

Quantum^{BW}

**WHERE
POSSIBILITY
becomes reality**

**Quantenstrategie
Baden-Württemberg**

Part of
**THE
LÄND**

Quantum^{BW}

THE LÄND of quantum technology



Quantum^{BW} bündelt die einzigartige wissenschaftliche und wirtschaftliche Kompetenz in Europas führender Innovationsregion THE LÄND, um die Quantenrevolution mitzugestalten. Gemeinsam fördern wir den Transfer quantentechnologischer Forschung in Anwendungen, um verschiedene Lebensbereiche zu verbessern und Märkte disruptiv zu verändern.

Die Quantum Technology Alliance Baden-Württemberg, kurz Quantum^{BW}, ist eine Initiative zur Förderung der Quantentechnologie im Land Baden-Württemberg.

In Quantum^{BW} schließen sich führende Forschungseinrichtungen und Unternehmen an verschiedenen Standorten des Landes zusammen und treiben die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten in den Zukunftsthemen Quantensensorik und Quanten-

computing voran. Die Geschäftsstelle Quantum^{BW}, die die Aktivitäten der Innovationsinitiative koordiniert und die erste Anlaufstelle bildet, wird durch das IQST der Universität Stuttgart und der Universität Ulm zusammen mit Fraunhofer IAF und Fraunhofer IAO geführt und gemeinsam von den Ministerien für Wissenschaft, Forschung und Kunst sowie Wirtschaft, Arbeit und Tourismus Baden-Württemberg gefördert.

01 EXECUTIVE SUMMARY S. 06

02 QUANTEN- TECHNOLOGIE S. 8

2.1 ÖKOSYSTEM QUANTENTECHNOLOGIE BADEN-WÜRTTEMBERG S. 10

2.2 STRATEGISCHE ZIELSETZUNGEN UND HANDLUNGSFELDER VON QUANTUM^{BW} S. 14

- 2.2.1 Ökosystemgestaltung und Standortmarketing
- 2.2.2 Infrastruktur und Quantum-Enabling-Technologien
- 2.2.3 Aus- und Weiterbildung, Ausgründungen

03 TECHNOLOGIE ROADMAPS S. 20

3.1 ROADMAP QUANTENSENSORIK S. 24

- 3.1.1 Ausgangslage 2022
- 3.1.2 Zentrale Herausforderungen bei der Überführung der Quantensensorik in den Markt
- 3.1.3 Kurz-, mittel- und langfristige Zielsetzungen in der Quantensensorik
- 3.1.4 Abgeleitete kurz-, mittel- und langfristige Maßnahmen in der Quantensensorik

3.2 ROADMAP QUANTENCOMPUTING S. 30

- 3.2.1 Ausgangslage 2022
- 3.2.2 Stand der Technik
- 3.2.3 Zentrale Herausforderungen des Quantencomputing
- 3.2.4 Kurz-, mittel- und langfristigen Zielsetzungen im Quantencomputing
- 3.2.5 Abgeleitete kurz-, mittel- und langfristige Maßnahmen im Quantencomputing

01 EXECUTIVE SUMMARY

Die Quantentechnologien gehören zu den wichtigsten Schlüsseltechnologien des 21. Jahrhunderts. Die Übertragung der faszinierenden Eigenschaften und Effekte der Quantenwelt in technologische Anwendungen wird unser Leben in vielen Bereichen verbessern und zahlreiche Märkte disruptiv verändern.

Baden-Württemberg befindet sich in einer hervorragenden Ausgangslage, um die anstehende Quantenrevolution mitzugestalten und von ihr zu profitieren. Auf der Basis bereits etablierter Netzwerke exzellenter Quantenwissenschaft an den Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen sowie international führender High-Tech-Unternehmen und Start-ups ist unser Land prädestiniert, entscheidende Beiträge für die nationalen und europäischen Initiativen in den Quantentechnologien zu leisten, erfolgreiche und profitable Produkte und Dienstleistungen zu entwickeln und die entstehenden Märkte für Quantentechnologien zu besetzen.

Gleichzeitig bedarf es eines mutigen, entschlossenen und koordinierten Handelns, um diese Spitzenposition in der Forschung und insbesondere bei neuen Geschäftsfeldern auszubauen. Nur wenn Wissenschaft, Wirtschaft und Politik an einem Strang ziehen, wird es gelingen, im starken internationalen Wettbewerb um Ideen, Köpfe, Märkte und Investitionen erfolgreich zu sein und die großen Innovations- und Wertschöpfungspotenziale der Quantentechnologien in Baden-Württemberg zu heben.

In **Quantum^{BW}** schließen sich daher führende Forschungseinrichtungen und Unternehmen des Landes zusammen, um Baden-Württemberg als Wissenschafts- und Wirtschaftsstandort für Quantentechnologien gemeinsam strategisch weiterzuentwickeln und die internationale Sichtbarkeit als Quantenzentrum auszubauen. Als langfristige und innovative Struktur wird **Quantum^{BW}** eine noch engere Vernetzung und Bündelung von Kompetenzen und Akteuren entlang der gesamten Innovations- und Wertschöpfungskette fördern.

Innerhalb dieser Struktur werden wir aufbauend auf kohärenten, ergebnisorientierten Technologie-Roadmaps prioritär Maßnahmen ergreifen, die

- Innovationen im Bereich der Quantentechnologien durch anwendungsorientierte, kooperative Forschungs- und Entwicklungsvorhaben stärken und beschleunigen;
- leistungsfähige Infrastrukturen für Kooperationen von Wissenschaft, Wirtschaft und Investoren schaffen und ausbauen;
- die Qualifizierung von Fach- und Nachwuchskräften für Wissenschaft und Unternehmen befördern und attraktive Standortbedingungen für Spitzenkräfte schaffen;
- eine lebendige Gründerszene unterstützen, die Unternehmensgründungen aus der Wissenschaft und Wirtschaft heraus ermutigt und Investitionen begünstigt.

Insbesondere in den Bereichen der Quantensensorik, des Quantencomputings, der Quantennetzwerke und der hierfür erforderlichen Basistechnologien, in denen unser Land schon heute stark ist, werden wir so eine kritische Masse erreichen, die neuen Ideen den Boden bereitet und den Grundstein für den Aufbau eines schlagkräftigen Ökosystems legt, das Forschenden, etablierten Unternehmen und Start-ups Rahmenbedingungen und Freiräume bietet, gemeinsam mit anderen Disziplinen und Akteuren zu forschen, Strategien und Lösungen zu erarbeiten und neue Märkte mit innovativen Produkten und Dienstleistungen zu erschließen.

02 QUANTEN- TECHNOLOGIE

in Baden-Württemberg

Potenziale, Status Quo und zentrale Herausforderungen

Quantentechnologien, die darauf basieren, quantenmechanische Effekte gezielt erzeugen und kontrollieren zu können, ermöglichen Innovationen und Anwendungen, die unser Leben in vielen Bereichen schneller, einfacher oder sicherer machen können.

Da Quanten extrem sensibel auf Umwelteinflüsse reagieren, können Quantensensoren eine bislang unerreichte Empfindlichkeit und Genauigkeit realisieren oder sogar neue Messparameter erfassen. So bieten sich etwa im Bereich der medizinischen Diagnostik neue Möglichkeiten zur frühzeitigen und präziseren Erkennung von zahlreichen Stoffwechselerkrankungen. Weitere Einsatzfelder umfassen Ortungs- und Navigationssysteme, die Messung von Gravitations- oder Magnetfeldern oder die Entwicklung von neuartigen Temperatur- und Drucksensoren.

Quantencomputer vermögen perspektivisch, auch im Verbund mit Höchstleistungsrechnern, bestimmte Aufgaben und komplexe Optimierungsprobleme in enormer Geschwindigkeit zu lösen. So haben sie z. B. das Potenzial, die Modellierung und Entwicklung von neuen Materialien oder medizinischen Wirkstoffen auf eine neue Ebene zu heben. Sie tragen damit – wie auch die Quantensensorik – zu wichtigen Weiterentwicklungen und Innovations-sprüngen in den zentralen Zukunftsbe-reichen Gesundheit, Mobilität, Klimaschutz und Nachhaltigkeit bei.

Auch wenn sich die beschriebenen Quantentechnologien insgesamt noch in einem frühen Stadium auf ihrem Weg von der Forschung in die Märkte befinden, gewinnen sie als disruptive Technologien, die Märkte von Grund auf verändern können, enorm an

Relevanz. Weltweit bilden sich Initiativen und Ökosysteme aus Forschung und Anwendung heraus, in denen Hersteller, Zulieferer für Komponenten und Service-anbieter entlang der Wertschöpfungskette zusammenarbeiten.

Insbesondere dem Teilbereich des Quantencomputings wird ein sehr großes Markt- und Wertschöpfungspotenzial vorausgesagt. Marktabschätzungen sind aufgrund des frühen Entwicklungsstadiums nur begrenzt belastbar, prognostizieren aber die

Entstehung eines Weltmarktes im Umfang von 450 bis 850 Mrd. USD in den nächsten 15 bis 30 Jahren¹. Anders als beim Quantencomputing zeichnet sich im Teilbereich Quantensensorik bereits in den kommenden drei bis fünf Jahren die Verfügbarkeit industriell breiter einsetzbarer, robuster Sensoren ab. Erste Schätzungen bezüglich des Marktes für Quantensensoren belaufen sich auf 1,3 Mrd. USD im Jahr 2023 und gehen von einem Wachstum auf 2,2 Mrd. USD bis 2028 aus².

¹ Quelle: BMBF Forschungsprogramm Quantensysteme

² Quelle: acatech - Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation

Ökosystem Quantentechnologie Baden-Württemberg

Baden-Württemberg bietet als eine führende Wissenschafts-, Wirtschafts- und Innovationsregion in Deutschland und Europa ideale Voraussetzungen dafür, diese Potenziale mit dem Aufbruch zu einer leistungsstarken Quantenindustrie zu heben. Unser Land verfügt über eine vielfältige und exzellente Forschungslandschaft an den Universitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen sowie über zahlreiche führende Industrieunternehmen und hochinnovative High-Tech-Start-ups. Die bereits gelungene Verzahnung von herausragender Grundlagenforschung mit den praktischen Erfahrungen und Erfolgen in der Entwicklung, Integration, Kommerzialisierung und Anwendung von Quantensystemen stellt eine große Stärke von Baden-Württemberg dar.

Netzwerkpartner

Unternehmen

- Advanced Quantum GmbH
- AITAD GmbH
- Balluff GmbH
- Carl Zeiss AG
- EnBW AG
- Eviden Germany GmbH
- Festo SE & Co. KG
- Hensoldt Sensors GmbH
- HQS Quantum Simulations GmbH
- IBM Deutschland GmbH
- Kipu Quantum GmbH
- Mercedes-Benz-Group AG
- NVision Imaging Technologies GmbH
- Q.ANT GmbH
- Quantum Brilliance GmbH
- Quantum Machines Ltd.
- Robert Bosch GmbH
- Thales Deutschland GmbH & Co. KG
- Tesat-Spacecom GmbH & Co. KG
- TRUMPF SE+ Co. KG

Universitäten und Institutionen

- Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
- Baden-Württemberg International
- Duale Hochschule Baden-Württemberg (DHBW)
- Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e. V. (DLR)
- Eberhard Karls Universität Tübingen
- Fraunhofer-Gesellschaft e. V.
- Hahn-Schickard-Gesellschaft e.V.
- Intitut für Mikroelektronik Stuttgart (IMS Chips)
- Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- Max-Planck-Gesellschaft e. V.
- Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg
- Technoseum Mannheim
- Universität Konstanz
- Universität Stuttgart
- Universität Ulm

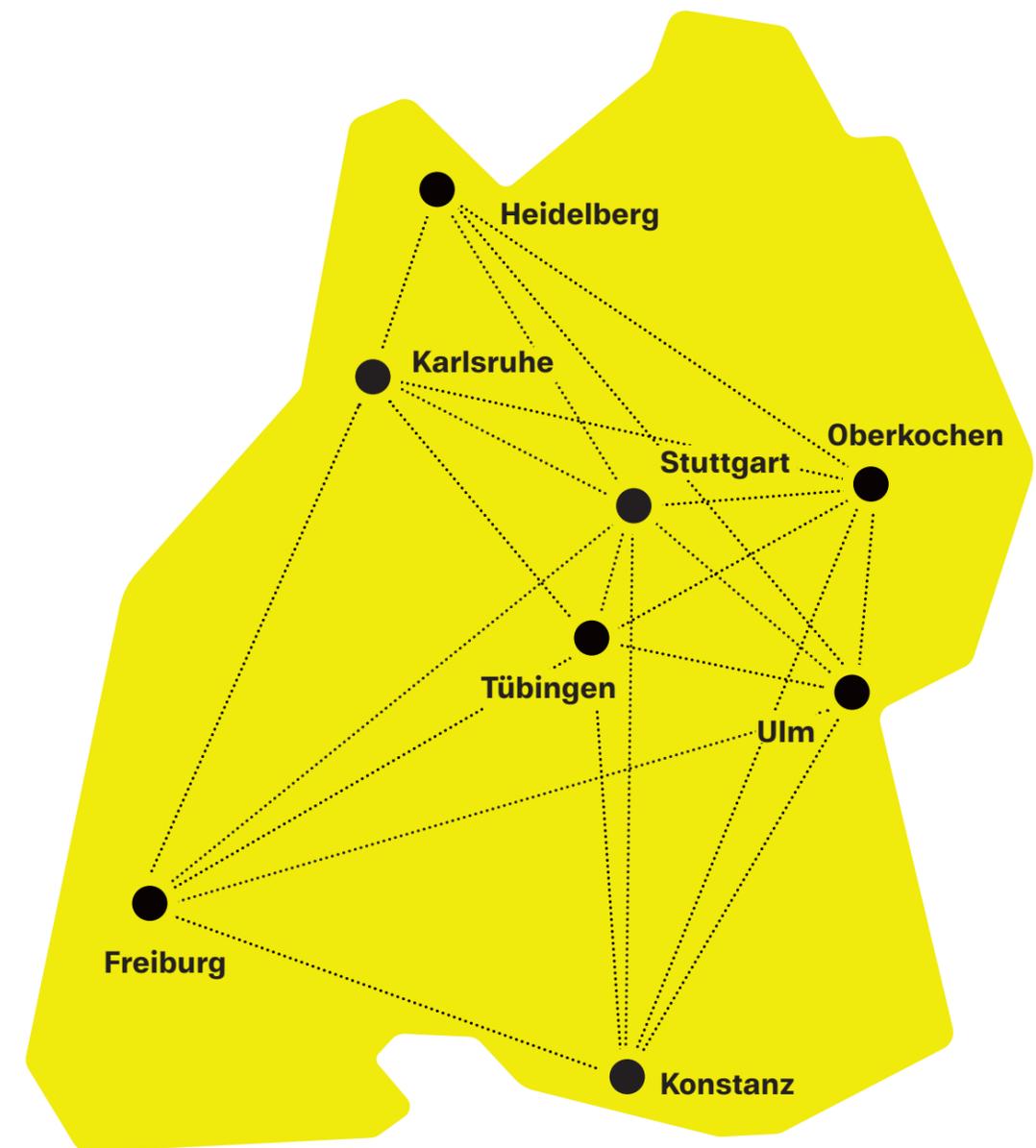


Abbildung 1:
Partner im Quantum^{BW}-Netzwerk

Ökosystem Quantentechnologie Baden-Württemberg

Zu den Leitinitiativen mit überregionalem Leuchtturmcharakter, die bereits durch das Land – vielfach gemeinsam mit dem Bund – gefördert wurden bzw. werden, zählen beispielsweise das Zentrum für Integrierte Quantenwissenschaft und Technologie Stuttgart/Ulm (IQST), das Kompetenzzentrum Quantencomputing BW und der Zukunftscluster „QSens – Quantensensoren der Zukunft“. Diese Verbundvorhaben bündeln grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung im Bereich der Quantentechnologie über die einzelnen Standorte hinweg und fördern den Austausch mit Hochtechnologieunternehmen im Land. Das Land investiert seit 2019 über 115 Millionen Euro in Projekte und Infrastrukturmaßnahmen, die den Auf- und Ausbau dieser in ihrer Breite einmaligen Exzellenz unterstützen.

Gleichzeitig wirken die beteiligten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler sowie Netzwerkpartner in Baden-Württemberg aufgrund ihrer international herausragenden Expertise äußerst erfolgreich in vielen bundes- und EU-geförderten Verbundprojekten entscheidend mit. Komplementär zur Förderung durch das Land wurden so in den vergangenen zehn Jahren über 480 Millionen Euro an Drittmitteln des Bundes und der EU an die Standorte der universitären und außeruniversitären quantenwissenschaftlichen Forschung in Baden-Württemberg eingeworben.

Neben der Stärke in der grundlagen- und anwendungsorientierten Forschung in den Bereichen Quantensensorik und Quantencomputing verfügt Baden-Württemberg über eine hervorragende Ausgangsposition in der Entwicklung der zugrundeliegenden Basistechnologien, den sog. „Quantum-Enabling-Technologien“. Auf diesen technologischen Basiskomponenten, wie z. B. spezialisierten Laser- und Photonenquellen oder halb- und supraleitenden Spezialmaterialien, bauen alle Anwendungsfelder der Quantentechnologien auf. Sie sind eine zentrale Voraussetzung dafür, dass quantentechnologische Innovationen den Weg aus den Laboren und Reinräumen hinaus in Produkte und Anwendungen unter Praxisbedingungen finden. Relevante Felder hierfür sind insbesondere die Mikroelektronik, die Photonik sowie die Aufbau- und Verbindungstechnik, in denen das baden-württembergische High-Tech-Ökosystem stark aufgestellt ist. Im Bereich des Quantencomputings spielt ferner die Entwicklung von Algorithmen, Software und den damit verbundenen Dienstleistungen eine entscheidende Rolle für eine breite Implementierung quantentechnologischer Anwendungen. Denn für die meisten Unternehmen wird es zumindest perspektivisch nicht um den Bau eines Quantencomputers gehen, sondern

darum, quantenbasierte Softwarelösungen und Algorithmen für unternehmensspezifische Fragestellungen zu entwickeln, die dann über einen Zugriff auf externe Quantencomputing-Kapazitäten umgesetzt werden können. Auch hier kann Baden-Württemberg von umfangreichen Kompetenzen im Bereich der akademischen Forschung sowie von in diesem Bereich weltweit sichtbaren Unternehmen profitieren. Zudem sind große Synergien zwischen Quantencomputing, klassischem Höchstleistungsrechnen (High-Performance-Computing, HPC) und Maschinellem Lernen zu erwarten, die mit einem exzellenten Verbund von Höchstleistungsrechenzentren im Land und dem Cyber Valley als internationalem Hot Spot der künstlichen Intelligenz optimal weiterentwickelt und ausgeschöpft werden können.

Diese regionalen Stärken gilt es entschieden auszubauen, um die dynamischen Entwicklungen im Bereich der Quantentechnologien weiterhin an der Spitze mitgestalten und vorantreiben zu können.

Strategische Zielsetzungen und Handlungsfelder von Quantum^{BW}

Die Erforschung und Umsetzung der verschiedenen Quantentechnologien ist in Baden-Württemberg unterschiedlich stark ausgeprägt. Besondere Stärken bestehen in der Quantensensorik und in der Hardwareentwicklung für das Quantencomputing. Hier ist die Grundlagenforschung im Land hervorragend aufgestellt und gehört in vielen Bereichen zur Weltspitze. Eine zentrale Herausforderung besteht darin, diese breite Expertise in die angewandte Forschung und in konkrete technologische Innovationen für die Industrie zu übersetzen. Während sie im Bereich des Quantencomputings noch am Anfang steht, bestehen bei der Quantensensorik bereits heute gute Aussichten, die gesamte Wertschöpfungskette von potenziellen Anwendern bis zu den Herstellern zentraler Enabling-Technologien im Land abzudecken und Forschungsergebnisse erfolgreich in konkrete Anwendungen und Produkte zu überführen.

In Baden-Württemberg sind bereits innovative Unternehmen und Start-ups aktiv, die als Vorreiter die Industrialisierung und Kommerzialisierung von Quantensensoren massiv vorantreiben. Hier haben unsere Unternehmen und Einrichtungen eine Spitzenposition inne, die wir weiter ausbauen wollen. Das Quantencomputing wird für viele unserer Weltunternehmen und Hidden Champions erheblichen Einfluss auf ihr Geschäftsmodell haben. Hier kommt der Wissenschaft und Wirtschaft eine maßgebliche Rolle bei der erfolgreichen Einführung des kommerziellen Einsatzes von Quantencomputern und angepassten Softwarelösungen zu.

Im Rahmen der Innovationsinitiative Quantum^{BW} wollen wir sicherstellen, dass Baden-Württemberg bei der Wertschöpfung mit neuen Quantenlösungen weiterhin eine Führungsrolle einnimmt. Aufbauend auf den Stärken unserer Hochschulen und Forschungseinrichtungen als wichtige Impulsgeber neuer technologischer Innovationen, sollen Unternehmen und Start-ups aus Baden-Württemberg als zentrale Anbieter und Anwender am Weltmarkt für Quantenlösungen teilhaben.

Vertreter von führenden Quanten-Forschungseinrichtungen und -Unternehmen haben sich hinter diesem gemeinsamen Ziel versammelt und in einem breit angelegten Austausch- und Abstimmungsprozess zentrale Handlungsfelder für eine Strategie zur Weiterentwicklung des Quantentechnologie-Standorts Baden-Württemberg identifiziert. In deren Zentrum stehen die Ausrichtung von Forschungs- und Entwicklungsarbeiten an Quantentechnologie-Road-

maps, die sich an den bestehenden Stärken orientieren, sowie ein klarer Fokus auf den Transfer von Forschungsergebnissen in die Anwendung und kooperativen FuE-Vorhaben von Wissenschaft und Wirtschaft. Die Roadmaps greifen die Handlungsfelder auf und konkretisieren diese. Das so entstehende, eng verflochtene Netzwerk von Wissenschaftseinrichtungen und Unternehmen bildet den Nukleus für den langfristigen Aufbau eines neuen Innovationscampus in den Quantentechnologien, in dem innovative Kooperationsformate und Begegnungsräume von Wissenschaft und Wirtschaft als wechselseitige Impulsgeber nachhaltig verankert werden.

2.2.1 Handlungsfeld 1: Ökosystemgestaltung und Standortmarketing

Die Entwicklung von Quantentechnologien ist ein sehr wettbewerbsintensives Forschungsgebiet, das starke institutionenübergreifende und interdisziplinäre Netzwerke benötigt, um international konkurrenzfähig zu sein. Die Zusammenführung von Kompetenzen, der wissenschaftliche Diskurs über Fachgrenzen hinweg sowie eine möglichst breite Nutzung aufwendiger Infrastrukturen versprechen einen großen Mehrwert für Baden-Württemberg und sollen im Rahmen von Quantum^{BW} gezielt vorangetrieben werden.

Im Zentrum dieser Aktivitäten wird eine Geschäftsstelle stehen, die den Clusterpartnern als zentrale Anlaufstelle zur Verfügung steht, Informationen über das

Quantenökosystem in Baden-Württemberg bündelt und aufbereitet, die Umsetzungsmaßnahmen der Quantenstrategie sowie die Weiterentwicklung der Roadmaps koordinierend begleitet und die Vernetzung der Standorte proaktiv vorantreibt.

Die Geschäftsstelle soll außerdem den Quantentechnologie-Standort Baden-Württemberg nach außen vertreten und dazu beitragen, das Ökosystem und die vorhandene Expertise Baden-Württembergs unter der Dachmarke Quantum^{BW} sichtbar zu machen. Sie agiert dabei als Knotenpunkt im engen Austausch mit bereits bestehenden Organisationsstrukturen, um Synergien maximal auszuschöpfen und gleichzeitig den Aufbau von Doppelstrukturen zu vermeiden.

Strategische Zielsetzungen und Handlungsfelder von Quantum^{BW}

2.2.2 Handlungsfeld 2: Infrastruktur und Quantum-Enabling-Technologien

Die Zusammenarbeit von Forschungseinrichtungen und Unternehmen in der Bearbeitung konkreter anwendungsrelevanter wissenschaftlicher Fragestellungen ist entscheidend, wenn es darum geht, Forschungsergebnisse in die Anwendung zu überführen und nachhaltige innovationstreibende Partnerschaften aufzubauen. Quantum^{BW} wird daher einen Rahmen für die flexible Förderung vorwettbewerblicher anwendungsorientierter Forschungsarbeiten oder anwendungsrelevanter Proof-of-Concept-Nachweise zur ersten Potenzialabschätzung einer Technologie schaffen. Diese setzen im Vergleich zur rein erkenntnisorientierten Grundlagenforschung dort an, wo bereits grundlegende Erkenntnisse beschrieben wurden, aus denen sich ein

Potenzial für eine technische Nutzung ableiten lässt. Die Projekte sollen sich dadurch auszeichnen, dass Partner aus universitärer, außeruniversitärer und industrieller Forschung zusammenarbeiten und sich inhaltlich an den baden-württembergischen Technologie-Roadmaps ausrichten. So sollen die aktuellen Stärken in der Quantensensorik sowie der Hardware- und Softwareentwicklung im Quantencomputing weiter fokussiert und im Hinblick auf konkrete Fragestellungen und Problemlösungen mit Blick auf Bedarfe der Industrie und Marktanforderungen weiterentwickelt werden.

Die Erforschung, Entwicklung und Validierung von Quantentechnologien erfordert komplexe, aufwendige und kapitalintensive Infrastrukturen, wie etwa Rein- und Grauräumkapazitäten oder spezialisierte Forschungslabore. Gerade für Start-ups und kleinere Unternehmen ist das eine große Hürde für den schnellen Ideentransfer. Ein niederschwelliger und unkomplizierter Zugang zu Forschungsgeräten, Produktions-, Test- und Validierungsumgebungen stellt deshalb für akademische und industrielle Akteure einen wesentlichen Mehrwert insbesondere bei Basiskomponenten und bei der Quantensensorik dar. Im Rahmen von Quantum^{BW} sollen deshalb auf der Grundlage einer umfassenden Bestandsaufnahme Modelle für die geteilte und dadurch effizientere Nutzung der vorhandenen Gebäude- und Geräteinfrastruktur im Land

etabliert und diese Infrastrukturen basierend auf den Technologie-Roadmaps gezielt ergänzt und ausgebaut werden. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf der Infrastruktur für die Quantum-Enabling-Technologien, die derzeit einen entscheidenden Flaschenhals für die hochvolumige industrielle Nutzung von Quantensystemen darstellen. Die Technologie-Roadmaps unterscheiden hierbei zwischen der benötigten Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur sowie einer Infrastruktur für die Fertigung von Kleinserien und die Volumenfertigung von Quanten-Bauelementen und -Systemen.

2.2.3 Handlungsfeld 3: Aus- und Weiterbildung, Ausgründungen

Ein wissenschaftlich und technologisch komplexes Feld wie die Quantentechnologien erfordert gut ausgebildetes Personal mit spezifischen Kompetenzen, sowohl in der Wissenschaft als auch in der Industrie. Quantum^{BW} wird sich daher auch als Plattform für die koordinierte Entwicklung, Förderung und Bindung von Fachkräften für Wissenschaft und Wirtschaft etablieren und Konzepte für die nachhaltige Talentförderung durch Verzahnung von exzellenter Hochschullehre und Unternehmenspraxis entwickeln.

Eine exzellente und zugleich homogene Aus- und Weiterbildungslandschaft im Bereich der Quantentechnologien in Baden-Württemberg ist ein essenzieller Baustein für ein nachhaltiges Quanten-Ökosystem sowie das erste Glied in einer erfolgreichen Wertschöpfungskette im Bereich der Quantentechnologien.

Insbesondere die Schaffung landesweit einheitlicher Standards für die universitäre Ausbildung auf Bachelor- und Masterniveau sowie im Bereich der Promotionen bietet die Chance, nachhaltig hervorragend qualifizierte Quanten-Fachkräfte als Ressource für die lokale Wirtschaft auszubilden. Dies kann durch eine gezielte Nachwuchssprache von Schülerinnen und Schülern über Studierende bis hin zu exzellenten Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftlern weiter unterstützt werden. Bereits bestehende Curricula und Graduiertenschulen an den baden-württembergischen Universitäten können als Ausgangspunkt dienen, um ein landesweit einheitliches Ausbildungsnetzwerk aufzubauen. Die entsprechenden Homogenisierungs- und Netzwerkaktivitäten werden im Rahmen

von Quantum^{BW} unterstützt.

Ebenso bietet sich die Einrichtung neuer Professuren oder Nachwuchsgruppen mit quantentechnologischem Profil im Bereich der Ingenieurwissenschaften und ggf. zukünftig auch der Informatik an, um einen Brückenschlag zwischen den verschiedenen Fachdisziplinen zu erreichen.

Im Bereich der beruflichen Weiterbildung verfügen das Zukunftscluster QSens und das Kompetenzzentrum Quantencomputing Baden-Württemberg bereits über entsprechende Programme. Ziel muss es daher sein, diese Aktivitäten zu bündeln und nutzbringend zu kombinieren. Auch hier wird die Geschäftsstelle als zentrale Anlaufstelle für interessierte Unternehmen eine wichtige Rolle einnehmen.

Durch die Einbindung und ggf. den gezielten Ausbau bestehender Unterstützungsformate und Inkubatoren sollen wissenschaftsgetriebene Ausgründungsaktivitäten befördert und Nachwuchskräfte für die Umsetzung innovativer Ideen in der unternehmerischen Selbstständigkeit begeistert werden.

Geleitet durch die Rahmensetzung dieser vier Handlungsfelder zur Förderung der Quantentechnologien in Baden-Württemberg sowie der Zielformulierungen der technologischen Roadmaps werden die Gremien innerhalb der Quantum^{BW}-Governance, konkret das Executive Board, unterstützt durch das Advisory Board und die Geschäftsstelle zeitnah konkrete Umsetzungsschritte und Maßnahmen priorisieren und ausgestalten.

Aktivitäten bündeln und nutzbringend kombinieren

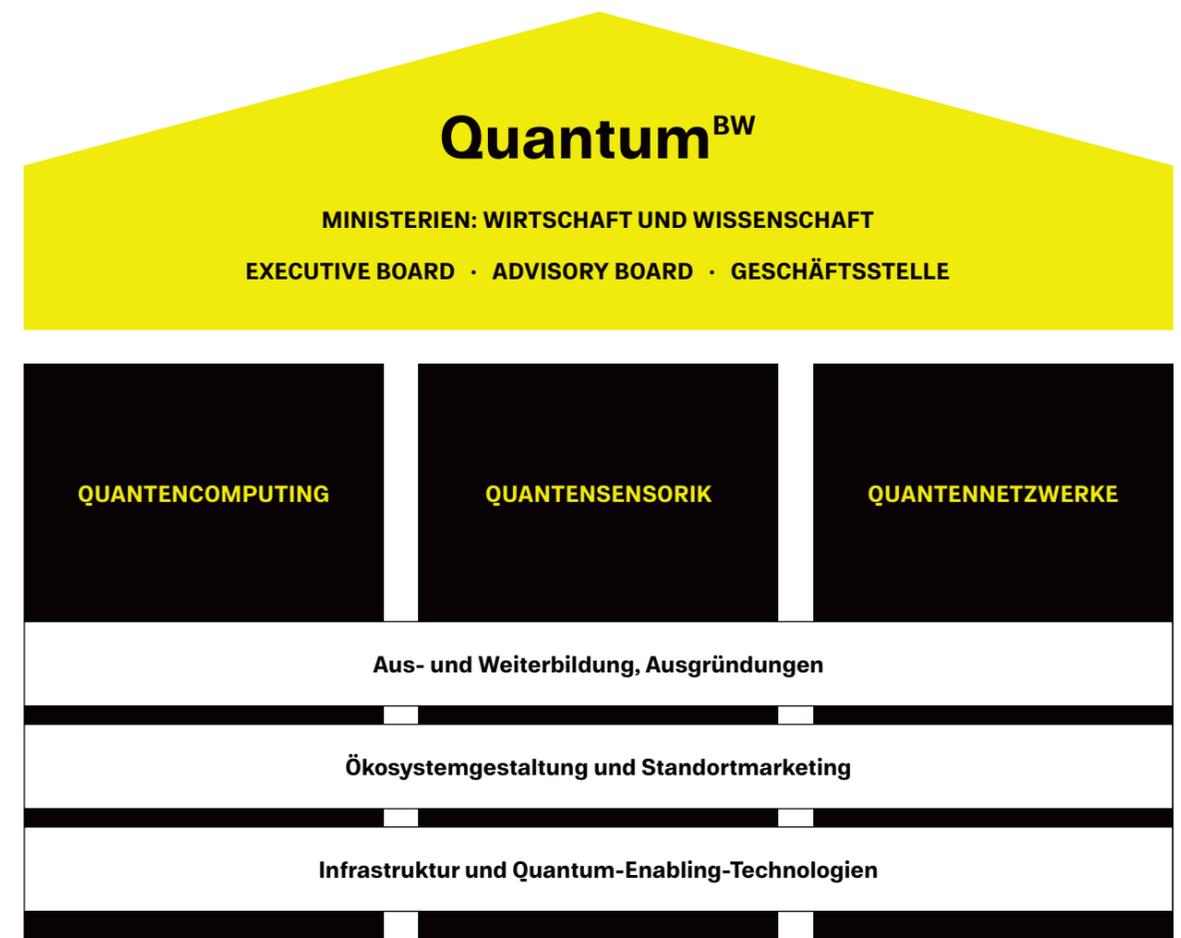
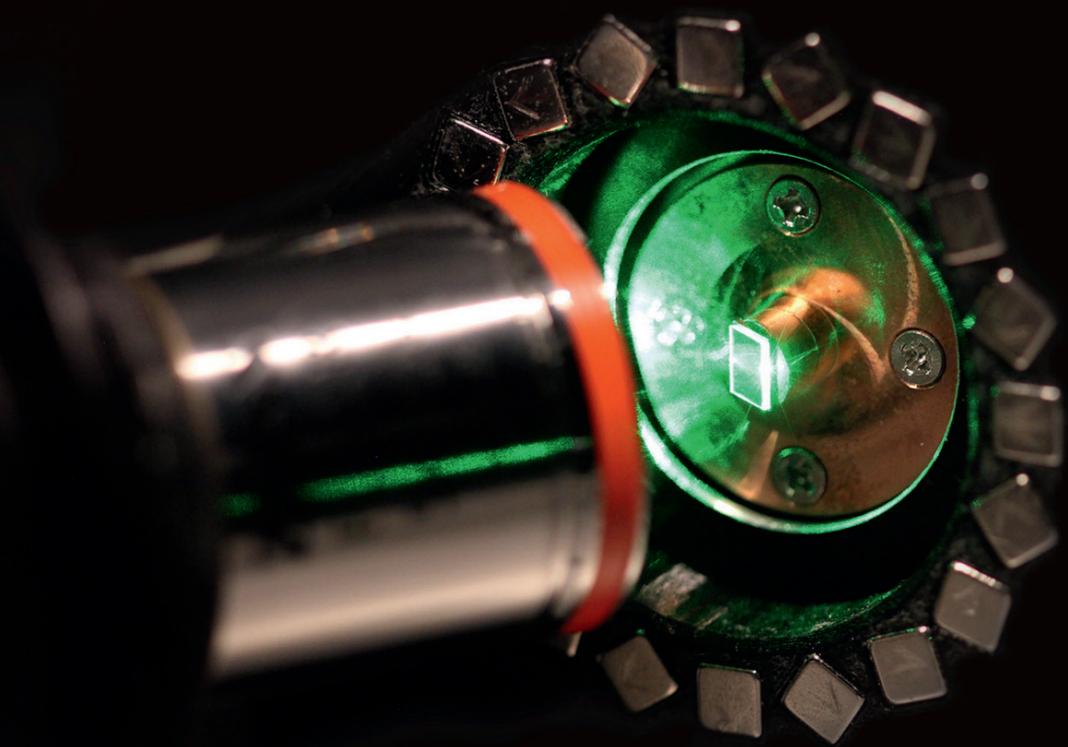


Abbildung 2:
Übersicht zur Governance-Struktur und Arbeitsfeldern von Quantum^{BW}

03 TECHNOLOGIE ROADMAPS



Um die vier zentralen Handlungsfelder von Quantum^{BW} mit konkreten Maßnahmen und Meilensteinen zu unterlegen, wurde in den Bereichen Quantensensorik und Quantencomputing sowie dem damit verbundenen Feld der Quantennetzwerke ein Roadmap-Prozess angestoßen, der den Akteuren innerhalb der Quantum^{BW}-Governance – basierend auf dem Input führender Expertinnen und Experten – einen schlüssigen und verbindlichen Fahrplan für die nächsten Umsetzungsschritte an die Hand geben soll.

Die Roadmaps verfolgen das Ziel, den Standort Baden-Württemberg im nationalen sowie internationalen Wettbewerb der Quantentechnologie in der technologischen und ökonomischen Spitzengruppe zu etablieren. Quantum^{BW} setzt dabei den Schwerpunkt auf den Transfer der herausragenden Forschungsergebnisse

der Landesuniversitäten und außeruniversitären Forschungseinrichtungen in konkrete Anwendungen und regionale Wertschöpfungsketten.

Aufgabe des Roadmap-Prozesses ist es,

- klare themenspezifische Roadmaps für das Land in den nächsten zehn Jahren, d. h. bis 2033 (in Zeitskalen von drei, fünf und zehn Jahren) zu schaffen und diese kontinuierlich weiterzuführen,
- den Abgleich der Landesaktivitäten mit den relevanten nationalen und internationalen Roadmaps zu ermöglichen,
- die kontinuierliche Überprüfung erzielter Fortschritte in Rückkopplung mit den Roadmaps vorzunehmen und hieraus ggf. Veränderungen der Maßnahmen oder Anpassungen der Roadmaps abzuleiten.

Übergreifende Ziele der Roadmaps

1. Die Einnahme einer industriellen Spitzenposition in den Quantentechnologien im Laufe der nächsten zehn Jahre.

2. Die Einnahme einer Spitzenposition im Bereich der Quantensensorik und deren Anwendungen mit breiter Verfügbarkeit über die nächsten zehn Jahre in Baden-Württemberg.

3. Eine internationale Führungsrolle bei industriellen Anwendungen des Quantencomputings und deren Algorithmen mit breiter Verfügbarkeit im Laufe der nächsten zehn Jahre in Baden-Württemberg einzunehmen.

Zur Erreichung der übergeordneten Ziele werden die Roadmaps in individuelle Themenstränge aufgeteilt, die sich inhaltlich an den zentralen Handlungsfeldern des Konzeptpapiers sowie an den entsprechenden Rahmenbedingungen der jeweiligen Quantentechnologiefelder orientieren. Technologiespezifische Herausforderungen, Ziele und Empfehlungen sind in separaten Roadmaps für die Bereiche Quantensensorik und Quantencomputing festgehalten. Innerhalb der Organisationsstruktur von Quantum^{BW} werden die Roadmaps durch das Executive Board, unterstützt durch das Advisory Board sowie die Geschäftsstelle, regelmäßig überprüft und aktualisiert.

Übergreifende Themenstränge und damit verbundene Ziele

	QUANTENSENSORIK	QUANTENCOMPUTING UND ALGORITHMEN
01 Kooperationsprojekte Anwendungen	Unterstützung der vorwettbewerblichen Forschung und des Wissenstransfers im Bereich der Quantensensorik im Hinblick auf zukünftige Schlüsselanwendungen	Unterstützung der vorwettbewerblichen Forschung und des Wissenstransfers zum QC mit Blick auf die Anwendungen für relevante und bestätigte Use Cases und Algorithmen
02 Kooperationsprojekte Basistechnologien	Forschung an den notwendigen Integrationstechnologien für die Quantensensorik (Enabling-Technologien) unterstützen	Schaffung technologischer Grundlagen von QC-Hardware mit Zugangsmöglichkeiten für Netzwerkpartner
03 Grundlagen, Infrastruktur	Schaffung eines wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Ökosystems für die nachhaltige industrielle Nutzung der Quantentechnologien	Unterstützung einer breiten wissenschaftlichen Basis des QC Stacks durch grundlegende Schaffung bzw. Koordination von Infrastruktur
04 Nachwuchsförderung und Ausbildung	Ausbildung und Weiterqualifikation einer ausreichenden Zahl von Fachkräften im akademischen wie nicht-akademischen Bereich der Quantensensorik und des Quantencomputing unter Nutzung bestehender regionaler Strukturen	
05 Ausgründungen	Nutzung und ggf. Erweiterung der Ausgründungs- und Inkubationsaktivitäten des Landes um die Quantentechnologien	

Tabelle 1:
Übergreifende Themenstränge und damit verbundene Ziele

3.1 Roadmap Quantensensorik

Zur Erreichung der übergreifenden Ziele sollen im Rahmen der Roadmap die folgenden zentralen Fragen adressiert werden:

- Welche fundamentalen sozioökonomischen Auswirkungen ergeben sich durch die Quantensensorik?
- Welche Auswirkung hat die Verfügbarkeit dieser neuen Art von Sensorik auf die Industrie in Baden-Württemberg?
- Was sind die ersten wichtigen Use-Cases der Quantensensorik? Wie lassen sich diese im industriellen Maßstab adressieren?
- Welche Märkte profitieren zuerst von der Quantensensorik? Welche Märkte folgen zeitlich gestaffelt?
- Wie kann die Quantensensorik in Massenmärkten nutzbar gemacht werden?
- Welche Synergien ergeben sich für die Industrie im Bereich der Enabling-Technologien?
- Wie können Synergien mit dem Cyber Valley und weiteren KI Aktivitäten im Land geschöpft werden?

3.1.1 Ausgangslage 2023

Quantensensorik, Quantenimaging und Quantenmetrologie gehören zu den am weitesten entwickelten Quantentechnologien. Insbesondere Quantensensoren basierend auf Defekten in Festkörpern stehen kurz vor der Marktreife und es ist mit ersten massentauglichen Produkten in den nächsten drei bis fünf Jahren zu rechnen.

Die Aktivitäten in Baden-Württemberg fokussieren dabei vor allem auf Defekte in

Festkörpern, atomare Systeme in der Gasphase und Photonen. Weitere Schwerpunkte liegen in den Bereichen Materialforschung – mit einem Schwerpunkt auf 2D-Materialien – für die Sensorik, Enabling-Technologien wie Mikroelektronik, Photonik und mikrohybride Aufbau- und Verbindungstechnik sowie in der Verbindung mit der konventionellen Sensorik (hybride Sensoren) und KI.

Eine erfolgreiche Erschließung neuer Anwendungen und Märkte kann in zwei Schritten erreicht werden:

1. Geeignete Nischenanwendungen identifizieren und Produktionskapazitäten im Land schrittweise erweitern. Hierbei kann es sich um Produkte für ausgewählte Nischenanwendungen handeln, die in kleinen Stückzahlen in die entsprechenden Märkte gebracht werden und beteiligten Firmen möglichst frühzeitig einen Return-on-Invest (ROI) ermöglichen.

2. Zielmärkte mit größeren Volumina durch geeignete Applikationen identifizieren und technologisch erschließen. Dazu müssen Quantensensoren drastisch miniaturisiert und weitere Fortschritte bei ihrer skalierbaren Fertigung erzielt werden. Hierfür ist entsprechende Forschung und Entwicklung im Bereich der Integrations-technologien unabdingbar. In dieser zweiten Kategorie können auch Quantenmessnormale und Kalibrierungsdienste für die Zertifizierung dieser neuartigen Quantengeräte und -systeme eingeordnet werden. Aufgrund des breiten Spektrums möglicher Anwendungen und ihrer Spezifität muss eine breite Palette physikalischer Plattformen in Betracht gezogen werden, einschließlich (aber nicht beschränkt auf) gefangene Ionen, ultrakalte Atome, warme und heiße Atomdämpfe, nano- und mikro-mechanische Oszillatoren und optomechanische Systeme, supraleitende und halbleitende Nanoschaltungen, künstliche Systeme wie Quantenpunkte und Spindeldefekte in Festkörpern sowie rein optische Systeme, die nicht-klassische Zustände des Lichts einbeziehen.

3.1.2 Zentrale Herausforderungen bei der Überführung der Quantensensorik in den Markt

Kommerzielle Anwendungen erfordern die Entwicklung miniaturisierter, integrierter, kosteneffizienter und für den Benutzer funktionsfähiger Quantensensoren. Um dies zu erreichen, müssen die folgenden technologischen Herausforderungen gelöst werden:

- Erfolgreiche Integration von Sensor-Qubits mittels klassischer Mikroelektronik und Photonik, um Größe, Kosten, Robustheit und Reproduzierbarkeit ausreichend skalierbar und massenmarktkompatibel zu gestalten.
- Verbesserte Lösungen in den Bereichen Herstellung, Integration und Verpackung sowie in den Quantenmaterialien als Basis für viele Anwendungen in der Quantensensorik (und im Quantencomputing)
- Verbesserter Zugang zu Foundries, z. B. integrierte Photonik und Elektronik.
- Integration von Elektronik und Optik in Sensorplattformen.
- Miniaturisierte Laser- und Vakuumsysteme.
- Nutzung von nano- und mikroelektromechanischen Systemen (NEMS und MEMS), optomechanischen Systemen und Mikrosystemtechnik.
- Definitionen für Standardschnittstellen zwischen Komponenten.
- Entwicklung von Maßnahmen zur Qualitätssicherung und Festlegung von Normen und Zertifizierungen.

3.1.3

Kurz-, mittel- und langfristige Zielsetzungen in der Quantensensorik

Allgemein: Anschlussfähigkeit zu den Ausschreibungen auf Landes-, Bundes- und EU-Ebene zur Maximierung von Synergien und Schließung von Förderlücken herstellen. Es werden über existierende Forschungs- und

Entwicklungsprojekte sowie industrielle Forschung und Entwicklung erste Produkte mit kleineren Stückzahlen vor 2026 erwartet.

ZIELE NACH 3 JAHREN (2023–2026)**ZIELE NACH 5 JAHREN (2023–2028)****ZIELE NACH 10 JAHREN (2023–2033)****01****Kooperationsprojekte
Anwendungen**

Für die nachhaltige industrielle Nutzung der Quantensensorik ist die Erschließung erster Zielmärkte von entscheidender Bedeutung. Hier werden gezielt vom Markt her konzipierte Projekte gefördert, welche die Forschung an der Nutzbarmachung technologisch fortgeschrittener (>TRL 4) Quantentechnologien für bestimmte, ggf. zuvor durch geeignete Prozesse identifizierter Märkte/Anwendungen zum Ziel haben.

Überführung einer signifikanten Anzahl von Quantensensorikprodukten in relevante, ggf. zuvor durch geeignete Prozesse identifizierter Märkte mit kleinen und mittleren Stückzahlen.

Verfügbarkeit der Quantensensorik in Massenmärkten.

02**Kooperationsprojekte
Basistechnologien**

Die Forschung an Enabling-Technologien wie der Mikroelektronik und der Photonik spielt eine zentrale Rolle für eine spätere skalierbare Fertigung von Quantensensoren. Aus diesem Grund sind Forschungsprojekte notwendig, welche gezielt Integrationstechnologien für bestimmte Quantensysteme beforschen.

→ Verfügbarkeit erster Labordemonstratoren hochgradig skalierbarer Quantensensoren.
→ Verfügbarkeit von skalierbaren und parametrisierten Simulationsmodellen zur Auslegung und Optimierung von monolithisch und hybrid integrierten Quantensensoren.

Erste Labordemonstratoren monolithisch integrierter oder in „System-in-Package“-Bauweise realisierter Quantensensoren.

03**Grundlagen,
Infrastruktur**

Es erfolgt die Schaffung einer breiten wissenschaftlichen Basis durch den langfristigen Aufbau neuer Forschungsstrukturen. Zentrales Ziel ist die Schaffung des niederschweligen Zugangs zu neuen Methoden und Technologien (s. 02).

- An den Standorten und überregional werden für alle Partner niederschwellige Zugänge zu relevantem Mess- und Laborequipment geschaffen, welche durch die lokalen Universitäten sowie Institute der Innovationsallianz Baden-Württemberg (innBW) betreut werden. Das gleiche gilt für den Zugang zu Strukturen aus anderen nationalen Großvorhaben, wie beispielsweise der Fraunhofer Forschungsfabrik Mikroelektronik, der DLR Quantencomputing-Initiative oder dem IQST. Der konkrete Zugang wird durch messbare Key Performance Indicators nachgewiesen und wird in einem pragmatischen Verfahren mit niedrigem bürokratischen Aufwand organisiert.
- Für den Technologiezugang ist neben der Koordination die Verfügbarkeit von wissenschaftlich-technischem Personal von zentraler Bedeutung.

→ Fortführung der Grundlagenforschung auf der Basis lokal erarbeiteter Exzellenz und neuer Professuren.
→ Technologiezugang wird angepasst und ggf. je nach den Notwendigkeiten des Fortschritts ausgebaut.

→ Weiteres Befüllen der „Pipeline“ der Quantensensorik durch die Grundlagenforschung.
Verfügbarkeit von Sensor-Qubits mit weiter verbesserten Eigenschaften bei Raumtemperatur.
→ Technologiezugang an den Landesuniversitäten sowie den Instituten der innBW für die Partner in Baden-Württemberg.

04**Nachwuchsförderung
und Ausbildung**

Die erfolgreichen universitären Ausbildungsaktivitäten werden verstärkt und fortgesetzt.

- Schaffung von Nachwuchsprofessuren insbesondere im Bereich der Enabling-Technologien sowie an den Schnittstellen zwischen der Physik und weiteren Disziplinen (Ingenieurwissenschaften, Medizin, Materialwissenschaften).
- Ausbau der Fortbildungsmöglichkeiten bestehender Arbeitnehmer im akademischen wie nicht-akademischen Bereich. Mit dem Fortschritt der Technologie wird die Bedeutung der nicht-akademischen Ausbildung wachsen.

→ Nachwuchsprofessuren sind etabliert.
→ Bestehende Fortbildungsaktivitäten werden regional erweitert und diversifiziert, besonders auch für nicht-akademische Nutzer.

Maximale Diversifizierung der Aus- und Fortbildungsaktivitäten.

05**Ausgründungen**

Schaffung bzw. Unterstützung einer signifikanten Anzahl von Ausgründungen aus den Universitäten bzw. Forschungseinrichtungen; Hinterlegung durch übliche Leistungskennzahlen nach Methoden der Gründerszene und Vernetzung mit Venture Capital.

Überführung einer signifikanten Zahl der Start-Ups in erfolgreiche Unternehmen.

Erfolgreiche Quantenunternehmen am Markt in führender Rolle.

3.1.4

Abgeleitete kurz-, mittel- und langfristige Maßnahmen in der Quantensensorik

Abgeleitete Maßnahmen für 2023: Anschlussfähigkeit zu den Ausschreibungen auf Landes-, Bundes und EU-Ebene zur Maximierung von Synergien und Schließung von Förderlücken herstellen. Es werden über existierende Forschungs- und Entwicklungsprojekte sowie industrielle Forschung und Entwicklung erste Produkte mit kleineren Stückzahlen vor 2026 erwartet.

	MASSNAHMEN BIS 2026	MASSNAHMEN BIS 2028	MASSNAHMEN BIS 2033
01 Kooperationsprojekte Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> → Schaffung geeigneter Kooperations- und Innovationsformate, um in der Interaktion zwischen industriellen Anwendern und Forschern besonders vielversprechende Applikationen zu ermitteln und Commitment auf Seiten der Industrie zu schaffen. → Förderung dreijähriger Forschungsprojekte 2024-2027 mit Schwerpunkt auf den zukünftigen Anwendungen der Quantensensorik (vom Markt her konzipierte Projekte). → Dabei: Verbindung zur konventionellen Sensorik (hybride Sensoren) und zur künstlichen Intelligenz schaffen. → Thematische Workshops zur Findung geeigneter Anwendungen und Zielmärkte. 	<p>Weitere vom Markt her konzipierte Projekte unter Berücksichtigung der technologischen Entwicklungen im Strang 2, d. h. Blick auf erste Anwendungen mit höheren Stückzahlen.</p>	<p>Anwendungsorientierte (vom Markt her konzipierte) Forschungsprojekte für die sukzessive Überführung von Quantensensoren in kontinuierlich wachsende Zielmärkte.</p>
02 Kooperationsprojekte Basistechnologien	<ul style="list-style-type: none"> → Entwicklung von maßgeschneiderten Quantenmaterialien für die Quantentechnologie. → Standardisierung von Quantenmaterialien für reproduzierbare Quantensensorik. → Systematische Qualifizierung von Materialien, Simulationsmodellen und Technologien für die Auslegung und prototypische Fertigung von Quantensensoren, Klassifikation der Materialien und Technologien entlang der Eignung für unterschiedliche Genauigkeitsklassen von Quantensensoren. → Förderung dreijähriger Forschungsprojekte 2024-2027 mit Schwerpunkt auf den Enabling-Technologien für die skalierbare Fertigung von Quantensensoren. → Koordination, Schaffung und Synchronisierung der Möglichkeiten zum Technologiezugang. 	<ul style="list-style-type: none"> → Weitere Forschungsprojekte zur skalierbaren Integration von Quantensensoren unter Berücksichtigung neuer Entwicklungen bei den Sensor-Qubits. → Forschungsprojekte zur monolithischen Integration von Quantensensoren. → Forschungsprojekte zur Absicherung der Zuverlässigkeit von monolithisch und hybrid gefertigten Quantensensoren. 	<p>Technologieorientierte Forschungsprojekte zur Erhöhung der Skalierbarkeit der Quantensensoren mit dem Ziel, hochgradig skalierbare Quantensensoren im BW-Ökosystem fertigen zu können.</p>
03 Grundlagen, Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> → Einbindung relevanter Partner in die Gesamtstruktur des Clusters. → Einrichtung von Stellen (Koordinationsstellen und Tool-Operatorstellen) für den Technologiezugang sowie Schaffung neuer Technologieinfrastruktur bzw. Ergänzung der vorhandenen Technologieinfrastruktur. 	<p>Ergänzende neue Technologie-Infrastrukturen sind geschaffen. Ggf. Ergänzungen unter Berücksichtigung neuer Entwicklungen bei den Sensor-Qubits.</p>	<ul style="list-style-type: none"> → Gezielte Unterstützung der Grundlagenforschung zur Füllung der „Pipeline“ mit neuen Sensor-Qubits. (z. B. durch unterstützende Finanzierungen für Drittmittelanträge) → Schaffung eines funktionalen Systems für den Technologiezugang aus verschiedenen Quellen (Universitäten, innBW, Industrie).
04 Nachwuchsförderung und Ausbildung	<ul style="list-style-type: none"> → Einrichtung von Nachwuchsprofessuren oder Nachwuchsgruppen. → Allgemeines Fortbildungsprogramm bestehender Verbünde (z. B. QSens) weitergeführt und ausgebaut. 	<ul style="list-style-type: none"> → Nachwuchsprofessuren bzw. -gruppen sind erfolgreich eingerichtet. → Übergang auf regionale Einrichtungen und in den nicht-akademischen Fortbildungsbereich. 	<p>Schaffung eines breiten und nachhaltigen Ausbildungssystems sowohl für bestehende wie neu auszubildende Fachkräfte im akademischen wie im nicht-akademischen Bereich.</p>
05 Ausgründungen	<ul style="list-style-type: none"> → Einbindung der Quantensensorik in die Gründerszene und Vernetzung mit Venture Capital (Ausstattung eines Quanteninkubators als Teil der Venture Capital Aktivitäten). → Verknüpfung mit dem QSens-Quanteninkubator sowie anwendungsspezifisch mit Inkubatoren wie der Start-Up Autobahn oder dem AIXpress. 	<p>Überprüfung der Gründerzahlen. Ggf. Anpassung der o. g. Maßnahmen.</p>	<p>Ausreichende Bereitstellung von Venture Capital Angeboten und Maßnahmen entlang der Entstehungskette.</p>

3.2

Roadmap Quantencomputing

Zur Erreichung der übergreifenden Ziele sollen im Rahmen der Roadmap die folgenden zentralen Fragen adressiert werden:

- Wie fundamental ist die Änderung der industriellen Landschaft durch das Quantencomputing?
- Wie ist die Wirkung dieser Industrialisierung von neuer Informationstechnik auf alle Techniken, die das Land Baden-Württemberg heute und in Zukunft ausmachen?
- Wie ist die Wirkung auf die Implementierung in der Breite der High-Tech Industrie in Baden-Württemberg?
- Wie kann die Industrialisierung des gesamten Quantencomputing-Stacks erfolgen?
- Wie kann eine Verknüpfung mit dem Cyber Valley und den KI Aktivitäten im Land erreicht werden?

3.2.1 Ausgangslage 2023

Ziel der Roadmap ist es, den Industriestandort Baden-Württemberg ausgehend von den disruptiven Wirkungen neuartiger Erkenntnisse der Quantenphysik im nationalen sowie internationalen Wettbewerb in der quantentechnologischen und ökonomischen Weltspitze zu etablieren. Dieser Erfolg baut dabei parallel auf eine breite und erfolgreiche Grundlagenforschung in Baden-Württemberg auf. Technologien werden verfügbar gemacht mit einem Fokus auf optischen und photonischen Verfahren. Ferner erfolgt ein breites Aus- und Fortbildungsprogramm zur Sicherung der notwendigen Fachkräfte sowohl durch akademische als auch außerakademische Maßnahmen.

Die Aktivitäten in Baden-Württemberg fokussieren dabei vor allem auf Defekten in Festkörpern wie Diamant, sowie die Nutzung von Photonen. Weitere Schwerpunkte liegen in den Bereichen Materialforschung, Enabling-Technologien wie Kryotechnik und Mikroelektronik, Photonik und mikrohybride Aufbau- und Verbindungstechnik für das Quantencomputing.

3.2.2 Stand der Technik

Der Stand der Technik in den Hardwaretechnologien liegt in der industriellen Verfügbarkeit von physikalischen Qubit-Systemen in verschiedenen Prozessorarchitekturen (z. B. Supraleitende Qubits, Ionenfallen, Neutralatome, Spinbasierte oder photonische Qubits), die mit den Vor- und Nachteilen der verschiedenen Technologieplattformen nutzbar verbunden und angesteuert werden können.

Quantencomputer sind heute Einzelanfertigungen mit einem hohen spezifischen Hardwareanteil. Die Ansteuerung bzw. Programmierung von Quantenprozessoren unterschiedlicher Bauart ist aktuell nicht vereinheitlicht. Es gibt einige Ansätze für die Schaffung einer vereinheitlichten Form, wie zum Beispiel die Qiskit Entwicklungsumgebung von IBM, die sich jedoch noch nicht durchgesetzt hat.

3.2.3 Zentrale Herausforderungen des Quantencomputing

Um perspektivisch in marktnahen Anwendungen eingesetzt werden zu können, müssen Quantencomputer mit hoher Güte der Qubits entwickelt und bewertet werden. Hierfür ist entsprechende Forschung und Entwicklung zur Hardware dieser neuartigen Quantensysteme im Bereich der Materialien, der Prozess-Technologien, der Kühl- sowie der Integrationstechnologien unabdingbar. Parallel dazu spielen für die Softwareentwicklung auch die Entwicklung von Quantenalgorithmen sowie Fortschritte in der Quanteninformatik und der Standardisierung eine zentrale Rolle.

In Differenzierung zu den an anderen Standorten in Deutschland verfolgten Konzepten zum Bau von deutschen Quantencomputern, konzentriert sich die Forschung in Baden-Württemberg auf Ansätze, die insbesondere auf der Grundlage von Photonen, Spin-Qubits in Diamant und Rydberg-Atomen beruhen.

3.2

Roadmap Quantencomputing

Photonische Quantenprozessoren zeichnen sich durch eine große Stabilität der Zustände und eine besonders nahtlose Einbindung in Quantenkommunikationsnetzwerke aus. Die Funktionsweise basiert auf der Erzeugung einzelner Photonen, der Verarbeitung in optischen Netzwerken, sowie einer effizienten Quantenmessung. Die Hardware besteht aus photonischen Komponenten, die Licht auf Quantenebene manipulieren; beispielsweise werden hier photonische Siliziumchips eingesetzt. Eine Herausforderung ist vor allem die Integration einer Vielzahl photonischer Quanten-Bauteile – eine Grundvoraussetzung für einen skalierbaren photonischen Quantenprozessor. Hier ist der Ausbau von Synergien mit der klassischen Photonikindustrie – die in Baden-Württemberg stark vertreten ist – unabdingbar.

Elektronen-Spins, die in Farbzentren von Halbleiterkristallen lokalisiert sind und die mit Kernspins in ihrer unmittelbaren atomaren Nachbarschaft wechselwirken können, ermöglichen Qubit-Topologien mit sehr hoher Konnektivität und skalierbare Qubit-Architekturen, die ein hohes Anwendungspotential für die Quanteninformationsverarbeitung und Quantennetzwerke besitzen. Baden-Württemberg hat eine große Zahl an universitären und außer-universitären Forschungseinrichtungen

mit einer hohen internationalen Reputation auf dem Gebiet der Diamantbasierten Quantensysteme (NV-Zentren in Diamant), die durch Spin-offs und KMU mit einer weitreichenden Expertise in der Herstellung und Prozessierung von synthetischen Diamantschichten flankiert werden.

Digitales Quantenrechnen mit Rydberg-Atomen ist im Vergleich zu traditionellen Systemen von ionischen Qubits oder supraleitenden Qubits eine junge und sich sehr dynamisch entwickelnde Plattform. In den letzten Jahren wurden die Kontrolle, Verschränkung sowie konkurrenzfähige Güten in Qubit-Gatteroperationen demonstriert. Die Plattform hat darüber hinaus ein enormes Innovationspotenzial, das bisher nicht ausgeschöpft wurde. Das beinhaltet die Realisierung einer dynamischen Konnektivität in zwei oder auch drei Dimensionen sowie die Realisierung von Vielteilchen Gattern. Diese beiden Elemente ermöglichen neuartige algorithmische Möglichkeiten und Anwendungsmöglichkeiten in Materialdesign und Quantenchemie.

Um das Versprechen eines Quantencomputers zu erfüllen, müssen verschiedene Schichten von Hardware und Software entwickelt werden, die zusammen als Quantencomputing-Stack bezeichnet werden.

Die Basis des Stacks, bildet der Quantenprozessor mit den Qubits als kleinste Rechen- und Informationseinheit eines Quantencomputers. Jeder Quantencomputer benötigt eine Abstraktionsschicht (Quanten-Firmware-Schicht), die eine Schnittstelle zwischen der Hardware/Kontrollelektronik und der zu realisierenden Anwendungslogik zur Verfügung stellt und die aktuell für jede Quantencomputer-Architektur technologiespezifisch realisiert wird. Eine große Herausforderung besteht darin, dass Qubits extrem störungsempfindlich sind und durch die kleinsten Fluktuationen in ihrer Umgebung gestört werden. Die daraus resultierenden Fehler sind zu korrigieren. Ansätze für eine fehlertolerante Quanteninformatik basieren auf verschiedenen Techniken der Quantenfehlerkorrektur, die ebenfalls Bestandteil des Stacks ist.

Der Stack eines zukünftig fehlertoleranten Quantencomputers besteht demnach aus Schichten, die den Abstraktionsebenen der Software entsprechen. An der Spitze steht Quantum-as-a-Service (QaaS), das Funktionen für die datenbasierte Wertschöpfung bereitstellt und mit denen Nutzerinnen und Nutzer beispielsweise über einen Cloud-Dienst interagieren können. Darunter befinden sich Quantenalgorithmen und -anwendungen, die mit Hilfe von Entwickler-

werkzeugen kodiert werden und eine Abstraktion auf hoher Ebene ermöglichen. Die Algorithmen und Anwendungen werden auf der dritten Ebene kompiliert, um Schaltungen auf kodierten Blöcken zu realisieren. Beim fehlertoleranten Rechnen erfolgt diese Umsetzung auf logischen Qubits, die mit der Quantenfehlerkorrektur (Quantum error correction, QEC) kodiert sind, obwohl die Realisierung des QEC-Codes und anderer damit verbundener Aufgaben eine eigene Ebene einnimmt. Die physikalische Konnektivität zwischen den Geräten und die Kompensation etwaiger Streukopplungen werden in einem Hardwarebewussten Compiler berücksichtigt. Die Quanten-Firmware-Schicht, die für die Minimierung von Hardware-Fehlern verantwortlich ist, befindet sich zwischen dieser Schicht und der physikalischen Hardware. Sie übernimmt alle Aufgaben, die für die Hardware-Kalibrierung, -Einstellung, -Charakterisierung, -Stabilisierung und -Automatisierung erforderlich sind.

Eine Stärke von Baden-Württemberg im Quantencomputing sind die Aktivitäten von führenden Unternehmen, die in der Industrialisierung, Anwendung und Kommerzialisierung von Quantentechnologien eine maßgebliche Rolle einnehmen. Insbesondere im photonischen Quantencomputing als auch bei den Algorithmen für das Quan-

3.2

Roadmap Quantencomputing

tencomputing spielen in Baden-Württemberg Akteure aus Forschung und Industrie eine tragende Rolle.

Durch eine Fokussierung können hier die existierenden technologischen Stärken hervorgehoben und unter breiter Einbindung der verschiedenen Akteure der baden-württembergischen Forschungslandschaft weiterentwickelt werden. Eine Fokussierung ermöglicht zudem eine weitergehende Differenzierung zu anderen Initiativen, soll aber keine Einschränkung der Breite der Forschungsaktivitäten zu verschiedenen technologischen Plattformen im Bereich Quantencomputing darstellen.

Neben der Photonik bestehen im Land gegenwärtig weitere Stärken und Schwerpunkte zum Quantencomputing in Festkörpertechnologien und der Materialforschung, insbesondere der Quantenmaterialien.

Darüber hinaus bestehen in Baden-Württemberg umfassende Kompetenzen in der Entwicklung, Implementierung und Bereitstellung von Quanten-Software

sowie ihrer Standardisierung, Normung und Regulierung. Ziel von Forschung und Industrie ist es zudem, im gesamten Quanten-Software-Entwicklungsprozess durch ganzheitliches Quanten-Software-Engineering performante, automatisierte und steuerbare Lösungen für industrielle Anwendungsfälle zu erforschen und Best-Practices bereitzustellen. Dabei werden im Land essentielle Beiträge zur Quantencomputing-Stackentwicklung geleistet, z. B. durch anwendungsorientierte Lösungen zur Fehlerkorrektur. Basierend auf industriellen Anwendungsfällen werden zudem Benchmarks entwickelt, welche den Stand des Quantencomputings für verschiedene industrielle Fragestellungen quantifizieren und Transparenz herstellen.

Enormes Potenzial für das Quantencomputing in Baden-Württemberg wird in der Verbindung mit Künstlicher Intelligenz (Quantum Machine Learning) und klassischem Höchstleistungsrechnen (hybrides Quantencomputing) gesehen. Hier sind exzellente Strukturen in Wissenschaft und Wirtschaft vorhanden, auf die weiter aufgebaut werden soll.

Ferner bestehen Bezüge zur Quantenkommunikation, hierin vor allem den Quantennetzwerken, die insbesondere mit Blick auf die Verschränkung von Teilsystemen im Quantencomputer notwendig sind, z. B. um Quantenspeicher und Quantenprozessor(en) quantenmechanisch zu koppeln.

Dieser kritische Aspekt der Quantencomputerhardware wird in der von Quantum^{BW} entwickelten Roadmap mitbetrachtet, ohne den vollen Anspruch auf den Ausbau der Quantenkommunikation in Baden-Württemberg zu erheben. Solche Netzwerke und die Untersuchung ihrer Eigenschaften sind inhärenter Bestandteil der Forschung der Hardware und Systembetrachtung des Quantencomputers, da dieser Fortschritt zur Skalierung der verschiedenen Architekturen beiträgt. Je nach ihrer zu erwartenden Bedeutung werden diese beforscht.

3.2.4

Kurz-, mittel- und langfristige Zielsetzungen im Quantencomputing

Allgemein: Anschlussfähigkeit zu den Ausschreibungen auf Landes-, Bundes und EU-Ebene zur Maximierung von Synergien und Schließung von Förderlücken herstellen.

	ZIELE NACH 3 JAHREN (2023–2026)	ZIELE NACH 5 JAHREN (2023–2028)	ZIELE NACH 10 JAHREN (2023–2033)
01 Kooperationsprojekte Anwendungen	<p>Schaffung von vorwettbewerblicher Forschung zu den Algorithmen des Quantencomputings.</p> <ul style="list-style-type: none"> → Der Blick auf die Anwendungen für relevante und bestätigte Use Cases in einer breiten Form wird gestärkt und durch signifikante Projekte umgesetzt. Erste Projekte zu Transfer- und Potenzialanalysen mit der Wirtschaft werden parallel gestartet (Quick Checks/ Exploring Projects). → Die KI-Verbindung des Quantencomputings mit Cyber Valley und Ipai sowie Anwendungen des Quantencomputings in der Materialforschung wird gestärkt. → Die Nutzung hybrider Ansätze des Quantencomputings wird zentral verfolgt. Es wird eine Quantum Computer Hardware vom Stand der Technik, z. B. in Ehningen, bereitgestellt mit parallelen Demonstratoren und weiterem Zugang zu anderen Quantencomputing Technologien für den niederschweligen Zugang zu Quantencomputing für KMUs. 	<ul style="list-style-type: none"> → Ein Anteil der Forschungsprojekte bei den Algorithmen wird unter dem Lead der Industrie umgesetzt. → Schaffung eines Demonstrationszentrums mit Schulungen für KMUs und Quick Checks/ Exploring Projects (3-5 Monate). 	<p>Verfügbarkeit des Quantencomputings als normale IT-Technologie mit niederschweligen Angeboten und Ressourcen verfügbar.</p>
02 Kooperationsprojekte Basistechnologien	<p>Schaffung von Technologieverfügbarkeit bei Vermeidung von Doppelstrukturen</p> <ul style="list-style-type: none"> → Schaffung niederschweliger Zugänge für alle Partner zu relevantem Mess- und Laborequipment, welche durch die lokalen Universitäten bzw. Einrichtungen betreut werden. → Zugang zu parallelen Strukturen aus anderen nationalen Großvorhaben, wie beispielsweise der Fraunhofer Forschungsfabrik Mikroelektronik, der DLR Quantencomputing-Initiative oder dem IQST. Der konkrete Zugang wird durch messbare KPIs nachgewiesen und in einem pragmatischen Verfahren mit niedrigem bürokratischen Aufwand organisiert. → Es erfolgen weiterhin Vergleiche der Quantencomputing-Technologien in einem offenen Rennen. Für den Technologiezugang ist für die Universitäten neben der Koordination die Einrichtung von Dauerstellen zentral wichtig. → Photonische Systeme stehen im Zentrum der Betrachtungen in Baden-Württemberg, es erfolgt entsprechende Materialforschung dazu und F&E zu deren Integration. 	<p>Technologiezugang wird angepasst und ausgebaut nach den Notwendigkeiten des Fortschritts.</p>	<p>Technologiezugang an den Universitäten und Bereitstellung für die beteiligten Universitäten und Ausgründungen.</p>
03 Grundlagen, Infrastruktur	<p>Es erfolgt die Schaffung einer breiten wissenschaftlichen Basis durch die Forschungsstrukturen. Zentrales Ziel ist die Schaffung des niederschweligen Zugangs zu neuen Methoden und Technologien (siehe Strang 2).</p>	<p>Fortführung der Grundlagenforschung auf der Basis lokal erarbeiteter Exzellenz und neuer Professuren.</p>	<p>Weiteres Nachfüllen der „Pipeline“ der Quantencomputer durch die Grundlagenforschung, Öffnung für neue Themen in der Post-Quantum Ära.</p>
04 Nachwuchsförderung und Ausbildung	<ul style="list-style-type: none"> → Die erfolgreichen universitären Ausbildungsaktivitäten werden verstärkt und fortgesetzt. → Dazu erfolgt die Schaffung von Nachwuchsprofessuren und Stellen im akademischen Mittelbau für Technologiezugang. → Sie werden ergänzt um Fortbildungsmöglichkeiten bestehender Arbeitnehmer im akademischen wie nicht-akademischen Bereich. Mit dem Fortschritt der Technologie wird die Bedeutung auch der nicht-akademischen Ausbildung wachsen. 	<ul style="list-style-type: none"> → Nachwuchsprofessuren/ Nachwuchsgruppen sind etabliert → Die Fortbildungsaktivitäten (Fraunhofer, IQST etc.) werden regional erweitert und diversifiziert, besonders auch für nicht-akademische Nutzer. 	<p>Maximale Diversifizierung der Aus- und Fortbildungsaktivitäten.</p>
05 Ausgründungen	<p>Schaffung bzw. Unterstützung einer signifikanten Anzahl von Ausgründungen aus den Universitäten bzw. Forschungseinrichtungen; Hinterlegung durch übliche Leistungskennzahlen nach Methoden der Gründerszene und Vernetzung mit Venture Capital.</p>	<p>Überführung einer signifikanten Zahl der Start-Ups in erfolgreiche Unternehmen.</p>	<p>Erfolgreiche Quantenunternehmen am Markt in führender Rolle.</p>

3.2.5

Abgeleitete kurz-, mittel- und langfristige Maßnahmen im Quantencomputing

Abgeleitete Maßnahmen für 2023: IP Technische Verwertung: Durch Kooperationsverträge wird sichergestellt, dass die IP der Projektpartner initial an die Partner lizenziert werden muss (Erstverwertungsrecht); hierdurch soll die regionale Verwertung in Baden-Württemberg gefördert werden. Das Cyber Valley oder der Zukunftscluster QSens können hierfür als Vorbild dienen.

	MASSNAHMEN BIS 2026	MASSNAHMEN BIS 2028	MASSNAHMEN BIS 2033
01 Kooperationsprojekte Anwendungen	<ul style="list-style-type: none"> → Für Q2/2024 Fortsetzung der wissenschaftlichen Projekte 2024-2027 mit Schwerpunkt auf den durch Forschung etablierten Use Cases in Softwarebereich. → Erste Quick Checks/Exploring Projects, wo bereits inhaltlich sinnvoll zur KMU Förderung. → Dabei: Verbindung besonders zum hybriden Quantencomputing und, wo technisch geboten, Quantum Machine Learning schaffen. <p>Für Q2/2024 Bereitstellung einer neuen Generation einer zentralen Quantencomputer Hardware und parallelen Zugängen zu vergleichbaren Technologien.</p>	<p>Überführung in industriegeführte Projekte bei der Software und Exploring Projects, Demonstrator-rooms.</p>	<p>Bildung eines Forschungs- und Entwicklungs-Ökosystems für Quantenalgorithmen.</p>
02 Kooperationsprojekte Basistechnologien	<ul style="list-style-type: none"> → Koordination, Schaffung und Synchronisierung der Zugangsmöglichkeiten zu Technologien. 	<p>Überprüfung des Technologieangebots und Unterstützung von Ausgründungen.</p>	<p>Schaffung eines funktionalen Systems für den Technologiezugang aus verschiedenen Quellen (Universitäten, Fraunhofer, IQST, Industrie, soweit dort gewünscht) als Modell für grundsätzlichen Technologiezugang.</p>
03 Grundlagen, Infrastruktur	<ul style="list-style-type: none"> → Einbindung relevanter Partner in die Gesamtstruktur des Clusters. <p>Für die Universitäten: Einrichtung von Dauerstellen für den Zugang, Unterstützung des Netzwerks Infrastruktur durch bekannte Aktivitäten an den Universitäten, aber auch bei den Forschungseinrichtungen (Fraunhofer, IQST) und Aufsetzen/ Ergänzungen neuer Infrastruktur, z. B. Technologie.</p>	<ul style="list-style-type: none"> → Ergänzende neue Infrastrukturen/Technologie sind geschaffen. 	<p>Bereitstellung von ausreichender Grundlagenforschung zur Füllung der Nachfolgetechnologien.</p>
04 Nachwuchsförderung und Ausbildung	<ul style="list-style-type: none"> → Einrichtung von Nachwuchsprofessuren oder Nachwuchsgruppen. → Allgemeines Fortbildungsprogramm z. B. Fraunhofer Akademie, weitergeführt und ausgebaut. 	<ul style="list-style-type: none"> → Nachwuchsprofessuren sind erfolgreich unterstützt. Übergang auf regionale akademische Bildungseinrichtungen und in den nicht-akademischen Fortbildungsbereich. 	<ul style="list-style-type: none"> → Schaffung eines breiten und nachhaltigen Ausbildungssystems sowohl für bestehende wie neu auszubildende Fachkräfte im akademischen wie im nicht-akademischen Bereich.
05 Ausgründungen	<p>Einbindung des Quantencomputings in die Gründerszene und Vernetzung mit Venture Capital (Ausstattung eines Quanteninkubators als Teil der Venture Capital Aktivitäten).</p>	<ul style="list-style-type: none"> → Überprüfung der Gründerzahlen. <p>Ggf. Anpassung der o. g. Maßnahmen.</p>	<p>Ausreichende Bereitstellung von Venture Capital Angeboten und Maßnahmen entlang der Entstehungskette.</p>



quantumbw.de

IMPRESSUM

Herausgeber:

Ministerium für Wissenschaft, Forschung und
Kunst Baden-Württemberg
Königstraße 46
70173 Stuttgart
www.mwk.baden-wuerttemberg.de

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit
und Tourismus Baden-Württemberg
Neues Schloss
Schlossplatz 4
70173 Stuttgart
www.wm.baden-wuerttemberg.de

Fotos:

Titel IQST – Quantenoptik,
Heiko Grandel (Wissenschaft – Grandel-Werbefotografie)
Seite 2 Fraunhofer IAF – Diamantwachstum
Seite 4 Wil Stewart auf Unsplash
Seite 20 Fraunhofer IAF – HF Sensorchip-Diamant

Druck:

Februar 2025

Copyright

© 2025, Ministerium für Wissenschaft,
Forschung und Kunst Baden-Württemberg

Ministerium für Wirtschaft, Arbeit
und Tourismus Baden-Württemberg