



ROADMAP ZUR

QuantenTech Vision Bayern

Zukunftsentwürfe für Quantentechnologien in Bayern
und deren industrielle Anwendungen, einschließlich
für die dazu erforderlichen Ökosysteme

Im Auftrag

des Bayerischen Staatsministeriums für Digitales,
des Bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst
sowie des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft,
Landesentwicklung und Energie





Inhaltsverzeichnis

1. Einführung	3
2. Executive Summary	4
3. Prozess, Teilnehmerspektrum	5
3.1 Entstehungsprozess <i>QuantenTech Vision Bayern</i>	5
3.2 Beteiligte Expertinnen und Experten	6
4. Skizzierung von Handlungsräumen	7
4.1 <i>QuantenTech Vision Bayern</i>	7
4.2 Zeithorizonte der verschiedenen Quantentechnologien	7
4.3 Skizzierung: Wege zur Vision, Implikationen, Optionen	8
4.4 Anwendungsorientierter Zugang	8
4.5 Technologieförderung	10
4.6 Beispiele für Hubs und Kompetenzzentren/-netzwerke	11
5. Ergebnisse aus den Workshops zur Roadmap <i>QuantenTech Vision Bayern</i>	12
5.1 Trends Treiber Barrieren	12
5.2 Anwendungen in den Industriebranchen	16
5.3 Vom Wissen zur Anwendung	20
5.4 Infrastruktur Ressourcen	23
5.5 Quantentechnologien	26
Simulation Computing	26
Sensorik Metrologie	28
Software Algorithmen	30
Kommunikation	32
6. Appendix	34
Quellen	34
Prozesserklärung	35
An den Workshops beteiligte Institutionen	36

1.

1. Einführung

Die Ära der Quantentechnologien der zweiten Generation, welche hier Quantencomputing (QC), -software, -sensorik und -kommunikation mit einschließt, hat begonnen und die Bedeutung des Themas wächst rasant, auch in der Wahrnehmung der Gesellschaft.

Große Konzerne haben insbesondere das Thema Quantencomputing bereits für sich entdeckt und eruieren die damit einhergehenden Möglichkeiten. Neben Forschern, Ingenieuren und Softwareentwicklern in direkter Beziehung zu den Quantentechnologien untersuchen erste Anwender der klassischen Industrie mögliche Einsatzgebiete, -szenarien und zukünftige Geschäftsmodelle – mit allen Risiken und Abwägungen, Herausforderungen und Chancen, welche diese Schlüsseltechnologie mit sich bringt. Während der zukünftige Bedarf an Quantencomputern kaum abgeschätzt werden kann, wird der weltweit verfügbare cloudbasierte Zugang auf Rechnern aktuell präferiert. Wenige, hauptsächlich ausländische Unternehmen erweitern ihre Geschäftsmodelle vom Quantencomputer als Produkt hin zum Quantencomputing als Service, um niederschweligen Zugang für eine breite Anwenderbasis zu ermöglichen. Die Anwendungsgebiete des Quantencomputing nehmen zu, der Zugang und die Nutzung werden immer einfacher. Wichtig ist, trotz der rasanten Entwicklungen im Bereich des Quantencomputing die Nutzung der Quantentechnologien generell und im Speziellen Anwendungen der Sensorik/Metrologie und Kommunikation nicht zu vernachlässigen, deren kurz- und mittelfristiger Nutzen für die Anwenderindustrie besser abzusehen ist. Um zukünftig im globalen Wettbewerb mithalten zu können, ist es notwendig, das Wissen aus der Forschung in den Quantentechnologien in die industrielle Anwendung zu bringen und das Fachpersonal an spezifischen Fragestellungen auszubilden, damit auch langfristig die Wertschöpfung im Freistaat Bayern generiert und gehalten werden kann.

Aus diesem Grund haben

das **Bayerische Staatsministerium für Digitales,**

das **Bayerische Staatsministerium für Wissenschaft und Kunst** sowie

das **Bayerische Staatsministerium für Wirtschaft, Landesentwicklung und Energie**

die Bayern Innovativ GmbH beauftragt, einen Prozess zu begleiten, in dem ausgewählte Experten aus den verschiedenen Bereichen der Quantentechnologien aus Wirtschaft und Wissenschaft eine mittel- und langfristige Vision für die Etablierung eines bayerischen Quantentechnologie-Ökosystems vorzeichnen, an der sich zukünftige Maßnahmen orientieren können.

Diese Roadmap zeigt eine Vision für die Quantentechnologien in Bayern für die kommenden fünf bis zehn Jahre. Sie beleuchtet mittel- und langfristige Entwicklungsstufen und bildet die technologischen und industriellen Anwendungspotenziale in den Quantentechnologien für die bayerische Wirtschafts- und Forschungslandschaft ab.

2.

2. Executive Summary

Alle **Bereiche der Quantentechnologien** (Quantencomputing/-simulation, -software, -kommunikation, -sensorik) sind wichtige Schlüsseltechnologien für die Zielsetzung des Aufbaus einer Quantentechnologie-Industrie und adressieren unterschiedliche Zeithorizonte, unterschiedliche Anwendungen sowie unterschiedliche Industriebranchen. Damit wird deutlich, dass sich in den diskutierten und bewerteten *Enabling*-Technologien keine Präferenz ausbilden sollte.

Ein Ziel ist, in Bayern neben den herausragenden Grundlagenkompetenzen in den Quantentechnologien die notwendigen Kompetenzen bei Anwendern aufzubauen und den Schulterchluss zwischen den Quantentechnologien sowie industrieorientierter Anwendung zu beschleunigen. Gleichberechtigt für alle Bereiche der Quantentechnologien gelingt dies durch Fokussierung von Bedarfen aus der Industrie sowie deren Umsetzung an realen Problemstellungen. Parallel dazu wird die Entwicklung eines eigenen Quantencomputers mit angegliedertem Quanten-Ökosystem (insbesondere Komponenten-Zulieferer) vorangetrieben. Auch hier ist der Schulterchluss zwischen wissenschaftlich/akademisch orientierter Forschung und industrieller Umsetzung wichtig.

Neben (forschungsorientierten) Leuchtturmprojekten sollten auch Projekte mit hoher Diversität in allen Bereichen der Quantentechnologien initialisiert werden, die in einem überschaubaren Zeitraum anwendungsorientierte quantentechnische Lösungen mit hohem wirtschaftlichen Potenzial etablieren können.

Eine Ausgewogenheit zwischen Leuchtturmprojekten und kleineren, aber dafür technologisch heterogenen anwendungsorientierten Projekten, insbesondere in der Sensorik, Kommunikation und Software/Algorithmik, macht deutlich, dass **alle Quantentechnologien in und für Bayern** für eine erfolgreiche wirtschaftliche Nutzung wichtig sind. Quantencomputing als Leuchtturmprojekt ist in diesem Kontext für die bayerische Positionierung sowohl im akademischen/wissenschaftlichen Bereich als auch in der unternehmerischen Umsetzung und Anwendung wichtig. Ziel dabei ist, sowohl die Führungsrolle der bayerischen Grundlagenforschung weiter auszubauen als auch die benötigten Zulieferketten zu etablieren und zu fördern. Auch wenn das Produkt Quantencomputer für heutige Anwendungen in der Industrie noch einen geringeren Reifegrad aufweist, lassen sich erste Lerneffekte auf bereits vorhandenen Plattformen erzielen und das Potenzial leistungsfähigerer Rechner ist erkennbar.

Für eine effiziente **Kommerzialisierung** der Quantentechnologien bzw. das *Knowhow* hierzu ist für Bayern der Kompetenzaufbau **über bereits heute umsetzbare anwendungsorientierte Projekte unabdingbar**, um auch in der öffentlichen Wahrnehmung deren Nutzen aufzuzeigen.

3.

3. Prozess, Teilnehmerspektrum

3.1 ENTSTEHUNGSPROZESS QUANTENTECH VISION BAYERN

Zur Erstellung der *QuantenTech Vision Bayern* wurde die Methode des Roadmappings genutzt. Mittels einer Roadmap können zeitliche und logische Verknüpfungen zwischen unterschiedlichen Einflussfaktoren wie Technologien, Anwendungen oder auch Infrastruktur über einen längeren Zeitraum hinweg aufgezeigt und visualisiert werden. Damit können komplexe Zusammenhänge transparent und klar mit unterschiedlichen Interessenvertreterinnen und -vertretern erarbeitet und kommuniziert werden. Zudem lassen sich so Optionen ableiten und in Strategien umsetzen.

Zur Erarbeitung der Roadmap wurde ein **interaktiver und partizipativer Ansatz** unter Einbeziehung von mehr als 80 Expertinnen und Experten aus Wirtschaft und Wissenschaft in Bayern gewählt. Mittels Workshops und Experteninterviews wurden die unterschiedlichen Interessensvertreterinnen und -vertreter eingebunden und die internen und externen Sichtweisen mit aufgenommen. So konnte ein ganzheitliches Bild erzeugt werden, das dabei hilft, wichtige Zusammenhänge zu erkennen.

Zielsetzung der Roadmap *QuantenTech Vision Bayern*

- Schaffung eines Überblicks über die Stärken, Schwächen, Möglichkeiten und Risiken (SWOT-Analyse) der Quantentechnologien in Bayern
- Identifizierung der wichtigsten Aspekte
- Ableitung von Optionsräumen, Skizzieren von Schritten zur Vision
- Perspektiven industrieller Anwendungen

Die Zielvorgabe „Entwicklung einer mittel- bis langfristigen Vision“ für die Quantentechnologien in Bayern erfolgte durch die drei o. g. Ministerien; erstellt wurde die Roadmap im Auftrag der drei Ministerien vom Thinknet Quantentechnologie der Bayern Innovativ GmbH zusammen mit einem Gremium aus Expertinnen und Experten in den Quantentechnologien.

Im Fokus stand hierbei das Quantentechnologie-Ökosystem mit den dazugehörigen verschiedenen Quantentechnologien und nicht eine tiefgehende Technologieanalyse.

Ausgehend von dieser Roadmap werden **Optionsräume für die Quantentechnologien in Bayern und deren industrielle Anwendungen, insbesondere die dazu erforderlichen Ökosysteme** aus Netzwerksicht aufgezeigt. Die vollständige Prozessbeschreibung, die Methodik und das Vorgehen zur Erstellung der *QuantenTech Vision Bayern* sind im Anhang ab S. 34 ausführlich dargestellt.

3.2 BETEILIGTE EXPERTINNEN UND EXPERTEN

Die teilnehmenden Expertinnen und Experten aus Forschung und Wissenschaft sowie Komponentenhersteller für Quantentechnologien und Anwender aus der Industrie repräsentieren einen hervorragenden Querschnitt der bayerischen Quantencommunity. In der **Abb. 1** sind die einzelnen beteiligten Institutionen vermerkt und die lokalen Schwerpunkte in Bayern aufgezeigt. Die Liste der beteiligten Institutionen ist im Anhang beigefügt.

Über den am Entstehungsprozess beteiligten Expertenkreis hinaus bestehen weitere Kompetenzen zur Quantentechnologie in Bayern. Eine interaktive, beständig wachsende Kompetenzlandkarte findet sich *online* unter: www.bayern-innovativ.de/quantentechnologie



Abb. 1: Am Roadmap-Prozess beteiligte Institutionen sowie lokale Quantentechnologie-Schwerpunkte in Bayern. Die Größe der Symbole spiegelt die Anzahl der beteiligten Akteure in der Region wider. Weitere Akteure im Bereich der Quantentechnologien finden Sie in der digitalen Kompetenzlandkarte unter: www.bayern-innovativ.de/quantentechnologie

4.

4. Skizzierung von Handlungsräumen

Die Skizzierung von Handlungsräumen und ihrer zeitlichen Dimensionen ergibt sich aus den durchgeführten Workshops sowie zusätzlichen Experteninterviews. Dabei werden forschungs- und anwendungsorientierte Zugänge aufgezeigt sowie externe Bedingungen einer Technologieförderung abgesteckt.

4.1 QUANTENTECH VISION BAYERN

Aufbauend auf der traditionell starken Basis von Ausbildung, Forschung, Unternehmergeist und Vernetzung erschafft Bayern in den nächsten zehn Jahren ein florierendes Quantentechnologie-Ökosystem und damit die Ausgangslage für den zukünftigen Konjunkturmotor Deutschlands. Leuchtturmprojekte sowie ein Spitzenforschungszentrum der Quantentechnologien schaffen die Basis für das Quantenökosystem aus Wissenschaft und Wirtschaft. Durch die starke bayerische Industrie, die nahezu alle Branchen abdeckt, werden aus Anwendersicht zudem Impulse in die Forschung gebracht, die damit neben Grundlagenforschung auch applikationsnahe Problemstellungen adressiert. Die enge Verzahnung der herausragenden Kompetenzen der Quantenforschungslandschaft mit den starken, klassischen Industrien bildet die Grundlage einer lebendigen Start-up-Kultur. Für neue Geschäftsmodelle, Produkte und Dienstleistungen stehen hier modernste Labor-, Produktions- und Testinfrastrukturen bereit.

4.2 ZEITHORIZONTE DER VERSCHIEDENEN QUANTENTECHNOLOGIEN

Ausgehend vom anwendergetriebenen wirtschaftlichen Einfluss ergeben sich für die verschiedenen Quantentechnologien unterschiedliche Zeithorizonte bzgl. ihres Einflusses auf die bestehende Industrie (vgl. Abb. 2). Für hoch spezialisierte Start-ups sowie kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), die **hochkomplexe Technologien** im Hardware-Bereich für Komponenten zur Verfügung stellen, ist die Zeitschiene kürzer einzuschätzen, da diese bereits jetzt in Forschungs- und Entwicklungsprojekte eingebunden sind. Es sollten die Nutzer dieser Technologien in der klassischen Industrie, deren Geschäftsmodelle sich traditionell an anderen Produktportfolios orientieren, nicht außer Acht gelassen werden. Auch für diese muss sich ein signifikanter Mehrwert im Nutzen von Quantentechnologien gegenüber klassischen Methoden und Komponenten innerhalb ihrer *use cases* erschließen.



Abb. 2: Zeitliche Einordnung der wirtschaftlichen Bedeutung verschiedener Quantentechnologien aus Anwendersicht für die kommenden 10 Jahre. Die NISQ-Ära (**Noisy Intermediate-Scale Quantum**) bezeichnet das frühe Entwicklungsstadium von Quantencomputern.

4.3 SKIZZIERUNG: WEGE ZUR VISION, IMPLIKATIONEN, OPTIONEN

Um die Entwicklung der Quantentechnologien umfassend abzubilden, sollten alle ihre Ausprägungen berücksichtigt werden. Hier werden Optionsräume auf dem Weg zur *QuantenTech Vision Bayern* skizziert und mittel- sowie langfristige Zeitschienen zur Sensibilisierung und Einbindung aller Akteure aufgezeigt, die mit den Expertinnen und Experten im Rahmen des Roadmap-Prozesses erarbeitet wurden. Aus der Kategorie „Chancen“ in den jeweiligen SWOT-Analysen können unmittelbar Optionsräume abgeleitet werden.

Im Folgenden werden Möglichkeiten aufgezeigt, die einen positiven Einfluss auf die Entwicklung der Quantentechnologie in Bayern haben können. Diese sind als Optionsräume zu sehen und stellen keine Handlungsempfehlungen dar.

4.4 ANWENDUNGSORIENTIERTER ZUGANG

- **Hardware-Entwicklung zum Quantencomputing/-computer** sowie damit einhergehende *Enabling-Technologien* (Kryotechnik, Mikrowellenpuls-Technik, Einzelphotonendetektoren, Software-Stack für Quantencomputer, Quantenfehlerkorrektur, etc.) und das entsprechende Ökosystem.
- **Komponenten, Prototypen und Demonstratoren**, z. B. für Sensorik und Metrologie, Kommunikation.
- **Software- und Algorithmen-Entwicklung** Anwendung aus der Industrie bzw. Spiegelung von realen Problemen in Lösungsräume, die über Software abgebildet werden können (z. B. Optimierungsprobleme).
- **Absicherung kritischer Infrastrukturen** Sichere Kommunikation ist essenziell für kritische Infrastrukturen jeder Art (Energieversorgung, Krankenhäuser etc.).

Eine anwendungsorientierte Betrachtung kann in den unterschiedlichsten Branchen (Luftfahrt, Automotive, Medizin und Pharmazie, etc.) und Technologien (Chemie, Materialwissenschaften, Energie, etc.) genutzt werden und adressiert unterschiedlichste Umsetzungen der Quantentechnologien (Kommunikation, Security, Optimierung von Prozessen, Abläufen, Verkehr, Simulation von Molekülen, Aufbau von Messtechnik, Portfoliooptimierung im Finanzwesen etc.). Zugehörige Analysen zu Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken (SWOT-Analysen) mit dem Fokus auf Bayern helfen bei der Bestandsaufnahme und zeigen Potenziale und Chancen auf.

Applikationsnahe Entwicklungen fördern eine industrielle Umsetzung, erhöhen das Bewusstsein der Interessengruppen in den Unternehmen und schaffen wirtschaftliche Anreize, das volle Potenzial dieser Technologien zu erschließen.

Mit der Aufspaltung komplexer Problemstellungen in skalierbare Beispiele (*use cases*) werden kurzfristig erste wichtige Erfahrungen gesammelt und essenzielle Lösungszwischenschritte z. B. für den jeweiligen Stand der Hardware entwickelt. Für einen industriellen Durchbruch der Quantentechnologien sollte der **Fokus gleichermaßen auf heutige Industriefragestellungen und auf Grundlagenforschung gelegt werden.**

Hier bietet sich für den **kurzfristigen** zeitlichen Horizont die Adressierung von wirtschaftlichen Problemstellungen über **Algorithmen und Software** und die Absicherung der Kommunikation kritischer Infrastrukturen durch **Quantenkommunikation** an. Schon heute arbeiten einige bayerische Firmen an deren Umsetzung. Es existieren einige Anwendungsbeispiele, die wichtige Lerneffekte für die Wirtschaft generieren können, um nachhaltig mittel- und langfristig wichtiges firmeneigenes *Know-how* aufzubauen und geistiges Eigentum zu entwickeln.

Neue, disruptive Technologieentwicklungen **in der Quantensensorik werden mittelfristig** Auswirkungen auf die wirtschaftliche Landschaft haben. Ein Beispiel für eine solche Art Sensoren sind Quantenbeschleunigungssensoren, die eine GPS-freie Navigation ermöglichen können. Besonderes Interesse an dieser Schlüsseltechnologie herrscht in Bayern im Bereich *Aerospace*. Kostengünstigere Derivate dieser Sensoren können in der Automobilindustrie Anwendung finden. Sichere Kommunikation mittels Quantenschlüsselverteilung und Post-Quanten-Kryptografie sollte bereits heute in den Blick genommen werden, da ihre Relevanz den Entwicklungen in der Hardware zeitlich vorgeschaltet ist. Zudem besteht die Gefahr, dass nach heutigen Verschlüsselungsstandards gespeicherte Daten in Zukunft von Quantencomputern entschlüsselt werden, sobald Systeme mit entsprechend vielen Qubits verfügbar sind.

Hochskalierte Quanten-Computer-Hardware-Entwicklungen mit der daraus erwarteten Qubit-/Rechenleistung sind – laut Expertenmeinung – frühestens in etwa zehn Jahren in Form eines universellen Quantencomputers zu erwarten. Ausgehend von der aktuellen Qubit-Skalierungsgeschwindigkeit werden in zehn Jahren fünf- bis sechsstellige Qubitanzahlen zur Verfügung stehen, welche zur Lösung von Aufgabenstellungen im Industriemaßstab erforderlich sind. Die Entwicklung eigener Quantencomputer-Hardware sichert langfristig die Technologiesouveränität Europas/Deutschlands/Bayerns, vermeidet Abhängigkeiten von ausländischen Konzernen, bildet Fachkräfte aus und bindet diese im Land.

Aus den Workshops und Gesprächen im Zuge der Erstellung der Roadmap wurde deutlich, dass gerade der Aspekt der industriellen Anwendung unter Einbeziehung aller vier Technologiebereiche mit ihren unterschiedlichen Zeithorizonten besonders zu berücksichtigen ist.

Einhellige Expertenmeinung ist, dass eine einseitige Ausrichtung auf einen Technologiebereich die Chancen nicht ausreichend adressiert, die die Quantentechnologien in all ihren Facetten zukünftig bieten.

Das *Munich Quantum Valley* mit seiner gebündelten Expertise bietet hervorragende Ausgangsbedingungen für Forschungsaktivitäten im Bereich des Quantencomputings sowie zur Entwicklung eines zugehörigen Quantenökosystems. Flankierend kann eine Stärkung der Infrastruktur und Schwerpunktsetzung auf die industrielle Anwendung aller diskutierten Technologien zu Synergien zwischen den Technologien führen, Risiken minimieren und Interessensgruppen aller Quantentechnologien adressieren.

Die Orientierung der Forschung an wirtschaftlichen Bedarfen erhöht die Strahlkraft und Attraktivität des Wirtschaftsstandorts Bayern für Startups. Heimische Firmen finden Lösungen lokal und die Wertschöpfung bleibt im Land. Die Etablierung eines quantentechnologischen Ökosystems kann dadurch auf sich selbst verstärkende Effekte bauen.

Ziel soll es somit sein, über die Kommerzialisierung und Industrialisierung der Quantentechnologien in Bayern die damit einhergehende Wertschöpfung zu stimulieren, zu steigern und Bayern als attraktiven Standort für hochinnovative Quantentechnologien zu etablieren.

4.5 TECHNOLOGIEFÖRDERUNG

Auch im Bereich der Quantentechnologien zeigt sich ein klassisches Bild, wie es bei vielen Schlüsseltechnologien vorkommt und mit dem *Gartner-Hype-Cycle-Modell* beschrieben werden kann. So durchlaufen Technologien wie KI, additive Fertigung, Industrie 4.0 in diesem Modell nach einer anfänglichen Hype-Phase ein Tal der Enttäuschungen, eine Phase der Ernüchterung, der Konsolidierung und der intensiven Betrachtung und Abwägung von Risiken und Vorteilen der neuen Technologie für eine industrielle Anwendung.

Wenn dieses Tal der Enttäuschungen durchlaufen worden ist, folgt mit dem Plateau der Produktivität der Bereich wirtschaftlicher Rentabilität. Bezieht man dieses Modell auf das Beispiel des Quantencomputings im *Gartner Hype Cycle*, so liegt dieser Teil der Quantentechnologien hier im Bereich des Gipfels der überzogenen Erwartungen, also einer Technologie, die ein hohes Potenzial für zukünftige Anwendungen hat, aber auch das Tal der Enttäuschungen noch durchschreiten muss (vgl. **Abb. 3**).

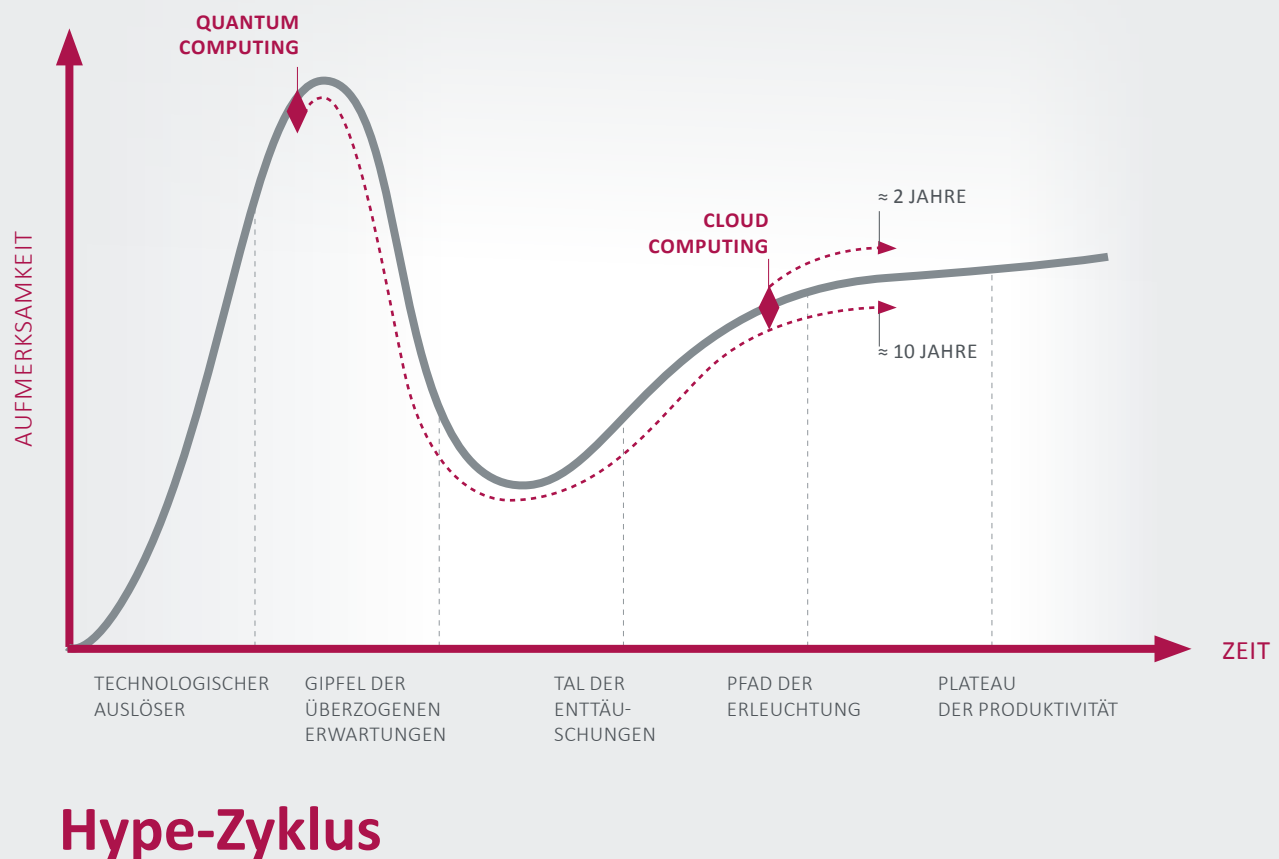


Abb. 3: Skizze Hype-Zyklus für Computer-Infrastruktur (inspiriert durch *Gartner Hype Cycle for Compute Infrastructure 2020* – Quelle: www.gartner.com/en/documents/3987268/hype-cycle-for-compute-infrastructure-2020).

Entlang einer solchen Technologieentwicklung, wie sie auch für die Quantentechnologien zu erwarten ist, werden (insbesondere im Tal der Enttäuschungen) finanziell unterstützende Maßnahmen benötigt, um Technologien aus dem Labormaßstab in marktreife Kleinserien zu bringen bzw. Hardware und Komponenten für die industrielle Anwendung marktwirtschaftlich anzubieten. Letztendlich sind auch die einzelnen Technologiefelder in zeitlich unterschiedlichen Horizonten zu sehen mit der Software und der Kommunikation eher im kurzfristigen, den industriestandardisierten Quantensensoren im mittelfristigen und dem universellen Quantencomputer eher im langfristigen Bereich.

Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass **ausgereifte bestehende Förderkonzepte** insbesondere die Forschungs- und Vorentwicklungsphase gut abdecken, aber in Zukunft auch den **Weg in die Industrialisierung oder Kommerzialisierung berücksichtigen sollten**. Hierzu sollten neue bzw. die Anpassung von bestehenden Konzepten ange-dacht werden.

Bezugnehmend auf die Empfehlungen der Roadmap Quantencomputing des Bundes, die die Umsetzung einer Strategie über Hubs und Kompetenznetzwerke mit dem Fokus auf Quantencomputer empfiehlt, sollten auch die anderen Felder der Quantentechnologien (Quantenkommunikation, Quantensoftware und Quantensensorik) in einer Förderstrategie berücksichtigt werden. So wird den unterschiedlichen Zeithorizonten der Technologien in Bezug auf eine industrielle Anwendung Rechnung getragen. Dadurch werden klassische Industrien, die bisher noch keine Berührungspunkte mit den Quantentechnologien haben, als Anwender frühzeitig in die Entwicklung relevanter Quantentechnologien eingebunden und ihren Bedarfen wird Rechnung getragen.

4.6 BEISPIELE FÜR HUBS UND KOMPETENZZENTREN/-NETZWERKE

Sowohl für den Aufbau eines Quantenökosystems als auch für den Schulterschluss der klassischen Industrie zu den Quantentechnologien lassen sich für Bayern folgende Möglichkeiten, u. a. in Kohärenz mit der Roadmap Quantencomputing des Bundes, skizzieren:

- **Quantentechnologie-Zentren, Hubs**

Aktuell diskutierte Hubs bzw. Forschungszentren zielen schwerpunktmäßig auf den Aufbau eines Quantencomputers sowie eines damit verbundenen Quantencomputer-Ökosystems ab. Für den Aufbau eines Ökosystems ist dieser Ansatz erforderlich und wichtig. Solche Forschungszentren werden beispielsweise über das *Munich Quantum Valley* abgebildet. **Hier sollen Forschungs- und Entwicklungsprojekte zum Quantencomputing inkl. des Aufbaus eines damit verbundenen Ökosystems umgesetzt werden. Weiterhin würden Zentren zur Quantenkommunikation den Anschluss Bayerns an europäische Initiativen bzw. deren Infrastrukturen unterstützen.**

- **Anwendungsorientierte Quantentechnologie-Kompetenznetzwerke**

Mit der Fokussierung auf die wirtschaftliche Wertschöpfung durch Quantentechnologien in Bayern sollen Anreize für Forschungs- und Entwicklungsprojekte, die Ansiedlung von Unternehmen oder die Gründung von Start-ups gegeben werden. Um das wirtschaftliche Potenzial der Quantentechnologien zu heben, könnte die Entwicklung von **anwendungsorientierten übergreifenden Quantentechnologie-Netzwerken** ein probates Mittel sein. Hierbei stehen die Anwendung der Technologien und das Zusammenspiel der unterschiedlichen Disziplinen im Hinblick auf die Entwicklung von Prototypen hin zu industriellen Anwendungen und Produkten im Fokus. Die Bedarfe der Unternehmen/Industrie sollen sich in den Aktivitäten der Netzwerke direkt widerspiegeln.

Unterstützt werden kann die Entwicklung durch eine vernetzende Transferstelle. Ihre Rolle als *face to the customer* kann die Lücke in der Adressierung dieser komplexen Schlüsseltechnologien an innovationsbereite Unternehmen schließen.

5.

5. Ergebnisse aus den Workshops zur Roadmap *QuantenTech Vision Bayern*

Um alle Aspekte der Quantentechnologien über unterschiedliche Detaillierungsgrade auszuleuchten, wurde das Thema über hierarchische *Layer* vorstrukturiert. Diese wurden in den Workshops systematisch diskutiert. Die Ergebnisse sind in den folgenden Kapiteln 5.1 bis 5.5 dargestellt.

5.1 TRENDS | TREIBER | BARRIEREN

Um die Trends, Treiber und Barrieren besser kategorisieren und somit zuordnen zu können, wurde die Einordnung nach PESTLE (politisch, wirtschaftlich, sozio-kulturell, technologisch, rechtlich, ökologisch) gewählt und in Ebenen, sog. *Layern und Sublayern*, abgebildet. Hierbei wurde der Rahmen für die jeweiligen Einflussfaktoren wie folgt gewählt:

- **Politisch** u. a. Außenpolitik, Handelspolitik, Steuerregelungen, Subventionen, politische Stabilität
- **Wirtschaftlich** u. a. Wirtschaftswachstum, Bildungsniveau, Handel, Steuersystem, Einkommen und Kaufkraft
- **Soziokulturell** u. a. Bildungsniveau, Werte, demografische Entwicklung, Lebensstil, Mobilität
- **Technologisch** u. a. Information, Kommunikation, Infrastruktur, Energieversorgung, Digitalisierung, Forschung
- **Rechtlich** u. a. Gesetzgebung, Wettbewerbsrecht (auch Schutzrechte), Umweltrecht, Kartellrecht, Steuerrecht, Arbeitsrecht, Rechtssystem, Produkthaftung
- **Ökologisch** Umweltauflagen, Emissionen, Klima, Verfügbarkeit von Rohstoffquellen, Verbrauch

Diese Definitionen wurden sowohl für die Recherche als auch für die Workshops und Diskussionen mit den Expertinnen und Experten genutzt und bildeten somit den Rahmen für den *Layer Trends | Treiber | Barrieren*. Bei der Analyse der erhaltenen Ergebnisse zeigt sich Folgendes:

• Politische Trends | Treiber | Barrieren

Die Aufgabe des Staates soll regulatorisch und fördernd in der Etablierung und dem Aufbau eines Ökosystems der Quantentechnologien sein, um die Technologiesouveränität Europas, Deutschlands und Bayerns zu gewährleisten, als auch kritische Kommunikationsinfrastrukturen abzusichern. Zugleich soll der Zugang zu den Quantentechnologien unabhängig von außenpolitischen Einflüssen gewährleistet sein.

Eine abgestimmte integrative Förderpolitik der bayerischen Staatsregierung kann wichtige Rahmenbedingungen für Start-ups setzen und den Technologietransfer zwischen Wissenschaft und Wirtschaft fördern. Die Nähe zur Anwendung schafft Bewusstsein und Bekenntnis für die Quantentechnologien in der Wertschöpfungskette (KMUs und Industrie).

• **Wirtschaftliche Trends | Treiber | Barrieren**

Aus wirtschaftlicher Sicht sind besonders *early adopters* dieser Technologien entscheidend. Die Modellierung und Umsetzung erster *use cases* sowie angewandter Zusammenarbeit zwischen Wirtschaft und Wissenschaft schaffen die Basis für ein erfolgreiches und zukunftssträchtiges Quantentechnologie-Ökosystem. Damit werden akute Bedürfnisse (z. B. sichere *end-to-end*-Kommunikation, Ausbildung und Sicherung von Fachkräften und die Lösung von Optimierungsproblemen) befriedigt, die die bayerische Wirtschaft auch in Zukunft wettbewerbsfähig halten sollen. Erste schnelle Lernfortschritte können beispielsweise durch anwendungsnahe Entwicklung von Software und Algorithmen erzielt und über die starken bayerischen Innovationsnetzwerke in die Wirtschaft zurückgespiegelt werden, bis sich vor allem beim Quantencomputer eine überlegene, skalierbare Technologie abzeichnet. Viele Unternehmen (kleine wie große) zeigen sich bei Investitionen (Finanzmittel und Fachpersonal) noch zurückhaltend, da die Komplexität der Quantentechnologien eine Einstiegshürde darstellt sowie deren Potenziale außerhalb dezidierter Expertenkreise wenig bekannt sind.

• **Sozio-kulturelle Trends | Treiber | Barrieren**

Sozio-kulturell überwiegt die Bedeutung der Ausbildung (traditionell stark in Bayern) und Sicherung von geeignetem Fachpersonal, um den immer komplexer werdenden gesellschaftlichen Herausforderungen (Energie, Ressourcen, Wirtschaftlichkeit) und Gefahren (Datensicherheit, Abwanderung von Talenten) gewachsen zu sein. Der breiten Bevölkerung sollen mögliche Vorbehalte gegenüber den Quantentechnologien genommen und es soll ein Bewusstsein für deren Potenzial geschaffen werden.

• **Technologische Trends | Treiber | Barrieren**

Grundlagenforschung sowie industrielle Forschung und Entwicklung sind klare Stärken der bayerischen Forschungslandschaft. Damit sind die Weichen gestellt, um die gewonnenen Erkenntnisse langfristig, sicher und erfolgreich zu vermarkten. Technologische Aspekte, wie z. B. die Qubit-Technologie, Einzelphotonenquellen, Verteilungs- und Managementsysteme von Quantenschlüsseln (QKD) oder das Konzept der Quantenfehlerkorrektur müssen teilweise von ersten Ideen über Prototypen bis zur Serienreife entwickelt und gefördert werden. Auch die Vernetzung von bestehender Software mit bereits existierenden Quantentechnologien und Synergien mit bestehenden starken

Expertisen in relevanten Quantencomputer-Technologien (z. B. Photonik, Ionenfallen, supraleitende Schaltkreise) spielt dabei eine entscheidende Rolle.

• **Rechtliche Trends | Treiber | Barrieren**

IP-Generierung und Schutz der Wertschöpfung: Aus rechtlicher Sicht sind die Generierung und der Schutz von geistigem Eigentum entscheidend für die zukünftige Entwicklung und Vermarktung dieser Technologien. Die Schaffung eines Patentportfolios sowie auch *open-source*-Initiativen auf bayerischer, deutscher und europäischer Ebene unterstützen eine Start-up-Kultur und verhindern Hürden im internationalen Wettbewerb. Die Standardisierung der Technologie und vor allem die Zertifizierung von Endgeräten sichern dabei rechtliche Kontrolle, allgemeine Akzeptanz und wirtschaftliche Potenziale.

• **Ökologische Trends | Treiber | Barrieren**

Treiber aus ökologischer Sicht sind die Verknappung von Ressourcen sowie vorausschauendes und nachhaltiges Energiemanagement, um die Herausforderungen durch den Klimawandel zu bewältigen. Quantensensoren versprechen beispielsweise genauere Bildgebungsverfahren zur Lagerstättenerkundung, Planung von Bauvorhaben oder die Katastrophenfrühwarnung. Simulationen verbessern Wettervorhersagen und ermöglichen effizientere Landwirtschaft.

In den Diskussionen zeigte sich, dass beispielsweise eine Barriere sehr schnell zu einem Treiber werden kann und umgekehrt. Eine trennscharfe Abgrenzung zwischen den Treibern, Trends oder Barrieren kann häufig nicht gezogen werden, weshalb auch keine Einteilung in die drei Kategorien in der Roadmap vorgenommen wurde.

Ausgehend von den Ergebnissen und Gewichtungen fasst die SWOT-Analyse (Stärken, Schwächen, Chancen und Risiken) in **Tab. 1** die Ausgangslage für die Trends | Treiber | Barrieren der Quantentechnologien mit einem Fokus auf die industrielle Anwendung zusammen. Hierbei ist anzumerken, dass gewisse Risiken – abhängig von ihrer Gewichtung – auch gleichzeitig Chancen bergen. Dazu sind in **Abb. 4** die drei jeweils höchstpriorisierten Themen in ihrem zeitlichen Kontext und in unterschiedlicher technologischer Detailtiefe stichpunktartig angegeben.

STÄRKEN

- Bayerische Spitzenforschung bietet starke Ausgangslage (Hochschulen, Fraunhofer-Gesellschaft, Max-Planck-Gesellschaft, Bayerische Akademie der Wissenschaften und weitere)
- Ausbildung durch Hochschulen, insbesondere über viele Disziplinen hinweg hervorragend (siehe Masterstudiengang *Quantum Science & Technology* i. R. d. Exzellenzclusters *Munich Center for Quantum Science and Technology* (MCQST) von LMU und TUM)
- Breite, überregionale Verteilung von Wissenschaft und Industrie/KMU fördert Verteilung von Fachkräften über ganz Bayern hinweg
- Industrie bietet Anwendungsfelder über alle Branchen hinweg
- Starkes finanzielles Bekenntnis des Freistaats
- Leistungsfähiges Start-up-Ökosystem → fruchtbarer Nährboden für Gründer in Bayern gegeben
- Ausgeprägte Aufmerksamkeit der Industrie im Bereich kommerzieller QKD-Managementsysteme

CHANCEN

- Nutzung eigener Technologien und gezielte Förderung: breit aufgestellte, heterogene Grundlagenforschung in Bayern schafft ideale Voraussetzung für Start-ups und Ausgründungen
- IP und Wertschöpfung durch frühzeitiges Engagement in der Entwicklung und Anwendung der Quantentechnologien generieren und schützen
- Know-how und Technologie sind Grundpfeiler der bayerischen Wirtschaft → Austausch über Netzwerke beflügelt Innovationen
- Wettrennen der besten Technologie noch nicht entschieden
- Bedarfe der Industrie/Anwender mit Forschung abgleichen → Detailtiefen angleichen / eine gemeinsame Sprache finden → Ideen entwickeln und Mut zum Wagnis fördern → gemeinsam lernen
- Regionale Nähe zwischen Anwendern und Umsetzern der Quantentechnologien stärker nutzen
- Automobilindustrie als *early adopter* von Quantentechnologien gibt Innovationsimpulse an Zulieferindustrie → Visionen teilen und Kommunikation fördern
- Globaler Wettbewerb als Beschleuniger für Innovationsbereitschaft bayerischer Unternehmen
- Einbindung der starken klassischen Industrie in Bayern durch branchenspezifische *use cases* der Quantentechnologien → applikationsnahe Forschung
- Viele bayerische *hidden champions* in hochspezialisierten Technologien mit Potenzial für Quantentechnologien (z. B. Automobilzulieferer, Messelektronik, Telekommunikation, Logistik, Automatisierung etc.)

SCHWÄCHEN

- *Big Player* sitzen derzeit außerhalb Europas
- Zurückhaltende Investitionen aus der Industrie
- Anknüpfungspunkte zwischen klassischer Industrie und quantentechnologischen Forschungsschwerpunkten nicht offensichtlich bedingt durch technische Komplexität der Quantentechnologie → *use cases* sichtbar und verständlich machen
- Stärkere Vernetzung der Interessengruppen wünschenswert

RISIKEN

- Technologiesouveränität Europas/Deutschlands/Bayerns durch Abhängigkeiten von ausländischen Firmen gefährdet → eigene Kompetenzen stärken
- Fokussierung auf eine einzelne Technologiesparte erzeugt Abwanderung von Fachpersonal, Start-ups und Expertinnen und Experten anderer Branchen
- Start-ups brauchen einen langen Atem für den Transfer vom Labor in den Markt → Überbrückung schaffende Fördermaßnahmen
- Skalierung von Technologien z. T. schwierig
- Fokus auf Grundlagenforschung = Industrie sucht ihre Lösungen dort, wo die entsprechende Dienstleistung angeboten wird → Abwanderung von jungen Talenten

Tab. 1: SWOT-Profil für Bayern für Trends | Treiber | Barrieren in den Quantentechnologien im Kontext industrieller Anwendung.

TRENDS | TREIBER | BARRIEREN –
PRIORISIERUNG | TRENDS | TREIBER

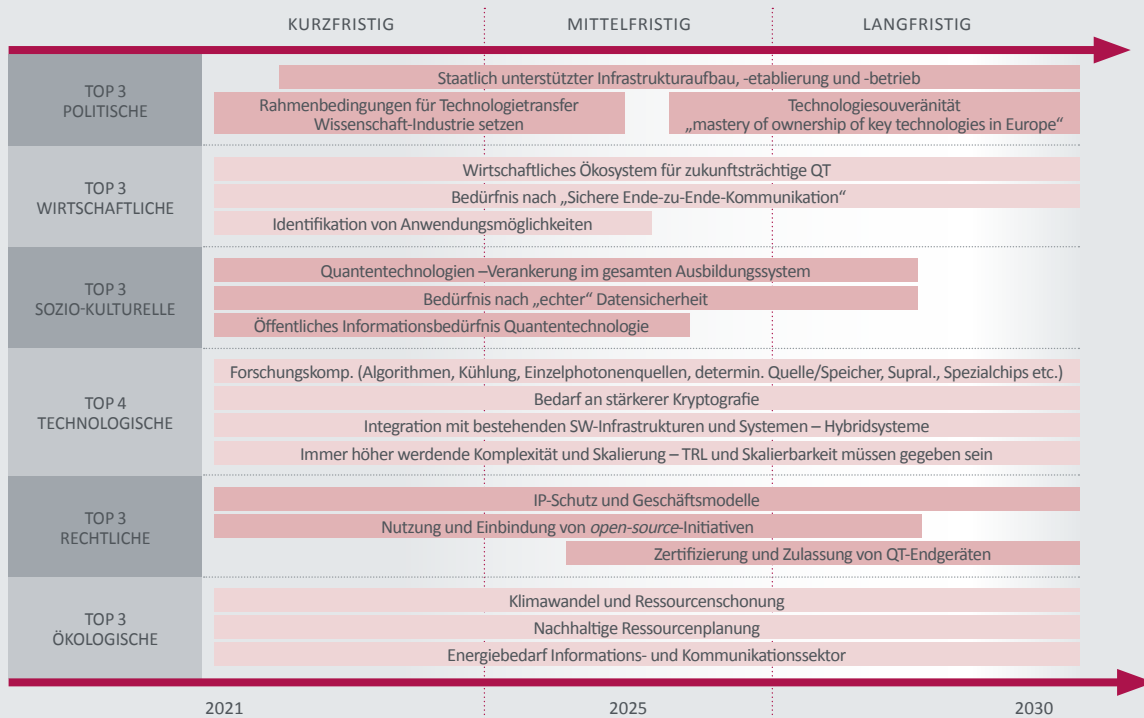


Abb. 4: Priorisierte Themen in ihrer zeitlichen Darstellung für Trends | Treiber | Barrieren in den Quantentechnologien im Kontext industrieller Anwendung; die Abbildung spiegelt konkrete Aussagen aus den Workshops wider, aus denen die Kernaussagen in Kapitel 5.1 abstrahiert wurden.

5.2 ANWENDUNGEN IN DEN INDUSTRIEBRANCHEN

Der *Layer Anwendungen* wurde in die *Sublayer*

- Mobilität
- Gesundheit
- Chemie/Material
- IT/Digitalisierung
- Banken/Versicherungen
- *Aerospace*
- Landwirtschaft
- *Cross Industry* (inklusive Produktion)
- Energie

eingeteilt. Diese Einteilung erfolgte im Hinblick auf die aus bayerischer Sicht wichtigen Branchen. In der Diskussion wurde deutlich, dass der *Sublayer Cross Industry* auch die Produktionsanwendungen beinhaltet, da diese branchenübergreifend sind. Folgende Punkte wurden von den Expertinnen und Experten hervorgehoben:

• Mobilität

Der Bereich Mobilität betrachtet Optimierungsprobleme, autonomes Fahren, genaue Positionsbestimmung und sichere Kommunikation. Dabei spielen unter anderem Prozessoptimierungen, Logistik, Fahrplan- und Verkehrsflussoptimierung sowie Konzepte zum *ridesharing* eine Rolle. Die Entwicklung von miniaturisierten, kostengünstigen optischen Uhren verspricht eine millimetergenaue Positionsbestimmung und schafft in Kombination mit hochgenauen Quantensensoren den nächsten Schritt hin zum autonomen Fahren. Schnelle und sichere Kommunikation von Fahrzeugen untereinander und mit einem zentralen *Backbone* ermöglicht eine sichere Authentifizierung und optimiertes *Routing*.

• Gesundheit

Im Gesundheitssektor wird große Hoffnung auf neue Diagnostik und Bildgebungsverfahren, die sichere Übertragung und Speicherung sowie algorithmusbasierte Auswertung (z. B. *Machine Learning* und KI) von Patientendaten sowie die Entwicklung, Modellierung und Synthese von neuen Medikamenten gelegt. Dabei ermöglichen Quantensensoren und -verfahren genauere Bild-Auflösungen und schonendere Diagnostik. So kann die Detektion kleinster Ströme im Gehirn Aufschlüsse über Krankheiten und neue Behandlungsmethoden geben. Die Simulation von Krankheitserregern und Medikamenten auf molekularer

Ebene könnte präklinische Studien deutlich verkürzen. Außerdem könnte das Gesundheitswesen aufgrund des hohen Sicherheitsbedarfs von Patientendaten einer der ersten Anwender von QKD sein, was bereits in ersten europäischen Projekten demonstriert wird.

• Chemie/Material

In der Chemie und Materialentwicklung spielen Quantensensoren, -computer und -simulatoren zukünftig eine wichtige Rolle. Zum Beispiel können Spektroskopie- und Imagingverfahren zusammen mit Simulationen die Batterieentwicklung entscheidend beschleunigen – eine der grundlegenden Herausforderungen der Elektromobilität wird damit angegangen.

• IT/Digitalisierung

Die Diskussionen im Bereich IT/Digitalisierung werden dominiert von Fragen zu Kryptografie und *Cybersecurity*. Nicht nur die abhörsichere Verschlüsselung von Kommunikation, sondern auch die Absicherung existierender schutzwürdiger Informationen vor der Entschlüsselung durch einen Quantencomputer (Shor-Algorithmus und neuartige Algorithmen) beschäftigen Expertinnen und Experten, Regierungen und die Wirtschaft. Technologische Entwicklungen von Komponenten (Quantenrepeater, *trusted nodes*, Freistrahilverbindungen), aber auch Software und Managementsysteme zur Verteilung von Schlüsseln (QKD) bilden die nächsten Schritte hin zu quantenresistenter (Post-Quanten) sowie quantenbasierter Kryptografie und Telekommunikation. Dabei sind eine Standardisierung und Zertifizierung der Geräte und Verfahren nötig. Bei der Optimierung komplexer Systeme werden Quantencomputer zukünftig eine entscheidende Rolle spielen.

• Banken/Versicherung

Im Finanz- und Versicherungssektor werden Themen wie Kryptografie, Portfoliooptimierung und Risikominimierung diskutiert. Ebenso wie bei der Kommunikation werden die Anwendung und der Nutzen der Quantentechnologien vom frühen Stadium der Rechner und von der beschränkten Einsatzfähigkeit der Quantenkryptografie limitiert. Echtzeit-Trading und die sichere Kommunikation lassen Banken und Finanzinstitute auf technologische Fortschritte in der System- und Komponentenentwicklung hoffen.

- **Aerospace**

Vorteile durch Optimierung, Technologie- und Komponentenentwicklung, Simulation/Modellierung und Kryptografie bieten die Quantentechnologien auch im Bereich *Aerospace*. Mathematisch hochkomplexe Strömungsanalysen könnten in Zukunft schneller gelöst oder Flugrouten und *Gate*-Zuweisungen effizienter geplant werden. Die Entwicklung von Technologien (QKD über lange Strecken, Satelliten, Flugzeuge) geht oft mit der Entwicklung von Komponenten (Quantenrepeatern, verlustarmen/-freien Schnittstellen und Konvertern oder auch Einzelphotonenquellen und -detektoren) einher. Solche neuen Möglichkeiten im zivilen Flugverkehr, aber auch das Anwendungspotenzial in der Verteidigung (z. B. Quantenradar) gilt es zu bedenken.

- **Landwirtschaft**

Durch genauere Simulation von Wetterdaten und Frühwarnsysteme auf quantentechnologischer Grundlage kann die Landwirtschaft effizienter und widerstandsfähiger gegenüber dem Klimawandel und Naturkatastrophen gemacht werden. Autonomes Fahren und Optimierungsprozesse helfen beim *smart farming*. Quantensensoren können langfristig bei der Herkunfts- und Qualitätskontrolle von Lebensmitteln helfen. Die Quantenchemie lässt auf enormes Einsparungspotenzial durch effizientere Katalysatoren zur Düngerproduktion hoffen.

- **Cross Industry (inklusive Produktion)**

In der produzierenden Industrie (u. a. Maschinen- und Anlagenbau, Robotik, Automatisierungstechnologien) werden Fragen zur Optimierung, Modellierung, Simulation (klassisch, analog oder digital) und Kryptografie diskutiert. Großes Potenzial wird in der Entwicklung von Algorithmen zur Optimierung (Industrie 4.0) und der Etablierung sicherer, quantenresistenter (Post-Quanten) Kommunikation gesehen. Im Fokus steht auch hier die Entwicklung von Komponenten (z. B. das Konzept des Quantenrepeaters) und Technologien (z. B. Messtechnik, Mikroskopie, Simulation komplexer Systeme, Kommunikation). Einen Teil der Industrie bilden Zulieferketten für die Quantentechnologien (z. B. Kryotechnik, Laser und optische Komponenten, Elektronik, Signalverarbeitung, Messtechnik), aber auch Dienstleister (Simulation komplexer Problemstellungen), welche zuerst und direkt von Investitionen in die Quantentechnologien profitieren werden. Durch die Innovationskraft dieser Unternehmen werden technologische Hürden

zur Machbarkeit und Skalierbarkeit von Lösungen überwunden. Ihre zentralen Aufgaben sind die Identifikation von industriellen Bedarfen und die Überführung ihrer Lösungen vom Labormaßstab in die Industrie. Ihr Bedarf an hoch spezialisierten Fachkräften und Experten ist bereits hoch und wird in Zukunft weiter wachsen.

- **Energie**

Im Bereich Energie könnten die Quantentechnologien in der Optimierung der Versorgung und der sicheren Ansteuerung/Kontrolle kritischer Komponenten einen Nutzen bieten. Durch die Simulation komplexer Prozesse (z. B. Alterung) könnten in den Materialwissenschaften (z. B. Batteriezellenentwicklung) schnelle Fortschritte erzielt werden. Energieversorger werden als erste Anwender von QKD gehandelt, um diese kritische Infrastruktur vor unbefugtem Zugriff zu schützen.

Generell könnten Innovationen in Zukunft durch den Einsatz von Quantencomputern zusätzlich beschleunigt werden. Bis Quantencomputer mit ausreichender Anzahl und Qualität von Qubits in Form eines universellen Quantencomputers eine Quantenüberlegenheit für den Nutzer ermöglichen, wird als Brückentechnologie u. a. auch auf die Kombination unterschiedlicher Technologien gesetzt. Im Detail bestehen große Erwartungen an die Entwicklung von geeigneten Schnittstellen zwischen Photonen- und Mikrowellensystemen, welche die Verbindung von Quantencomputern unterschiedlicher Kerntechnologien und damit hybride Rechneransätze ermöglichen können.

Tab. 2 zeigt die SWOT-Analyse für den *Layer* Anwendungen bezogen auf Bayern.

Abb. 5 zeigt eine zeitliche Prognose für die drei jeweils am höchsten bewerteten Themen in den Unterkategorien.

STÄRKEN

- Automobil- und Zulieferindustrie, Maschinenbau, Produktion und Mobilität
- Versicherungs- und Finanzbranche als Beispiel für frühe wirtschaftliche Nutzer des Quantencomputings (schneller Nutzen hinsichtlich Investment-Portfolio-Optimierung, Risikominimierung)
- Führende Akteure in der Medizintechnik (relevant hinsichtlich Besetzung von Patenträumen)
- Landwirtschaft (in Bayern stark vertreten); als potenzieller Nutzer von quantentechnologischen Anwendungen
- Wachsende Märkte für starke bayerische Akteure in der Zulieferkette für Quantentechnologien (Lasertechnik, Kryotechnik, Elektronik)
- Aerospace- und Zulieferketten: führende Hersteller von Geräten für sichere Kommunikation in Flug- und Satellitentechnologien
- Technologie für Energieversorger ansässig in Bayern (alle Quantentechnologien)

SCHWÄCHEN

- Zurückhaltende Investitionsbereitschaft durch Coronakrise
- Unklares Bild über erste profitable Anwendungsszenarien

CHANCEN

- Luft- und Raumfahrt, Automobil und deren Zulieferer profitieren von neuen technologischen Entwicklungen
- Hohe Innovationsbereitschaft in Bayern in der Flugzeugindustrie
- Versicherungswesen in Bayern stark vertreten → Ansiedlung von Beratungs- und Softwareunternehmen als Mittler zu Quantentechnologien
- Heterogene Branchenstruktur in Bayern eröffnet vielseitige Anwendungspotenziale

RISIKEN

- Nutzer lassen ihre Probleme außerhalb Bayerns lösen → Abwanderung
- Abschätzung des Marktpotenzials und der benötigten Stückzahlen von Quantencomputern schwierig

Tab. 2: SWOT-Profil für industrielle Anwendungen der Quantentechnologien in Bayern.

ANWENDUNGEN – PRIORISIERUNG

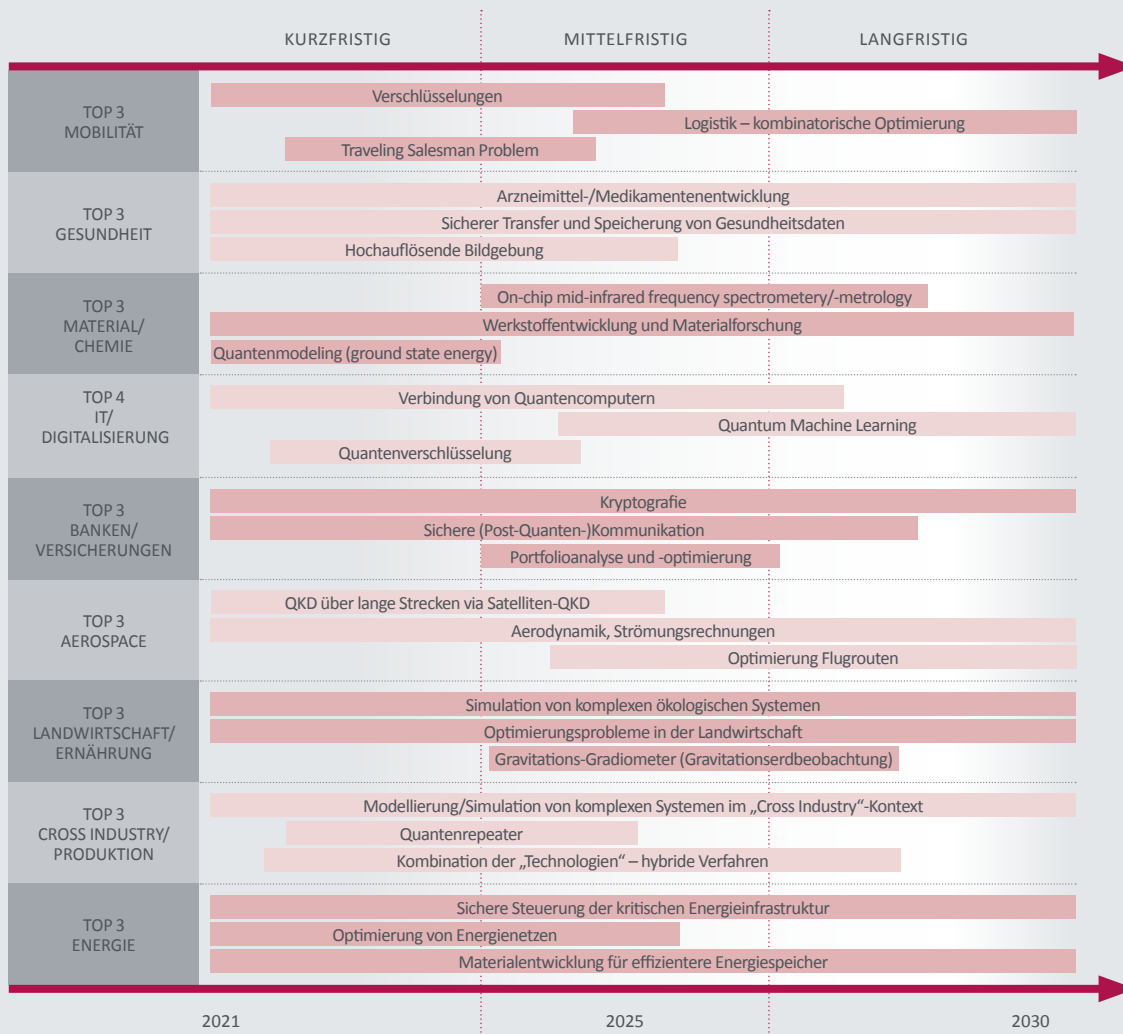


Abb. 5: Die jeweils am höchsten bewerteten Themen im Bereich der industriellen Anwendung in ihrem zeitlichen Kontext. Die Abbildung spiegelt konkrete Aussagen aus den Workshops wider, woraus die Kernaussagen in Kap. 5.2. „Anwendungen in den Industriebranchen“ abstrahiert wurden.

5.3 VOM WISSEN ZUR ANWENDUNG

Neben der Kommerzialisierung der Quantentechnologien ist die Aus- und Weiterbildung in und für Wissenschaft und Unternehmen essenziell. Dazu werden die verschiedenen Themenschwerpunkte von der Grundlagenforschung bis zum Markt beleuchtet. Der *Layer* Wissen/Anwendung, der wiederum in die *Sublayer* Grundlagen, Angewandte Forschung, Prototypen, Start-ups/Ausgründungen, Industrie sowie weitere Disziplinen unterteilt wurde, bildet die Ergebnisse aus den Workshops ab.

• Grundlagenforschung und Ausbildung

Bei der Grundlagenforschung zu den Quantentechnologien wurde die Ausbildung einer *quantum work force* mit interdisziplinärer Ausbildung an Hochschulen in den MINT-Fächern mit neuen Professuren zu Quantentechnologien am höchsten bewertet. Die Forschung in Bayern ist exzellent; aus diesem Grund sollte ihr Stellenwert, auch in der internationalen Wahrnehmung, noch stärker hervorgehoben werden. Neben der Ausbildung wurden technologische Schwerpunkte wie die Schnittstelle von Optik zu Mikrowellensystemen genannt, da hybride Quantensysteme in naher Zukunft als Erfolg versprechende Lösung erscheinen. Ferner wurden die Entwicklung, Verbesserung und Miniaturisierung von Komponenten wie Einzelphotonenquellen und -detektoren, Quantenrepeatern und effizienten Quantenspeichern (inklusive nötiger Materialforschung) genannt, da diese wichtige Zwischenschritte auf dem Weg zur Vernetzung von Quantencomputern in einem *quantum local area network* (QLAN) sind. Vor allem aufseiten der Software gibt es Forschungsbedarf, z. B. im Bereich der Entwicklungen robuster Mehrbenutzer-Datenübertragungsprotokolle ergänzend zu *quantum key distribution* (QKD) sowie plattformunabhängige Softwarelösungen und Quantenalgorithmen.

• Angewandte Forschung

Aus der Grundlagenforschung leiten sich Ziele für die angewandte Forschung ab. Besonders für die quantenbasierte Kommunikation und Kryptografie ist die Entwicklung effizienterer Quantenspeicher, Quantenrepeater, hocheffektiver Einzelphotonenquellen und -detektoren sowie Schnittstellen zwischen Optik und Mikrowellen für anwendungsbezogene Applikationen unabdingbar. Ebenso in der Entwicklung von Quantenheuristiken, -algorithmen und -softwareentwicklung sollte die Anwendungsnähe stets im Fokus liegen. Dazu ist eine effiziente Kommunikation entlang der Wertschöpfungs-

ungskette essenziell, die beispielsweise industrienahe Forschungsinstitute zur Industrialisierung der Quantentechnologien begleiten und vorantreiben können.

• Prototypen:

Maßgeblich für den Transfer der Quantentechnologien aus dem akademischen Bereich in die Industrie sind Prototypen und Demonstratoren. Durch ihre Entwicklung (u. a. auch im Quantencomputing) werden modulare Technologieschritte (Konzept des Quantenrepeaters, Einzelphotonenquellen und -detektoren, optische Uhren etc.) ausgekoppelt und vermarktet. Beispielsweise unterstützen im Bereich Quantencomputing und -software neue bzw. alternative Programmiersprachen und Softwarebibliotheken die frühe Einbindung von Nutzern und ermöglichen so neue wirtschaftliche Potenziale (z. B. Start-ups spezialisiert auf Beratung und Entwicklung von Algorithmen für Finanzsektor).

• Start-ups | Ausgründungen

Großes Potenzial wird bei Start-ups im Bereich der Quantensoftware gesehen, die beratend und mit eigener Software zwischen Herstellern von Quantencomputer-Hardware und Anwendern vermitteln können.

Aber auch im Bereich der Hardware sind in Bayern bereits relevante hoch spezialisierte Akteure etabliert, die mit Kryotechnik, Lasertechnik etc. auf dem Markt vertreten sind.

In den Technologiebereichen Freistrahlkommunikation, Einzelphotonenquellen und -detektoren, Verschlüsselung und der Kontrollhardware/-software wurde Potenzial für weitere Start-ups identifiziert. Durch die technischen Fortschritte in der Entwicklung von QKD sind bereits erste vielversprechende Start-ups am Markt. Gemeinsame Geschäftsmodelle der unterschiedlichen Technologiekompetenzen erleichtern das Einwerben von *Venture Capital* (VC), das gerade bei teurer, hardwarelastiger Spezialisierung unabdingbar ist. Als wichtigste Aufgaben des Staates werden hierbei die Förderung und das Bereitstellen von Inkubatoren gesehen.

• **Industrie**

Um die Industrie in Bayern in der Entwicklung der Quantentechnologien mit einzubeziehen, muss – vom Konzern bis zum KMU – ein grundsätzlich breiteres Bewusstsein hierfür geschaffen, Akteure und Interessierte müssen vernetzt sowie Expertenwissen und Fachpersonal aufgebaut werden. Anreize dafür könnten staatliche Investitionen in Prototypen, *early adopters* oder die Initiierung von Pilotprojekten zwischen Industrie und Forschung sein, welche die Bedarfe der Wirtschaft adressieren und Schnittstellen zwischen Forschung und Industrie bilden. Plattformunabhängige Softwareentwicklung mit niederschwelligem Zugang zu existierender Hardware zur Lösung anwendungsnaher Problemstellungen bewirkt schon heute industrielles Engagement in diesem Thema. Daneben ist bei Quantensensoren die Etablierung von industriellen

Lieferketten wichtig. Die Standardisierung und Zertifizierung bei Integration und Auswahl muss sichergestellt werden, was besonders bei Weltraumanwendungen maßgeblich ist.

Fördertechnische Impulse für die Reifung der *Enabling*-Technologien werden als eine zentrale Herausforderung gesehen. Die Initiierung und Entwicklung marktreifer Komponenten birgt Lerneffekte, die in andere Branchen übertragen werden können. Dies zeigt sich am Beispiel der Entwicklung von Komponenten und Systemen, die für die Raumfahrt entwickelt werden und als kostengünstigeres Derivat in anderen Bereichen (z. B. Automobilindustrie) Anwendung finden. Die SWOT-Analyse ist in **Tab. 3** und die priorisierten Themen in ihrem zeitlichen Kontext sind in **Abb. 6** dargestellt.

STÄRKEN	<ul style="list-style-type: none"> • Starkes finanzielles und politisches Bekenntnis gibt eine klare Richtung vor • Bayerische Universitäten (LMU, TUM, FAU Erlangen-Nürnberg, Univ. Würzburg, Univ. Regensburg u. a.) und Forschungsinstitute (WMI, MPG, FHG) weltweit führend in der Grundlagenforschung 	SCHWÄCHEN
CHANCEN	<ul style="list-style-type: none"> • <i>Push</i> einer Hardware-Start-up-Kultur mit Zugang zu Spezialequipment, Reinräumen etc. • Finanzielle Anreize für <i>early adopters</i> wecken industrielles Interesse • Interdisziplinäre Ausbildung der <i>quantum work force</i> in den MINT-Fächern • Softwareplattformen zur Problemübersetzung nötig. Starke Quanten-Softwareentwicklung in Bayern (u. a. Automobilbranche) • Kommunikation entlang der Wertschöpfungskette und Einbindung von Anwendern in die Forschung • Attraktiver Standort für Fachkräfte bleiben und ausländische Experten anziehen 	RISIKEN
	<ul style="list-style-type: none"> • Ohne Prototypen kein klarer Vorteil für Industrie ersichtlich → verhaltenes Interesse 	
	<ul style="list-style-type: none"> • Finanzierung und fehlende Risikobereitschaft bremst Ausgründungen • Fehlende anwendungsorientierte Schwerpunktsetzung begünstigt die Suche nach industriellen Lösungen außerhalb Bayerns 	

Tab. 3: SWOT-Profil für Bayern für Wissen und Anwendung im Kontext industrieller Anwendung.

WISSEN UND ANWENDUNG – PRIORISIERUNG

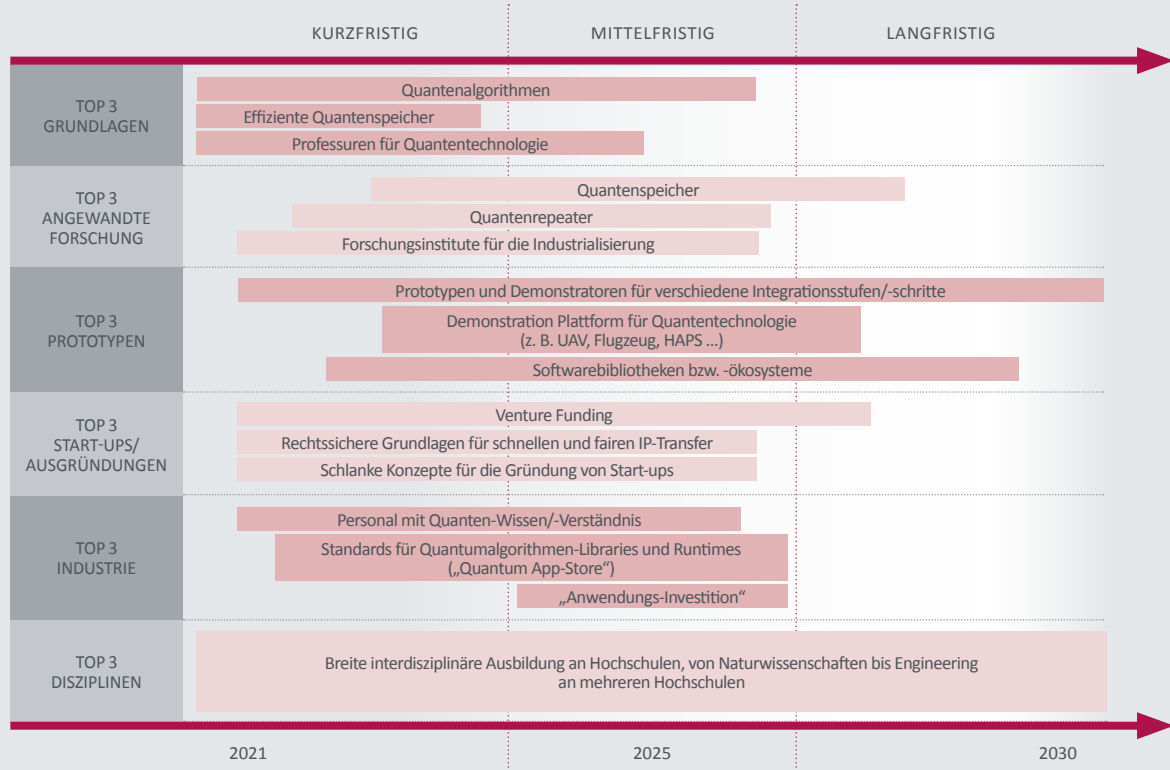


Abb. 6: Darstellung der priorisierten Themen im Feld Wissen und Anwendung in ihrem zeitlichen Kontext. Die Abbildung spiegelt konkrete Aussagen aus den Workshops wider, woraus die Kernaussagen in Kapitel 5.3 abstrahiert wurden.

5.4 INFRASTRUKTUR I RESSOURCEN

Der letzte *Layer* Infrastruktur I Ressourcen bildet die benötigte Unterstützung für die Industrialisierung der Quantentechnologien im Sinne eines Ökosystems ab. Hierbei wurden für die Fokussierung und Einordnung die *Sublayer* Regierung, Partnerschaften I Netzwerke I Technologietransfer, Infrastruktur, Finanzierung I Förderung sowie Öffentlichkeitsarbeit gebildet. Aus den Ergebnissen und der Analyse wurden folgende wichtige Themen identifiziert:

• Staatsregierung

Als wichtig wurden die Ausrichtung der Förderstrategie, Ausbildung, Standardisierung und Zertifizierung genannt. Hierbei soll die Förderung interdisziplinäre, innovative und branchenübergreifende Aspekte berücksichtigen. Auch im Bereich der Aus- und Weiterbildung sollte ein interdisziplinärer und branchenübergreifender Ansatz gewählt werden. Die Schwerpunktsetzung der Staatsregierung im Bereich Quantentechnologien wird von allen Expertinnen und Experten ausdrücklich begrüßt. Es ist wichtig, unterschiedliche synergetische Expertisen in anwendungsnahen Technologiezentren zu bündeln und mit geeigneten Maßnahmen bei der Generierung und dem Transfer von geistigem Eigentum (*Intellectual Property*, IP) zu unterstützen.

• Partnerschaften I Netzwerke I Technologietransfer

Im Kontext der Partnerschaften I Netzwerke I Technologietransfer sind sich die Experten einig, dass die Etablierung eines technologieübergreifenden Anwendernetzwerks und Ökosystems „Quantentechnologie Bayern“ unter Einbeziehung aller Akteure zielführend sein könnte. Dies sollte auch die Unterstützung bei der Generierung von IP beinhalten und damit die Forschung mit Gründern und Industrie verknüpfen.

• Infrastruktur

Im Bereich Infrastruktur werden Quantentechnologiezentren priorisiert, die den Prozess des Wissenstransfers von Forschung in Start-ups, KMUs und Großindustrie mit Zugang zu Testlaboren (z. B. mit verschiedenen Quantencomputer-Typen), *Prototyping* und Fabrikationslinien unterstützen. Außerdem sollen Qualifizierungslabore langfristig (> 10 Jahre) Standardisierung und Zertifizierung unterstützen. Der Aufbau eines Netz-

werks für sichere Kommunikation muss frühzeitig begonnen werden, um der Industrie den notwendigen Aktionsbereich zu geben und die Anbindung an die *European Quantum Communication Infrastructure* (EuroQCI) zu beschleunigen.

• Finanzierung I Förderung

Ein wichtiger Aspekt aus Sicht der Expertinnen und Experten ist, dass bei der Förderung und Finanzierung Synergien mit Förderprogrammen der Europäischen Union (EU) und des Bundes genutzt und kommuniziert werden. Des Weiteren sollten fördertechnische Instrumente gestärkt werden, die eine Start-up-Kultur im Kontext der Quantentechnologien begünstigen.

Mehrfach genannt wurde eine Bereitstellung von Förderkonzepten, die einer Kommerzialisierung der Quantentechnologien gezielt Vorschub leisten, z. B. risikoadaptive Förderprogramme, die eine Staffelung der Förderquoten in Abhängigkeit vom Entwicklungsstatus (Grundlage, Prototyp, Anwendung) zulässt.

• Öffentlichkeitsarbeit

Wie bei vielen Schlüsseltechnologien sind eine breite Akzeptanz in der Bevölkerung einerseits und eine Schaffung von *Awareness* seitens der Industrie als Nutzer andererseits unabdingbar. Öffentlichkeitsarbeit ist ein möglicher Weg, um das Thema mit entsprechender technologischer Detailtiefe einem breiten Zielpublikum vorzustellen.

Für Anwender müssen Chancen und Nutzen dieser disruptiven Technologie verständlich erklärt, Erwartungen professionell eingeordnet und Gefahren und Risiken neutral aufgezeigt werden. Um den Akteuren der klassischen Industrien das nötige Verständnis für den Nutzen der Quantentechnologien für ihr Spezialisierungsfeld zu vermitteln, sollte früh die Begeisterung für Quantentechnologien in MINT-Studiengängen gefördert werden und Kindern und Jugendlichen – der nächsten Generation von Anwendern – das Thema verständlich nähergebracht werden. Außerdem sollen Qualifizierungs- und Weiterbildungsangebote entlang der Wertschöpfungskette etabliert werden.

Tab. 4 zeigt die SWOT-Tabelle für den *Layer* Infrastruktur und Ressourcen bezogen auf Bayern und in Abb. 7 die jeweils drei höchstbewerteten Themen in den *Sublayern* in ihrem zeitlichen Kontext.

STÄRKEN	<ul style="list-style-type: none"> • Spitzenforschung und Expertise vor allem im Bereich Mikroelektronik und Optik/Photonik • Starke Industriepartner (z. B. BMW, Airbus, Infineon, Intel) 	<ul style="list-style-type: none"> • Bislang zurückhaltendes Engagement aus der klassischen Anwenderindustrie 	SCHWÄCHEN
CHANCEN	<ul style="list-style-type: none"> • Synergien in der Förderung zwischen Land, Bund und EU • Frühe Einbindung bayerischer KMUs durch Schaffung von Awareness • Applikationsnahe Forschung • Öffentlichkeitsarbeit schafft Begeisterung für diese Schlüsseltechnologie und fördert <i>quantum work force</i> • Mitwirkung bei Standardisierung und Zertifizierung der Technologien und Komponenten auf Bundesebene • Durch attraktive, innovative Förderinstrumente Firmengründungen und -ansiedlungen forcieren • Forschungsförderung mit Anwendungsbezug schafft wirtschaftliche Potenziale • Leuchtturmprojekte und breit angelegte Quantentechnologie-Projekte • Anwendernetzwerk und Ökosystem könnten Umsetzungen in der Industrie beschleunigen 	<ul style="list-style-type: none"> • Technologische Umsetzungsmöglichkeiten werden kurzfristig überschätzt → Tal der Enttäuschung • Ergebnisse und <i>Return on Investment</i> bleiben hinter Erwartungen zurück 	RISIKEN

Tab. 4: SWOT-Profil für Bayern für Infrastruktur und Ressourcen im Kontext industrieller Anwendung.

INFRASTRUKTUR UND RESSOURCEN – PRIORISIERUNG

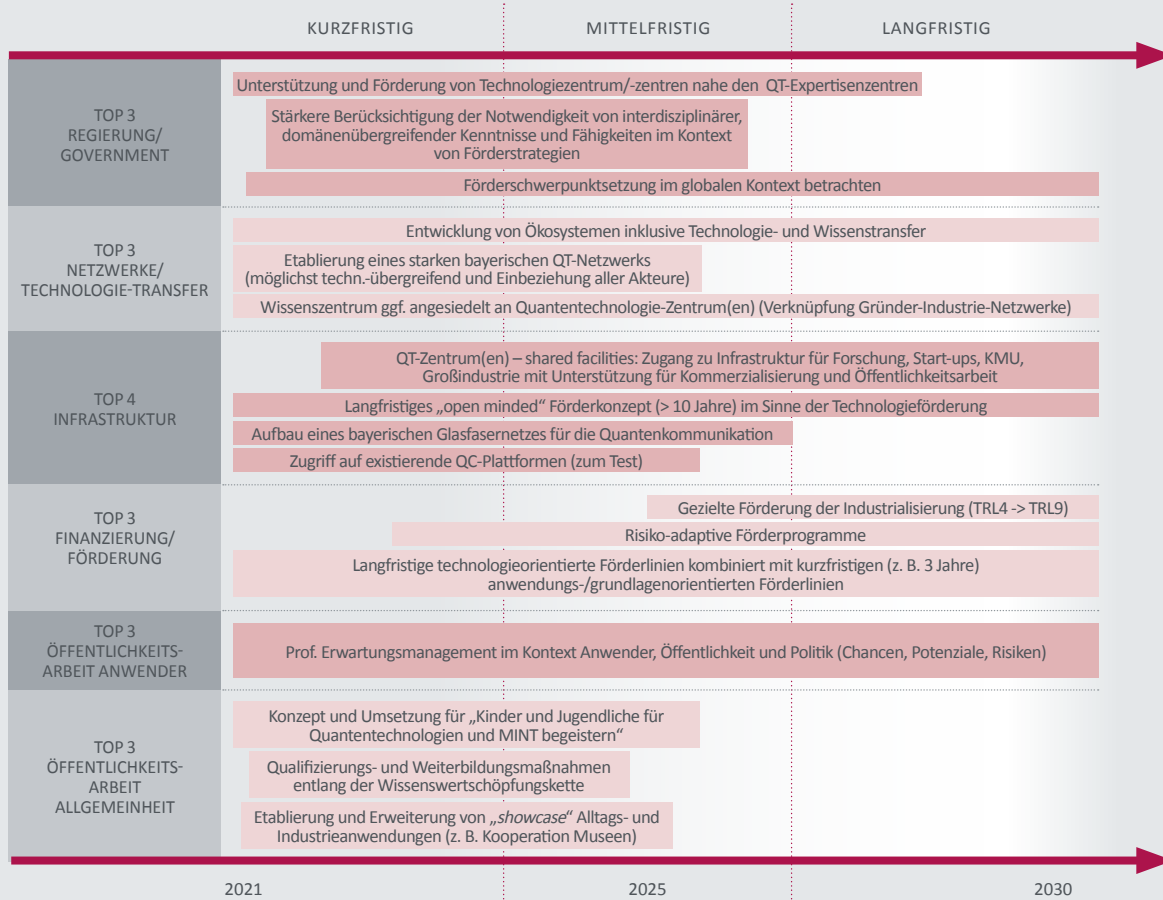


Abb. 7: Die am höchsten bewerteten Themen aus dem *Layer* Infrastruktur und Ressourcen in ihrer zeitlichen Relevanz. Die Abbildung spiegelt konkrete Aussagen aus den Workshops wider, woraus die Kernaussagen dieses Kapitels abstrahiert wurden.

5.5 QUANTENTECHNOLOGIEN

Im *Layer* Quantentechnologien sind die vier Schlüsseltechnologien

- Simulation I Computing
- Sensorik I Metrologie
- Software I Algorithmen
- Kommunikation

abgebildet. Die Kategorisierung erfolgte auch vor dem Hintergrund, dass diese unterschiedlichen Technologiebereiche unterschiedliche Zeithorizonte in Bezug auf ihren Technologiereifegrad sowie auf eine industrielle Anwendung haben. Zudem ist jede dieser Technologien relevant für die Weiterentwicklung des gesamten Spektrums der Quantentechnologien und für den erfolgreichen Aufbau eines bayerischen Ökosystems für Quantentechnologien.

Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse aus dem Prozess dargelegt:

• Simulation I Computing

Im Bereich Simulation und Computing lassen sich systemseitig die *Enabling*-Technologien in die Entwicklung von Qubits, die Verbindung unterschiedlicher technologischer Ansätze zu hybriden Quantensystemen, Software und Algorithmen-Entwicklung, Benchmarking und Zertifizierung gliedern. Der Fokus in der Qubit-Entwicklung liegt auf Skalierbarkeit, der Kombination vielversprechender Technologien (z. B. supraleitende Qubits, Qubits aus Halbleitern und Photonen) und der Herabsetzung ihrer Störanfälligkeit (rauscharm und fehlerkorrigiert). Um komplexe Quantenberechnungen zu ermöglichen, bedarf es Quantenfehlerkorrekturverfahren, die mehrere (physikalische) Qubits verwenden, um zuverlässige (logische) Qubits zu erzeugen. Einige Technologien zeigen bereits anwendungsspezifische Vorteile (siehe Quanten-Annealer/Digital Annealer für Optimierungsprobleme mit vielen Variablen) gegenüber klassischen Rechnern. Ein system-integrativer, hybrider Ansatz als Brückenlösung wäre kurz- bis mittelfristig zu evaluieren. Langfristig sorgt der Bau eines eigenen (bayerischen) Quantencomputers für den unabhängigen Zugang und für eine Weiterentwicklung der erforderlichen Technologien. Kurzfristig gelingt der Nachweis des

Quantenvorteils für die Industrie nur über praxisnahe Anwendungen (z. B. Problemstellungen zur Optimierung), welche durch geeignete Algorithmen für die Berechnung auf einem Quantencomputer übersetzt werden. Dabei erfordern sowohl die Systemintegration von Software, Middleware und Hardware als auch die Auswahl der am besten geeigneten Technologieplattform, die Auswertung und Zertifizierung der Ergebnisse entsprechende Kompetenzen und Fachwissen.

Die für das Gesamtsystem erforderlichen Komponenten lassen sich in Vakuum- und Kühltechnik, Elektronik und Schnittstellen, Optik und Photonik und die Entwicklung von Materialien und Qubits unterteilen. Die Entwicklung anwendungsspezifischer (miniaturisierter und skalierbarer) Kühl- und Vakuumtechnik geht mit der Entwicklung von rauscharmer, nicht dissipativer, kryotechnischer, elektronischer und signalführender Infrastruktur und Verarbeitung einher. Für die Vernetzung von Quantencomputern unterschiedlicher Technologien (z. B. Photonen, Ionenfallen oder supraleitende Qubits) müssen geeignete Schnittstellen entwickelt werden.

Tab. 5 zeigt die SWOT-Tabelle für die Schlüsseltechnologien Simulation I Computing bezogen auf Bayern und Abb. 8 die jeweils drei wichtigsten Bereiche in den *Sublayern* in ihrem zeitlichen Kontext.

STÄRKEN

- Starkes Interesse bayerischer Autohersteller, sowie Medizintechnik und Luft- & Raumfahrt an der Anwendung
- Spitzenforschungsgruppen mit internationaler Ausrichtung in vielen Technologiebereichen
- International sichtbare Grundlagenforschung in diversen Quantentechnologien
- Hoch spezialisierte KMU
- Breites Spektrum an Branchen, die Quantencomputer nutzen könnten
- Gute finanzielle und sichere politische Rahmenbedingungen der bayerischen Wirtschaft; attraktiv für Zuwanderung von Experten
- Vielversprechende Start-ups und Niederlassung bereits etablierter internationaler Akteure

CHANCEN

- Quantencomputer-Hardware-Ausgründungen aus Labormaßstab durch Kompetenzen gegeben → Bau eines eigenen skalierbaren Quantencomputers
- Halbleiterindustrie in Bayern bereits ansässig → ideale Startbedingungen durch Expertise, Produktions- und Testumgebungen für Qubit-Herstellung in Bayern
- Breiten Zugang zu Quantencomputer-Plattformen bieten
- Forcierung von Entwicklungskooperationen mit potenziellen Anwendern → erste Lerneffekte für bayerische Unternehmen und Generierung von IP
- Kompetenznetzwerk für Anwender zur technischen Problemdefinition initiieren, um geeignete Quantencomputer-Plattform zu finden
- Kopplung von Wirtschaft und Forschung vorhanden, aber weiter ausbaufähig → Erzeugung von Wertschöpfung in Automobil-, Chemie-, Pharma-, Finanz- und Logistikindustrie
- Komponentenlieferung nicht von globalen (polit.) Gegebenheiten abhängig → Schaffung/ Erweiterung eines eigenen Ökosystems

SCHWÄCHEN

- Keine deutschen/bayerischen Quantencomputer-Hardwareentwickler (analog IBM, Google, Microsoft, Rigetti etc.) mit vergleichbar finanzieller Stärke und internationaler Bekanntheit
- Vorhandene Patente ausländischer Hersteller → supraleitende Quantencomputer sind bereits mit vollem Hard- und Software-Stack verfügbar; Deutschland noch im Rückstand, Stakeholder stark akademisch geprägt → Anwendungsnähe forcieren → *Gap* von Labormaßstab zur Kleinserie groß
- Anwender-Nachfrage für Quantencomputer-Bau noch nicht ausgeprägt; Nutzung wird präferiert

RISIKEN

- Verlust der Technologiesouveränität, damit Abhängigkeit des Zugangs zu Quantencomputer
- Softwareentwicklung erfordert direkten, dauerhaft gesicherten Zugang zur Quantencomputer-Hardware
- Anzahl Qubits mit explorierten Technologien noch nicht skalierbar; Q-Überlegenheit noch offen
- Vorteil für wirtschaftliche Fragestellungen kurz- und mittelfristig noch offen (ROI nicht absehbar)

Tab. 5: SWOT-Profil für Bayern zum *Layer Enabling*-Technologien Simulation | Computing im Kontext industrieller Anwendung.

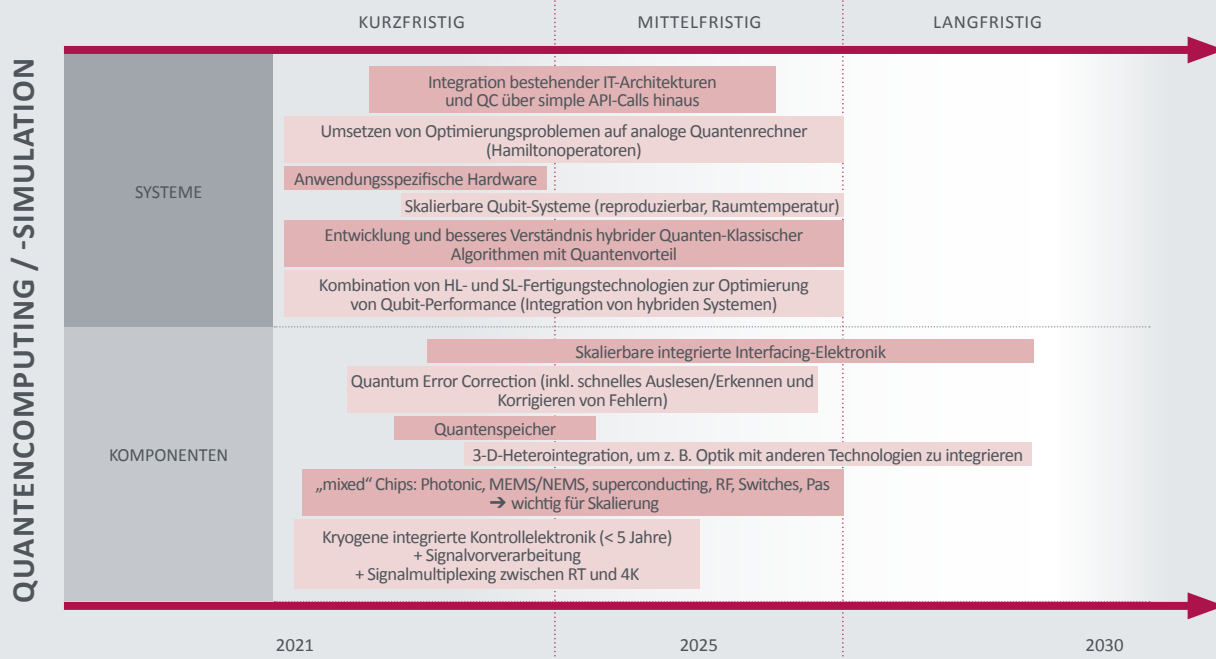


Abb. 8: Die am höchsten priorisierten Themen aus dem Layer Simulation | Computing in ihrer zeitlichen Darstellung im Kontext industrieller Anwendung. Die Abbildung spiegelt konkrete Aussagen aus den Workshops wider, woraus die Kernaussagen dieses Kapitels abstrahiert wurden.

• Sensorik I Metrologie

Der Bereich Quantensensorik beschäftigt sich mit Systemen, deren Quantenzustände hochsensibel auf Änderungen ihrer Umgebung reagieren und dadurch eine wesentlich höhere Empfindlichkeit gegenüber herkömmlichen (nicht auf Quanteneffekten beruhenden) Sensoren aufweisen. Die hierdurch realisierten Messungen beruhen auf den unveränderlichen Eigenschaften von u. a. Atomen und Elektronen. Somit können Messgrößen (wie z. B. elektromagnetische Felder, Beschleunigungen, Vibration, Gravitation, elektrische Ströme und Temperaturen) hochgenau gemessen werden. Nicht zuletzt unterstreicht die Neudefinition des SI-Einheitensystems auf Basis der Messung quantenmechanischer Effekte und Konstanten die weltweite Tragweite der Quantenwissenschaften. Diese neue Art von Sensoren hat das Potenzial, disruptiv auf heutige Märkte zu wirken und durch ihre verbesserte Messgenauigkeit bestehende Technologien abzulösen und/oder zu verändern.

In den Workshops wurden die Themengebiete Systemintegration Optik/Photonik, Einzelkomponentenentwicklung, Umgebungs- und Signalhandling, Automotive & Aerospace und Material betont.

Die Systemintegration optischer Komponenten erfordert die Entwicklung von robusten, rauscharmen (-freien), miniaturisierten Schnittstellen

zwischen photonischen Bauteilen und Bauteilen auf Mikrowellenbasis, inklusive Quellen und Signalverarbeitung. Neben optischen Uhren, Einzelphotonenquellen und -detektoren wurde Entwicklungsbedarf anwendungsspezifischer Kryo- und Lasertechnik und Materialentwicklung auf Halbleiterbasis als kritische Technologien auf dem Weg zu hochgenauen Inertialsensoren (Gravimeter, Gyroskope und Accelerometer) identifiziert. Diese sind für den Automobil- und Aerospace-Sektor von großem Interesse.

Jüngste Fortschritte auf dem Forschungsgebiet der Magnetometrie und der Mikroskopie von lebenden Zellen, erzielt durch NV-Farbzentren in Diamanten, erregten großes wissenschaftliches Interesse und ermöglichten erste kommerzielle Ausgründungen. Bayerische Akteure sind auf diesem Gebiet noch eher selten. Dabei könnte der Einsatz besserer (Quanten-)Sensoren kurzfristig großes Wertschöpfungs- und Einsparpotenzial sowohl im Automobilsektor als auch in der Tiefensondierung und Lagerstätten erkundung aufweisen.

Tab. 6 zeigt die SWOT-Tabelle für die Enabling-Technologien Sensorik I Metrologie bezogen auf Bayern und Abb. 9 die jeweils drei höchstbewerteten Themen in den Sublayern in ihrem zeitlichen Kontext.

STÄRKEN

- Hohe industrielle Kompetenz Bayerns in Mikroelektronik, Medizintechnik, Luft- und Raumfahrt, Photonik und Mikroskopie
- Produktions-Know-how für Sensorik in Bayern vorhanden → *Awareness* und Andockpunkte für Quantensensorik schaffen
- Einige international renommierte Spitzenforschungsgruppen in der Grundlagenforschung
- Hoher Technologiereifegrad → kurz- bis mittelfristiger *Impact* für wirtschaftliche Anwendungen in Bayern

CHANCEN

- Quantensensorik als Entwicklung unabhängig von anderen Quantentechnologien oder Quantencomputern möglich
- Zeitnahe Demonstration des Quantenvorteils als *Awareness* für Industrie und Investoren
- Hohes Potenzial in der Wertschöpfungskette als erster Anwender (z. B. *Aerospace*- und Automobilindustrie stark in Bayern vertreten)
- Fokussierung auf Anwenderleistungsprofile zieht Expertinnen und Experten an → Zuwanderung von Fachkräften
- Anwendungspotenziale noch stärker ausschöpfen
- Quantensensorik-Leuchtturmprojekte fördern Synergien zur starken Anwenderbasis → eigene Talente fördern und ausländische Expertinnen und Experten anziehen
- Neue Mikroskopie- und Diagnostikverfahren in der Medizintechnik (starke bayerische Firmenbasis beschleunigt den Übergang vom Labor in die industrielle Anwendung)

SCHWÄCHEN

- Fokus des breiten Mittelstands i. d. R. wenig auf kommerzielle Entwicklung von Quantensensoren/Produkten gerichtet → *Bewusstsein* durch *use cases* schaffen und Anwendungsgebiete aufzeigen
- Kaum bayerische Forschung auf dem Gebiet der NV-Zentren in Diamant/NV-Farbzentren → Expertinnen und Experten anziehen

RISIKEN

- Abwanderung von jungen Talenten in Regionen, in denen es spannende Projekte in Forschung und Entwicklung gibt
- Eine zu starke Fokussierung auf Quantencomputer birgt Gefahr in sich, dass Potenziale in der Quantensensorik nicht ausreichend genutzt werden → Gefahr der Wertschöpfung dann außerhalb Bayerns

Tab. 6: SWOT-Profil für Bayern für *Enabling*-Technologien Sensorik | Metrologie im Kontext industrieller Anwendung.

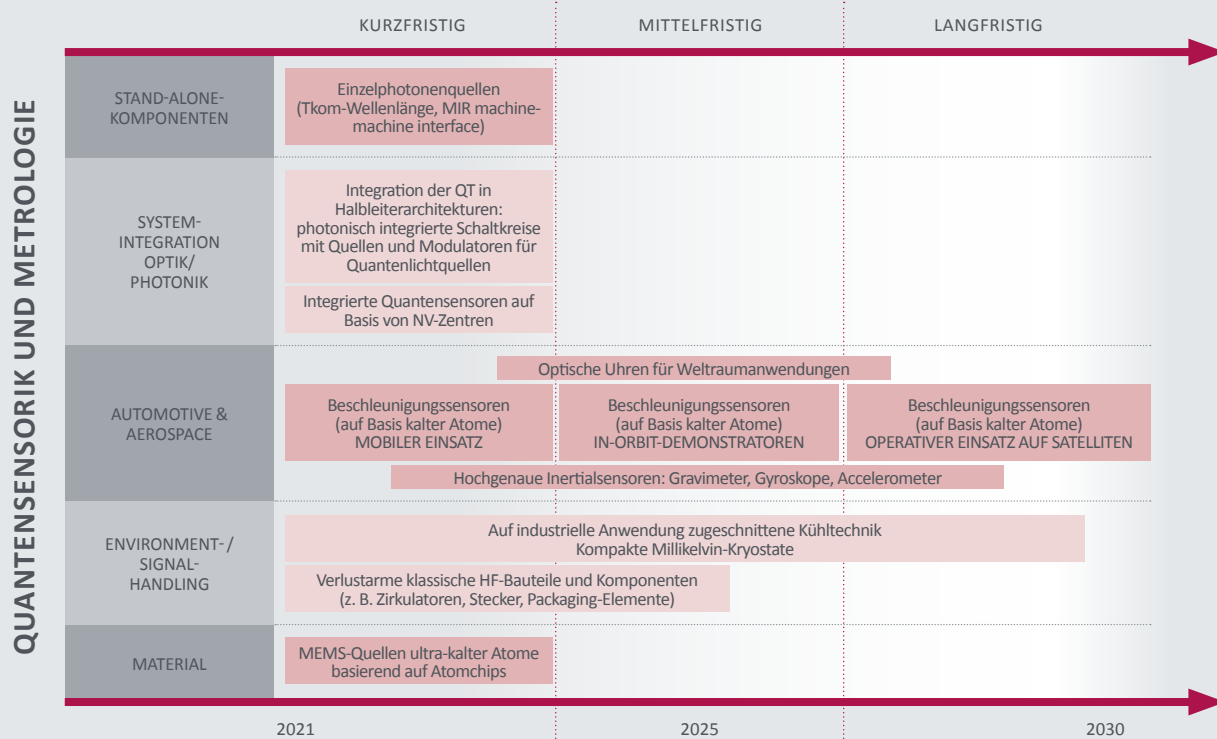


Abb. 9: Die am höchsten priorisierten Themen aus dem *Layer Enabling-Technologien Sensorik | Metrologie* in ihrer zeitlichen Darstellung im Kontext industrieller Anwendung. Die Abbildung spiegelt konkrete Aussagen aus den Workshops wider, woraus die Kernaussagen dieses Kapitels abstrahiert wurden.

• Software | Algorithmen

Im Bereich Software finden sich sowohl die Entwicklung eines Quantencomputer-Betriebssystems und *Front-end*- und *Back-end*-Applikationen als auch die Entwicklung anwendungs- und problem-spezifischer Algorithmen wieder. Wichtig für den Anwender ist die Entwicklung geeigneter Algorithmen zur Problemübersetzung realer Sachverhalte in auf Quantencomputern ausführbare Rechenschritte. Zwar existieren bereits plattformunabhängige *open-source*-Entwicklungsplattformen, zugehörige Softwarebibliotheken sowie auf Hardware zugeschnittene *Compiler*, allerdings gibt es kaum problemspezifische Übersetzer als Bindeglied zum Anwender.

Unter den kommerziellen Akteuren (Quantensoftware- und Algorithmenplattformen, Datenbanken, Programmiersprachen und Dienstleistungen) finden sich einige europäische, wenige deutsche und bislang noch keine bayerischen Akteure. Die breit aufgestellte bayerische Industrielandschaft bietet viele potenzielle Kunden und Partner für Quantensoftwareanwendungen.

Dazu zeigt **Tab. 7** die SWOT-Analyse für die Schlüsseltechnologie Software | Algorithmen bezogen auf Bayern und in **Abb. 10** sind die jeweils drei wichtigsten Themen in den *Sublayern* in ihrem zeitlichen Kontext dargestellt.

STÄRKEN

- Institute und Forschung bilden an spezifischen Quanten-Projekten interdisziplinär aus
- Umsetzungen konkreter Fragestellungen bereits jetzt möglich über cloudbasierten Zugang zu Quantencomputern → niederschwellige industrielle Anwendbarkeit
- *Awareness* über Ingenieur-Studiengänge bereits geschaffen
- Erste Anwendungen werden bereits (unabhängig von Quantencomputer-Hardware-Technologie) umgesetzt

CHANCEN

- Zeitnahe Umsetzung möglich
- Direkter Nutzen auch für KMUs in der Lieferkette
- Weiterbildung bestehenden Fachpersonals zur Entwicklung fachspezifischer Algorithmen
- Niederschwelliger Zugang zu Quantencomputern ermöglicht die Entwicklung von Software und Algorithmen
- Adressierung an alle Disziplinen seitens Hochschulen und Fachabteilungen unterschiedlichster Branchen → starke Vernetzung von Industrie und universitärer Forschung in Bayern
- Forciert neue Herangehensweise an Probleme (Konzepte), Problemlklassifizierung und Wahl geeigneter Quantencomputer, Entwicklung Methodenkompetenz
- Start-ups im Bereich Software-Entwicklung würden aufgrund der lokalen Nähe zu Auftraggebern aus der bayerischen Industrie die Ausbildung von Ökosystemen nachhaltig positiv beeinflussen
- *open-source*-Software-Entwicklungsplattform entwickeln

- Industrie sind Anwendungsmöglichkeiten noch nicht in allen Facetten klar
- Noch kein direkter ROI darstellbar. ABER: Erschlossenes Wissen zahlt sich mit höherer Qubit-Zahl aus (Skalierung)
- Schutz von IP schwierig, da auf ausländische Quantencomputer-Firmen und Software-Provider zurückgegriffen werden muss

SCHWÄCHEN

- Patenträume der Forschung werden von ausländischen Quantencomputer- und -software-anbietern besetzt
- Wertschöpfung in den Dienstleistungen außerhalb Bayerns
- Datentransfer und Datentransfer-Sicherheit in andere Staaten birgt Gefahren in der IT-Sicherheit

RISIKEN

Tab. 7: SWOT-Profil für Bayern für *Enabling*-Technologien Software|Algorithmen im Kontext industrieller Anwendung.

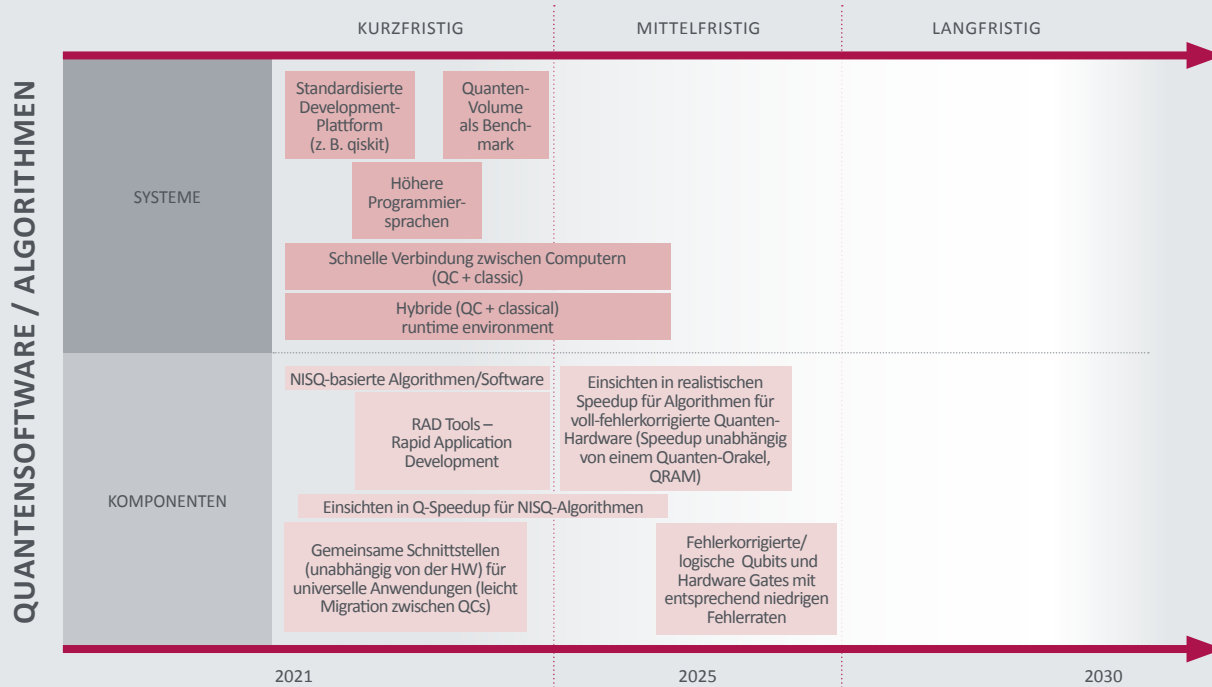


Abb. 10: Die in den Workshops am höchsten priorisierten Themen aus dem *Layer Enabling*-Technologien Software, Algorithmen in ihrer zeitlichen Relevanz im Kontext industrieller Anwendung und ihrer wirtschaftlichen Bedeutung. Die Abbildung spiegelt konkrete Aussagen aus den Workshops wider, woraus die Kernaussagen im Text abstrahiert wurden.

• **Kommunikation**

Im Bereich der Quantenkommunikation liegt kurzfristig der Fokus auf der Entwicklung zertifizierter *Quantum-Key-Distribution(QKD)*-Systeme (Hardware und Software), welche die Kommunikation absichern sollen und den nächsten Schritt in Richtung wirtschaftlicher QKD-Komplettlösungen bilden. Für den Ausbau der Reichweite ist mittelfristig die Satelliten-QKD mit *trusted nodes* und langfristig die Entwicklung des Konzepts eines Quantenrepeaters essenziell. So soll die Kommunikation sowohl über Glasfaser als auch im Freistrahl zwischen zwei Punkten über lange Distanzen durch Nutzung von Drohnen und Satelliten ermöglicht werden. Die Verknüpfung zweier Netzwerke erfordert standardisierte Übergabepunkte und zertifizierte Protokolle. Der Mangel an Zertifizierung im QKD stellt ein zentrales Hindernis dar. Zur Entwicklung und Zertifizierung wird eine standardisierte Testumgebung benötigt. Sie ist Ausgangspunkt für ein QLAN (*quantum lokal area network*), das sowohl mit Photonen als auch mit Mikrowellen

realisiert werden kann. Geeignete Schnittstellen zwischen Mikrowellen und Photonen, miniaturisierte optische/photonische Komponenten wie Einzelphotonenquellen und Detektoren für den Einsatz in Satelliten sowie adaptive vakuum- und kryotechnische Lösungen sind die nächsten Schritte in der Entwicklung dieser Technologie vom Labormaßstab hin zu industriellen Anwendungen.

Tab. 8 zeigt die SWOT-Analyse für die Schlüsseltechnologie Kommunikation bezogen auf Bayern und die höchst bewerteten Themen in den *Sublayern* in ihrem zeitlichen Kontext sind in Abb. 11 dargestellt.

STÄRKEN	<ul style="list-style-type: none"> • In Bayern große Kompetenz zum Aufbau einer Quantenkommunikationsinfrastruktur vorhanden • Engagement bei der Standardisierung der Post-Quanten-Kryptografie • Spitzenforschung auf dem Gebiet der Glasfasertechnologie • Hoher Technologiereifegrad 	SCHWÄCHEN	<ul style="list-style-type: none"> • Zurückhaltende Nutzung erster Anwendungen aufgrund fehlender Standards, Normen und Zertifikate • Fehlen großer Infrastrukturprojekte (z. B. Testfelder) im Vergleich zur internationalen Konkurrenz → wenig Einfluss auf Standardisierung
	CHANCEN		<ul style="list-style-type: none"> • Quantenrepeater als Schlüsselkomponente notwendig • <i>Quantum Key Distribution</i> (QKD) über integrierte Optik • Förderung zur Entwicklung besserer Sicherheitsstandards • Vernetzung verschiedener Quantencomputer • Industrielle Treiber in Bayern (u. a. Siemens, Infineon, Zulieferer für Telekommunikation) • Standardisierung der Technologie

Tab. 8: SWOT-Profil für die *Enabling*-Technologie Kommunikation für Bayern im Kontext industrieller Anwendung.

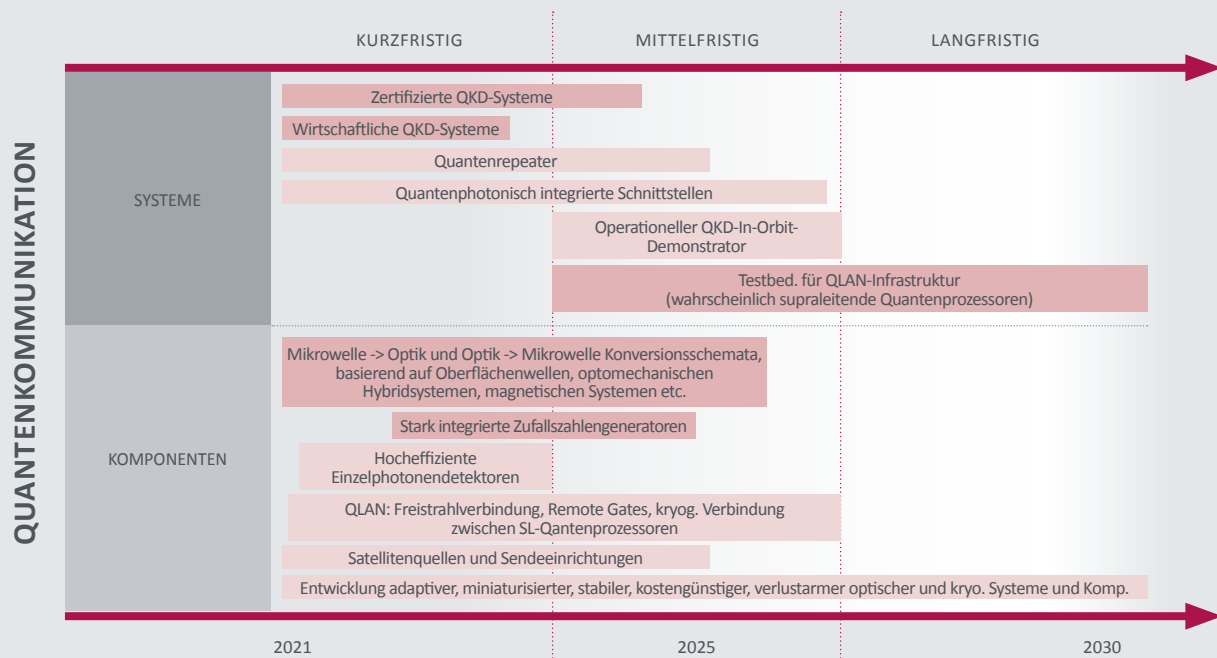
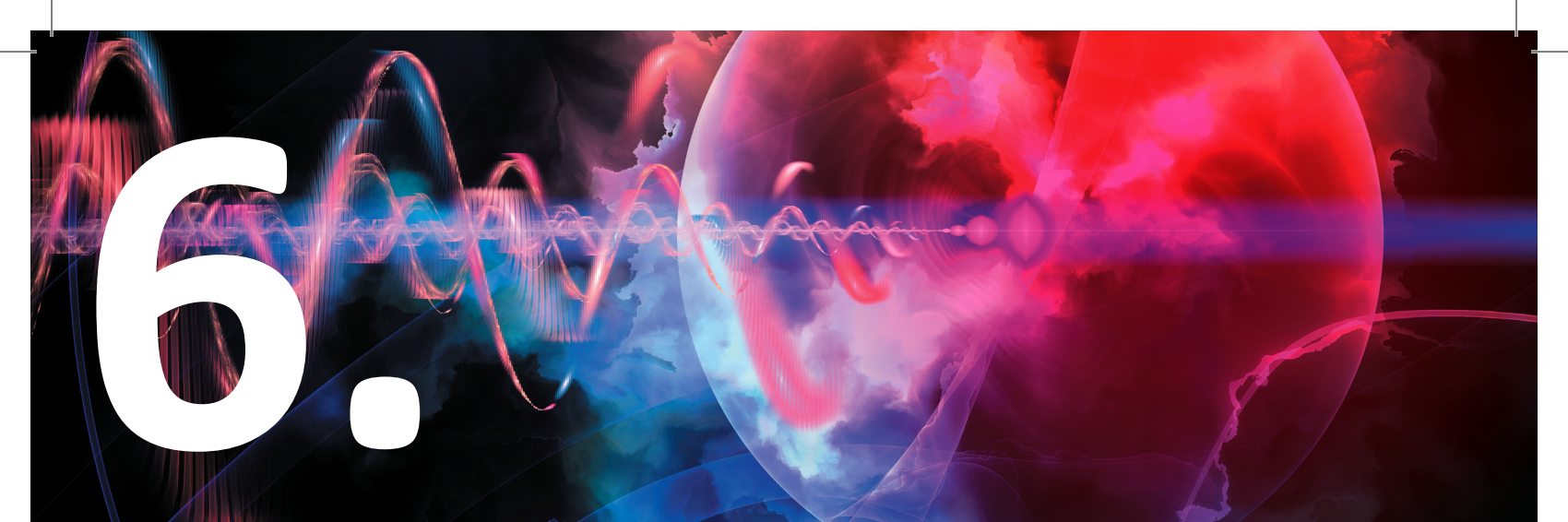


Abb. 11: Die am höchsten priorisierten Themen aus dem *Layer* Kommunikation in ihrer zeitlichen Darstellung im Kontext industrieller Anwendung. Die Abbildung spiegelt konkrete Aussagen aus den Workshops wider, woraus die Kernaussagen im Text abstrahiert wurden.



6.

6. Appendix

Appendix Quellen

- **H. Kagermann et. al., acatech IMPULS:**

Innovationspotenziale der Quantentechnologie der zweiten Generation; März 2020;
www.acatech.de/publikation/innovationspotenziale-der-quantentechnologien/

- **Interviews mit Expertinnen und Experten**

- **Zehn halbtägige Workshops im Zeitraum vom 12.11.2020 bis 10.12.2020**

- **Robert Phaal, Clare Farrukh and David Probert;**

University of Cambridge, Institute for Manufacturing – Roadmapping for strategy and innovation;
April 2011

- **Abb. 3:** gezeichnet von Kommunikationsagentur Schultze. Walther. Zahel. GmbH in Anlehnung an Gartner Hype Cycle für Compute Infrastruktur 2020, Quelle:

www.gartner.com/en/documents/3987268/hype-cycle-for-compute-infrastructure-2020

- **Bildquellen:**

AdobeStock©Peter Jurik
shutterstock©Dmitriy Rybin
iStock©billnoll
shutterstock©Costex
iStock©koto_feja
iStock©Pobytov

APPENDIX PROZESSERKLÄRUNG

Einführung

Für das Ziel, eine **Roadmap aus Netzwerksicht** („Makroperspektive“) zu erstellen, wurde der nachfolgende Prozess aufgesetzt. Hierbei stehen das Quantentechnologie-Ökosystem mit den dazugehörigen Technologien im Fokus und nicht eine tiefergehende Technologieanalyse. Die Roadmap soll helfen, die Ergebnisse zu kommunizieren und eine transparente und verständliche Darstellung des Quantentechnologie-Ökosystems zu schaffen. Bei dieser Roadmap handelt es sich um eine Bestandsaufnahme zum Dezember 2020. Die Roadmap zeigt aus der Netzwerkperspektive Abhängigkeitspfade zwischen den notwendigen Bereichen des Ökosystems auf und gibt Auskunft über den aktuellen Stand sowie Einschätzungen zu zukünftigen Entwicklungen.

Die Roadmap zeigt somit **Zukunftsentwürfe für Quantentechnologien in Bayern und deren industrielle Anwendungen, insbesondere der dazu erforderlichen Ökosysteme** aus Netzwerksicht auf. Um dies zu erreichen, wurde die Roadmap in die *Layer* (Bereiche) Trends | Technologien | Barrieren, Anwendungen, *Enabling*-Technologien (Simulation | Computing, Software, Sensorik, Kommunikation), Wissen | Anwendung, Infrastruktur | Ressourcen eingeteilt und für deren Erarbeitung in einem partizipativen Prozess wurden mehr als 80 Expertinnen und Experten aus Industrie und Wissenschaft aus ganz Bayern eingebunden.

Prozessklärung

Für die Erstellung der Roadmap *QuantenTech Vision Bayern* wurde ein methodengestütztes Vorgehen gewählt. Im initialen Schritt wurden auf Basis von Desktoprecherchen und Expertenbefragungen die wichtigsten Themen identifiziert und darauf aufbauend wurde der grundsätzliche Rahmen für die Roadmap-Architektur (*Layer*) geschaffen:

- Trends | Technologien | Barrieren (T | T | B)
- Anwendungen
- Quantentechnologien (Simulation | Computing, Software, Sensorik, Kommunikation)
- Wissen | Anwendung
- Infrastruktur | Ressourcen

Diese *Layer*-Architektur wurde gewählt, um das gesamte Ökosystem der Quantentechnologien in Bayern darstellen zu können, mit einem starken Fokus auf die industriellen Anwendungen und Bedarfe. Hierzu war es wichtig, dass ausgehend vom externen Umfeld die wichtigsten T | T | B identifiziert wurden. Diese sind letztendlich Beschleuniger oder auch Bremser für die industriellen und auch wissenschaftlichen Fortschritte. Im zweiten Schritt wurden die wichtigsten Anwendungen identifiziert und im zeitlichen Horizont abgebildet. Die dazu benötigten *Enabling*-Technologien bilden die dritte Ebene und wurden nach den vier wichtigsten technologischen Kategorien der Quantentechnologien eingeteilt. Hierbei wurden die Technologien Simulation und Computing – auf Hinweis aus der Arbeitsgruppe hin – zusammengefasst. Die nächste Ebene Wissen | Anwendung bezieht dann die wichtigen Themen aus Sicht der Aus- und Weiterbildung sowohl im akademischen wie auch im industriellen Sinne ein und zeigt damit die notwendigen Aktivitäten für eine industrielle Umsetzung auf. Der letzte *Layer* Infrastruktur | Ressourcen bildet dann die im Sinne des Ökosystems benötigten Unterstützungsleistungen ab.

Ausgehend von diesem Aufbau wurde in einem zweiten Schritt mit mehr als 80 Expertinnen und Experten in fünf Workshops die Roadmap-Architektur verifiziert und mit ersten fachlichen Inhalten gefüllt. Diese wurde anschließend auf Konsistenz geprüft und mit Erkenntnissen weiterer Recherchen sowie aus Expertengesprächen validiert. Die so generierten Inhalte wurden im nächsten Schritt in weiteren Workshops wieder mit denselben Expertinnen und Experten (Teilnehmer der Initial-Workshops) gespiegelt und von diesen priorisiert. Diese Ergebnisse wurden wiederum aufgearbeitet, auf Konsistenz geprüft und auf eine gemeinsame Detailtiefe gebracht. Die so erarbeitete Roadmap wurde wiederum von den Expertinnen und Experten geprüft, verifiziert und konnte kommentiert werden. Diese bildete dann die Basis für die Formulierung und Ableitung von Handlungsoptionen, die wiederum an die Expertinnen und Experten zurückgespiegelt wurden. Gerade durch die Workshop-Elemente wurde eine interaktive Diskussion und Konsensbildung ermöglicht und auch kontroverse Themen wurden transparent gemacht. Dazu wurden Recherchen und Expertengespräche kontinuierlich parallel

zur Roadmap-Erstellung durchgeführt sowie neu hinzukommende Themen in den Revisionsprozess der Roadmap mit dem Expertengremium kommuniziert und diskutiert.

Durch dieses Vorgehen konnte eine hohe Transparenz im Erstellungsprozess der Roadmap gewährleistet und die Beiträge aller Beteiligten konnten aufgenommen werden. Weiterhin wurde so in allen Schritten eine kontinuierliche Überprüfung ermöglicht, ob die getroffenen Inhalte, Annahmen und Abhängigkeiten aktuell und stimmig waren.

Das Zukunftsthema Quantentechnologien verlangt durch rasante Entwicklung und komplexe Zusammenhänge nach einer schnellen und flexiblen Methodik. Die Entwicklung der Roadmap fand im Zeitraum von Winter 2020 bis Frühjahr 2021 statt.

In Expertengesprächen – insbesondere in den Expertenworkshops – wurde deutlich, dass es für die Technologie-Roadmap *QuantenTech Vision Bayern* von zentraler Bedeutung ist, eine gemeinsame Abstraktionsebene der Technologien bzw. der Begrifflichkeiten zu finden, die eine Arbeit mit der Roadmap aus Netzwerksicht sinnvoll erscheinen lässt. Die Adressierung technologischer Details war daher nicht Gegenstand dieser Roadmap. Die Gespräche und Workshops mit den Expertinnen und Experten zeigten ferner, dass eine koordinierte Zusammenarbeit über Branchen- und Wertschöpfungsketten hinweg wichtig ist. Für den Aufbau der Roadmap wurden die kommenden fünf bis zehn Jahre betrachtet, da aus Sicht der Beteiligten hierdurch die mittel- und langfristigen Themen industrierelevant abgebildet werden können.

AN DEN WORKSHOPS BETEILIGTE INSTITUTIONEN

Kryotechnik

kiutra GmbH
Entropy GmbH

Laser und Photonik

TOPTICA Photonics AG
Menlo Systems GmbH

Halbleiterindustrie/Chipentwicklung

Infineon Technologies AG

Anwenderindustrie/Luft- und Raumfahrt

Airbus Defence and Space GmbH
BMW Group
Volkswagen Data:Lab
OHB System AG

Telekommunikation

ADVA Optical Networking SE

Hardware und Software

Google Germany GmbH
IBM Deutschland Entwicklung GmbH
IQM Germany GmbH
Novarion/QMWare
Terra Quantum AG
Intel Corporation

Netzwerke und Partnerschaften

Bayern Innovativ GmbH
Quantum Business Network UG

HOCHSCHULEN/ AUSSERUNIVERSITÄRE FORSCHUNGSEINRICHTUNGEN

- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V., Institut für Kommunikation und Navigation
- Fraunhofer-Einrichtung für Mikrosysteme und Festkörper-Technologien (EMFT)
- Fraunhofer-Gesellschaft e. V., Fraunhofer Zentrale
- Fraunhofer-Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit (AISEC)
- Fraunhofer-Institut für integrierte Schaltungen (IIS)
- Fraunhofer-Institut für Integrierte Systeme und Bauelementetechnologie (IISB)
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Department Elektrotechnik-Elektronik-Informationstechnik (EEI)
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Elektronische Bauelemente
- Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Lehrstuhl für Theoretische Physik
- Hochschule München, Fakultät für Informatik und Mathematik
- Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Lehrstuhl für Experimentelle Physik III
- Leibniz-Rechenzentrum der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
- Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Informatik
- Ludwig-Maximilians-Universität-München, Fakultät für Physik
- Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts
- Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Fakultät für Mathematik und Informatik
- Technische Hochschule Deggendorf, IT-Zentrum (THD)
- Technische Universität München, Lehrstuhl für Physik, Halbleiter-Nanostrukturen und -Quantensysteme
- Technische Universität München, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik
- Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Informatik
- Universität der Bundeswehr München, Fakultät für Informatik, FI CODE
- Universität der Bundeswehr München, Institut für technische Informatik
- Universität Regensburg, Institut für Theoretische Physik
- Walther-Meißner-Institut für Tieftemperaturforschung der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Um eine gemeinsame Roadmap zur *QuantenTech Vision Bayern* zu erarbeiten, hat die Bayern Innovativ GmbH im Auftrag von drei bayerischen Ministerien Workshops mit hochrangigen Expertinnen und Experten aus Wirtschaft und Wissenschaft durchgeführt, um die Herausforderungen, Stärken und Schwächen in den genannten Feldern der Quantentechnologie zu benennen und Empfehlungen zu skizzieren. Die Ausarbeitung erfolgte durch die Bayern Innovativ GmbH, Thinknet Quantentechnologie, in Absprache mit Vertretern der drei Ministerien sowie den Expertinnen und Experten aus den Workshops.

Roadmap zur *QuantenTech Vision Bayern* vom August 2021

Erstellt und begleitet von:



Thinknet Quantentechnologie
quantum@bayern-innovativ.de



[bayern-innovativ.de/
quantentechnologie](https://bayern-innovativ.de/quantentechnologie)

bayern  innovativ
Innovation leben.

Im Auftrag

des Bayerischen Staatsministeriums für Digitales,
des Bayerischen Staatsministeriums für Wissenschaft und Kunst
sowie des Bayerischen Staatsministeriums für Wirtschaft,
Landesentwicklung und Energie

