich selbst mittelfristige Ziele, an denen sie gemessen werden. Das Erreichen dieser eigenen Ziele dient als Basis einer weiteren Fokussierung auf die vielversprechendsten Hubs beziehungsweise Technologieplattformen nach ca. fünf Jahren. Damit einher geht mittelfristig auch eine zunehmende Fokussierung zur Systemintegration mit Aufbau entsprechender Infrastruktur.

Mit den Hubs werden wir:

- unbürokratisch und schnell verteilte Kompetenzen aus Wissenschaft und Wirtschaft zum Quantencomputing bündeln,
- Technologiewettbewerb und Fokussierung erzeugen,

- Keimzellen für industrielle Systemintegratoren schaffen,
- Start-ups aufbauen und einbinden,
- starke Positionen im Bereich Intellectual Property (IP) aufbauen,
- souveränen Zugang zu Komponenten und Systemen sicherstellen und
- Talente anziehen und fördern.

Mit den Kompetenznetzwerken, die begleitend zu den Hubs etabliert werden, um die Aktivitäten der Hubs zu verbinden und um übergreifende Themen zu adressieren, werden wir:

- den Zugang zu digitaler und technologischer Infrastruktur sicherstellen,
- übergreifende Ausbildungsstrukturen schaffen und
- Anwendungen entwickeln durch den Zugriff auf heute verfügbare und künftige Hardware
- **langfristig angelegte und ausreichend finanzierte Hubs und Kompetenznetzwerke mit kompetenzorientierter Entscheidungsautorität etablieren**
- die Einrichtung einer **ressortübergreifenden Dachorganisation – der Deutschen Quantengemeinschaft DQG vorantreiben**. Die DQG soll keine Behörde oder Organisation mit Budgetverantwortung sein, sondern ein neuartiges, leichtes Instrument zur übergreifenden Orchestrierung der Maßnahmen. Sie soll über Strategiekompetenz verfügen, die Roadmap regelmäßig revidieren beziehungsweise aktualisieren und die effiziente Umsetzung der Gesamtstrategie „Quantencomputer made in Germany“ aus einem Guss sicherstellen.

**Die Welt wartet nicht auf Deutschland.
Wir müssen jetzt starten.**



Motivation und Vision

Erste Quantencomputer sind bereits in der Lage, simple Problemstellungen zu lösen, leiden aber noch unter einer hohen Fehlerwahrscheinlichkeit. Ein sogenannter Quantenvorteil – also die Lösung eines anwendungsrelevanten Problems mit einer Effizienz, die ein klassischer Rechner nie erreichen kann – wird erst mittel- beziehungsweise langfristig erzielt werden können. Anbieter von Quantencomputing-Systemen sind heute nahezu ausschließlich im nordamerikanischen Raum angesiedelt, dicht gefolgt von chinesischen staatlichen Initiativen. Weitere starke Gruppen gibt es unter anderem in Japan und Australien. Daher müssen wir in Deutschland und Europa *kurzfristig (in den nächsten fünf Jahren)* eine geeignete Struktur aufbauen, um ein komplettes Quantencomputer-System mit Quantenanwendungen zu entwickeln, zu bauen und zu betreiben und damit den souveränen Zugang zu dieser potenziell disruptiven Technologie sicherzustellen. Dabei sind Quantencomputer-Systeme ganzheitlich zu verstehen. Das heißt, sowohl Hardware als auch Software bis zur Anwendungsebene sind integrale Bestandteile solch eines Gesamtsystems. Zudem soll auch der Zugriff für Forschende sowie Anwenderinnen und Anwender auf existierende Systeme gewährleistet werden, um Geschwindigkeit aufzunehmen und die Erwartungen in Bezug auf Quantencomputing kontinuierlich mit der Realität abzugleichen.

Unser Meilenstein: international wettbewerbsfähige Quantenrechner mit mindestens 100 individuell ansteuerbaren Qubits und Skalierungspotenzial auf 500 Qubits. **Mittelfristig (in fünf bis zehn Jahren)** muss Deutschland im Verbund mit den europäischen Partnern in der Lage sein, an der Spitze des internationalen Wettbewerbs einen anwendungstauglichen Quantencomputer zu bauen und zu betreiben.

Unser Ziel: die Demonstration eines Quantenvorteils für praxisrelevante Anwendungen. Das **langfristige Ziel (mindestens zehn bis fünfzehn Jahre)** ist es, fehlerkorrigierende Quantencomputer-Systeme zur Lösung einer universellen Klasse an Problemen mit exponentiellem Quantenvorteil zur Verfügung zu stellen. Deutschland soll dabei eine führende Rolle einnehmen und gemeinsam mit den europäischen Partnern den für die strategische Unabhängigkeit relevanten Teil der Wertschöpfungskette abdecken.

Ein wichtiger Teil der Wertschöpfung wird aus Anwendungen des Quantencomputers erwachsen. Auf dem Weg zu einem fehlerkorrigierenden Quantencomputer-System müssen daher anwendungsspezifische Vorstufen (NISQ-Systeme, Quantensimulatoren) erarbeitet werden, um schon kurz- und mittelfristig einen ersten wissenschaftlichen und vor allem kommerziellen Nutzen zu erzielen. Diese Wertschöpfung und Verwertung zeichnen sich vor allem in drei Bereichen ab:

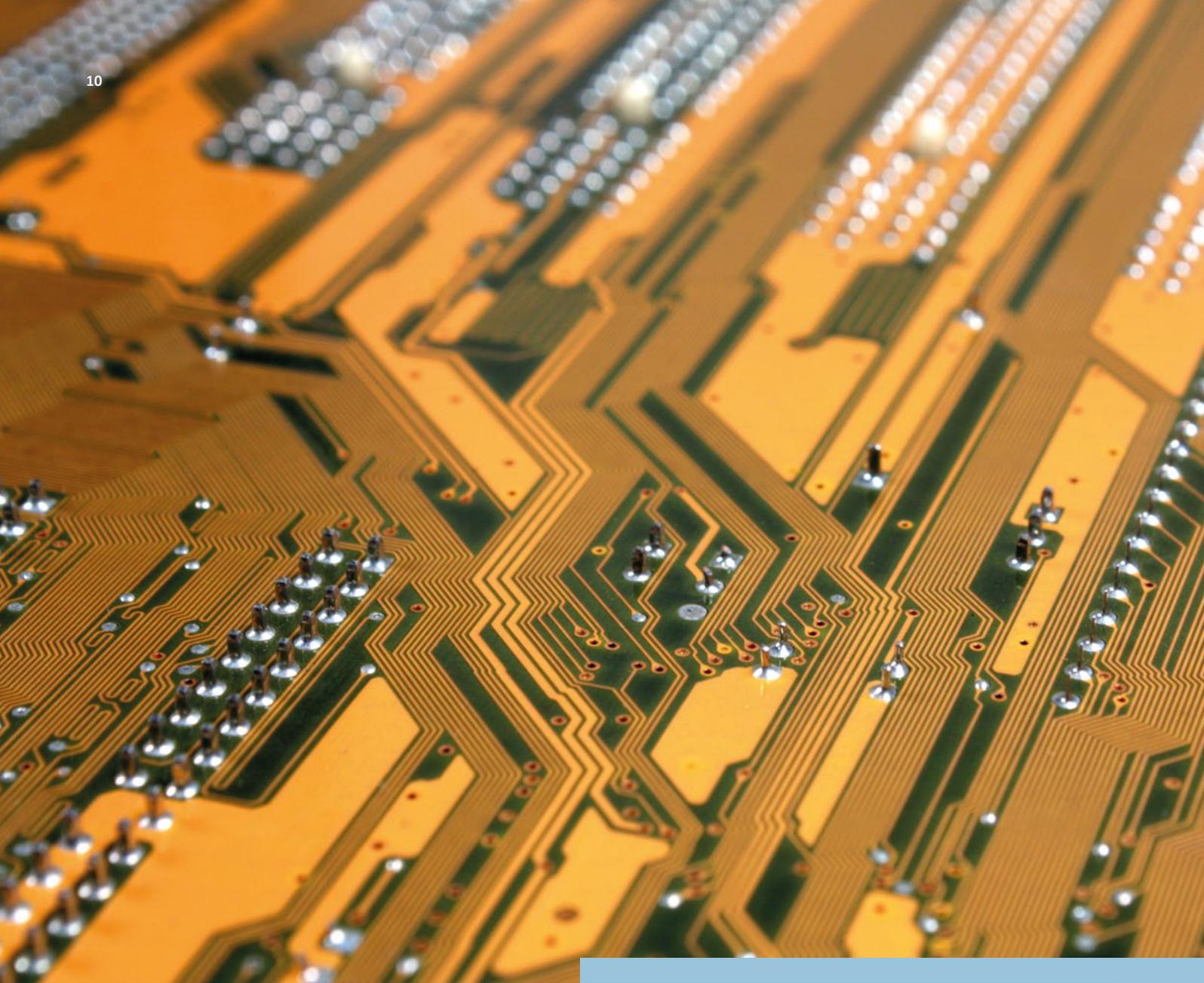
- **Herstellung und Betrieb von Quantencomputern**, um sowohl Anwendern als auch Zulieferern von Komponenten Zugriff zu ermöglichen,
- **Zulieferung von Hardware und Herstellung von Softwarewerkzeugen** unter Etablierung eines ganzheitlichen Quantenökosystems sowie
- **Entwicklung von Applikationen**, um das Potenzial des Quantencomputers von Anfang an gewinnbringend nutzen zu können.

Darüber hinaus lassen sich mit den Quantentechnologien vielfältige Potenziale in den Bereichen Kommunikation und Sensorik erschließen, die mit dem Quantencomputing eng verzahnt sind.

Die Vision und das erklärte Ziel für Deutschland und Europa müssen sein:



- führender Anbieter und Anwender von Quantencomputing-Hard- und -Software und
- Fabrikaurüster der Welt für Quantencomputing zu werden,
- Quantencomputing für innovative Produkte und Services zu nutzen,
- schnell am und im Markt zu sein,
- die technologische Souveränität im Bereich des Quantencomputings als Teil der Quantentechnologien zu sichern sowie
- Fachkräfte auszubilden und Talente zu sichern.



Herausforderungen und Lösungen

Obwohl aktuell einige der zahlreichen Technologieplattformen in der Entwicklung deutlich vorne liegen, ist langfristig noch nicht abzusehen, welche Technologie die zielführende ist. Deshalb gilt es auch auf lange Sicht, Technologieoffenheit für neue Erkenntnisse aus der Grundlagenforschung zu bewahren. Im Folgenden werden zunächst die gängigsten Technologieplattformen kurz vorgestellt, die wir in naher Zukunft als potenziell relevant für Deutschland sehen.

Supraleitende Schaltkreise

Auf Supraleitern basierende Systeme zählen weltweit zu den führenden Plattformen mit Systemgrößen von etwa 50 Qubits. Vor allem die großen amerikanischen Tech-Firmen Google und IBM haben hier Maßstäbe gesetzt. Im Jahr 2018 konnte Google an einem 53-Qubit-

Prozessor Quantenüberlegenheit für ein akademisches Beispiel zeigen. Deutschland ist aktuell im Bereich supraleitender Qubits nicht führend, es gibt aber ernst zu nehmende Aktivitäten in der deutschen Forschungslandschaft.

Ionen

Auf Ionenfallen basierende Quantencomputer sind neben den supraleitenden Ansätzen die am weitesten entwickelte Technologieplattform. Mit ähnlichen Systemgrößen und Gattergüten wie bei den Supraleitern lassen sich bereits Quantensimulationen durchführen. Der Grundstein für die Entwicklung wurde zunächst unter der Nutzung großer Paulfallen gelegt, mittlerweile werden aber skalierbare chipbasierte Ansätze verfolgt. Deutschland ist in diesem Feld bereits seit Jahren gut aufgestellt.

Neutral-Atome

Neutral-Atome bilden eine weitere interessante Plattform zur Realisierung eines Quantencomputers. Dabei werden Atome in optischen Pinzetten oder optischen Gittern gefangen. So lassen sich bis zu hundert Qubits in flexiblen dreidimensionalen Strukturen realisieren. Die Gattergüten stehen noch hinter denen der Ionenfallen-Quantencomputer zurück, es konnten hier zuletzt aber deutliche Fortschritte erzielt und auch hier größere Systeme realisiert werden. International sind in diesem Bereich bereits erste Start-ups aktiv. Deutschland ist hier bei der Forschung gut aufgestellt.

Spin-Qubits

Spinbasierte Ansätze lassen sich durch Fehlstellen zum Beispiel in Diamanten oder Quantenpunkten in Halbleiterstrukturen realisieren. In ihrer Technologiereife liegen diese Systeme aktuell deutlich hinter den Ionenfallen- und Supraleiter-Ansätzen. Sie umfassen nur wenige Qubits, oft aber mit ausgezeichneten Gattergüten. Als enormer Vorteil insbesondere bei siliziumbasierten Ansätzen gilt die große Ähnlichkeit zu klassischer Hardware, sodass die Erfahrung der Halbleiterindustrie für die Skalierung dieser Systeme genutzt werden kann. Deutschland hat sowohl im Bereich der Stickstoff-Fehlstellen-Zentren als auch bei halbleiterbasierten Ansätzen gute Forschungsgruppen.

Photonen

Photonische Ansätze nutzen die Quantenzustände von Licht und integrierte Photonik, um universelle, messbasierte Quantenprozessoren und anwendungsspezifische

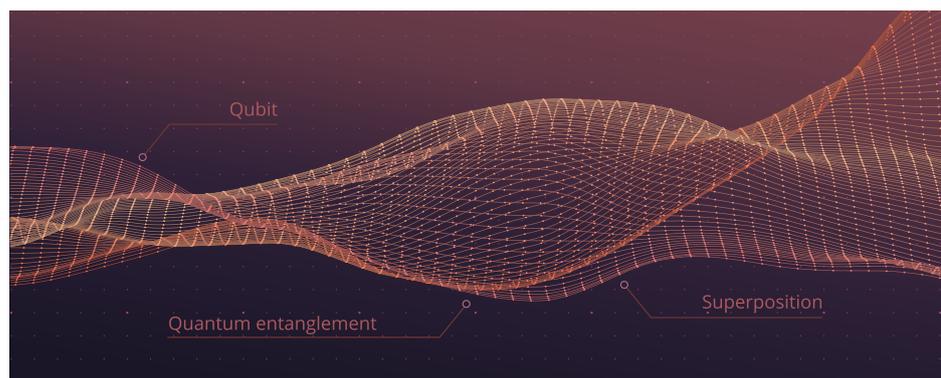
Methoden (Boson Sampling) zu realisieren. Aktuell wurde Boson Sampling mit 76 Photonen demonstriert und damit Quantenüberlegenheit für ein akademisches Beispiel gezeigt. Eine Besonderheit ist die Möglichkeit der nahtlosen Einbindung in Quantenkommunikations-Netzwerke. Bei der Skalierung spielt das Know-how zur integrierten Photonik eine wichtige Rolle. Es existieren prominente Start-ups in Nordamerika, in Deutschland gibt es international konkurrenzfähige Grundlagenforschung.

Jenseits der Technologieplattformen wird es entscheidend sein, Kompetenzen zu Quanteninformationstheorie, Algorithmen, Software und Anwendungen auszubauen. Hier ist Deutschland in Forschung und Industrie in einer hervorragenden Ausgangsposition.

Status quo und Herausforderungen

Aus den verschiedenen möglichen Ansätzen ergibt sich die Unsicherheit, welche Technologie am Ende das Rennen machen wird. Außerdem sind für Unternehmen sowohl der Zeithorizont als auch der konkrete Nutzen potenzieller industrierelevanter Anwendungen schwer abschätzbar. Folge ist ein noch zurückhaltendes Engagement – sowohl auf Anbieter- als auch auf Anwenderseite. Nach heutigem Stand gibt es in Europa niemanden, der die Entwicklung von Quantencomputern ganzheitlich angehen und mit den Akteuren aus den USA beziehungsweise China auf Augenhöhe agieren könnte. Um die „Quantencomputer-made-in-Germany-Strategie“ erfolgreich umzusetzen, müssen wir daher einige Herausforderungen meistern.

Insbesondere kleine und mittelständische deutsche



Unternehmen (KMU) besetzen international führende Positionen bei vielen Basistechnologien des Quantencomputings. Es fehlt jedoch ein **ganzheitliches Ökosystem**, das alle Stufen der Innovations- und Wertschöpfungskette umfasst, die Erforschung und Entwicklung von Spitzentechnologie unterstützt und gleichzeitig den raschen Marktransfer mit wertschöpfenden Anwendungen und Produkten sicherstellt. Im nordamerikanischen Raum haben die risikofreudige Start-up-Kultur und die deutlich größere staatliche Incentivierung und Marktbildung zu einer Vielzahl von Quanten-Start-ups geführt. In Deutschland fehlt ein vergleichbares Umfeld, das die Kooperation zwischen und den Know-how-Transfer von der Wissenschaft in die Wirtschaft flächendeckend stärkt, eine Start-up-

Kultur fördert und deren Finanzierung erleichtert. Bisherige Anstrengungen in Europa sind zu fragmentiert, zu langsam und zu wenig wirtschaftsorientiert. Infrastrukturprojekte wie zum Beispiel der Aufbau von Reinräumen und Fertigungen sind in der bestehenden Förderlandschaft nur sehr schwer und langfristig umzusetzen.

Auch ist die Position Deutschlands und Europas bei **Intellectual Property (IP)** im Bereich Quantencomputing schwach. Eine solide Basis für die Sicherung der Freedom to Operate fehlt. Es gibt zudem nur eingeschränkt **Zugang zu Quantenrechnern**, insbesondere auf Hardwareebene, sodass eine zielgerichtete und nutzerorientierte Entwicklung von Applikationen



und Komponenten sowie eine Validierung des Potenzials kaum möglich sind.

Eine weitere Herausforderung ist der **trans- und interdisziplinäre Aufbau von Fähigkeiten und Fertigkeiten**, vor allem in den Bereichen Physik, Ingenieurwesen, Informatik und Mathematik – sowohl in Grundlagen als auch in der Anwendung. Aufseiten der Hochschulen wird dies zum einen erschwert durch wenig flexible Strukturen im Bereich von Fächergrenzen und Personalgewinnung (inklusive Forschungsgruppen beziehungsweise Professuren), zum anderen durch einen zunehmenden Anteil kurzfristiger drittmittelfinanzierter Projekte im Gegensatz zu einer langfristigen Grundfinanzierung für strukturelle Einrichtungen. Problematisch ist außerdem der starke Talentabfluss, insbesondere in die USA. Deutschland und Europa liegen im Wettbewerb um die besten Köpfe und Firmen zurück.

Basierend auf der Analyse des Status quo stellen wir fest:

- In Deutschland sind in erheblichem Umfang relevante Kompetenzen und Know-how vorhanden. Diese sind aber breit verteilt und noch wenig wirtschaftsorientiert. Weder einzelne Akteure noch existierende Konsortien sind heute in der Lage, die Entwicklung, den Bau und Betrieb von Quantencomputern anzugehen. Um erfolgreich zu sein, müssen wir unsere Kräfte in einem ganzheitlichen Ökosystem bündeln und Aktivitäten koordinieren. Dazu sollen von Anfang an starke europäische Partner einbezogen und nationale mit europäischen Maßnahmen abgestimmt werden.
- Aktuell ist nicht absehbar, welche Technologieplattform sich am Ende durchsetzen wird. Unterschiedliche Ansätze müssen daher zunächst parallel verfolgt werden, bevor eine weitere Fokussierung der Ressourcen fundiert erfolgen kann.

Daraus ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- **die Einrichtung von Hubs** mit dem Ziel, vollständige Quantencomputer-Systeme basierend auf mindestens einer Technologieplattform zu realisieren. Dazu werden die wesentlichen wirtschaftlichen, universitären und wissenschaftlichen Kompetenzträger in den Bereichen Hardware und Software eingebun-

den. Die Hubs sollen hochwertige Aus- und Weiterbildung bieten, die Generierung geistigen Eigentums fördern, Start-ups ausgründen und einbinden, Industrie und Wissenschaft Quantencomputer zur Verfügung stellen und technologiespezifische Anwendungen gemeinsam entwickeln. Sie bilden die Keimzelle für zukünftige Systemintegratoren und -anbieter sowie Anknüpfungspunkte für eine europäische Zusammenarbeit.

- **die Etablierung von intermediären Vernetzungsstrukturen (Kompetenznetzwerke)**, die spezifische hubübergreifende Themen in querliegenden Feldern wie Quantensoftware und Anwendungen, systemrelevante technologische Infrastruktur sowie Aus- und Weiterbildung adressieren und die Aktivitäten der Hubs verbinden
- die Einrichtung einer **ressortübergreifenden Dachorganisation – der Deutschen Quantengemeinschaft (DQG)** – zur Selektion, Evaluation zur schrittweisen Konzentration und Koordinierung der Gesamtstrategie unter Einbindung eines europäischen Expertengremiums mit Zuständigkeit für alle Evaluationsfragen

Auf diese Weise schaffen wir eine **hohe Sichtbarkeit und feste Anlaufstellen**, um auf dem Weg weitere Akteure einzubinden. Gleichzeitig bieten wir sowohl der Industrie und insbesondere Start-ups (Zulieferer, Systemintegratoren, Lösungsanbieter, Software- und Anwendungsanbieter und Nutzer) als auch der Wissenschaft (Forschungsgruppen) einen **niederschweligen Zugang zu Forschungs- und Fertigungsinfrastruktur**. Alle Maßnahmen sind generell mit fließendem Übergang von staatlicher Förderung und Verantwortung zu marktwirtschaftlichem Antrieb und zunehmender Industriebeteiligung zu gestalten.



Wettbewerb orchestrieren und Quantencomputer-Systeme realisieren

Vision

Deutschland muss den Anschluss an führende Quantencomputing-Anbieter herstellen und internationale Wettbewerbsfähigkeit möglichst bis 2025 erreichen. Auf dem Weg zu einem langfristigen Quantenvorteil bei praxisrelevanten Problemen können Vorstufen wie NISQ-Rechner oder anwendungsspezifische Quantencomputer/-simulatoren eine erste Wertschöpfung ermöglichen. Für eine zielgerichtete und nutzerorientierte Entwicklung dieser ist ein frühestmöglicher Zugang für Nutzer und Komponentenanbieter wichtig.

Konkrete Ziele

Um dies zu erreichen, empfehlen wir:

- **den schnellstmöglichen Aufbau und Betrieb von wettbewerbsfähigen Quantencomputer-Systemen** in Deutschland unter Berücksichtigung von Hardware, Algorithmen, Software und Anwendungen
- **eine langfristig angelegte Verstärkung der Entwicklung durch einen wirksamen Techno-**

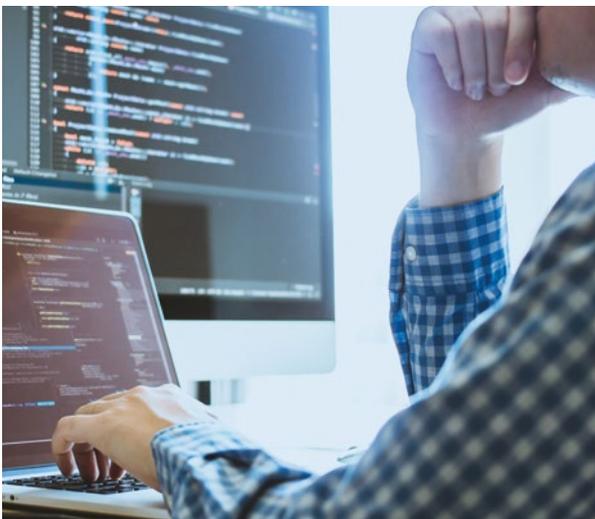
logietransfer und die Ansiedlung von Start-ups, verbunden mit einer Fokussierung auf die aussichtsreichen Ansätze, um die Nachhaltigkeit des Aufbaus und damit verbundener Wertschöpfung sicherzustellen

Handlungsempfehlungen und wettbewerbliche Kriterien

Wir empfehlen, einen Wettbewerb zum Bau von Quantencomputer-Systemen in fokussierten Strukturen – den Hubs – zu orchestrieren. Die Auswahl der Hubs soll unter Beteiligung eines externen, mit europäischen, international ausgewiesenen Expertinnen und Experten besetzten, an die Dachorganisation angebotenen Strategiebeirats anhand objektiver Kriterien erfolgen. Diese dienen ebenfalls zur regelmäßigen, jährlichen Evaluierung, um mittelfristig eine weitere Konzentration auf die vielversprechendsten Technologieplattformen und Hubs zu erreichen. Auch die Kompetenznetzwerke für Infrastruktur, Anwendung und Ausbildung müssen in einem wettbewerblichen Verfahren etabliert werden und für den jeweiligen Bereich genannte Kriterien erfüllen.

Eingruppierung der Technologieplattformen nach Herausforderungen: „Quantenvorteil“ beziehungsweise „Skalierbarkeit“

Um eine **Fokussierung und gleichzeitig eine gewisse**



Technologieoffenheit zu ermöglichen, ist aufgrund unterschiedlicher Entwicklungsstände eine Differenzierung bei den Technologiezielen notwendig. Jede Plattform als Bestandteil eines Hubs soll sich daher bei Antragstellung gemäß ihrer technologischen Reife einordnen und bezüglich des internationalen Stands der Technik anhand folgender Parameter positionieren:

- Anzahl Qubits
- Satz und Art von Gattern oder Wechselwirkungen/ Operationen
- Qualität der Operationen (Fehler pro Gatter oder pro Zeiteinheit)
- Konnektivität
- nachgewiesenes Potenzial für Fehlerkorrektur beziehungsweise Fehlervermeidung

Die Kategorie „Quantenvorteil“ verspricht, **innerhalb von fünf Jahren spezifische Problemstellungen schneller und effizienter** als existierende klassische Computer zu lösen. Dabei muss bereits zu Beginn die Implementierung von Quantenalgorithmien für die genutzte physikalische Plattform (international) nachgewiesen worden sein. Innerhalb von fünf Jahren müssen die Antragsteller einen Quantenvorteil auf einem Quantencomputer-System des Hubs demonstrieren. Das System soll auf mindestens 500 Qubits ausgelegt sein und dabei mindestens 100 individuell adressierbare Qubits aufweisen.

In der Kategorie „Skalierbarkeit“ wird im gleichen Zeitraum **mindestens die Durchführung von Quantenalgorithmien auf einem Quantencomputer-System** des Hubs gezeigt sowie ein ambitionierter Ausblick auf wettbewerbsfähige Leistung und Skalierbarkeit gegeben. Als Einstiegskriterium dient der Nachweis einer erfolgreichen Verschränkung zweier Qubits auf der genutzten Technologieplattform.

Software und Anwendungen

Software und Anwendungen müssen alle Funktionalitäten bereitstellen, um eine Überprüfung der im vorherigen Abschnitt genannten Ziele zu ermöglichen:

- **praxisrelevante und industrielle Anwendbarkeit**, die einen Quantenvorteil bietet
- **Entwicklung von Algorithmen und informationstheoretischen Konzepten** mit beweisbarem Quantenvorteil
- **Entwicklungsmethodik, Entwicklungswerkzeuge und Cloud-Ausführungsumgebung**. Eine Evaluation erfolgt anhand der Anzahl der Nutzer der Cloudumgebung beziehungsweise Verwendung der Entwicklungswerkzeuge vor allem durch externe Nutzer
- **klar definierte Schnittstellen**, um Drittanbietern Technologiezugriff auf den verschiedenen Technologieebenen zu erlauben (beispielsweise Pulsebene, Firmware, Middleware, Anwendungsebene). Die Evaluation erfolgt anhand der optimierten Ausnutzung der Hardware-Ressourcen
- **Zugriff auf Anwendungen und Software** über (cloud-basierte) Schnittstellen (im Sinne von Plattform/Software-as-a-Service – PaaS/SaaS), um eine breite Basis für Anwendungsentwicklungen zu schaffen

Infrastruktur

Der **Zugang zur nötigen Infrastruktur** wie Fabrikationslinien beziehungsweise Cloud-Zugang muss entweder bereits vorhanden sein oder während des Vorhabens aufgebaut werden können. Die Infrastruktur muss hierbei auch anderen Interessenten wie Industrie und Forschungsgruppen zu fairen und transparenten Bedingungen zur Verfügung gestellt werden (Open Innovation and Testing Labs).

Wirtschaftliche Umsetzung

Es ist eine **IP-Aufbaustrategie** vorzuweisen, deren Umsetzung anhand der Anzahl angenommener Patente bewertet wird. Ebenfalls nötig ist ein **Konzept für die aktive Förderung von Firmenausgründungen** beispielsweise über Gründerzentren oder Inkubatoren sowie zur Etablierung eines Systemanbieters. **Der Anteil privaten Kapitals** in Form von Eigenbeiträgen an den Gesamtmitteln dient ebenfalls als Bewertungskriterium der Anträge und ermöglicht unter anderem eine intrinsische Fokussierung auf relevante Anwendungsfelder.





Darüber hinaus ist darzulegen, wie eine **Technologiesouveränität** gefördert und – abhängig vom Technologiestatus – mittelfristig erreicht werden kann. Dazu gehört auch das Benennen notwendiger und kritischer Komponenten und Kompetenzen, die in Deutschland und Europa zur Verfügung stehen beziehungsweise aufgebaut werden müssen (☑ siehe Seite 28 ff.). Insbesondere muss dargestellt sein, wie ein möglicher, durchaus kritisch zu sehender Mitteleinsatz für Leistungen außereuropäischer Anbieter als direkte Hub-Konkurrenten kontinuierlich reduziert wird. Hier ist eine regelmäßige (jährliche) Überprüfung und Freigabe nach Begutachtung durch den Strategiebeirat erforderlich.

Ausbildung und Gesellschaft

Ebenfalls bewertet wird die Strategie zur **Ausbildung von Fachkräften, zu Weiterbildungsangeboten in der beziehungsweise für die Wirtschaft sowie zur Öffentlichkeitsarbeit** mit dem Ziel der langfristigen Etablierung der Quantentechnologien in der Gesellschaft. Das bedingt auch ein Konzept zu Responsible Research and Innovation (RRI) beziehungsweise Technikfolgenabschätzung. Ferner ist die Förderung des Nachwuchses in Wissenschaft und Wirtschaft zu bewerten und eine nachhaltige Strategie zu Gleichstellung und Diversität vorzuweisen.

Um einen effizienten Transfer aus Grundlagenforschung und angewandten Wissenschaften in industrielle Anwendungen mittelfristig zu etablieren, müssen die Kompetenzträger aus Wissenschaft und Forschung frühzeitig eingebunden werden, ohne dabei

die exzellente Forschung durch den Aufbau neuer Strukturen zu schwächen.

Allgemeine Anforderungen

Die allgemein üblichen Anforderungen an wettbewerbliche Ausschreibungen wie etwa klar definierte Ziele und Meilensteine, Risikomanagement, effizienter Einsatz der Mittel und Diversität sind selbstverständlich zu erfüllen, werden in diesem Dokument aber nicht weiter ausgeführt.

Darüber hinaus

- muss die Kompetenz bezüglich wissenschaftlicher und wirtschaftlicher Vorarbeiten und Expertise bewertet werden, mit besonderem Fokus auf der Leitungsstruktur der Hubs beziehungsweise Kompetenznetzwerke.
- müssen Strukturen geschaffen und finanzielle sowie personelle Ressourcen zur Verfügung gestellt werden, um Anknüpfungspunkte für andere Hubs, Projekte und Kompetenznetzwerke zu ermöglichen.
- müssen die einzelnen Bestandteile der Hubs (Hardware/Software, verschiedene Plattformen etc.) beziehungsweise Kompetenznetzwerke, deren Abhängigkeiten und Verbindungen klar ausgearbeitet und durch die selbst gesetzten Ziele gerechtfertigt sein.



Ein ganzheitliches Ökosystem schaffen

Unsere Vision für ein erfolgreiches Ökosystem

Quantencomputer-Systeme zu bauen, die in praxisrelevanten Anwendungen einen Quantenvorteil bieten, ist als Moonshot-Projekt anzusehen, das mit den bisherigen Strukturen und Fördermaßnahmen nicht mit der gebotenen Geschwindigkeit und den notwendigen Erfolgsaussichten erreichbar ist. Um aus einer erfolgreichen Mondlandung einen wirtschaftlichen Erfolg zu machen und Deutschland in diesem Zukunftsfeld an der internationalen Spitze zu positionieren, ist ein **komplettes, ganzheitliches Ökosystem** zu etablieren, das alle Stufen der Innovations- und Wertschöpfungs-

kette umfasst. Dieses muss auf den besonderen Stärken Deutschlands aufbauen: den exzellenten Universitäten und Forschungseinrichtungen sowie dem sehr breiten Spektrum innovativer Unternehmen, die sowohl als Technologieanbieter als auch als Anwender agieren.

Das Versprechen des Quantencomputings wird diejenige Volkswirtschaft am besten erfüllen, die **wissenschaftliche Exzellenz auf herausragenden Technologieplattformen** abbildet und mit hoher Geschwindigkeit Anwendungen und Produkte auf dem Markt etablieren kann. Es geht also gleichermaßen um Technologieführerschaft, Anwendungskompetenz und Umsetzungsgeschwindigkeit.

Ein darauf ausgerichtetes Ökosystem muss **flexibel genug** sein, um der äußerst dynamischen und disruptiven Landschaft des Quantencomputings gerecht zu werden. Es muss die Entwicklung von Spitzentechnologie unterstützen und gleichzeitig den raschen Markttransfer mit wertschaffenden Anwendungen und Produkten sicherstellen. Es muss insbesondere niederschweligen Zugang zu kapitalintensiver Infrastruktur und den entstehenden Quantencomputer-Technologieplattformen auf allen Ebenen gewährleisten.

Die topologische Seite des Ökosystems, das Netzwerk, muss den **Know-how-Austausch und -Transfer von der Wissenschaft in die Wirtschaft** flächendeckend stärken und eine Start-up-Kultur fördern. Durch Schaffen einer öffentlichen Nachfrage müssen insbesondere kleine und mittelständische Unternehmen als Anbieter eines ganzen Spektrums von Produkten aufgebaut werden. Dieses Spektrum soll von Basistechnologien bis zu Quantenanwendungen reichen, die Industrie als Anbieter und Anwender der Quantentechnologie ergänzen sowie eine deutsche/europäische Quantencomputer-Nutzerplattform etablieren. Dazu braucht es Strukturen, die Workflows für rasche Entwicklung, Betrieb und Anwendung der Technologien ermöglichen und auch durch Standardisierung Interoperabilität gewährleisten.

Das Ökosystem muss **offen genug** sein, existierende Technologien wie die großen Plattformen in den USA oder China in die Wertschöpfungskette zu integrieren und zügig zu nutzen. Gleichzeitig muss es die Entwicklung wettbewerbsfähiger nationaler beziehungsweise europäischer Quantencomputer-Systeme ermöglichen.

Begleitend sind standortübergreifende, **neuartige Aus- und Weiterbildungsformate** zu entwickeln, um den Bedarf an Arbeitskräften langfristig abzusichern und die Bildung einer wertschöpfenden Quanten-Community zu unterstützen.

Unser Ziel: ein kompetitives Ökosystem

Der Aufbau eines funktionierenden und international kompetitiven Ökosystems braucht eine (Markt-) Perspektive sowie langfristig und gleichzeitig flexibel angelegte Fördermaßnahmen, um risikoreiche Technologieentwicklungen angehen zu können. Ziel muss es sein, dass Unternehmen trotz potenziell hoher Risiken in dieses Gebiet einsteigen und Start-ups ein optimales Wachstumsumfeld erhalten. Dazu braucht es Sichtbar-



keit sowohl aktueller Aktivitäten als auch zukünftiger Chancen und Mehrwerte. Die unter „Unser Weg: die Kräfte wirksam bündeln in Hubs und Kompetenznetzwerken“ [☞](#) detailliert erläuterte Struktur aus Hubs und Kompetenznetzwerken unterstützt dies zielgerichtet durch:

- eine hohe Sichtbarkeit **im Sinne von Leuchtturmprojekten**,
- das Bündeln von Kompetenzen, das Initiieren von Kooperationen zwischen Wissenschaft und Wirtschaft und die Unterstützung eines wirksamen und schnellen Technologietransfers,
- die Schaffung fester Anlaufstellen, um weitere Akteure wie Start-ups oder KMU einzubinden und so stetig die Vernetzung auszubauen und Kooperationen zu vertiefen,
- klar geregelte und faire Zugangsmodalitäten zu Infrastrukturen sowohl für die Industrie (Zulieferer, Systemintegratoren, Lösungsanbieter und Nutzer) als auch für Forschungsgruppen (zum Beispiel in Form von sogenannten „Open Innovation and Testing Labs“ oder kooperativen Technologieparks) sowie

- eine Beschleunigung und Vereinfachung von Verfahren im Bereich der Forschungsförderung.

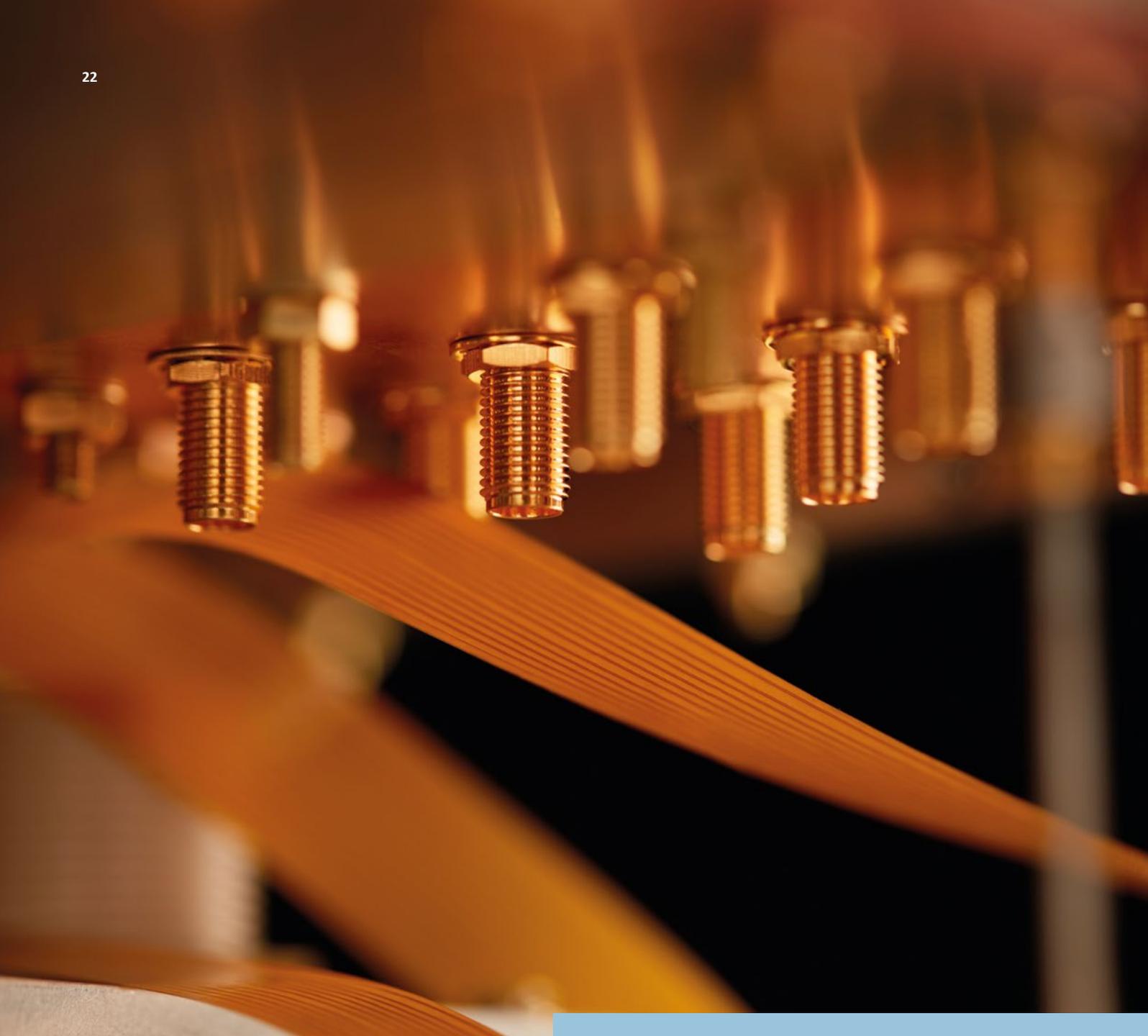
Konkret bedeutet dies:

- 1. Langfristig angelegte Hubs unter Beteiligung von Wissenschaft und Wirtschaft** mit ausreichender finanzieller Ausstattung treiben die nötigen Entwicklungen auf allen Ebenen eines Quantencomputing-Systems parallel voran, bauen Systemkompetenz auf, stellen die nötige Ausbildungs- und Infrastruktur bereit und schaffen die Basis resilienter Wertschöpfungsketten für systemkritische Komponenten und Basistechnologien.
- 2. Kompetenznetzwerke** mit ebenfalls ausreichender finanzieller Ausstattung adressieren spezifische Fragestellungen und Herausforderungen in querliegenden Feldern wie Quantensoftware und Anwendungen, systemrelevante technologische Infrastruktur sowie Aus- und Weiterbildung. Konkrete Beispiele dafür werden auf Seite 24 ff. [☞](#) vorgestellt. Diese Netzwerke ermöglichen außerdem die Integration bereits existierender Technologien, fungieren als sichtbare Anlaufstelle für interessierte Unternehmen und fördern so den Aufbau



einer deutschen/europäischen Quantencomputer-Nutzerplattform.

Auf diese Weise unterstützen wir den Aufbau einer **technologisch breiten Zuliefer-, Anbieter-, Software- und Anwenderindustrie** und etablieren resiliente Wertschöpfungsketten für systemkritische Komponenten und Basistechnologien als Grundlage einer technologischen Souveränität Deutschlands und Europas. Der Aufbau einer Hard- und Softwareindustrie und von Gesamtsystemanbietern sind zentrale Erfolgsfaktoren für eine kommerziell erfolgreiche Umsetzung des Quantencomputings. Letztendlich geht es darum, in Deutschland und Europa eine Industrielandschaft mit einer kritischen Masse für einen Übergang von „Push to Market“ zu „Market Pull“ zu bilden.



Unser Weg: die Kräfte wirksam bündeln in Hubs und Kompetenznetzwerken

Um die zentralen Aufgaben – den Bau eines Quantencomputing-Systems, seinen Betrieb und seine Bereitstellung über Cloud-Dienste sowie den Aufbau eines ganzheitlichen Ökosystems für das Quantencomputing – zu ermöglichen, empfehlen wir wie bereits erwähnt die Schaffung *zentraler Knotenpunkte in Form von Hubs, die durch Kompetenznetzwerke für Infrastruktur, Ausbildung und Anwendung* für die Nutzung von Synergien sowie die Adressierung querliegender Themen miteinander verbunden sind. Dabei sollen Dopplungen zwischen Kompetenznetzwerken vermieden werden. Insbesondere empfiehlt der Expertenrat, Aktivitäten der Länder in die Hubs und Kompetenznetzwerke einzubeziehen.

Schneller Start und langer Atem

Die Welt wartet nicht auf Deutschland. Die vorgeschlagenen Maßnahmen müssen schnell Wirkung entfalten. Daher ist die hier vorgeschlagene Organisation so konzipiert, dass sie mit vorhandenen Instrumenten sofort umsetzbar ist (ähnlich wie zum Beispiel die Maßnahmen der Spitzen- oder Exzellenzcluster), um sich dann nach einer ersten Anlaufphase in langfristigeren Strukturen zu festigen.

Der erste Schritt ist eine Ausschreibung für Hubs und Kompetenznetzwerke, die unter Berücksichtigung der Vorgaben des Expertenrats vorbereitet und von den zuständigen Ministerien im ersten Quartal 2021 durchgeführt werden soll. Parallel dazu muss die unten beschriebene Dachorganisation etabliert werden, um die Auswahl zu begleiten und zu beaufsichtigen, damit die Hubs ihre Tätigkeit noch 2021 aufnehmen können. Im Anschluss können die weiteren Schritte folgen wie etwa die Einrichtung des Hub-Verbands und die Konsolidierung der gesamten Struktur bis 2024.

Hubs: Auswahl, Struktur, Eigenschaften und Inhalte

In einem wettbewerblichen Verfahren sollen **einige wenige Hubs** selektiert werden. Dabei geht es nicht in erster Linie um den Wettbewerb einzelner Akteure, sondern darum, die besten Akteure zu Hubs zusammenzuführen. Dies sorgt einerseits für die nötige Fokussierung in Deutschland und andererseits für eine kritische Masse für internationale Wettbewerbsfähigkeit und Technologieführerschaft. Die Auswahl- und Bewertungskriterien werden auf Seite 15 ff. [☞](#) dargestellt.

Ein Hub enthält **mindestens eine Technologieplattform** für den Bau und Betrieb eines Quantencomputer-Systems, stellt die nötigen Softwareebenen (Kontrollsoftware, Firmware über Middleware bis zur Anwendungsebene) für Betrieb und Zugriff bereit und ermöglicht den Zugang für Anwender über einen Cloud-Service in Kooperation mit dem Anwenderkompetenznetzwerk und stellt Zugang zu systemrelevanter Infrastruktur sowie eine Ausbildungsstruktur sicher. Dies vermeidet Mehrfachentwicklungen und

macht den Weg frei für eine Quantensoftware-Industrie. Abhängig von in Deutschland/Europa vorhandenen Kompetenzen kann ein Hub lokalisiert oder delokalisiert organisiert werden. Für eine Stärkung des wettbewerblichen Gedankens können zu einer Technologieplattform gegebenenfalls auch mehrere Hubs geschaffen werden, sofern klare Differenzierungsmerkmale vorliegen und jeweils vollständige Quantencomputer-Systeme adressiert werden. Angestrebt werden ein Zusammenschluss der Besten und eine zunehmende Fokussierung auf die vielversprechendsten Ansätze. Für das Entstehen von Innovationen kann dazu eine örtliche Nähe der beteiligten Akteure vorteilhaft sein.

Außerdem beinhaltet jeder Hub einen **Lenkungsansatz mit Strategiekompetenz und Verantwortung** (perspektivisch Entscheidungsgewalt), der aus Vertreterinnen und Vertretern sowohl der Wissenschaft als auch der Industrie zusammengesetzt ist.

Ein Hub hat Zugang zu oder schafft die nötige Infrastruktur zur Bereitstellung der Hardware und Software. Zusätzlich leistet er einen Beitrag zur Ausbildung der benötigten Expertinnen und Experten unter anderem durch Vermittlung von Kenntnissen in Hard- und Software (gemeinsame Sprache entwickeln) sowie durch den Aufbau von Bewertungskompetenzen von Anwendungsmöglichkeiten. Koordiniert wird dies durch die jeweiligen Kompetenznetzwerke. Der Hub fungiert darüber hinaus als **Inkubator für Ausgründungen und Start-ups** in enger Kooperation mit Industrie und bestehenden Angeboten. Ziel ist die Schaffung eines Ökosystems, in dem Start-ups und potenzielle Systemintegratoren entstehen beziehungsweise wachsen können. Für die Systemintegration sollen die zunächst dezentral organisierten Hubs zunehmend auch räumlich fokussiert werden.

Eine langfristig gesicherte Finanzierung der Hubs ist unabdingbar (ähnlich wie beispielsweise bei der Förderung von Exzellenzclustern), um nachhaltig effektives Handeln sicherzustellen. Neben einer Basisfinanzierung soll dazu als flexibel einsetzbares Instrument eine vom Hub ausgewählte Finanzierung zur Durchführung von externen Anträgen mit wettbewerblicher Vergabe vorgesehen sein (ähnlich wie etwa bei der Förderung von Exzellenzclustern oder im Programm Zwanzig20 des BMBF). Ein Finanzierungsbeitrag seitens der Industrie ist grundsätzlich Voraussetzung.

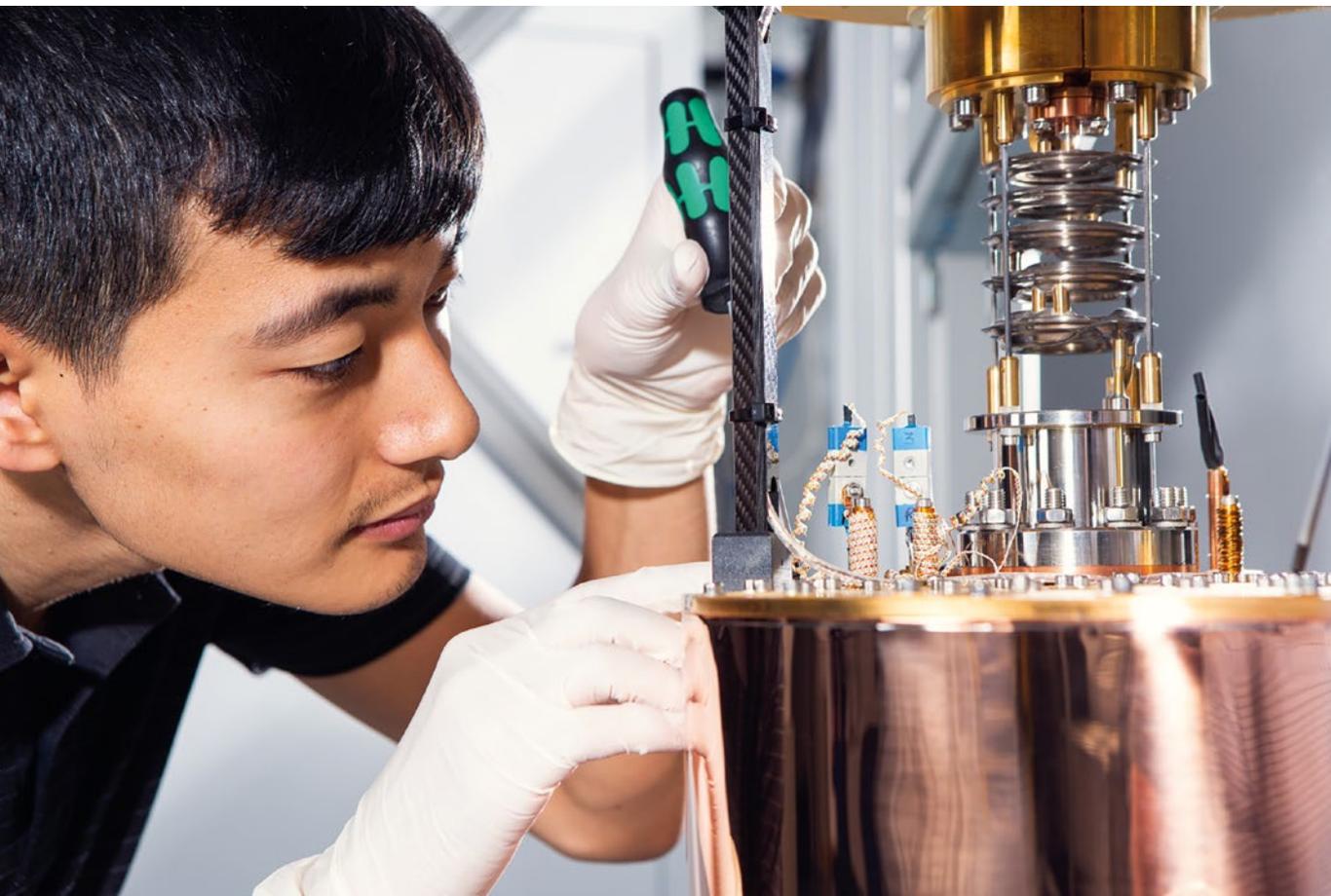
Für eine langfristige Ausrichtung der Aktivitäten muss die Entwicklung von Quantencomputer-Systemen in geeigneten Betreibermodellen verstetigt werden, die innerhalb der Hub-Strukturen ausgearbeitet werden sollen.

Kompetenznetzwerke

Hauptaufgabe der Kompetenznetzwerke ist es, **übergreifende Themenschwerpunkte zu adressieren und die Aktivitäten der Hubs untereinander sowie mit Industrie und externen Anwendern und Bildungseinrichtungen zusammenzuführen**. Angelehnt an die Hubs sollen auch die Kompetenznetzwerke in einem wettbewerblichen Verfahren selektiert werden. Die Auswahl- und Bewertungskriterien sind auf Seite 15 ff. [☞](#) aufgeführt. Dabei sollen Dopplungen zwischen Kompetenznetzwerken vermieden werden. Insbesondere empfehlen wir, Aktivitäten der Länder in die Kompetenznetzwerke einzubeziehen.

Ein Kompetenznetzwerk koordiniert jeweils einen hubübergreifenden Themenbereich, insbesondere in den Schlüsselfeldern **Ausbildung, Infrastruktur und Anwendungen**, und stellt hierfür Anknüpfungspunkte für die Hubs sowie die dafür notwendigen finanziellen und personellen Ressourcen zur Verfügung. Es bündelt die in Deutschland/Europa vorhandene Expertise und Kompetenz und fungiert als erster Ansprechpartner für externe Anwender und Stakeholder. Darüber hinaus stellt das Netzwerk Standards bereit, koordiniert deren Erstellung, garantiert die Einhaltung anerkannter Qualitätskriterien und stellt in Abstimmung mit dem Strategiebeirat sicher, dass es nicht zu ungewollten Dopplungen kommt.

Die Kompetenznetzwerke verfügen über eigene Projektmittel, um komplementäre Entwicklungsaktivitäten in enger Abstimmung mit den Hubs durchzuführen. Sie operieren entlang selbst definierter Meilensteine sowie der Zielvorgaben eines Lenkungsausschusses. Dabei



werden die für das jeweilige Netzwerk relevantesten Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft und öffentlicher Hand ebenso einbezogen wie Vertreterinnen und Vertreter der Hubs. Sie fördern die Einbindung von Start-ups und Unternehmen, zum Beispiel bei der Entwicklung von Software-Werkzeugen, Beratungsleistungen, Anwendungen und Ausbildungsprogrammen, und stellen sicher, dass diese auf Infrastrukturen der Hubs zugreifen können.

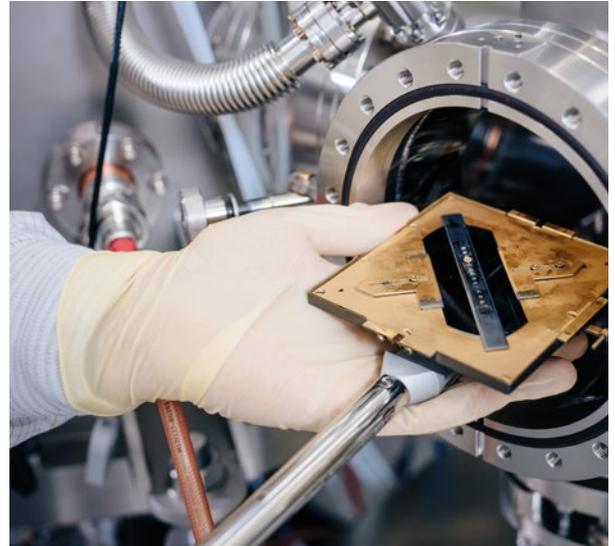
Beispiele für Kompetenznetzwerke

Die drei nachfolgenden Kompetenznetzwerke werden exemplarisch vorgestellt und können in Abstimmung mit der DQG strategisch komplettiert werden.

1. Quantencomputing-Anwenderkompetenznetzwerk

Das Quantencomputing-Anwenderkompetenznetzwerk soll zeitnah die bereits bestehenden Möglichkeiten des Quantencomputings eruieren und diese Technologien mit hoher Geschwindigkeit für Anwendungen in der Industrie wertschöpfend nutzbar machen. Das Netzwerk soll folgende Aufgaben wahrnehmen:

- Identifizierung von Use Cases der Anwenderindustrie und Abschätzung der Tragweite für die jeweilige Branche beziehungsweise den jeweiligen Markt
- schnelle Bereitstellung eines niederschweligen Zugangs zu Quantencomputern und quantum-inspired Hardware für Forschung und Industrie, zunächst auf Basis auch international verfügbarer Quantencomputing-Systeme
- Aufbau einer unabhängigen Bewertungskompetenz für die Anwenderindustrie, die Fragen nach Leistungsfähigkeit, Mehrwert, Entwicklungsaufwand, Trends usw. beantwortet
- Bereitstellung von Methodenwissen, Optimierung von Software-Algorithmen und Erstellung von Entwicklungswerkzeugen für Quantencomputing-Anwendungen und Aufbau einer entsprechenden Anwenderplattform inklusive der Cloudumgebung für den Zugriff auf die Quantencomputer
- kooperative Durchführung von praxisnahen Pilotprojekten als Basis für die Entwicklung zugehöriger Geschäftsmodelle durch Anwenderunternehmen



2. Kompetenznetzwerk Quanten-Infrastruktur

Das Kompetenznetzwerk Quanten-Infrastruktur soll die in die Hubs integrierte Infrastruktur wie zum Beispiel die Fertigung von supraleitenden Chips, Atomfallenchips, Quanten-Photonik sowie spezialisierte Messumgebungen koordinieren und zu einer übergreifenden Maßnahme zusammenführen. Das Netzwerk verfolgt drei Hauptziele:

- hubübergreifende Koordination von Infrastruktur und deren Adaption auf die spezifischen Quantentechnologie-Anforderungen sowie Identifikation fehlender systemkritischer Infrastruktur und deren Ergänzung oder Substitution in Europa, begleitet durch die Etablierung von Standards
- Etablierung einheitlicher und offener Zugangsmodelle, zum Beispiel in Form von „Open Innovation and Testing Labs“ oder kooperativen Technologieparks mit Personal für den Betrieb der Anlagen und Fertigung von Prototypen nach Spezifikation, um Start-ups, KMU und Forschenden niederschweligen Zugang zu hochinvestiver Infrastruktur zu ermöglichen
- Etablierung einer Plattform für eine themen- und fächerübergreifende Community an der Schnittstelle zwischen Fertigungs- und Messtechnik, Universitäten, Forschungseinrichtungen und Industrie – insbesondere auch zu den anderen Quantentechnologie-Themengebieten

3. Kompetenznetzwerk Quantenbildung

Das Kompetenznetzwerk Quantenbildung soll die Bildungsaktivitäten der Hubs koordinieren und zusammenführen. Die Zertifizierung von Bildungsangeboten und die Bereitstellung hochwertiger Lehrmaterialien setzen Güte- und Qualitätskriterien und schaffen Vernetzung. Die vier Hauptziele lauten:

- **Ausbildung von Fachkräften** durch neue interdisziplinäre Ausbildungsstrukturen an den Hochschulen
- **Kompetenzerwerb und Weiterbildung** für Industrie und Wirtschaft durch Vermittlung von spezifischem Fachwissen und einer realistischen Bewertungskompetenz
- **Schaffen von Akzeptanz** in der Gesellschaft durch Öffentlichkeitsarbeit und transparente Informationen zu den Potenzialen und Grenzen der Quantentechnologien insbesondere im Kontext der schulischen Bildung. Dies soll unter anderem die Entwicklung negativer Emotionen wie Ängste und Unsicherheiten vermeiden.
- **Etablierung von Richtlinien** und Regeln zur Technikfolgenabschätzung der Quantentechnologien durch Stakeholder-Dialoge mit Forschung, Wirtschaft und Politik

Dachorganisation: Deutsche Quantengemeinschaft (DQG)

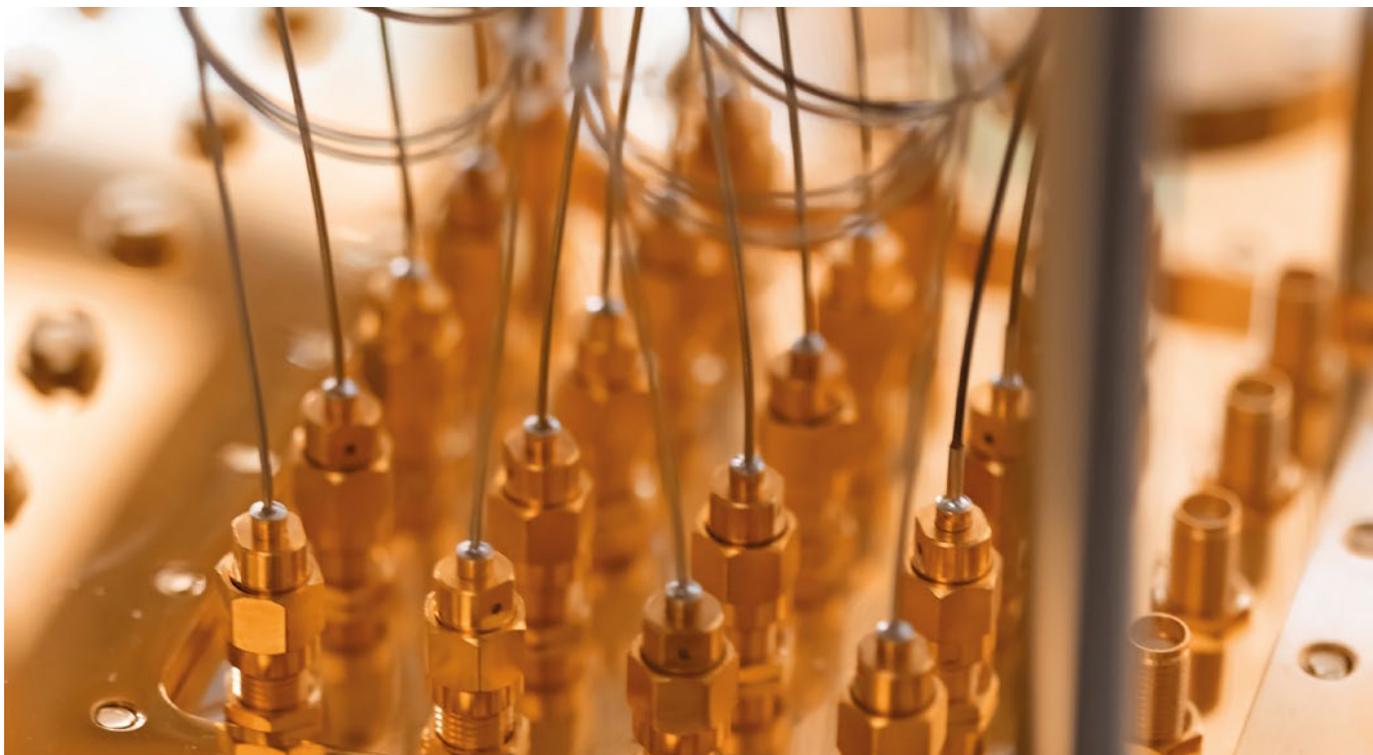
Eine **schlanke und unbürokratische Dachorganisation** soll hub- und kompetenznetzwerkübergreifend die Umsetzung der Gesamtstrategie sicherstellen, indem sie:

- die öffentliche Hand bei der Umsetzung der Roadmap berät und unterstützt,
- ressortübergreifend ein wettbewerbliches Verfahren orchestriert, bei dem sie zu allen Vergabe- und Evaluationsfragen durch international ausgewiesene Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Industrie beraten wird,

- durch den unten beschriebenen Strategiebeirat den Fortschritt der geförderten Hubs und Kompetenznetzwerke evaluiert, korrektive Maßnahmen empfiehlt und eine schrittweise Fokussierung auf wenige aussichtsreiche Hubs und darin enthaltene Ansätze durchführt,
- die Schaffung fehlender Strukturen initiiert und
- die Abstimmung und Zusammenarbeit zwischen den Hubs und den Kompetenznetzwerken sicherstellt.

Dies erfordert eine unabhängige, kompetenzbasierte Zielstruktur, bestehend aus:

- **Aufsichtsrat:** Die Bundesministerien selbst übernehmen eine überwachende Funktion. Der Aufsichtsrat bestellt den Strategiebeirat. Es erfolgt keine inhaltliche Einflussnahme.
- **Strategiebeirat:** Der Beirat besteht aus nationalen und europäischen, international ausgewiesenen Expertinnen und Experten aus Wissenschaft und Wirtschaft. Er verfügt über die Strategiekompetenz, die Strukturbildung zu steuern, Ausschreibungen für weitere strategische Projekte der Hubs und Kompetenznetzwerke zu empfehlen, den wissenschaftlichen und technischen Fortschritt vor dem Hintergrund des internationalen Stands der Forschung zu evaluieren, übergreifende Fragestellungen im Bereich des IP-Managements aufzugreifen, die Bildung resilienter Wertschöpfungsketten abzusichern und eine globale Steuerfunktion der Aktivitäten der Hubs und Kompetenznetzwerke zu übernehmen.
- **Hub- und Kompetenznetzwerk-Verband:** Der Verband setzt sich zusammen aus Vertreterinnen und Vertretern der Hubs und Kompetenznetzwerke. Er fördert in Zusammenarbeit mit dem Strategiebeirat die notwendigen Synergien, auch durch die Mitwirkung eigener Vertreterinnen und Vertreter im Strategiebeirat, jedoch zur Vermeidung von Interessenkonflikten ohne Entscheidungsrolle innerhalb der Dachorganisation.
- **Geschäftsstelle:** Die Geschäftsstelle unterstützt die operative Umsetzung durch die beteiligten Bundesministerien, begleitet die Maßnahmen und unterstützt den Strategiebeirat.



Finanzierungsinstrumente

Die hier vorgeschlagene Organisation ist sofort mit bereits vorhandenen Instrumenten umsetzbar, um dann nach einer ersten Anlaufphase längerfristig konsolidiert zu werden.

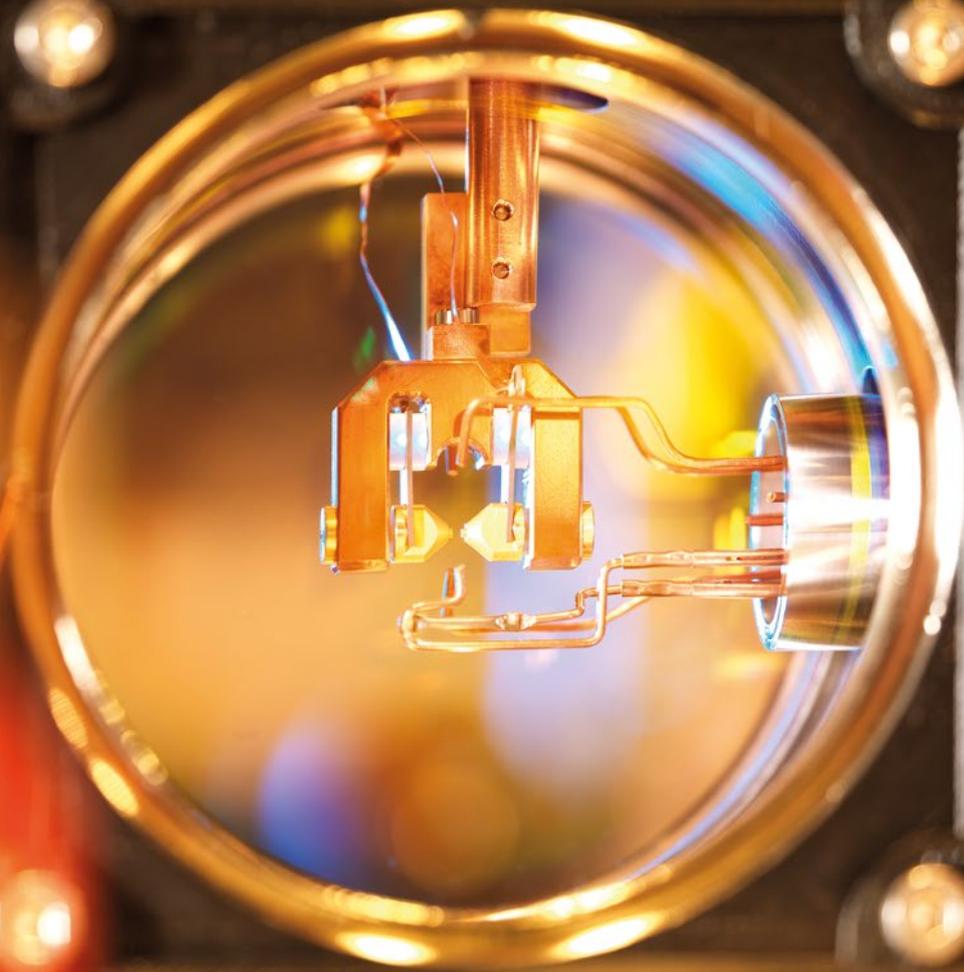
Im ersten Schritt werden die Hubs und Kompetenznetzwerke in einem wettbewerblichen Verfahren zur Finanzierung ausgewählt. Vorgesehen ist eine **integrierte Förderung von wissenschaftlichen und industriellen Akteuren zusammen mit ausgewählten europäischen Partnern**. Dafür sind in gewissem Umfang zweckgebundene Mittel in den Hubs vorzusehen. Die Vergabe der Projekte wird hubintern vorgeschlagen.

Vorbild für die Flexibilität in der konkreten Umsetzung sind existierende Beispiele wie die Exzellenzcluster der DFG oder die Spitzencluster des BMBF. Dies erfordert zunächst eine Anpassung der existierenden Finanzierungsinstrumente und später die Entwicklung dedizierter Instrumente. Das unternehmerische Risiko für die Industrie und insbesondere für Start-ups sollte entsprechend der Industrialisierungsnähe und dem

Entwicklungsrisiko durch **angepasste Förderquoten** berücksichtigt werden. Zudem sollte der Staat das Instrument der öffentlichen Beschaffung durch die Vergabe von Forschungs- und Entwicklungsaufträgen zur Absicherung besonders risikoreicher Arbeiten nutzen.

Darüber hinaus werden Möglichkeiten für **Public Private Partnerships (PPP)** auf der Ebene der Hubs implementiert. Dies umfasst auch die Möglichkeiten zur gemischten Finanzierung mit privaten Finanzierungsquellen wie zum Beispiel durch Risikokapital (Venture Capital).

Zudem sollen Maßnahmen wie **Gründungsstipendien/EXIST-Programme** und finanzielle Unterstützung für die Etablierung und Erhaltung des Patentportfolios die Bereitschaft zur Gründung von Start-ups aus dem Quantencomputing-Ökosystem fördern.



Kompetenzen ausbauen, Komponenten verfügbar machen, Intellectual Property schützen

Strategischer Aufbau von Komponenten

Die Analyse unter „Herausforderungen und Lösungen“ zeigt: Deutschland ist derzeit nicht in der Lage, die zentralen Elemente eines Quantencomputers ohne Zulieferer und den kurzfristigen Zukauf von Komponenten von europäischen beziehungsweise außereuropäischen Herstellern zu entwickeln oder gar zu produzieren. Um dies zu ändern, sind folgende Schritte notwendig:

- Identifikation der **systemrelevanten Komponenten** und wichtigsten Produzenten in Deutschland und Europa und Entscheidung, welche dieser Komponenten systemkritisch sind und daher zeitnah in Deutschland oder Europa entwickelt werden müssen
 - Incentivierung von Forschung und Entwicklung der systemrelevanten Komponenten
 - etwaiger Schutz der relevanten IP
 - Systemintegration beziehungsweise Kommerzialisierung durch Start-ups, existierende KMU oder Großunternehmen
- Der Umgang mit systemkritischen, neutralen oder trivialen Komponenten muss verbindlich geregelt werden, um in Deutschland und Europa Souveränität erreichen zu können.
- **Systemkritische Komponenten:** Systemkritische

Komponenten sollen nach Möglichkeit in Deutschland, können aber auch in Europa hergestellt werden. Sollte dies noch nicht möglich sein, können sie übergangsweise zugekauft werden (unter klar definierten Regeln für außereuropäische Zulieferer). Zeitgleich müssen die Hubs eine Roadmap aufstellen, die beschreibt, wie eine eigene Produktion aufgebaut oder bestehende Akteure zur Produktion der Komponenten incentiviert werden sollen.

- **Neutrale Komponenten:** Neutrale Komponenten sollen aus Europa kommen, können aber auch außerhalb Europas zugekauft werden. Sollte es nicht sinnvoll sein, diese Komponenten in Europa herzustellen, eine eigene Herstellung aufgrund von Patenten nicht möglich oder alternative Technologien nicht vielversprechend sein, sollen Kooperationen gebildet werden.
- **Triviale Komponenten** dürfen auch langfristig aus außereuropäischen Ländern zugekauft werden. Triviale Komponenten sind solche, die nicht kritisch für die Herstellung des Quantencomputers sind beziehungsweise für die es Alternativen auch bei Wegfall eines Produzenten durch zum Beispiel Ausfuhrbeschränkungen gibt.

Die Einteilung der Komponenten in die drei Kategorien erfolgt in den Hubs beziehungsweise Kompetenznetzwerken und muss mit dem Strategiebeirat der DQG abgestimmt werden, um in die übergeordnete Quantencomputing-Strategie Deutschlands und Europas eingeordnet werden zu können.

Zielsetzung

Ziel muss es sein, in Deutschland/Europa Souveränität zu erreichen und die dazu notwendigen Talente aufzubauen beziehungsweise zu halten. Dies sollte erfolgen durch:

- stärkere Verzahnung von Hardware- und Softwareentwicklung in Situationen, die Vorteile versprechen. Es sollten

Schnittstellen zwischen Anwendungssoftware sowie Hard- und Firmware definiert werden, um langfristig eigenständige Entwicklung von Anwendungssoftware zu ermöglichen.

- Unabhängigkeit von außereuropäischen Herstellern bei systemkritischen Komponenten. Diese sollten in Deutschland, können aber auch in Europa hergestellt werden.
- Aufbau langfristiger Kooperationen mit Komponentenherstellern aus europäischen und europäischen Ländern

Handlungsempfehlungen

Defizite müssen vor allem in den Bereichen skalierbare Hardwareentwicklung, Softwareentwicklung, Systemintegration, IP-Generierung und Kompetenzaufbau/-erhaltung ausgeglichen werden.

Aufbau von systemrelevanten Komponenten in Deutschland/Europa

- Identifikation, Defizitanalyse und Einteilung von systemrelevanten Komponenten durch Hubs/Kompetenznetzwerke in Zusammenarbeit mit dem Strategiebeirat der DQG



- Aufbau der Produktion systemrelevanter Komponenten in den Hubs/Kompetenznetzwerken (mit Potenzial zur Ausgründung) in Deutschland:
 - dedizierte Aufträge an Industrie oder Forschungseinrichtungen, um den Fokus auf Quantentechnologien zu incentivieren und wirtschaftliche Rentabilität sicherzustellen
 - Fokus auf Geschäftsentwicklung/Verwertungsstrategien
- Aufbau einer Kooperation mit europäischen Produzenten für systemrelevante Komponenten und außereuropäischen Produzenten für triviale Komponenten sowie Etablierung von Richtlinien für die Zusammenarbeit mit internationalen Herstellern

Strategischer Aufbau von Kompetenzen

Um den absehbar hohen zukünftigen Bedarf an Fachkräften sicherzustellen, müssen Strukturen für

eine interdisziplinäre Ausbildung und den Aus- sowie Aufbau von Kompetenzen geschaffen werden. Wichtig ist dabei in erster Linie die Weiterbildung von Akteuren der Industrie und Wirtschaft, insbesondere von Entscheidungsträgerinnen und -trägern. Aktuell fehlt es trotz weitgehend vorhandener technologischer Grundkompetenzen und -komponenten an Personalausstattung und Skalierungskompetenz für den Übergang von Grundlagenforschung zur Anwendung.

Zielsetzung

Ziel ist es, in Deutschland die notwendigen Talente aufzubauen, anzuwerben und zu halten. Dies gelingt durch einen zielgerichteten Aufbau von Kompetenzen zur Entwicklung von Quanten-Hardware, Komponenten, Quanteninformationstheorie und Quantenalgorithmen, zu Software, Anwendungen und zur Systemintegration.

Handlungsempfehlungen

Wir empfehlen den Aufbau von Talenten und Kompetenzen in Deutschland/Europa koordiniert durch das Kompetenznetzwerk Quantenbildung (☑ siehe Seite 26) durch folgende Maßnahmen:



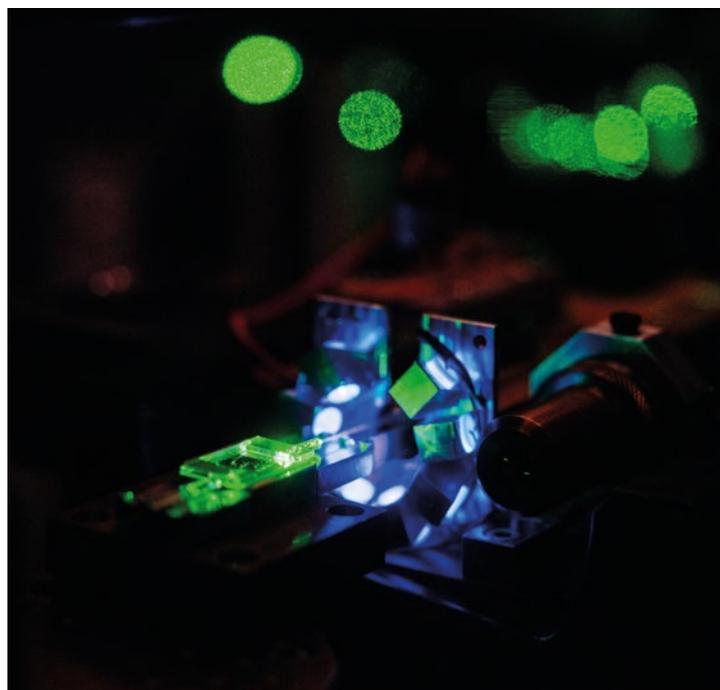
- **Schaffung interdisziplinärer universitärer Quantentechnologiezentren** jenseits üblicher Fakultätsgrenzen durch zusätzliche Professuren und Forschungsgruppen, spezielle Kurs- und Studienangebote an Universitäten und (Fach-) Hochschulen, Ausbildung von Promovierenden in Graduiertenschulen sowie Aus- und Weiterbildung von Lehrkräften als Multiplikatoren
- **Gezielter Austausch und Transfer von Know-how aus der Wissenschaft in die Industrie** durch Vernetzung der Universitäten und Forschungseinrichtungen mit der Industrie. Dies geschieht etwa durch eine gemeinsame Nutzung des Kompetenznetzwerks „Quanten-Infrastruktur“, die Einrichtung von Stiftungsprofessuren und flexiblen Mobilitätsprogrammen zwischen Universitäten und Industrie („Industrie-Sabbaticals“) sowie die Incentivierung von Gründungen, um Start-ups aufzubauen, beispielsweise durch Quantencomputing-Entrepreneur-Studienmodule.

Intellectual Property (IP)

Eine **übergreifende Strategie zu Intellectual Property** soll die Position Deutschlands und Europas im Rennen um den Quantencomputer stärken. Europa liegt derzeit mit 797 Patenten (exkl. UK mit 376), davon 410 in Deutschland, weit hinter den USA mit 1.990 oder China mit 5.164 Patenten (Stand 2020 unter Einbeziehung von Patenten bis einschließlich 2018). Eine Stärkung der IP-Position ist daher essenziell, um als ernst zu nehmender Kandidat am weltweiten Wettbewerb teilnehmen zu können.

Außerdem ist aufgrund der Komplexität des Quantencomputers eine erfolgreiche Umsetzung in Deutschland und Europa nicht durch einzelne Firmen, sondern in enger Kooperation mehrerer Industriepartner zusammen mit der Forschung zu erwarten. Ein IP-Umfeld ist daher notwendig, das sowohl die Zusammenarbeit als auch die Generierung von IP befördert.

Um dies zu erreichen, braucht es günstige Rahmenbedingungen für einen verstärkten Wissenstransfer von der Forschung in die Industrie, die Förderung von IP-Generierung und die Vereinfachung der Zusammenarbeit innerhalb Deutschlands/Europas.



Handlungsempfehlungen zur Stärkung der IP-Position Deutschlands und Europas

1. IP-Regelungen für Start-ups

Ziel: eine einheitliche Ausgründungspolitik von der Wissenschaft in die Industrie.

- Standardisierung und Beschleunigung des IP-Transfers von Universitäten und Forschungsinstituten in die Industrie
- Incentivierung von risikokapitalbasierten Investitionen durch einheitlich geregelte exklusive Nutzung der IP durch Gründerinnen und Gründer oder Übertragung auf Start-ups zu fairen Konditionen. Hierbei muss die Technologiesouveränität gewährleistet werden.
- Unterstützung bei der Ausgründung durch das bereits bestehende Ökosystem an Inkubatoren und Akzeleratoren
- Orientierung bestehender Infrastrukturen wie Tech-Transfer-Büros an Universitäten an internationalen Modellen, um eine rasche und unkomplizierte Übertragung zu ermöglichen

2. Freedom to Operate und Patentüberwachung

Ziel: ein umfassendes Bild über die Patentlandschaft des Quantencomputings, um eine Übersicht über systemkritische Patente zu erhalten.

- Aufgabe des jeweiligen Hubs beziehungsweise Kompetenznetzwerks
- Berücksichtigung der Patentsituation bei der strategischen Förderung von Forschung und Entwicklung. Identifikation, an welchen Stellen sinnvollerweise alternative Lösungsansätze erforscht werden müssen und wo eine Zusammenarbeit mit bestehenden Patenthaltern unumgänglich ist.

3. Patentpool

Ziel: die Zusammenarbeit zwischen mehreren Patentträgern vereinfachen.

- Um Blockaden zwischen verschiedenen Marktteilnehmern zu verhindern, kann ein lizenzfreier oder lizenzpflichtiger Patentpool gegründet werden. Solche Patentpools sind grundsätzlich auch für Nutzer außerhalb Deutschlands oder Europa offen.
- Die genaue Ausführung eines Patentpools muss individuell und in Abstimmung mit dem Kartellgesetz erfolgen. Das Für und Wider eines solchen Patentpools ist daher im Einzelfall genau abzuwägen.

4. Standardisierung

Ziel: Standards aus Europa im Quantenbereich setzen, um die Position im weltweiten Rennen zu stärken und von bestehenden Strukturen zu profitieren.

- Für eine effiziente Kommerzialisierung und weltweite Positionierung ist es wichtig, möglichst frühzeitig Standardisierungsprozesse anzustoßen. Dabei ist es sinnvoll, bei bestehenden Standardisierungsorganisationen mitzuwirken. Diese sind zusammen mit den Expertinnen und Experten aus den Hubs und Kompetenznetzwerken in der Lage, solche Standards zu etablieren.

Expertenrat

Um eine gemeinsame nationale Strategie für das Quantencomputing zu erarbeiten, hat die Bundesregierung ein Gremium aus hochrangigen Expertinnen und Experten aus Wirtschaft und Wissenschaft beauftragt, die zentralen Herausforderungen in diesem Feld zu benennen und Handlungsempfehlungen für das zukünftige Vorgehen auszusprechen. Dieses Gremium hat die vorliegende „Roadmap Quantencomputing“ erarbeitet.

Prof. Dr. Stefanie Barz

Universität Stuttgart

Dr.-Ing. Michael Bolle

Robert Bosch GmbH

Prof. Dr. Tommaso Calarco

Forschungszentrum Jülich und Universität zu Köln

Prof. Dr. Ignacio Cirac

Max-Planck-Institut für Quantenoptik

Prof. Dr. Stefan Filipp

TU München und Walther-Meißner-Institut

Magdalena Hauser

Parity Quantum Computing GmbH

Dr.-Ing. E. h. Peter Leibinger

TRUMPF GmbH + Co. KG

Prof. Dr. Dr. h. c. Frank Leymann

Universität Stuttgart

Prof. Dr. Claudia Linnhoff-Popien

QAR-Lab, LMU München

Dr. Sebastian Luber

Infineon Technologies AG

Dr. Florian Neukart

Volkswagen AG

Dr. Alexander Regnat

kiutra GmbH

Prof. Dr. Piet O. Schmidt

Physikalisch-Technische Bundesanstalt und Leibniz Universität Hannover

Prof. Dr. Christine Silberhorn

Universität Paderborn

Prof. Dr. Andreas Tünnermann

Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF und Friedrich-Schiller-Universität Jena

Dr. Horst Weiss

BASF SE

Impressum

Herausgeber

VDI Technologiezentrum GmbH
VDI-Platz 1
40468 Düsseldorf

Verantwortlich für den Inhalt:

Der Expertenrat „Quantencomputing“, vertreten durch die Sprecher
Prof. Dr. Stefan Filipp, Technische Universität München/Walther-Meißner-Institut der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
Dr.-Ing. E. h. Peter Leibinger, TRUMPF GmbH + Co. KG

Redaktion

VDI Technologiezentrum GmbH

Gestaltung und Umsetzung:

familie redlich AG Agentur für Marken und Kommunikation, Berlin
KOMPAKTMEDIEN Agentur für Kommunikation GmbH, Berlin

Druck

BMBF

Bildnachweise

Titel: Adobe Stock/Bartek; S. 4: Astrid Eckert/München, TRUMPF; S. 6: Forschungszentrum Jülich/Ralf-Uwe Limbach; S. 8: kiutra GmbH/Max Kühn; S. 9: Adobe Stock/sdecoret; S. 10: Adobe Stock/kilukilu; S. 11: Adobe Stock/Astibuag; S. 12: Bayerische Akademie der Wissenschaften/Kai Neunert; S. 14: Forschungszentrum Jülich/Ralf-Uwe Limbach; S. 15: Adobe Stock/dekdojjaidee; S. 16: Adobe Stock/industrieblick; S. 17: Adobe Stock/metamorworks; S. 18: Adobe Stock/metamorworks; S. 19: Adobe Stock/Nichizhenova Elena; S. 20: Adobe Stock/metamorworks; S. 22: kiutra GmbH/Max Kühn; S. 24: Bayerische Akademie der Wissenschaften/Kai Neunert; S. 25: Universität Paderborn/Besim Mazhiqi; S. 27: Forschungszentrum Jülich/Ralf-Uwe Limbach; S. 28: Physikalisch-Technische Bundesanstalt; S. 29: Adobe Stock/Anatoly Stojko; S. 30: kiutra GmbH/Max Kühn; S. 31: Universität Paderborn/Besim Mazhiqi

