

Antwort

der Bundesregierung

**auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Anna Christmann, Kai Gehring, Margit Stumpp, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/ DIE GRÜNEN
– Drucksache 19/24762 –**

Förderung von Quantentechnologien

Vorbemerkung der Fragesteller

Die zweite Quantenrevolution, einzelne quantenmechanische Zustände zu kontrollieren, ist nicht mehr nur das abstrakte Versprechen einzelner Physiker wie Richard P. Feynman. Vielmehr sind bereits heute mögliche erste Anwendungen absehbar. So operieren hochgenaue Messtechniken auf Grundlage einzelner Quantenzustände mit denen z. B. kleinste Änderungen im Erdschwerefeld aus dem Weltall sichtbar gemacht werden könnten. Auch werden bereits erste Prototypen vollständig abhörsicherer Quantennetzwerke aufgebaut und – wie im letzten Jahr geschehen – die potentielle Überlegenheit des Quantencomputers über den klassischen Computer experimentell bewiesen. Aus Letzterem ergeben sich eine Vielzahl an Anwendungsmöglichkeiten in der Optimierung von Prozessen, im Durchsuchen extrem großer Datenbanken oder in der Simulation von komplexen Materialien, woraus sich enorme disruptive Veränderungen für die Gesellschaft ergeben. All dies geht einher mit einem international stark gestiegenen Interesse an Quantentechnologien, das sich in enormen Investitionssummen in den USA und Chinas niederschlägt und welche sich in Größenordnungen von Hunderten Millionen Euro pro Jahr bewegen.

Die Europäische Union hat im Jahr 2018 das Quantum Flagship gestartet, um diverse Quantentechnologien mit einer Gesamtsumme von 1 Mrd. Euro zu fördern. Die Bundesregierung veröffentlichte im gleichen Jahr das Forschungsprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“. Auf Grundlage der Empfehlungen aus Wissenschaft (QUTEGA: „Quantentechnologien Grundlagen und Anwendungen“, vgl. <https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Qutega-QT-Grundlagen-und-Anwendungen-01-2017-C1.pdf>) und Wirtschaft („Förderung von Quantentechnologien, Positionspapier der Deutschen Industrie“, vgl. https://www.photonikforschung.de/media/quantentechnologien/pdf/Quantentechnologie_bf.pdf) wurden unter Federführung des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) Maßnahmen beschlossen, um (1) die Forschungslandschaft zu stärken, (2) Forschungsnetzwerke für neue Anwendungen zu schaffen, (3) Leuchtturmprojekte zu etablieren, (4) die Sicherheit und technologische Souveränität zu gewährleisten, (5) die internationale Zusam-

menarbeit zu gestalten und (6) die Menschen im Land mitzunehmen. Aufgeteilt auf die Themenbereiche Quantenkommunikation, Quantencomputing, Quantenmetrologie und Basistechnologien sollen so von 2018 bis 2022 insgesamt über 650 Mio. Euro investiert werden.

Gleichzeitig werden seit 2012 über das BMBF-Programm „Photonik Forschung Deutschland“ (vgl. https://www.photonikforschung.de/media/branche/pdf/BMBF_Photonik_Forschung_Deutschland_final_1.pdf) aus der „Agenda Photonik 2020“ (vgl. https://www.photonikforschung.de/media/branche/pdf/2016_Agenda_Photonik_2020_Update_bf_C1.pdf) lichtbasierte Grundlagenforschung und Schlüsseltechnologien, die in enger Beziehung zu vielen der genannten Quantentechnologien stehen, mit jährlich rund 100 Mio. Euro gefördert. Ziel ist es hier die gute Ausgangslage Deutschlands in der Photonikforschung zu nutzen, um Produkte und Lösungen für verschiedene Themenkomplexe wachsender Märkte wie z. B. auch Komponenten von Quantennetzwerken zu entwickeln.

Hinsichtlich der bisher bewilligten und abgerufenen Mittel wurde seitens der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN auf Bundestagsdrucksache 19/21858 geantwortet, dass in den Jahren von 2015 bis 2023 Quantentechnologien mit 345,3 Mio. Euro gefördert werden.

Zusätzlich zu diesen Summen hat die Bundesministerin für Bildung und Forschung Anja Karliczek am 31. Januar 2020 angekündigt, für Quantencomputing weitere 300 Mio. Euro zur Verfügung stellen zu wollen (vgl. <https://www.bmbf.de/de/karliczek-wir-starten-strategische-initiative-zum-quantencomputing-10748.html>). Zudem hat der Koalitionsausschuss am 3. Juni 2020 beschlossen, weitere 2 Mrd. Euro in Quantentechnologien zu investieren, um insbesondere „ein industrielles Standbein in Hard- und Software aufzubauen“ und „mindestens zwei Quantencomputer zu bauen“ (vgl. Nummer 44. in https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Schlaglichter/Konjunkturpaket/2020-06-03-eckpunktepapier.pdf?__blob=publicationFile).

Nach Ansicht der Fragestellenden handelt es sich bei diesen hohen Summen um Zukunftsinvestitionen in eine wichtige Schlüsseltechnologie, da sowohl sicherheitsrelevante Aspekte berührt werden als auch enorme positive Potentiale durch die Anwendung von Quantentechnologien möglich sind. Die zur Verfügung gestellten Mittel müssen allerdings strategisch sinnvoll und im Sinne des Allgemeinwohls eingesetzt werden. Im Wettbewerb mit den USA und China gilt es, in einer wichtigen Zukunftstechnologie den Anschluss nicht zu verlieren. Dafür müssen die für Quantentechnologien vorgesehenen Gelder zügig in die Forschung und Entwicklung gelangen.

Angesichts der enormen Investitionssummen und der großen innovationspolitischen Bedeutung bestehen viele Unklarheiten über die Förderstrategien der Bundesregierung.

1. Hat die Bundesregierung die potentiellen Auswirkungen von Quantentechnologien auf die Gesellschaft bewertet, und wenn ja, wie (bitte auf die Bereiche Quantenkommunikation, Quantencomputing, Quantenmetrologie und Basistechnologien für Quantentechnologien aufteilen), welche zentralen Anwendungsfelder von Quantentechnologien sieht die Bundesregierung als besonders erfolgsversprechend oder wichtig, und wie sieht die Bundesregierung den künftig möglich werdenden Nutzen von Quantentechnologien für die Umwelt und zum Erreichen der Klimaziele?

Quantentechnologien der zweiten Generation sind ein relativ neues Gebiet der Physik und Technik, in dem die spezifischen Eigenschaften der Quantenmechanik ausgenutzt werden. Die daraus abgeleiteten Technologien sollen in praktische Anwendungen wie z. B. Quantensensorik und -metrologie, Quantenkom-

munikation und Quantencomputing überführt werden. Aus den Chancen der Quantentechnologien ergeben sich zahlreiche potenzielle Auswirkungen auf Wirtschaft und Gesellschaft. Im Einzelnen:

– Sensorik und Metrologie

Quantenmechanische Zustände sind auf Messgrößen wie z. B. elektrische, magnetische und Gravitationsfelder äußerst empfindlich und können daher als Basis für ultrapräzise Sensoren dienen. Es wird angenommen, dass in mehreren Anwendungen in der nächsten Dekade signifikante Fortschritte erzielt werden können, z. B. in der Medizintechnik (u. a. bei der Magnetoenzephalografie). Satellitengestützte Sensoren könnten in der Klima- und Umweltforschung genutzt werden.

– Quantenkommunikation

In der Quantenkommunikation sieht die Bundesregierung eine Schlüsseltechnologie zur Sicherung der technologischen Souveränität Deutschlands. Sichere Kommunikationsnetzwerke haben in modernen Informationsgesellschaften den Stellenwert einer kritischen Infrastruktur. Quantenkommunikation kann unsere Gesellschaft auch zukünftig vor Gefährdungen durch Cyberangriffe und Datenlecks schützen. Erste erfolgversprechende Anwendungsfelder werden in der Kommunikation zwischen Bundeseinrichtungen und Behörden sowie bei kritischen Infrastrukturen gesehen.

– Computing und Simulation

Die besonderen Eigenschaften der Quantentechnologien machen den Quantencomputer zu einer Art ultraschnellem Parallelrechner mit enormem Potenzial für wesentliche Herausforderungen aus den Bereichen Materialwissenschaft, Pharmaindustrie, Verschlüsselung oder Optimierungsaufgaben z. B. im Verkehr. Ein funktionsfähiger Quantencomputer könnte solche Aufgaben erstmals lösen, an denen selbst die besten herkömmlichen Supercomputer scheitern.

2. Wie sieht die Bundesregierung den Entwicklungsstand der Quantentechnologien in Deutschland, insbesondere vor dem Hintergrund der nun zehnjährigen Förderprogramme „Photonik Forschung Deutschland“ und „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“?

Das genannte Förderprogramm „Photonik Forschung Deutschland“ ist mit den Quantentechnologien (der zweiten Generation) nur mittelbar verbunden; die dort adressierten Technologien nutzen nicht die Eigenschaften einzelner Quantenzustände. Das Regierungsprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ startete im September 2018. Der Entwicklungsstand der Quantentechnologien resultiert daher nicht bzw. nur aufgrund erster, seit 2018 geförderter Forschungs- und Entwicklungsprojekte (FuE-Projekte) aus den genannten Programmen.

- a) Wie sieht sie den Fortschritt im Bereich der Quantenkommunikation, insbesondere in Bezug auf Übertragungslänge und Übertragungsraten (Schlüsselraten) von Quantennetzwerken, wie ist der Entwicklungsstand bei Quantenrepeatern, und wann rechnet die Bundesregierung mit dem ersten praktisch einsetzbaren Quantennetzwerk in Deutschland?

Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) plant, bis 2026 die Initiative QuNET zu fördern, die zum Ziel hat, die technologischen Grundlagen für Quantennetze zu erforschen und zu entwickeln.

Das BMBF fördert seit 2010 die Erforschung und Entwicklung von Quantenrepeatern. Es ist davon auszugehen, dass als Ergebnis des Forschungsprojekts Q.Link.X Mitte 2021 der erste Quantenrepeaterknoten als funktionsfähiger Labordemonstrator verfügbar sein wird. Solche Knoten werden die elementaren Bausteine von künftigen Quantenrepeaternetzen darstellen. Die zu erwartenden Ergebnisse werden sowohl die Übertragungslänge als auch die Übertragungsraten entscheidend beeinflussen.

- b) Wie sieht sie den Fortschritt in der Entwicklung von Quantencomputern, insbesondere die verschiedenen Ansätze für Qubit-Plattformen des gatterbasierten Quantencomputers, das topologischen Quantencomputing und das adiabatische Quantencomputing (bitte die unterschiedlichen Ansätze bewerten)?

Im Bereich des Quantencomputing verfügt Deutschland über eine exzellente Grundlagenforschung; Entwicklungsbedarf besteht in der Systemkompetenz. Im Bereich der Atom- und Ionenfallen für Gatter-basierte Quantencomputer sind deutsche Forschungsgruppen international mit führend; bei Supraleitern bestehen ebenfalls umfangreiche, ausgewiesene Forschungsaktivitäten. Im Bereich des topologischen Quantencomputing gibt es erste Grundlagenarbeiten. Das adiabatische Quantencomputing ist zurzeit kein ausgewiesener Schwerpunkt der Forschung in Deutschland.

- c) Wie sieht sie die Entwicklung von kompletten Systemarchitekturen für Quantencomputer, wie sie beispielsweise am Forschungsinstitut QuTech in Delft, Niederlande, entwickelt werden, und wie bewertet sie den Entwicklungsstand von Algorithmen und Anwendungen für Quantencomputer in Deutschland?

Im Bereich kompletter Systemarchitekturen hat Deutschland im internationalen Wettbewerb Nachholbedarf, insbesondere im Vergleich mit nordamerikanischen Unternehmen wie z. B. Google und IBM. Die Bundesregierung hat daher im Januar 2020 die Strategische Initiative Quantencomputing gestartet. Das Ziel dieser BMBF-Initiative ist es, hier zeitnah Kompetenzen aufzubauen. Ein erster Schritt wurde 2020 mit der Förderinitiative „Quantenprozessoren und Technologien für Quantencomputer“ gemacht. Bei Algorithmen und Anwendungen haben sich Forschungsgruppen in Deutschland in den letzten 24 Monaten gut aufgestellt. Unternehmen werden frühzeitig durch Verbundprojekte miteingebunden. Dies zeigte sich 2020 u. a. durch die sehr gute Resonanz auf die BMBF-Förderinitiative „Quanteninformatik – Algorithmen, Software, Anwendungen“.

- d) Wie sieht sie den Entwicklungsstand der Quantenmetrologie in Deutschland?

Bei mehreren Technologieansätzen der Quantensensorik betreibt Deutschland Spitzenforschung. Die Arbeiten zu sogenannten Stickstoff-Fehlstellenzentren setzen international Maßstäbe; exzellente Arbeiten gibt es u. a. zur Atominterferometrie, insbesondere für Experimente in Weltraum, zu Atomuhren sowie zu optisch gepumpten Magnetometern. Erste Unternehmen bereiten für Anwendungen auf der Basis der Quantensensorik den Markteintritt vor. Insgesamt ist Deutschland hier hervorragend aufgestellt.

- e) Wie sieht sie den Entwicklungsstand der Basistechnologien für Quantentechnologien in Deutschland?

Aufgrund der unterschiedlichen Anforderungen der Quantensysteme erstrecken sich die sogenannten Enabling Technologies über viele Branchen, von Optik und Photonik über Mikrowellentechnik bis hin zu Kryotechnik (Kühlung) und Vakuumtechnik. Ein wichtiger Bereich ist die Entwicklung verbesserter Lichtquellen, wie beispielsweise Laser oder Einzelphotonenquellen. Hier gibt es in Deutschland hervorragende Expertise sowohl im universitären als auch im außeruniversitären und im industriellen Umfeld. Erste unternehmerische Aktivitäten gibt es auch bei der Kryotechnik und bei spezifisch ausgelegten Kontroll- und Messinstrumenten. Insgesamt ist Deutschland auch in diesem Bereich hervorragend positioniert.

3. Inwiefern erfolgt seitens der Bundesregierung ein kontinuierliches Monitoring der technologischen Fortschritte der von ihnen im Förderprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ definierten Teilbereiche (Quantenkommunikation, Quantencomputing, Quantenmetrologie und Basistechnologien für Quantentechnologien)?
- a) Wenn ja, in welchen Zeitabschnitten erfolgt dieses, welche Parameter werden für das Monitoring herangezogen, welche Personengruppen sind im Evaluationsprozess involviert, und wo werden diese Erkenntnisse veröffentlicht (bitte nach den vier Teilbereichen aufteilen)?
- b) Wenn nein, warum nicht, und soll ein solches Monitoring zeitnah durchgeführt werden?

Alle im Rahmen des Regierungsprogramms geförderten Projekte unterliegen einem kontinuierlichen Monitoring durch die von den beteiligten Ressorts für die jeweiligen Themengebiete beauftragten Projektträger. Die Parameter folgen aus den Zielstellungen der jeweiligen Projekte. Abschlussberichte aller Forschungsprojekte werden in der Technischen Informationsbibliothek des Leibniz-Informationszentrums Hannover publiziert. Übergeordnet werden der Stand der Technik und die erreichten technologischen Fortschritte in den verschiedenen Themenschwerpunkten anlässlich öffentlicher Statusseminare von Projektverbänden sowie anlässlich von Fachgesprächen mit der Wissenschaftsgemeinschaft erörtert.

4. Welche technischen Erwartungen hat die Bundesregierung bezüglich der Entwicklung von Quantencomputern in den nächsten Jahren?
- a) Strebt die Bundesregierung den Bau eines deutschen und Unterstützung eines europäischen Quantencomputers mit 100 funktionierenden physischen Qubits in den nächsten zwei Jahren an?

Die Fragen 4 und 4a werden im Zusammenhang beantwortet.

Der Bau eines europäischen Quantencomputers mit 100 funktionierenden physischen Qubits wird im nationalen Rahmen durch die Beteiligung deutscher Forschungsgruppen an den entsprechenden Aktivitäten des EU Quantum Flagship unterstützt (hier u. a. durch das von deutschen Partnern koordinierte Projekt OpenSuperQ). Flankierende Projekte zum EU Quantum Flagship werden von der Bundesregierung u. a. im Rahmen der BMBF-Initiative „Quantenprozessoren und Technologien für Quantencomputer“ gefördert. National sind Entwicklung und Aufbau eines Quantencomputers mit 100 funktionierenden physischen Qubits ebenfalls geplant. Grundlagen adressiert die genannte Förderinitiative des BMBF zu Quantenprozessoren; eine weiterführende Initiative befin-

det sich in Vorbereitung. Im Übrigen wird auf die Antwort zu den Fragen 2c sowie 19 bis 20d verwiesen.

- b) Welche technischen Erwartungen hat die Bundesregierung in der Entwicklung von Quantencomputern der nächsten zehn Jahre in Bezug auf Anzahl an zusammen funktionierenden Qubits und Fehlerraten dieser?

Die Entwicklung von Quantencomputern ist eine enorme technologische Herausforderung. Qubits sind sehr empfindliche Systeme, die durch äußere Einflüsse ihrer Umgebung gestört werden und damit ihre speziellen Eigenschaften verlieren. Dies macht eine Fehlerkorrektur mittels einer sehr großen Anzahl von Qubits notwendig. Die Entwicklung sehr großer Systeme mit vollständiger Fehlerkorrektur geht voraussichtlich über den zu erwartenden Fortschritt der nächsten Dekade hinaus. In der aktuellen Forschung versucht man jedoch, bereits mit kleineren, nicht fehlerkorrigierten Systemen Vorteile zu erzielen. Diese sogenannten „Noisy Intermediate-Scale Quantum“-Systeme sind bereits in naher Zukunft realisierbar. Mittelfristig ist es das Ziel der Forschung in Deutschland, mit diesen einen sogenannten Quantenvorteil für praxisrelevante Anwendungen zu demonstrieren. Nach zehn Jahren soll Deutschland mit souveräner Technologie mit an der Spitze des internationalen Wettbewerbs stehen. Die Anzahl funktionierender Qubits und Fehlerraten hierfür ist zurzeit nicht seriös abzuschätzen.

- 5. Welche Ziele möchte die Bundesregierung mit ihrer Förderung von Quantentechnologien erreichen?

Die übergeordneten Ziele der Bundesregierung bei der Förderung der Quantentechnologien sind im Regierungsprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ formuliert.

- a) Welche weiteren messbaren Ziele setzt sich die Bundesregierung im Bereich Quantentechnologien, insbesondere bei Quantencomputern, für die Jahre 2022, 2025, 2030 und 2040?

Bezüglich der Ziele bis 2030 wird auf die Antwort zu Frage 4b verwiesen. Messbare Ziele über diesen Zeitrahmen hinaus können aufgrund des gegenwärtigen, frühen Entwicklungsstands und der zu erwartenden dynamischen Entwicklungen im Bereich der Quantentechnologien nicht angegeben werden.

- b) Werden die ökologischen Chancen und Risiken des Einsatzes von Quantencomputing und ein vertretbares Verhältnis zwischen Energieaufwand und erbrachter Rechenleistung erforscht – gerade vor dem Hintergrund, dass die beiden dominierenden Systeme (supraleitende Qubits und Ionen-Qubits) teilweise nahe des absoluten Nullpunkts (–273 °C) betrieben werden müssen und damit teilweise extrem energieintensiv sind?

Die ökologischen Chancen des Einsatzes von Quantencomputern begründen sich in vielfältigen Potenzialen z. B. für die Energieeinsparung durch verbesserte Produktionslogistik, die Verkehrssteuerung, um Staus zu vermeiden, die Materialoptimierung für leichtere Fahrzeuge, die Batterieforschung, die Entwicklung neuer Katalysatoren oder verbesserte Methoden zur Herstellung von Dünger. Es wird erwartet, dass Quantencomputer zukünftig auch aufgrund ihrer hohen Leistungsfähigkeit selbst trotz der erforderlichen Kühlung potenziell signifikant energieeffizienter sind als konventionelle Hochleistungsrechenzentren.

Spezifische ökologische Risiken des Einsatzes von Quantencomputern sind nicht bekannt.

- c) Bis wann sollte in Deutschland ein breites Quantennetzwerk zur abhörsicheren Kommunikation aufgebaut werden?

Die Bundesregierung vertritt grundsätzlich die Position, dass in der Breite Post-Quanten-Kryptografie zur Absicherung ausreichend ist, sodass Quantennetzwerke aus Sicherheitsperspektive in der Breite derzeit nicht erforderlich sind.

Das US-amerikanische National Institute of Standards and Technology (NIST) hat 2016 einen Prozess zur Standardisierung von Post-Quanten-Kryptografie gestartet. Im Juli 2020 hat die dritte (und finale) Runde in diesem Prozess begonnen. Erste Entwürfe für Standards werden voraussichtlich erst ab 2022 veröffentlicht. Die NIST-Standards sollten dann auch in Deutschland genutzt werden, da davon auszugehen ist, dass sie sich weltweit durchsetzen werden.

Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI) hat bereits im März 2020, also vor Abschluss des NIST-Prozesses, zwei Einreichungen im NIST-Verfahren für einen quantencomputerresistenten Schlüsselaustausch in die Technische Richtlinie TR-02102-1 („Kryptografische Verfahren: Empfehlungen und Schlüssellängen“) aufgenommen. Dies dient dazu, den Umstieg auf Post-Quanten-Kryptografie zu beschleunigen und der Industrie Hinweise zu geben, in welche Richtung sich die Anforderungen an Produkte entwickeln werden. Zudem hat das BSI im April 2020 erste Handlungsempfehlungen zur „Migration zu Post-Quanten-Kryptografie“ veröffentlicht. Darin werden verschiedene Aspekte beleuchtet, die bei und neben dem Umstieg auf Post-Quanten-Kryptografie zu beachten sind. Eine aktualisierte und erweiterte Version der Handlungsempfehlungen ist für das Frühjahr 2021 geplant. Darüber hinaus könnten Verbindungen mit höchsten Sicherheitsanforderungen, wie etwa zwischen Bundeseinrichtungen sowie für kritische Infrastrukturen, künftig zusätzlich mit Quantennetzwerken gesichert werden. Die Technologien hierfür werden derzeit entwickelt.

- d) Wie soll die IT-Sicherheit und Kryptografie weiterentwickelt werden angesichts dessen, dass heutige Verschlüsselungsstandards (wie asynchrone RSA-Verschlüsselung) mit Rechenleistungen von Quantencomputern gebrochen werden können?

Zunächst sei angemerkt, dass neben dem Schutzziel Vertraulichkeit, das durch Verschlüsselung erreicht werden kann, auch Integrität und Authentizität durch weitere kryptografische Verfahren sicherzustellen sind. RSA und weitere asymmetrische Verschlüsselungsverfahren können durch Quantencomputer gebrochen werden; diese dienen in erster Linie dem Schlüsselaustausch und nicht der Verschlüsselung von Nutzdaten. Hingegen werden nach derzeitigem Kenntnisstand die gängigen symmetrischen Verschlüsselungsverfahren, z. B. Advanced Encryption Standard (AES), nicht grundsätzlich gefährdet, sofern ausreichend lange Schlüssel verwendet werden.

Somit ergibt sich ein Bedarf für neue Verfahren zum Schlüsselaustausch, für den es zwei Lösungsansätze gibt: Post-Quanten-Kryptografie, deren Sicherheit auf Komplexitätsannahmen beruht, und Quantenschlüsselaustausch bzw. Quantum Key Distribution (QKD), deren Sicherheit auf physikalischen Prinzipien beruhen soll. Bei Verwendung von Post-Quanten-Kryptografie sollten von NIST standardisierte Verfahren verwendet werden. Im Bereich der Quantenkryptografie werden momentan die Grundlagen für ein europäisches Quantennetzwerk, die European Quantum Communication Infrastructure (EuroQCI), gelegt. Die Bundesregierung ist im EuroQCI Board durch das BMBF sowie in der EuroQCI Security Working Group durch das BSI vertreten. Das BSI wirkt

unter anderem in Beratergremien der vom BMBF geförderten Projekte QuNET und Q.Link.X mit. Im Rahmen von QuNET ist u. a. die Demonstration einer quantenverschlüsselten Teststrecke zwischen BSI und BMBF geplant. Zudem stellt QuNET einen deutschen Forschungsbeitrag zur EuroQCI dar. Q.Link.X soll zur Entwicklung von Quantenrepeatern führen und damit Ende-zu-Ende-Sicherheit in Quantennetzwerken garantieren.

Darüber hinaus sind weitere wichtige Aspekte (weiter) zu entwickeln: Für viele weit verbreitete Anwendungen reicht es allerdings nicht, Algorithmen zu benennen, sondern es sind Änderungen oder Ergänzungen von Standards erforderlich wie „Transport Layer Security“ (TLS), „Internet Key Exchange“ (IKE) oder zum Erstellen digitaler Zertifikate (X.509), an denen verschiedene internationale Standardisierungsgremien arbeiten. Bisher gibt es keine QKD-Geräte europäischer Hersteller, die nach anerkannten Sicherheitskriterien evaluiert worden sind. Um die Grundlage für zukünftige Sicherheitsevaluierungen zu legen, erstellt das BSI in Kooperation mit dem European Telecommunications Standards Institute (ETSI) ein Schutzprofil zur Sicherheitsevaluierung von QKD-Geräten nach den sogenannten Common Criteria (EAL4+). Weitere Projekte zur Sicherheit von QKD sind in Vorbereitung. Die Bundesregierung sieht die Verfügbarkeit von zulassungsfähigen Lösungen als wesentlichen Baustein technologischer Souveränität.

Es ist das Ziel der Forschungsförderung der Bundesregierung, in den oben genannten Projekten sowie im Rahmen weiterer Fördermaßnahmen Technologien der Post-Quantenkryptographie und der Quantenkommunikation, insbesondere QKD, sowie kombinierte Verfahren zur Anwendungsreife zu bringen.

- e) Ab wann soll in Deutschland sensible Kommunikation so verschlüsselt werden, dass sie nicht mit Quantencomputern nachträglich entschlüsselt werden kann?

Es wird auf die Antwort zu Frage 5d und auf die Studie des BSI „Entwicklungsstand Quantencomputer“ verwiesen. Insbesondere auf Grund der Gefahr durch sogenannte „Store now, decrypt later“-Angriffe gilt es in hiervon betroffenen Anwendungsfällen, sich so früh wie möglich durch den Einsatz von Post-Quanten-Kryptografie oder QKD zu schützen.

Im staatlichen Hochsicherheitsbereich wird unter der Hypothese gearbeitet, dass Anfang der 2030er Jahre kryptografisch relevante Quantencomputer zur Verfügung stehen werden. Diese Aussage ist nicht als Prognose zur Verfügbarkeit von Quantencomputern zu verstehen, sondern stellt einen Richtwert für die Risikobewertung dar. Ziel ist es, insgesamt kryptografische Agilität zu erreichen, da grundsätzlich kryptografische Algorithmen auch ohne Quantencomputer gebrochen werden könnten.

- 6. Wie sieht die Bundesregierung den technischen Entwicklungsstand der Quantentechnologien in Deutschland und in Europa im Vergleich zu anderen Nationen und Regionen weltweit, insbesondere den USA, China, Japan, Großbritannien, Kanada und Australien,
 - a) im Bereich der Quantenkommunikation,
 - b) im Bereich des Quantencomputings,
 - c) im Bereich der Quantenmetrologie,
 - d) im Bereich der Basistechnologien für Quantentechnologien?
- 7. Liegen der Bundesregierung Informationen zu den Investitionssummen, den Investitionsprogrammen von Staat und Wirtschaft der USA, Chinas, Japans, Großbritanniens, Kanadas, Australiens und weiterer EU-Natio-

nen im Bereich der Quantentechnologien vor, und wenn ja, wie lauten diese Zahlen (bitte die Investitionssummen nach Nation, Jahr und Investitionsbereich (Quantencomputing, Quantennetzwerke, Quantenmetrologie und weitere unterstützende Technologien) auflisten)?

Die Fragen 6 und 7 werden im Zusammenhang beantwortet.

Bezüglich des technischen Entwicklungsstands der Quantentechnologien in Deutschland und Europa im internationalen Vergleich sowie entsprechender Investitionsprogramme wird auf die Studie „Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation“ der Deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) verwiesen.

8. Welche Standorte in Deutschland sind nach Kenntnis der Bundesregierung – insbesondere vor dem Hintergrund der anstehenden Aufstockungen der Haushaltsmittel für Quantentechnologien in Höhe von 400 Mio. Euro – aktuell führend in der Erforschung und Nutzung von Quantentechnologien (bitte pro nachfolgendem Indikator die jeweils zehn besten Standorte pro Teilbereich (Quantenkommunikation, Quantencomputing, Quantenmetrologie, Basistechnologien) nennen; Standorte können dabei sowohl Hochschulen und Forschungseinrichtungen als auch Unternehmen und einzelne Unternehmensstandorte sein):
 - a) Publikationen in wissenschaftlichen Peer-Review-Zeitschriften,
 - b) Patente,
 - c) Anzahl an Forschungspersonal (in Vollzeitäquivalenten),
 - d) Anzahl an Professuren mit Bezug zu Quantentechnologien in der Denomination,
 - e) Anzahl Kooperationen national und international?

Deutschland verfügt über zahlreiche hervorragende Standorte bzw. Akteure in den Quantentechnologien. Dazu zählen Hochschulen, Forschungseinrichtungen und Unternehmen. Eine Übersicht über im Rahmen des Regierungsprogramms „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ geförderte Institutionen findet sich unter www.quantentechnologien.de. Eine Rangfolge gemäß den in der Frage genannten Indikatoren liegt nicht vor. Angaben zu Publikationen, Patenten und Kooperationen werden, soweit für die Durchführung der beantragten Arbeiten und die Darstellung der wissenschaftlichen Exzellenz erforderlich, im Rahmen von Projektskizzen zu Förderwettbewerben vom einreichenden Konsortium gemacht und im Rahmen der Begutachtung der Projektskizzen im Einzelfall gewürdigt.

9. Mit welchen Förderprogrammen, Fördermaßnahmen und Projekten fördert die Bundesregierung von 2015 bis 2023 die Erforschung und Entwicklung von Quantentechnologien, und wie hängen diese verschiedenen Förderprogrammen untereinander zusammen (bitte die Fördermaßnahmen pro Förderprogramm, die Gesamtfördersumme pro Förderprogramm, die Laufzeiten der Förderprogramme und deren Ressortzugehörigkeit sowie die Gesamtfördersummen nach Ressorts und Haushaltsjahren auflisten)?

Die erbetenen Angaben sind der Anlage 1* zu entnehmen. Der Zusammenhang der Förderprogramme ist in der Hightech-Strategie 2025 der Bundesregierung dargestellt.

* Von einer Drucklegung der Anlage wird abgesehen. Diese ist auf Bundestagsdrucksache 19/25208 auf der Internetseite des Deutschen Bundestages abrufbar.

10. Wie verteilen sich die Fördersummen aller von der Bundesregierung bewilligten Förderprojekte seit 2015 auf die Bereiche Quantenkommunikation, Quantencomputer, Quantenmetrologie und Basistechnologien (bitte die Gesamtfördersummen pro Bereich der Jahre 2015 bis 2023 sowie die Gesamtfördersumme aller Förderprogramme nennen; wenn mit einzelnen Förderprojekten mehrere Bereiche abgedeckt werden, diese bitte gesondert ausweisen)?

Die erbetenen Angaben sind der Anlage 2* zu entnehmen.

11. Wie verteilen sich die Fördersummen der Bundesregierung für Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien auf Hochschulen, außeruniversitäre Forschungseinrichtungen (pro Forschungseinrichtung und pro Forschungsorganisation) und Unternehmen (bitte für alle Kategorien für 2015 bis 2020 angeben)?

Die erbetenen Angaben sind der Anlage 3* zu entnehmen.

12. Liegen der Bundesregierung Zahlen darüber vor, in welcher Höhe die Forschungsgemeinschaften aus der durch den Bund bereitgestellten Grundfinanzierung die Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien fördern, insbesondere vor dem Hintergrund teils eigener Quantentechnologie-Strategien (vgl. https://www.helmholtz.de/fileadmin/user_upload/01_forschung/QT_in_the_Helmholtz_Association.pdf; bitte nach Max-Planck-Gesellschaft, Fraunhofer-Gesellschaft, Helmholtz-Gemeinschaft, Leibniz-Gemeinschaft, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik, Agentur für Innovation in der Cybersicherheit und jeweils für die Jahre 2015 bis 2020 aufteilen)?

Der Bundesregierung liegen hierzu folgende Angaben vor:

Max-Planck-Gesellschaft

2015: 26,501 Mio. Euro

2016: 27,642 Mio. Euro

2017: 31,714 Mio. Euro

2018: 31,009 Mio. Euro

2019: 33,338 Mio. Euro

2020 (Plan): 33,091 Mio. Euro

Fraunhofer-Gesellschaft

2015: 0,2 Mio. Euro

2016: 0,2 Mio. Euro

2017: 0,8 Mio. Euro

2018: 2,7 Mio. Euro

2019: 5,7 Mio. Euro

2020: 6,6 Mio. Euro

Helmholtz-Gemeinschaft

* Von einer Drucklegung der Anlage wird abgesehen. Diese ist auf Bundestagsdrucksache 19/25208 auf der Internetseite des Deutschen Bundestages abrufbar.

Im Abfragezeitraum war die Forschung zu Quantentechnologien in der Helmholtz-Gemeinschaft nicht explizit in entsprechenden Strukturen abgebildet, was eine Abgrenzung nicht eindeutig möglich macht. In diesem Sinne ist die unten dargestellte Auflistung des Volumens, das aus der Grundfinanzierung für Aktivitäten im Rahmen der Forschung zu Quantentechnologien aufgewendet wurde, als Annäherung zu verstehen.

2015: 51 Mio. Euro

2016: 53 Mio. Euro

2017: 58 Mio. Euro

2018: 60 Mio. Euro

2019: 73 Mio. Euro

2020: 72 Mio. Euro

Leibniz-Gemeinschaft

Die Angaben für das Jahr 2020 fallen geringer aus, da nicht alle Leibniz-Einrichtungen, die für die Vorjahre melden konnten, hier bereits Angaben zur Verfügung haben.

2015: 3,2 Mio. Euro

2016: 3,3 Mio. Euro

2017: 3,3 Mio. Euro

2018: 3,4 Mio. Euro

2019: 5,9 Mio. Euro

2020: 5,7 Mio. Euro

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Die Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) hat in den Jahren 2015 bis 2020 zum Thema Quantentechnologien im Rahmen ihrer Aufgaben investiert. Diese Investitionen können im Einzelnen nicht explizit ausgewiesen werden. Im Übrigen wird auf die Antwort zu Frage 25 verwiesen.

Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik

Das Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik beauftragte keine Forschung und Entwicklung zu Quantentechnologien im abgefragten Zeitraum.

Agentur für Innovation in der Cybersicherheit

Die Agentur für Innovation in der Cybersicherheit GmbH beauftragte keine Forschung und Entwicklung zu Quantentechnologien im abgefragten Zeitraum.

13. Mit welchen Projekten förderte bzw. fördert die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) die Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien in den Jahren 2015 bis 2020 (bitte nach Jahr und den Bereichen Quantenkommunikation, Quantencomputer, Quantenmetrologie, Basistechnologien für Quantentechnologien aufschlüsseln)?

Mit welchen Projekten förderte bzw. fördert, nach Kenntnis der Bundesregierung, die Europäische Union über das EU-Quantum-Flagship oder andere Programme die Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien in Deutschland in den Jahren 2015 bis 2020 (bitte alle Projekte mit Angaben zum Projekttitel, Mittelempfänger, Budget und Laufzeit auflisten)?

Angaben zu den Förderaktivitäten der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) sind der Anlage 4* zu entnehmen.

Quantentechnologien in Deutschland werden im Rahmen des EU Quantum Flagship unterstützt. Deutsche Partner sind in 18 von 19 FuE-Projekten der laufenden Phase des Quantum Flagship vertreten. Die Mittel der Partner aus Deutschland betragen ca. 26 Prozent des Gesamtbudgets von 127,2 Millionen Euro. Weitere Einzelheiten sind der Anlage 5* zu entnehmen.

14. Wurden und werden internationale Gutachterinnen und Gutachter in Vergabeverfahren der Fördergelder der Programme des Bundes zur Förderung von Quantentechnologien, insbesondere „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“, „Photonik Forschung Deutschland“ und „Selbstbestimmt und sicher in der digitalen Welt 2015–2020“, einbezogen?
- a) Wenn ja, in welchem Maße (bitte Vergabeverfahren mit internationalen Gutachterinnen und Gutachtern benennen und den Anteil der internationalen Gutachterinnen und Gutachter an allen Vergabeverfahren angeben)?
- b) Wenn nein, warum nicht?

Die Fragen 14 bis 14b werden gemeinsam beantwortet.

Fördermittel werden in der Regel nicht über Vergabeverfahren, sondern über wettbewerbliche Auswahlverfahren vergeben. In Auswahlverfahren zur Förderung der Quantentechnologien im Rahmen der Programme „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ und „Photonik Forschung Deutschland“ wurden keine internationalen Gutachter einbezogen. Die Begutachtung erfolgte durch ausgewiesene Expertinnen und Experten des beauftragten Fachprojektträgers, um die Weitergabe von Unternehmensinformationen, Interessenkonflikte sowie Befangenheiten auszuschließen. Bei der Forschungsförderung der Quantenkommunikation im Rahmen des Programms „Selbstbestimmt und sicher in der digitalen Welt 2015–2020“ wurden bei den Fördermaßnahmen „Anwendungsszenarien der Quantenkommunikation“ und „Post-Quantenkryptographie“ sowie bei Initiativprojekten zu insgesamt ca. 55 Prozent internationale Gutachterinnen und Gutachter einbezogen.

15. In welcher Höhe wurden die in den Programmen „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“, „Photonik Forschung Deutschland“ und „Selbstbestimmt und sicher in der digitalen Welt 2015–2020“ ausgeschriebenen Fördersummen in den Jahren 2015 bis Oktober 2020 abgerufen (bitte nach Programm und Jahr differenziert angeben), und, sofern

* Von einer Drucklegung der Anlage wird abgesehen. Diese ist auf Bundestagsdrucksache 19/25208 auf der Internetseite des Deutschen Bundestages abrufbar.

Fördermittel unvollständig abgerufen wurden, was sind aus Sicht der Bundesregierung die Gründe dafür, und auf welche Höhe beliefen sich die nicht abgerufenen Fördermittel pro Programm und Jahr?

Die verfügbaren Fördermittel der Programme „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ sowie „Photonik Forschung Deutschland“ wurden in den Jahren 2015 bis 2019 jeweils vollständig, d. h. zu 100 Prozent abgerufen. Zum erfragten Stichtag 31. Oktober 2020 betrug der Mittelabfluss 63,4 Mio. Euro und somit 65,7 Prozent der verfügbaren Haushaltsmittel in Höhe von 96,5 Mio. Euro. Ebenso wurden die bereitgestellten Mittel im Programm „Selbstbestimmt und sicher in der digitalen Welt 2015–2020“ durchgehend nahezu vollständig abgerufen. Bislang gab es aufgrund der Covid-19-Pandemie Verzögerungen im Projektablauf, die zu geringfügigen Minderausgaben geführt haben.

16. Wie verteilen sich die Gesamtfördersummen der verschiedenen Förderprogramme aus den Jahren 2015 bis 2023 zur Förderung des Quantencomputings auf die verschiedenen Hardwareplattformen (supraleitende Qubits, Halbleiter-Qubits, ionische Qubits und photonische Qubits (für atterbasiertes Quantencomputing) sowie topologische Systeme, adiabatisches Quantencomputing und weitere Ansätze; bitte die jeweiligen Gesamtschummen pro Plattform nennen)?

Es wird auf die Antwort zu Frage 10 verwiesen. Eine Aufteilung auf verschiedene Hardware-Plattformen kann darüber hinaus nicht angegeben werden.

17. Hat die Bundesregierung eine Fokussierung der Quantencomputerentwicklung auf eine oder mehrere wenige Hardwareplattformen bewertet, und wenn ja, wie (Qubit-Arten) – vor dem Hintergrund, dass die derzeit in der Entwicklung am weitest fortgeschrittenen US-amerikanischen Konzerne Google und IBM auf die gleiche Plattform setzen, jedoch gleichzeitig andere Unternehmen wie Microsoft, aber auch viele deutsche Institute an anderen vielversprechenden Ansätzen, wie z. B. ionischen Systemen, forschen –, beabsichtigt die Bundesregierung die besondere Förderung einer, einiger weniger oder vieler verschiedener Hardware-Plattformen, und wenn ja, welcher (bitte sowohl gatterbasierte als auch topologische und adiabatische Ansätze einbeziehen)?

Die Bundesregierung strebt ein technologieoffenes, wettbewerbliches Verfahren zur Förderung der Forschung an Quantencomputern an. Daher können zum jetzigen Zeitpunkt keine Aussagen zur Förderung einzelner Ansätze bzw. Technologieplattformen getroffen werden. Mit zunehmender Technologiereife und auf der Basis der Evaluierung erreichter Ergebnisse wird voraussichtlich eine Fokussierung erforderlich sein, um kritische Massen zusammenzuführen und Infrastrukturen voranzutreiben. Zugleich wird es weiterhin Aufgabe der Technologieförderung sein, neue Ergebnisse in Forschung und Entwicklung zu alternativen Technologieplattformen sowie disruptive Ansätze mit hohem Potenzial zu würdigen.

18. Inwiefern wurden und werden seitens der Bundesregierung die Entwicklung von Quantenalgorithmien und Softwareanwendungen für Quantencomputer und Quantensimulatoren gefördert (bitte die Förderprojekte aus den Jahren 2015 bis 2023 inklusive Fördersumme, Laufzeit und Kurzbeschreibung auflisten)?

Die Entwicklung von Quanten-Algorithmien und -Softwareanwendungen ist ein wesentlicher Teil der Strategischen Initiative Quantencomputing des BMBF und des Regierungsprogramms „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“. Ein erster Förderaufruf „Quanteninformatik – Algorithmen, Software, Anwendungen“ wurde bereits veröffentlicht. Die Projekte starten voraussichtlich im ersten Quartal 2021. Entsprechend können noch keine Einzelangaben zu Förderprojekten, Fördersummen und Laufzeit gemacht werden.

19. Wann, und wofür plant die Bundesregierung, die im Konjunkturpakt unter Nummer 44 angekündigten 2 Mrd. Euro zur Förderung von Quantentechnologien in den nächsten Jahren zu investieren, insbesondere vor dem Hintergrund, dass davon bisher lediglich 400 Mio. Euro im Haushalt 2021 als „Verstärkung von Maßnahmen zur Förderung von Quantentechnologien“ (Bundestagsdrucksache 19/22600, S. 3146) budgetiert sind?
20. Bis wann plant die Bundesregierung, ein zwischen den Ressorts abgestimmtes Gesamtkonzept für die zusätzlichen 400 Mio. Euro als „Verstärkung von Maßnahmen zur Förderung von Quantentechnologien“ (Bundestagsdrucksache 19/22600, S. 3146) vorzulegen, um die im Entwurf zum Bundeshaushalt 2021 gesperrten Mittel freizugeben?
 - a) Welche förderpolitischen Ziele möchte die Bundesregierung mit den zusätzlichen 400 Mio. Euro erreichen?
 - b) In welche konkreten Maßnahmen sollen die zusätzlichen 400 Mio. Euro fließen?
 - c) Inwiefern ist ein Ausbau der personellen Kapazitäten in den Ressorts und den Projektträgern vorgesehen, damit die erhöhte Förderung für Quantentechnologien auch abfließen kann, und wie viele Personen sind zur Vergabe in den Ministerien vorgesehen?
 - d) Welches Ressort hat die Federführung bei der Entwicklung und Umsetzung des neuen Konzepts zur Förderung von Quantentechnologien inne?

Die Fragen 19 bis 20d werden im Zusammenhang beantwortet.

Zur Umsetzung von Ziffer 44 des Konjunktur- und Zukunftspaketes sind im Rahmen des zweiten Nachtragshaushaltsgesetzes 2020 zur Verstärkung von Maßnahmen zur Förderung der Quantentechnologien im Einzelplan 60 bei Kapitel 60 02 Titel 686 04 für das Haushaltsjahr 2020 Verpflichtungsermächtigungen in Höhe von 1 Mrd. Euro für künftige Haushaltsjahre veranschlagt.

Im Bundeshaushalt 2021 sind 400 Mio. Euro und ebenfalls eine Verpflichtungsermächtigung in Höhe von 1 Mrd. Euro für künftige Haushaltsjahre geplant. Durch Haushaltsvermerk sind Baransatz und Verpflichtungsermächtigungen bis zum Vorliegen eines zwischen allen Ressorts abgestimmten Gesamtkonzepts gesperrt.

Zur Vorbereitung wurde ein Prozess unter gemeinsamer Federführung des BMBF, des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie und des Bundesministeriums der Finanzen vereinbart. Bis Anfang 2021 wird eine Expertengruppe mit Akteuren aus Wirtschaft und Wissenschaft Handlungsempfehlungen vorlegen. Auf dieser Basis werden die beteiligten Ressorts zeitnah ein Gesamtkonzept zur weiteren Strukturierung der Förderlandschaft für die Quantentechnolo-

gien vorlegen. Die erforderlichen personellen Ressourcen werden gemäß diesem Gesamtkonzept bei den beteiligten Ressorts und den Projektträgern bereitgestellt werden.

21. Bis wann wird die Bundesregierung den von Bundesforschungsministerin Anja Karliczek am 6. Juli 2020 für „diesen Sommer“ angekündigten (<https://de.reuters.com/article/deutschland-quantentechnologie-karliczek-idDEKBN2470JL>) Auftrag an Konsortien zum Bau der zwei im Konjunkturpaket genannten Quantencomputer vergeben?
 - a) Ist eine erste Auswahl für Konsortien bereits getroffen, und wenn ja, an welche wird der Auftrag zum Bau eines Quantencomputers gehen (bitte die beteiligten Institute und deren Standorte nennen)?
 - b) Nach welchen Kriterien und in welchem Verfahren werden die Standorte der beiden angekündigten Quantencomputer ermittelt (bitte die Verfahrensschritte und alle daran beteiligten Personen inkl. Institution benennen)?
 - c) Welche technischen Erwartungen hat die Bundesregierung an die Quantencomputer in Bezug auf Anzahl und Art an verwendeten Qubits und deren Fehlerraten?
 - d) Nach welchen Kriterien wurde bzw. wird die Hardwareplattform der zwei Quantencomputerbauten ausgewählt, und welche Personen von welchen Institutionen waren bzw. sind an der Auswahl beteiligt?
 - e) Ausgaben in welcher Höhe plant die Bundesregierung für den Bau der zwei Quantencomputer?

Die Fragen 21 bis 21e werden im Zusammenhang beantwortet.

Die Entwicklung und der Bau von Quantencomputern werden auf der Basis der Handlungsempfehlungen der in der Antwort zu den Fragen 19 bis 20d genannten Expertengruppe erfolgen. Die Bundesregierung strebt dazu ein technologieoffenes, wettbewerbliches Verfahren an. Auf die Antwort zu Frage 17 wird verwiesen.

22. Durch welche konkreten Maßnahmen möchte die Bundesregierung die im Konjunkturpaket unter Nummer 44 definierten Ziele erreichen, und welche Finanzmittel werden jeweils zusätzlich in den Jahren 2020 und 2021 bereitgestellt für die Ziele
 - a) „ein neues industrielles Standbein sowohl hinsichtlich Hard- als auch Software aufbauen“,
 - b) „eine substantielle Förderung von Unternehmens- und Start-up-Gründungen“,
 - c) „gemeinsame neue Spitzencluster aus Wissenschaft und Industrie“?

Maßnahmen zu den Themenschwerpunkten Quantencomputing (Hard- und Software), Quantenkommunikation, Quantensensorik und Basistechnologien werden Teil eines Gesamtkonzepts sein, das von den beteiligten Ressorts zeitnah erarbeitet wird. Die Zusammenarbeit von Forschung und Industrie wird hierbei Berücksichtigung finden, ebenso die Förderung von Unternehmensgründungen. Aussagen zu einzelnen Maßnahmen und zu Finanzmitteln können erst nach Verabschiedung des Gesamtkonzepts getroffen werden. Auf die Antwort zu den Fragen 17 sowie 19 bis 20d wird verwiesen.

23. Inwiefern folgt die Bundesregierung seit 2018 der „nachdrückliche[n] Forderung der Max-Planck-Gesellschaft“ und der gesamten QUTEGA (vgl. Programm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“), Zentren zur Entwicklung von Quantentechnologien zu fördern (bitte die Zentren, deren Förderungsmittel, Förderlaufzeiten und die schwerpunktmäßig geförderten Quantentechnologiebereiche nennen)?

Wo plant die Bundesregierung die bis zu drei Kompetenzcluster für Quantencomputing in Deutschland aufzubauen (vgl. Forschungsprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“)?

- a) Aus welchen Gründen wird die Anzahl an aufzubauenden Kompetenzclustern für Quantentechnologien auf bis zu drei gesetzt, und wurde diese Zahl seit 2018 genauer definiert?
- b) Auf welchen Hardwareplattformen sollen die bis zu drei Kompetenzcluster zur Entwicklung eines Quantencomputers beruhen?
- c) Nach welchen Kriterien wurden beziehungsweise werden die Kompetenzcluster ausgewählt?
- d) Entsprechen diese Kompetenzcluster den im Konjunkturpaket unter Nummer 44 aufgeführten Spitzencluster aus „Wissenschaft und Industrie“?

Die Fragen 23 bis 23d werden im Zusammenhang beantwortet.

Zentren zu den Quantentechnologien bestehen in Deutschland bereits; sie sind insbesondere Gegenstand der institutionellen Förderung. Institute der Max-Planck-Gesellschaft sind u. a. das Max-Planck-Institut für Quantenoptik (u. a. Quantencomputing) und das Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts (u. a. Quantenkommunikation). Im Rahmen der institutionellen Förderung der Forschungsorganisationen stellt die Bundesregierung zudem Mittel für den Aufbau neuer Strukturen zur Verfügung, u. a. für die Helmholtz Quantum Facility am Forschungszentrum Jülich (insbesondere Quantencomputing), für die DLR-Institute für Quantentechnologien und für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik (insbesondere Quantensensorik) sowie für das Quantum Photonics Lab am Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF (insbesondere Basistechnologien). Die jährlichen Budgets der institutionellen Förderung werden im Haushaltsplan des BMBF dargestellt.

Die Nennung von bis zu drei Kompetenzzentren entspricht dem Stand von 2018 aus Expertengesprächen. Aktuell strebt die Bundesregierung u. a. auf der Grundlage der Handlungsempfehlungen der Expertengruppe zum Quantencomputing ein technologieoffenes wettbewerbliches Verfahren an. Die Anzahl und die Hardware-Plattformen werden in diesem Verfahren nicht eingeschränkt. Auf die Antwort zu den Fragen 21 bis 21e wird verwiesen.

24. Fördert oder plant die Bundesregierung die Förderung von Konsortien für die Entwicklung der Quantenkommunikation, der Quantenmetrologie oder für Basistechnologien?
- a) Wenn ja, wo sollen diese Konsortien lokalisiert sein, wer ist beteiligt, welche Fördersummen sind veranschlagt, und nach welchen Vergaberichtlinien wurden diese Wahlen getroffen (bitte nach den drei genannten Quantentechnologiebereichen aufteilen)?
 - b) Wenn nein, warum nicht, und welche Unterschiede bestehen zur Förderung von Konsortien zur Quantencomputerentwicklung?

Die Fragen 24 bis 24b werden gemeinsam beantwortet.

Die Bundesregierung fördert bereits die Entwicklung der Quantenkommunikation, der Quantenmetrologie und der Basistechnologien im Rahmen der in den

Antworten zu den Fragen 9 und 10 aufgeführten Programme. Das hier zugrundeliegende Instrument ist die Verbundforschung. In dieser arbeiten Konsortien aus Wirtschaft und Wissenschaft in einem fest definierten Zeitrahmen an konkreten Fragestellungen. Einschlägige Kriterien zur Bewilligung von Fördermaßnahmen werden in den zugrundeliegenden Bekanntmachungen dargestellt. Die Förderung ist nicht auf regionale Kooperationen begrenzt; in der Regel kooperieren exzellente Forschungseinrichtungen und Unternehmen deutschlandweit. Angaben zur Förderung der Quantenkommunikation, Quantenmetrologie und Basistechnologien können der Anlage 6* entnommen werden.

Auch das Gesamtkonzept zur Umsetzung von Ziffer 44 des Konjunktur- und Zukunftspakets wird Maßnahmen zu Quantenkommunikation, Quantenmetrologie und Basistechnologien vorsehen. Die Vergabe von Mitteln wird im Wettbewerb erfolgen; voraussichtlich werden auch überregionale Kooperationen adressiert werden.

25. Wie ist der Entwicklungsstand des seitens der Wissenschaft (QUTEGA) und Industrie geforderten und seitens der Bundesregierung im Programm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ angekündigten Quantentechnologie-Kompetenzzentrums an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (QTZ) (bitte den Termin der geplanten Fertigstellung und der vollständigen Betriebsaufnahme, die bisherigen Investitionssummen, die geplante Anzahl an Mitarbeitern und die geplanten Arbeitsaufgaben nennen)?

Das Quantentechnologie-Kompetenzzentrum an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (QTZ) befindet sich seit dem Jahr 2019 im Aufbau. Die Fertigstellung ist für das Jahr 2024 geplant, sofern die entsprechenden Haushaltsmittel dafür zur Verfügung stehen.

Die bisher festgesetzten Investitionen für das QTZ belaufen sich auf 2,1 Mio. Euro. Für die Erfüllung der Aufgaben des QTZ sind 28 Stellen geplant.

Das QTZ konzentriert sich auf folgende Aufgaben:

- Entwicklung robuster und anwendungsfreundlicher Komponenten für die Quantentechnologien,
- Sicherstellung und Zertifizierung von Spezifikationen zur Qualitätssicherung durch Kalibrierung,
- Entwicklung von Normen und Standards,
- Entwicklung von Anwenderplattformen,
- Ausbildung von Quanteningenieuren und damit die Unterstützung von Start-ups, kleinen und mittleren Unternehmen und Industrie.

* Von einer Drucklegung der Anlage wird abgesehen. Diese ist auf Bundestagsdrucksache 19/25208 auf der Internetseite des Deutschen Bundestages abrufbar.

26. Wie soll sichergestellt werden, dass das Quantentechnologie-Kompetenzzentrum an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) die Koordinierung aller vier Bereiche der Quantentechnologien bewerkstelligen kann, insbesondere auch den Austausch mit der Industrie und die Unterstützung von Gründern (bitte für alle vier Teilbereiche der Quantentechnologien begründen), oder plant die Bundesregierung eine oder mehrere weitere Koordinierungsstellen für Quantentechnologien (wenn ja, welche Standorte zusätzlich zur PTB sollen in welcher Höhe gefördert werden)?

Die PTB wurde im Rahmen des in der Wissenschaftsgemeinschaft geführten QUTEGA Prozesses als mögliche Koordinierungsstelle benannt, insbesondere aufgrund der Expertise im Bereich der Quantenmetrologie. Festlegungen dazu sind seitens der am Regierungsprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ beteiligten Ressorts nicht erfolgt. Für das Fokusthema Quantencomputing erarbeitet bis Anfang 2021 eine Expertengruppe mit Vertretern aus Wirtschaft und Wissenschaft Handlungsempfehlungen, die u. a. auch die Stärkung von Strukturen sowie Koordinierungsinstrumente umfassen. Auf dieser Basis werden die Ressorts zeitnah entsprechende Instrumente bzw. Koordinierungsgremien für die Gesamtheit der Quantentechnologien entwickeln und beschließen.

Parallel dazu arbeitet die PTB zu den Themengebieten Quantencomputer, Quantenmetrologie, Quantenkommunikation und Quantenkryptographie sowie Basistechnologien eng mit der Industrie zusammen.

Bei der Erfüllung der Aufgaben soll die Industrie von Anfang an mit eingebunden und der Transfer von der Forschung in den Markt berücksichtigt werden. Durch diese frühzeitige Einbindung ist sichergestellt, dass Kompetenzen auf diesem Gebiet auch in der Industrie aufgebaut werden und ein spürbarer konjunktureller Impuls erzielt werden kann.

Das Institut für Satellitengeodäsie und Inertialsensorik des DLR kooperiert mit der PTB und wird eine gemeinsame Abteilung haben. Im Übrigen wird auf die Antwort zu Frage 25 verwiesen.

27. Welche Unternehmen in Deutschland entwickeln nach Kenntnis der Bundesregierung in einem der vier Teilgebiete der Quantentechnologien (Quantenkommunikation, Quantencomputer, Quantenmetrologie, Basistechnologien für Quantentechnologien) Produkte oder Anwendungen (bitte nach Unternehmensname, Standort, Technologiebereiche der Entwicklung, Jahresumsatz auflisten)?

Der Bundesregierung liegen hierzu keine aggregierten Daten vor. Für Informationen zum Stand der unternehmerischen Entwicklung in Deutschland wird auf die acatech-Studie „Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation“ verwiesen. Eine Übersicht über im Rahmen des Regierungsprogramms „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ geförderte Institutionen sowie eine Branchenübersicht finden sich unter www.quantentechnologien.de

28. Welche Ziele verfolgt die Bundesregierung bei der Förderung einer Unternehmenslandschaft zum Thema Quantentechnologien in Deutschland?

Europa und damit auch Deutschland sollen diese wichtige Technologie unabhängig beherrschen und damit industriell bzw. kommerziell nutzen können.

- a) In welcher Unternehmensform soll ein deutsches Quantennetzwerk aufgebaut und betrieben werden (öffentlich, privatwirtschaftlich)

o. Ä.), und wie viele Anbieter für Quantenkommunikation soll es in Deutschland bis 2025 sowie 2030 geben?

Mit der Initiative QuNET unterstützt die Bundesregierung den Aufbau eines Pilot-Quantennetzwerks zur Kommunikation. Im Rahmen dieser BMBF-geförderten Initiative werden die Fraunhofer-Gesellschaft, die Max-Planck-Gesellschaft und das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt die technologischen Grundlagen für den Aufbau eines Pilotnetzes zur Quantenkommunikation in Deutschland schaffen, das der abhör- und manipulationssicheren Datenübertragung dient. Zunächst ist ein Pilotnetz für die Kommunikation zwischen Bundesbehörden angestrebt, die genaue Ausgestaltung steht derzeit noch nicht fest. Gleichzeitig fördert das BMBF die Entwicklung der Quantenkommunikation in der Verbundforschung unter Beteiligung von Unternehmen. In welchen Unternehmensformen und in welcher Anzahl Quantennetzwerke in Deutschland künftig betrieben werden, kann aufgrund des aktuellen Entwicklungsstandes der Technologie und der frühen Phase potenzieller Geschäftsmodelle nicht spezifiziert werden.

- b) Wie viele deutsche Anbieter von Quantencomputern soll es bis 2025 und wie viele bis 2030 geben, und wie soll der öffentliche Zugang zu diesen organisiert sein (öffentlich zugänglich, durch privatwirtschaftliche Modelle oder weitere)?

Aufgrund des frühen Entwicklungsstandes der Quantencomputer können zum jetzigen Zeitpunkt keine Aussagen über die Anzahl deutscher Anbieter bis 2025 und 2030 gemacht werden. Heute entwickeln erste Start-ups Quantencomputer in Deutschland. Ziel der Förderung der Quantentechnologien durch die Bundesregierung ist es, entsprechende unternehmerische Aktivitäten zu unterstützen und mit FuE-Konsortien von Wirtschaft und Wissenschaft die Basis für neue unternehmerische Aktivitäten zu legen. Dabei ist davon auszugehen, dass, die Verfügbarkeit der Technologie vorausgesetzt, bis 2025 bzw. 2030 in Deutschland sowohl öffentlich zugängliche als auch auf der Basis privatwirtschaftlicher Modelle verfügbare Quantencomputer aufgebaut werden.

- c) Wie will die Bundesregierung sicherstellen, dass die Forschung und Entwicklung durch die Offenheit der Programmiersprachen, der Schnittstellen und Systeme nachhaltig gestaltet wird und alle Marktakteure Zugang haben?

Im Rahmen der Förderung wird die Bundesregierung einen Austausch aller beteiligten Akteure zu Programmiersprachen, Schnittstellen und Systemen initiieren, um Standards bereitzustellen. So sollen u. a. klar definierte Schnittstellen Drittanbietern den Technologiezugriff auf den verschiedenen Hardware- und Software-Ebenen erlauben (beispielsweise Firmware, Middleware, Anwendungsebene). Der Verbreitung entsprechender Ergebnisse dient auch die Verpflichtung von Zuwendungsempfängern zur vorrangigen Publikation in Open-Access-Journalen.

29. Inwiefern wurden und werden seit 2015 die Ausgründung von Quantentechnologien seitens der Bundesregierung unterstützt (bitte die jährlichen Fördersummen inklusive Ressortzuständigkeit und die erfolgreichen Ausgründungen inklusive Unternehmensname auflisten)?

Um Unternehmensgründungen zu unterstützen, hat die Bundesregierung 2019 die Förderinitiative „Enabling Start-up – Unternehmensgründungen in den Quantentechnologien und der Photonik“ gestartet. Die BMBF-Maßnahme verfolgt das Ziel, innovative Ideen in den Quantentechnologien und der Photonik

aus Hochschulen und Forschungseinrichtungen über Ausgründungen in Richtung einer Anwendung und wirtschaftlichen Verwertung zu überführen. Dazu sollen insbesondere Verbünde aus einem Start-up und einer Hochschule oder Forschungseinrichtung gefördert werden. Erste Projektskizzen aus dem Bereich der Quantentechnologien werden zurzeit begutachtet; Bewilligungen sind noch nicht erfolgt. Daher können noch keine Fördersummen aufgeführt werden. Weiterhin wird auf die Antwort zu Frage 31 verwiesen.

30. In welcher Höhe wurde und wird die industrielle Forschung von Quantentechnologien in Deutschland seitens der Bundesregierung in den Jahren 2015 bis Oktober 2020 unterstützt (bitte die jährlichen Fördersummen und die geförderten Unternehmen auflisten)?

Mit dem Zentralen Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) werden anspruchsvolle marktorientierte technologische Forschungs- und Entwicklungsprojekte der mittelständischen Wirtschaft in Deutschland gefördert, die zu neuen Produkten, Verfahren oder technischen Dienstleistungen führen. Die Förderung ist in allen Technologiefeldern möglich. So werden im ZIM auch Projekte gefördert, die auch im weiteren Sinne eine Umsetzung oder Anwendung von Erkenntnissen der Quantenmechanik zur Entwicklung neuer Produkte und Technologien zum Gegenstand haben. Die Fördersumme in diesem Bereich betrug von 2015 bis Oktober 2020 insgesamt rund 4,5 Mio. Euro (siehe nachstehende Tabelle). Im Durchschnitt der Jahre 2015 bis 2019 betrug der Anteil an allen bewilligten Mitteln rund 0,15 Prozent.

Jahr	Zuwendung in Euro
2015	609.506
2016	305.870
2017	954.751
2018	1.134.777
2019	944.325
2020	550.685
Summe	4.499.914

Für den Umfang der Förderung von industrieller Forschung durch Unternehmen im Bereich Quantentechnologien wird auf die Antwort zu Frage 11 verwiesen. Folgende Zuwendungsempfänger, Unternehmen und Forschungseinrichtungen waren bzw. sind an diesen Projekten beteiligt:

ADVA Optical Networking SE
Allresist Gesellschaft für chemische Produkte zur Mikrostrukturierung mbH
AKKA DSW GmbH
BALLUFF GmbH
Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft
Bergische Universität Wuppertal Fakultät Elektrotechnik, Informationstechnik und Medientechnik
Carl Zeiss AG
Continental Teves AG & Co. OHG
D-Trust GmbH
Eagleyard Photonics GmbH
Dausinger & Giesen GmbH
Diamond Materials GmbH
Diebold Nixdorf Systems GmbH
Ecodiamond GmbH
Elektrobit Automotive GmbH

Entropy GmbH
ESCRYPT GmbH
Fraunhofer Gesellschaft e.V. Institut für Angewandte Festkörperphysik IAF
Fraunhofer Gesellschaft e.V. Institut für Angewandte Polymerforschung
Fraunhofer Gesellschaft e.V. Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS)
Fraunhofer Gesellschaft e.V. Institut für Solare Energiesysteme ISE
GATTAquant GmbH
genua GmbH
Giesecke+Devrient Mobile Security GmbH
GRINTECH GmbH
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf Institut für Experimentalphysik
Helmholtz-Zentrum Dresden – Rossendorf e. V. Institut für Ionenstrahlphysik und Materialforschung
HighFinesse Laser and Electronic Systems GmbH
Humboldt-Universität zu Berlin Institut für Physik
Infineon Technologies AG
Innolume GmbH
Jena-Optronik Gesellschaft mit beschränkter Haftung
kiutra GmbH
KSB SE & Co. KGaA
LAYERTEC GmbH
Leibniz-Institut für Photonische Technologien e.V.
MACIO GmbH
Menlo Systems GmbH
MTG AG
NANEO Precision IBS Coatings GmbH
nano analytik GmbH
Nanoscribe GmbH
neoplas control GmbH
neXenio GmbH
noris network AG
NVision Imaging Technologies GmbH
OHB System AG
onovum GmbH
operational services GmbH & Co. KG
PicoQuanT GmbH. Unternehmen für optoelektronische Forschung und Entwicklung
Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Q.ant GmbH
Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG
Qubig GmbH
Raith GmbH
Robert Bosch Gesellschaft mit beschränkter Haftung
Rohde & Schwarz Cybersecurity GmbH
SCHÖLLY FIBEROPTIC GMBH
Siemens Aktiengesellschaft
Signal-Construct, elektro-optische Anzeigen und Systeme, GmbH
Sirah Lasertechnik GmbH
SpaceTech GmbH
supracon Aktiengesellschaft
Surface Concept GmbH
Swabian Instruments GmbH
SYMPULS Gesellschaft für Pulstechnik und Meßsysteme mbH

Technische Universität Ilmenau Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
TEM Messtechnik GmbH
TOPTICA Photonics AG
TransMIT Gesellschaft für Technologietransfer mbH
Universität Bielefeld Fakultät für Physik
WIBU-SYSTEMS Aktiengesellschaft

- a) Hat die Bundesregierung ihren Erfolg bei der industriellen Forschung von Quantentechnologien bewertet, und wenn ja, wie?

Mit der Förderung der industriellen Forschung ist es gelungen, erste Unternehmen für die Entwicklung der Quantentechnologien zu gewinnen. Die nächsten Schritte werden Anfang 2021 gemacht, u. a. mit dem Start der Förderinitiativen „Quanteninformatik – Algorithmen, Software, Anwendungen“ unter Beteiligung potenzieller industrieller Anwender des Quantencomputing, sowie „Quantenprozessoren und Technologien für Quantencomputer“ unter Beteiligung erster Unternehmen, die Bauelemente für das Quantencomputing entwickeln. Hiermit werden erste zielführende Impulse für den Aufbau eines industriellen Ökosystems für die Quantentechnologien in Deutschland gesetzt.

- b) Welche Überlegungen bestehen seitens der Bundesregierung, die Fördermodalitäten für Unternehmen attraktiver zu gestalten?

Die Grundlage für die Ausgestaltung von Fördermodalitäten bilden das EU-Beihilferecht sowie die Bundeshaushaltsordnung. Innerhalb dieses Rahmens ist die Bundesregierung bestrebt, die Förderung für Unternehmen attraktiv zu gestalten. Ein Beispiel dafür ist die BMBF-Maßnahme KMU-innovativ. Mit dieser Maßnahme will das BMBF die Beantragung und Bewilligung von Fördermitteln für kleine und mittlere Unternehmen (KMU) vereinfachen. Ein zentraler Lotsendienst hilft in allen Fragen weiter, verbindliche Bearbeitungsfristen geben Planungssicherheit. KMU-innovativ ist in Technologiefeldern integriert, die für Deutschlands Zukunft besonders wichtig sind. Dazu gehören auch Photonik und Quantentechnologien.

31. In welcher Höhe wurden die Fördergelder der Programme „EXIST“, „High-Tech Gründerfonds“ und „INVEST – Zuschuss für Wagniskapital“ für die Förderung von Quantentechnologien abgerufen, die im Programm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ genannt werden (bitte die jährlichen Fördersumme mit Bezug zu Quantentechnologien für die jeweiligen genannten Programme seit 2015 auflisten)?

Mit dem Programm „EXIST“ wurden bisher keine Unternehmen im Bereich der Quantentechnologien unterstützt.

Der „High-Tech Gründerfonds“ hat insgesamt Investitionen i. H. v. rund 1,743 Mio. Euro in Portfoliounternehmen aus dem Bereich Quantentechnologien getätigt. Alle Investitionen erfolgten im Jahr 2019.

Beim Programm „INVEST – Zuschuss für Wagniskapital“ fließen keine Fördergelder direkt in förderfähige Unternehmen und es werden auch keine Forschungsprojekte o. Ä. finanziert, vielmehr werden mit dem Programm Investoren für ihre Gewährung von Wagniskapital an förderfähige Unternehmen bezuschusst.

Das Programm ist grundsätzlich auch für den Bereich Quantentechnologie offen, jedoch kann mit der verwendeten Branchenklassifizierung keine Aussage

darüber getroffen werden, wie viele der bisher erfolgten Förderungen dem Bereich der Quantentechnologie zugeordnet werden können.

32. Mit welchen Programmen und in welcher Höhe wird der seitens der Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler von QUTEGA geforderte (<https://www.quantentechnologien.de/fileadmin/public/Redaktion/Dokumente/PDF/Publikationen/Qutega-QT-Grundlagen-und-Anwendungen-01-2017-C1.pdf>, S. 34) Austausch von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in die Industrie und zurück gefördert (bitte die Programmtitel, die Laufzeit und die bewilligten jährlichen Förderungssummen seit 2015 nennen)?

Eine dedizierte Fördermaßnahme zum Austausch von Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern in die Industrie und zurück existiert nicht. Der aufgeführten Handlungsempfehlung wird im Rahmen des Regierungsprogramms „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ mit dem Instrument der Verbundforschung Rechnung getragen: In der Verbundforschung arbeiten Forscherinnen und Forscher aus Wissenschaft und Wirtschaft an gemeinsamen, klar umrissenen Projektzielen. Dabei erfolgt auch ein Know-how-Transfer über Köpfe. Dieser schließt u. a. die Entsendung akademischer Partner zu Unternehmen und vice versa ein.

33. In welcher Form erfolgt seitens der Bundesregierung eine Abstimmung der deutschen Förderprogramme für Quantentechnologien mit den aus dem Quanten-Flaggschiff der EU unterstützten Projekten?

Die Abstimmung der nationalen Förderung mit den Aktivitäten des EU Quantum Flagship erfolgt:

- über den kontinuierlichen Austausch mit der deutschen Konsortialführerschaft der Coordination and Support Action (CSA) QFlag für das EU Quantum Flagship,
- über den kontinuierlichen Austausch des BMBF mit dem Vorsitzenden des „Strategic Advisory Board“ (Prof. Jürgen Mlynek, Falling Walls Foundation, Berlin) sowie dem Vorsitzenden des „Quantum Community Network“ (Prof. Tommaso Calarco, Forschungszentrum Jülich),
- über den kontinuierlichen Austausch des BMBF mit den zuständigen Stellen der Europäischen Kommission, hier insbesondere mit dem Direktorat „Digital Excellence and Science Infrastructure“ der DG CONNECT.
 - a) Wie konkret sind die deutschen Förderprogramme mit dem Quanten-Flaggschiff der EU verzahnt?
 - b) Welche Ideen und Konzepte der Bundesregierung sind in das Design des Quanten-Flaggschiffs der EU eingeflossen, und welche blieben unberücksichtigt?

Die Fragen 33a und 33b werden gemeinsam beantwortet.

Im Rahmen des o. g. Austauschs erfolgte bzw. erfolgt eine kontinuierliche Abstimmung zu der „Strategic Research Agenda“ des EU Quantum Flagship. Entsprechende Erkenntnisse sind in die Entwicklung des Regierungsprogramms „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ eingeflossen bzw. fließen laufend in die Vorbereitung nationaler Fördermaßnahmen ein. U. a. adressierte 2020 die Fördermaßnahme „Quantenprozessoren und Technologien für Quantencomputer“ explizit die Zusammenarbeit mit dem EU Quantum Flagship zur Verwirklichung eines europäischen Quantencomputers, um sicher-

zustellen, dass der Standort Deutschland in optimaler Weise zum Gesamtziel beiträgt.

34. Inwieweit hat die Bundesregierung ihre derzeitige EU-Ratspräsidentschaft genutzt oder will sie noch nutzen, um das Thema Quantencomputing „im künftigen EU-Forschungsrahmen zu verankern“, wie Bundesforschungsministerin Anja Karliczek am 6. Juli 2020 angekündigt hat (<https://de.reuters.com/article/deutschland-quantentechnologie-karliczek-idDEKBN2470JL>)?

Die deutsche EU-Ratspräsidentschaft hat das Thema technologische Souveränität zu einer ihrer Prioritäten gemacht: Die künftige Forschungs- und Innovationspolitik Europas soll die technologische Souveränität in ausgewählten Schlüsselbereichen wie dem Quantencomputing weiter ausbauen. Bereits im laufenden Rahmenprogramm Horizont 2020 hatte sich die Bundesregierung für den Aufbau des EU Quantum Flagship eingesetzt und nun dessen Fortführung in Horizont Europa erfolgreich vorangetrieben. Die Quantentechnologie und das Quantencomputing sollen in Horizont Europa vor allem im Cluster 4 „Digital Industry and Space“ im Pfeiler 2 „Globale Herausforderungen und industrielle Wettbewerbsfähigkeit Europas“ gefördert werden. Weitere Mittel könnten aus dem industrienahen Pfeiler „Innovatives Europa“ beigesteuert werden.

35. Plant die Bundesregierung bilaterale Kooperationen im Bereich der Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien?
- Wenn ja, um welche Länder und Projekte handelt es sich hierbei, und in welchem Stadium befinden sich die jeweiligen Projekte (bitte für jedes Projekt einzeln benennen)?
 - Unterstützt die Bundesregierung diesbezüglich eine Kooperation mit Großbritannien, und wie konkret setzt sich die Bundesregierung – auch über den nahenden Brexit hinaus – für eine vertiefte Kooperation mit Großbritannien beim Thema Quantentechnologien ein?
 - Wenn nein, warum nicht?

Die Fragen 35 bis 35c werden im Zusammenhang beantwortet.

Ein übergeordnetes Ziel der Förderung der Entwicklung der Quantentechnologien ist es, die nationale und europäische Souveränität in diesem für Wirtschaft und Gesellschaft wichtigen Zukunftsfeld sicherzustellen. Daher zielt die Bundesregierung bei Kooperationen im Bereich Forschung und Entwicklung vorrangig auf die europäische Zusammenarbeit. Im Fokus stehen hier das Engagement Deutschlands für das EU Quantum Flagship und die wesentliche Mitwirkung deutscher Partner in den Konsortien des Flagship. Darüber hinaus stärkt die Bundesregierung die europäische Zusammenarbeit durch die Beteiligung des BMBF an der multinationalen Förderinitiative „QuantERA“, in der 27 Mitgliedstaaten sowie assoziierte Staaten der EU gemeinsam Kooperationsprojekte zu den Quantentechnologien fördern.

Bei der Erforschung der Grundlagen für die europäische Quantenkommunikationsinfrastruktur (EuroQCI) arbeitet die Bundesregierung mit zahlreichen Partnerländern innerhalb der EU zusammen. Derzeit sind keine bilateralen Kooperationen geplant, könnten sich aber im Kontext der Forschungsförderung zur EuroQCI ergeben.

Bilaterale Kooperationen sind grundsätzlich möglich, bestehen jedoch zurzeit nicht. Eine Zusammenarbeit mit Großbritannien im Bereich der Quantentech-

nologien wird abhängig von künftigen Regelungen zur Forschungszusammenarbeit zwischen der EU und Großbritannien geprüft werden.

Darüber hinaus besteht in der Verbundforschung grundsätzlich die Möglichkeit, Akteure aus der EU und dem außereuropäischen Ausland im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsaufträgen oder als assoziierte Partner zu beteiligen.

36. Wann wird nach Kenntnis der Bundesregierung der Quantencomputer am Standort Jülich einsatzbereit sein, und nach welchen Schlüssen verteilen sich die Kosten für Bau und Betrieb auf EU, Bund und Helmholtz-Gemeinschaft, und wie wird in Zukunft sichergestellt, dass andere Forscher und Forscherinnen in Deutschland und der EU Zugang zu dem in Jülich entwickelten Quantencomputer haben werden?

Der Prototyp des auf supraleitenden Qubits basierenden OpenSuperQ-Quantencomputers soll bis Ende 2021 im Forschungszentrum Jülich (FZJ) in Betrieb genommen werden. Zusätzlich wird das FZJ im Verlauf der ersten Hälfte des Jahres 2021 einen Quantenannealer installieren und betreiben. Ein weiterer Quantencomputer mit Halbleiter-basierten Qubits ist in einer frühen Phase der Entwicklung.

Für den Jülicher Anteil des OpenSuperQ-Projekts, an dem insgesamt zehn europäische Partnerinstitutionen beteiligt sind, werden Bau, Installation und Inbetriebnahme von der EU mit jährlichen Mitteln i. H. v. zwei Vollzeitäquivalenten gefördert. Hinzu kommen Eigenleistungen des FZJ aus der Programmorientierten Förderung (PoF) der Helmholtz-Gemeinschaft in etwa gleicher Höhe. Die PoF-Mittel werden im Schlüssel 90:10 vom Bund und vom Land Nordrhein-Westfalen finanziert.

Die Kosten für die Installation und den Betrieb des in Jülich zu installierenden Quantenannealers sowie für den derzeitigen Zugang zu einem externen solchen Rechner liegen bei insgesamt rund 2,9 Mio. Euro für den Zeitraum 2019 bis 2023. Sie werden zu je 50 Prozent vom Bund und vom Land Nordrhein-Westfalen getragen.

Alle Quantencomputer, die kurz- und längerfristig für den Betrieb am FZJ geplant sind, werden über die Jülicher Nutzer-Infrastruktur für Quantencomputing (JUNIQ) allen Forschenden aus Wissenschaft und Industrie in Deutschland und Europa zur Nutzung angeboten werden. Der Zugang wird nach Antragstellung und Begutachtung der Vorhaben erfolgen. Industrielle Nutzerinnen und Nutzer sollen bei offener Publizierung der Ergebnisse antragsberechtigt sein.

37. Wie viele Absolventinnen und Absolventen im Bereich Quantentechnologien erreichen nach Kenntnis der Bundesregierung zwischen 2015 und 2019 die verschiedenen Bildungsabschlüsse Master-, Diplom- oder vergleichbarer Abschluss, Promotion und Berufung auf eine Professur (bitte nach Art der Professur differenzieren), und welche Hochschulen in Deutschland bieten nach Kenntnis der Bundesregierung den Studiengang Quanteningenieurwesen, Quanteninformationstechnologie oder einen vergleichbaren auf Quantentechnologien fokussierten Nicht-Physik-Studiengang an, und wie viele Studierende sind hierzu eingeschrieben (bitte für die Jahre 2015 bis 2020 angeben)?

Aggregierte Daten zur Anzahl der Absolventinnen und Absolventen im Bereich Quantentechnologien liegen der Bundesregierung nicht vor. Eine Übersicht zu Studiengängen bzw. Lehrangeboten zu den Quantentechnologien gibt die veröffentlichte Studie „Erhebung des Lehrangebotes mit Bezug zu den Quantentech-

nologien an deutschen Hochschulen und hochschulnahen Forschungseinrichtungen“ (erstellt von bayern photonics e.V. und Optence e.V.).

38. In welcher Höhe fördert die Bundesregierung Hochschulbildung von Quantentechnologien, wie sie im Programm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ angekündigt wurde (bitte die jährlichen Förderungssummen der von 2015 bis 2023 bewilligten Mittel sowie die spezifischen durch den Bund geförderten Projekte nennen)?

Wie viele Professuren wurden im Bereich Quantentechnologien seit 2015 durch vom Bund (co-)finanzierte Programme geschaffen, und wie viele sollten nach Ansicht der Bundesregierung in den nächsten fünf Jahren von durch den Bund finanzierte Programme neu entstehen (bitte die seit 2015 neu geschaffenen Professuren und deren jeweilige thematische Schwerpunkte jährlich aufgeschlüsselt nennen)?

Die Hochschulbildung im Bereich der Quantentechnologien wird im Rahmen des Programms „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ durch die Förderinitiative „Nachwuchswettbewerb Quantum Futur“ unterstützt. Die BMBF-Maßnahme fördert junge Akademikerinnen und Akademiker beim Aufbau von Forschungsgruppen. Die Leiterinnen und Leiter der Nachwuchsgruppen bilden selbst wissenschaftlichen Nachwuchs aus und übernehmen Aufgaben in der Lehre. Seit dem Förderbeginn 2018 wurden dafür die folgenden Mittel durch das BMBF bereitgestellt:

2018: 3.422.480 Euro

2019: 6.664.340 Euro

2020: 6.334.459 Euro.

Für die Folgejahre ist eine Förderung in vergleichbarem Umfang vorgesehen,

Einzelne Professuren im Bereich der Quantentechnologien werden im Rahmen des themenoffenen Tenure-Track-Programms von Bund und Ländern gefördert. Derzeit lassen sich drei Tenure-Track-Professuren dem Bereich der Quantentechnologien zuordnen:

2019: Technische Universität München, Fakultät Elektrotechnik und Informationstechnik, Schwerpunkt Quantum Electronics and Computer Engineering

2019: Technische Universität München, Fakultät Informatik, Schwerpunkt Quantum Computing

2020: Universität Stuttgart, Fakultät Mathematik und Physik, Fachbereich Physik, Schwerpunkt Quantum Device Technology.

Anlage 1 zu Frage 9:

Förderung durch Förderprogramme, Fördermaßnahmen und Projekte (2015 bis 2023)

Regierungsprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ (BMBF), darin enthaltene Fördermaßnahmen und Projekte: QUTEQA, QuantERA, Quantum aktiv – intuitive Outreachkonzepte für die Quantentechnologien, Nachwuchswettbewerb Quantum Futur, Schlüsselkomponenten für Quantentechnologien, Wissenschaftliche Vorprojekte sowie Projekt „Quantum Photonics Labs“.

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Gesamtsumme
BMBF insg. (in Euro)	-	-	1.289.667,61	6.838.738,37	20.990.044,04	19.387.371,29	13.646.822,15	11.078.684,86	5.317.185,54	78.548.513,86

Förderung durch Förderprogramme, Fördermaßnahmen und Projekte (2015 bis 2023)

Regierungsprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ (BMWV), darin enthalten: Plattformprojekt PlanQ und Nationales Programm für Weltraum und Innovation, sowie BMVg.

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Gesamtsumme
BMWV insg. (in Euro)	8.038.009,25	5.315.282,70	5.737.019,27	5.421.002,14	6.649.795,95	12.073.606,35	11.712.696,78	7.868.260,96	930.473,12	63.746.146,52
BMVg insg. (in Euro)	-	-	-	-	1.458.000	1.833.000	4.385.000	3.685.000	3.135.000	14.496.000,00
insg. (BMBF, BMWV, BMVg/ (in Euro)	8.038.009,25	5.315.282,70	5.737.019,27	5.421.002,14	8.107.795,95	13.906.606,35	16.097.701,78	11.553.260,96	8.452.188,66	78.242.516,86

Förderung durch Förderprogramme, Fördermaßnahmen und Projekte (2015 bis 2023)
 Programm „Selbstbestimmt und sicher in der digitalen Welt 2015 bis 2020“ (BMBF), darin enthalten: Projekt QUBE, Projektverbund Q.com, Projekt HQS, Projekt QuaDiQua, Fördermaßnahme Anwendungsszenarien der Quantenkommunikation (Projekt Q.Link.X), Fördermaßnahme QuantERA (nur Quantenkommunikation), Projektverbund QuNET, Fördermaßnahme Postquantenkryptografie.

Alle Angaben in Euro

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Gesamtsumme
insgesamt	4.695.817,08	9.236.010,46	2.864.970,29	4.496.506,26	10.671.095,30	18.415.653,17	12.796.638,76	6.636.211,62	2.731.256,58	72.544.159,52

Förderung durch Förderprogramme, Fördermaßnahmen und Projekte (2015 bis 2023)
 Themenoffene Förderung VIP+ (BMBF), darin enthaltene Projekte: Qlaser, QSOURCE.

Alle Angaben in Euro

	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	Gesamtsumme
insgesamt	479.440,00	464.922,80	-	-	-	400.000,00	368.524,80	224.676,80	-	1.937.564,40

Anlage 2 zu Frage 10:

Verteilung der Fördersummen im Zeitraum 2015 bis 2023

	Gesamtfördersumme in Euro
Quantencomputer	10.619.758,09
Quantenkommunikation	83.269.578,87
Quantensensorik	6.826.345,00
Quantenmetrologie	47.609.877,99
Nachwuchs	32.497.599,00
Basistechnologien	42.338.059,49
Outreach	1.439.393,00
Europa	6.671.772,00
Summe	231.272.383,44

Anlage 3 zu Frage 11:

Anteile nach Einrichtungart im Zeitraum 2015 bis 2020

	Gesamtsumme in Euro
Hochschulen	62.897.938,73
Helmholtz-Gemeinschaft	3.905.638,82
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e. V.	19.180.897,00
Wissenschaftsgemeinschaft Gottfried Wilhelm Leibniz e.V.	12.217.041,00
Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.	3.427.266,53
Unternehmen	11.212.554,32
Sonstige Forschungseinrichtungen	2.318.379,90

Anlage 4 zu Frage 13:

DFG-Projekte mit Bezug zur Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien in der laufenden Förderung 2015 bis 2020 (Stand: 01.12.2020)

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
SFB 767: Terahertz-Quantenoptik mit Halbleiter-Nanostrukturen	01.01.2008	31.12.2015	Basistechnologien für Quantentechnologien
SFB 787: Effektive Modelle, Simulation und Analyse der Dynamik in Quantenpunkt Bauelementen	01.01.2008	31.12.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien
SFB 787: Energieeffiziente Oberflächenemitter mit ultimativer Bandbreite für die Silizium-Photonik, Beleuchtung und Detektion: Mikro- und Nano-Laser	01.01.2008	31.12.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien
TRR 142: Integrierte optische SU(1,1) Interferometer	01.01.2014	31.12.2021	Basistechnologien für Quantentechnologien
Nano-Positionierung, -Vermessung und -Strukturierung auf großen Flächen und Volumina für Design, Herstellung und Charakterisierung von neuartigen optischen Komponenten und Systemen.	01.01.2015	31.12.2016	Basistechnologien für Quantentechnologien
TRR 160: Herstellung von GaAs-basierten maßgeschneiderten Halbleiterquantenstrukturen in funktionalen Umgebungen	01.01.2015	31.12.2018	Basistechnologien für Quantentechnologien
Optimierung der Laserverstärkung in Terahertz-Quantenkaskadenlasern	01.01.2016	31.12.2017	Basistechnologien für Quantentechnologien
TRR 195: Computergestützte Klassifikation orthogonaler Quantengruppen	01.01.2017	31.12.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Effiziente Mehrstufen-Destillation von Quantenzuständen gegen Gaußsche Dekohärenz ohne Erfordernis von Quantenspeichern	01.01.2018	31.12.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
Neue Konzepte zur gepulsten Lichterzeugung mittels Halbleiterquantenpunktlasern	01.01.2018	31.12.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
Halbleiter-Quantenfilme angeregt mit nicht-klassischen Lichtzuständen: Wechselspiel zwischen photonischen Quanten-Korrelationen und Vielteilchen-Wechselwirkungen in Festkörpersystemen	01.01.2019	31.12.2021	Basistechnologien für Quantentechnologien
Neuartige Halbleitermaterialien mit großer Bandlücke zur Anwendung in der Optoelektronik und für die Grundlagenforschung	01.01.2019	31.12.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
Quanten Dynamik von Josephson-Flussquanten	01.01.2019	31.12.2021	Basistechnologien für Quantentechnologien
Quantensensoren für NMR-Spektroskopie an Oberflächen	01.01.2019	31.12.2024	Basistechnologien für Quantentechnologien
Quanteninvarianten, Konkordanz und Entknotung	01.01.2019	31.12.2024	Basistechnologien für Quantentechnologien
Maskiertes Tröpfchenätzen für positionierte Quantenstrukturen	01.01.2019	31.12.2021	Basistechnologien für Quantentechnologien
Entwicklung von deterministischen Quantenlichtquellen aus InP-basierten Quantenpunkten im Telekom-C-Band	01.01.2019	31.12.2021	Basistechnologien für Quantentechnologien

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Auf Si-Nanotips selektiv gewachsene III-V/Graphen Strukturen: Untersuchung der Korrelation zwischen den strukturellen und optoelektronischen Eigenschaften	01.01.2020	31.12.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien
Nanographen für Quantentechnologien	01.01.2020	31.12.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien
Gering-toxische Quantenpunkte mit modularer Lichtemission im Infrarot-Bereich	01.02.2017	31.01.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
Quantum + Grade Diamant für Quantentechnologien	01.02.2018	31.01.2021	Basistechnologien für Quantentechnologien
Planar optical nanocavities and their coupling to quantum emitters for on-chip photonics	01.03.2011	29.02.2016	Basistechnologien für Quantentechnologien
Asynchron optisch abtastendes gepulstes THz-TDS-Spektroskopiesystem auf Basis monolithisch modengekoppelter Laserdioden	01.03.2014	31.05.2023	Basistechnologien für Quantentechnologien
Dreidimensionale quantenphotonsche Bauelemente auf der Basis von einzelnen Emittern und lasergeschriebenen Mikrostrukturen für die effiziente Erzeugung von nicht-klassischem Licht und ultra-sensitiver optischer Nanomagnetometrie	01.03.2014	28.02.2017	Basistechnologien für Quantentechnologien
Terahertz Quantenkaskadenlaser auf Basis von Manipulation der Grenzschichtenrauigkeiten in InGaAs/InAlAs Heterostrukturen auf InP	01.03.2014	30.04.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien
Kontrolle nicht-klassischer Lichtzustände durch lineare und nicht-lineare Wechselwirkung in Hybridsystemen auf der Basis einzelner Halbleiter-Quantenpunkte und Alkali-Atomgas	01.03.2016	28.02.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Gekoppelte organisch-anorganische Nanostrukturen: Von maßgeschneiderten elektronischen Eigenschaften über selektiven Ladungstransport zu optoelektronischen Bauteilen	01.03.2016	28.02.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien
Simulation des Ladungstransportes in ultra-skalierten Bauelementen mit nativem Oxid	01.03.2017	29.02.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
SiGeSn-Nanostrukturen für integrierte Quantentopf-Infrarot-Photodetektoren	01.03.2018	31.08.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien
Strukturierung der photonischen Umgebung eines Einzelphotonen-Emitters	01.03.2018	31.08.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien
Integriert optische Einphotonenquelle mit Zeitmultiplex	01.04.2013	31.03.2016	Basistechnologien für Quantentechnologien
Rechnergestützte Modellierung und Kontrolle von langlebigen elektronischen Kohärenzen: Zur Quantendynamik von Makrosystemen	01.04.2017	31.03.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
Optische Eigenschaften kationischer Diamanttoide	01.04.2019	31.03.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien
FOR 1493: Growth of ultraclean, isotopically controlled diamond films and nanoparticles with well defined single defects and atomically smooth surfaces	01.05.2011	30.09.2017	Basistechnologien für Quantentechnologien
Erzeugung ununterscheidbarer Einzelphotonen aus resonant gepumpten Halbleiter-Quantenpunkten durch Quanten-Frequenzkonversion in das Telekommunikations-C-Band	01.05.2014	30.04.2017	Basistechnologien für Quantentechnologien

Projektitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Entwicklung von Heteropolyvanadat-Spincluster als Kandidaten für zukünftige redox-basierte Speicherbausteine	01.05.2015	30.04.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
Gekoppelte periodische Nanowellenleiter zur Erzeugung von Photonennpaaren	01.05.2017	30.04.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
Emission characteristics of the resonance fluorescence of semiconductor quantum dots in microcavities	01.06.2012	31.05.2015	Basistechnologien für Quantentechnologien
Konzeption quantenmechanischer Bauelemente mit ultra-dünnen funktionalen ALD-Schichten für den Einsatz in Terahertz-Anwendungen	01.06.2013	28.02.2018	Basistechnologien für Quantentechnologien
Einzel-Quantenpunkt Laser und Gekoppelte Kavitätsarrays	01.06.2015	31.05.2018	Basistechnologien für Quantentechnologien
Epitaxy of intra-plane ordered (In,Ga)N monolayers towards single photon emission	01.06.2017	31.05.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
Integrierte Quantenlicht-Quellen für Systeme kontinuierlicher Variablen	01.06.2017	31.05.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
Hochstrukturierte optische Materialien aus Proteincontainern und plasmonischen Nanopartikeln für die Manipulation von Licht auf der Nanoskala	01.06.2018	31.05.2021	Basistechnologien für Quantentechnologien
Terahertz Quantenkaskadenlaser-Quellen basierend auf Intra-Resonator Differenzfrequenzerzeugung mit Gittergestützter vertikaler Lichtauskopplung	01.06.2020	31.05.2023	Basistechnologien für Quantentechnologien

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungsende	Bereich
SFB 631: Supraleitende Bauelemente als Grundelemente für Quanten-Informationssysteme	01.07.2003	30.06.2015	Basistechnologien für Quantentechnologien
SFB 631: Integrierte Einzelphoton-Quantenoptik auf einem Halbleiter-Chip	01.07.2003	30.06.2015	Basistechnologien für Quantentechnologien
TRR 49: Auf DFT-Rechnungen gestütztes rationales Design und Darstellung von Quantenmagneten auf Basis von Koordinationspolymeren	01.07.2007	30.06.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien
Erforschung von hochwirksamen, RuO ₂ -basierten, thermoelektrischen Dünnschichten mittels Quantendesignverfahren	01.07.2013	30.06.2016	Basistechnologien für Quantentechnologien
Nichtlineare THz-Dynamik und Quantenvakuum-Photonik gequetschter Quantenvakua	01.07.2013	31.05.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
Photonische Netzwerke für einzelne Emittter der seltenen Erden	01.07.2014	30.06.2017	Basistechnologien für Quantentechnologien
Polaritonenbasierte Einzelphotonenquellen	01.07.2015	30.06.2018	Basistechnologien für Quantentechnologien
SiGeSn Laser für die Silizium Photonik	01.07.2016	30.04.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien
Holistisches Quantendesign von amorphen thermoelektrischen NbO ₂ legiert mit Übergangsmetallen	01.07.2016	30.06.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Stetigkeit und Stabilität in Quanten-Vielteilchensystemen.	01.07.2017	30.06.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien
Ultradünne breitbandige solare Absorber für den UV- und UV-NIR-Bereich basierend auf einem skalierbaren plasmonischen Metamaterial	01.07.2019	30.06.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien
Integrated Quantum Photonics and Opto-mechanics	01.08.2011	31.07.2016	Basistechnologien für Quantentechnologien
Nanometer-dicke YIG-Funktionsschichten und mikrostrukturierte Oberflächen für Spintronik-Anwendungen	01.08.2015	30.04.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien
Hybride Halbleiter-Supraleiter-basierte photonische Quantenschaltkreise	01.08.2015	31.07.2018	Basistechnologien für Quantentechnologien
DFG-RSF: Siliziumcarbid Polytyp- und Isotop-Technologie für Quanten-Mikrowellenverstärker	01.08.2016	31.07.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien
Modellierung von Quantenkaskadenlaser-Frequenzkämmen im mittleren Infrarot- und Terahertz-Bereich	01.08.2016	31.01.2018	Basistechnologien für Quantentechnologien
Kopplung von Quantendots mit Supraleitern - langreichweitige Kopplung von Quantenbits	01.08.2017	31.07.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
Nicht-Hermitesche Quantenmechanik in der Theorie der elektronischen Struktur	01.08.2017	31.07.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Numerische Methoden zur Beschleunigung der Analyse des Ladungsträgertransports in Quantenbauelementen der Hochfrequenztechnik und Photonik auf der Grundlage der von-Neumann-Gleichung	01.08.2017	31.08.2020	Basistechnologien für Quantentechnologien
FOR 2724: Quanten-Wärmemaschinen	01.08.2018	31.07.2021	Basistechnologien für Quantentechnologien
Spin-Kohärenz-Transfer in lichtinduzierten Multi-Spin Systemen	01.08.2019	31.07.2025	Basistechnologien für Quantentechnologien
Auf dem Weg zu hybriden Supraleiter/Kalt-Atom Quanten-Schaltkreisen	01.08.2019	31.07.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien
Hohe Ausbeute, geringe Variabilität - Silizium CMOS Technologie für die Realisierung von Spin Qubits	01.08.2019	31.07.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien
Quantenpunktbasierter nicht-flüchtiger Speicher (QD-Flash) mit schneller Schreib-, Lösch- und Lesezeit von wenigen Nanosekunden - Green Memory Concept	01.09.2007	28.02.2017	Basistechnologien für Quantentechnologien
SPP 1923: Nanodiamanten als sensitive Sensoren zur Untersuchung der Struktur und Dynamik von Tetherin	01.09.2016	31.08.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien
SPP 1929: Kontrollierte Wechselwirkungen von Rydberg-Exzitonen in integrierten und hochskalierbaren Bauteilen	01.09.2016	31.10.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien
Direktionalität in Quantensystemen	01.09.2017	31.08.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Hyperpolarisation und NMR-Detektion auf einem Diamantquantenchip	01.09.2020	31.08.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien
GRK 1838: Spektraltheorie und Dynamik von Quantensystemen	01.10.2013	31.03.2018	Basistechnologien für Quantentechnologien
Einzelphotonen-Quelle, getrieben durch komposite Pulse, für Anwendungen in einem dotierten Festkörper-Quantenspeicher	01.10.2018	30.09.2021	Basistechnologien für Quantentechnologien
MIR Breitband-Photodetektor bei Raumtemperatur auf der Basis von Si:Te für die Integration auf Wafer-Ebene	01.10.2020	30.09.2023	Basistechnologien für Quantentechnologien
Design und analytische und spektroskopische Charakterisierung von Halbleiternanopartikel-Salzkristall-Hybridstrukturen als extrem photostabile und hoch effiziente Lichtemitter für optische Anwendungen	01.11.2010	28.02.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien
Quanten-Ladungstransport trifft Quantenoptik: Josephson-Photonik mit starker Ladungs-Licht Kopplung	01.11.2016	31.10.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien
Josephson regelbare Metamaterialien für Quantenbauelementen	01.11.2020	31.10.2023	Basistechnologien für Quantentechnologien
Ortsaufgelöste Analyse photoelektrochemischer Reaktionen mit QuantumDot basierten Elektroden	01.12.2012	30.11.2015	Basistechnologien für Quantentechnologien
Ultra-helle Einzelphotonen-Quellen und Quellen verschränkter Photonenpaare	01.12.2014	30.11.2017	Basistechnologien für Quantentechnologien

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungsende	Bereich
Kantenemittierender elektrisch gepumpter Raumtemperatur-Spin-Laser	01.12.2017	30.11.2019	Basistechnologien für Quantentechnologien
Entwicklung und Untersuchung von MOCVD Wachstumsprozessen für binäre und ternäre 2D Übergangsmetall-Dichalkogenide (TMDC)	01.12.2018	30.11.2021	Basistechnologien für Quantentechnologien
Kontrollierte Anregung von Quantenemittern durch nichtlineare plasmonische Nahfelder	01.12.2018	30.11.2021	Basistechnologien für Quantentechnologien
Graphen-Quantenpunkte und -Nanostreifen für neuartige optische Anwendungen	01.12.2019	30.11.2022	Basistechnologien für Quantentechnologien
Chipbasierte Quantenspeicher auf Basis von Erbium-dotierten Silizium-Wellenleitern	01.12.2020	30.11.2023	Basistechnologien für Quantentechnologien
Simulation of mesoscopic quantum systems by liquid-state NMR	01.01.2006	31.01.2015	Quantencomputer
Das Potenzial von analogen Quantensimulatoren: Neue Werkzeuge für ihre Zertifizierung und Untersuchung ihrer Rechenleistung	01.01.2015	31.12.2017	Quantencomputer
DIP 13: Quantensimulatoren: Von photonischen zu atomaren Systemen	01.01.2016	31.12.2020	Quantencomputer
Multipfad-Interferenztests der Quantenmechanik	01.01.2016	31.12.2018	Quantencomputer

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Operativer Ansatz für nicht-Gauß'sche Zustände - Photon für Photon	01.01.2018	31.12.2019	Quantencomputer
3D Quanten-Zufallsbewegung in laser-geschriebenen Wellenleiterstrukturen	01.01.2019	31.12.2021	Quantencomputer
SFB 910: Rückkopplungskontrolle in der Quanteninformationsverarbeitung	01.01.2019	31.12.2022	Quantencomputer
EXC 2004: Materie und Licht für Quanteninformation (ML4Q)	01.01.2019	31.12.2025	Quantencomputer
Eindimensionale Majorana-Moden in elektronischen Schaltkreisen	01.01.2020	31.12.2022	Quantencomputer
Integriert optische Quantensysteme aus Fluor-Donator Qubits	01.02.2012	31.01.2015	Quantencomputer
Neue Perspektiven in stark gekoppelten Systemen: Vorbereitung auf Quantensimulatoren.	01.02.2018	31.01.2020	Quantencomputer
Ultrakalte Atome in periodisch modulierten Potenzialen: Ein quantenmechanisches Metamaterial zur Erforschung von Systemen fernab vom Gleichgewicht sowie zur Simulation relativistischer Effekte	01.03.2013	29.02.2016	Quantencomputer
Quantencomputer-resistente Signaturverfahren für die Praxis	01.03.2014	28.02.2017	Quantencomputer

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Dekohärenz in Josephson-Quantenbits aufgrund von Ladungs- und Spin-Fluktuatoren	01.03.2014	28.02.2017	Quantencomputer
Spin-Qubits in elektrostatisch definierten ZnSe Quantenpunkten	01.03.2017	29.02.2020	Quantencomputer
Hochauflösende Quantengas-Mikroskopie von ultrakalten ^{23}Na 40K Molekülen in optischen Gittern	01.03.2019	28.02.2021	Quantencomputer
Quanteninformationsprotokolle mit begrenzten Ressourcen	01.03.2019	28.02.2022	Quantencomputer
Präzise und effiziente Charakterisierung von verschränkten Mehrteilchen-Zuständen und von Quantengattern mit gespeicherten Ionen	01.04.2014	31.03.2017	Quantencomputer
Eindämmung von Dekohärenz in der Kontrolle logischer Quantenbits und Quantenregister	01.04.2014	31.03.2017	Quantencomputer
TRR 183: Quantenfehlerkorrektur und neue Materien	01.04.2018	30.06.2020	Quantencomputer
Paradigmatische Quantenmaschinen	01.04.2020	31.03.2023	Quantencomputer
FOR 1493: Integrated Quantum Optics and Nanophotonics with Defect Centers in Nanodiamonds	01.05.2011	30.09.2017	Quantencomputer

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungsende	Bereich
Exploration des Raumes Chemischer Verbindungen mit Methoden des maschinellen Lernens	01.05.2014	30.04.2017	Quantencomputer
Entwicklung von supraleitenden Quantenbits zur universellen Analyse von Materialdefekten	01.05.2015	29.02.2020	Quantencomputer
Topologische Zustände in atomaren Strukturen untersucht mittels Rastertunnelmikroskopie	01.05.2018	30.04.2020	Quantencomputer
Von Quanten-Magnetomechanik zu rein magnetischer Quanteninformationsverarbeitung und -simulation	01.06.2013	31.05.2016	Quantencomputer
SFB 631: Beherrschung und Kontrolle der Dekohärenz in festkörperbasierten Quanteninformationssystemen	01.07.2003	30.06.2015	Quantencomputer
SFB 631: Quantenspeicher und Quantensimulationen mit ultrakalten Gasen	01.07.2007	30.06.2015	Quantencomputer
Experimentelle Quantensimulationen in Arrays von Ionenfallen	01.07.2013	31.03.2020	Quantencomputer
Quantensimulation mittels Netzwerken von Josephson-Verbindungen zwischen topologischen Supraleitern	01.07.2014	30.06.2017	Quantencomputer
TRR 183: Verschränkung und maschinelles Lernen	01.07.2016	30.06.2024	Quantencomputer

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
TRR 183: Messung und Manipulation von topologischen Anregungen	01.07.2016	30.06.2024	Quantencomputer
TRR 183: Konstruktion von topologischen Materie-Zuständen	01.07.2016	30.06.2024	Quantencomputer
TRR 183: Majorana Plattformen	01.07.2016	30.06.2024	Quantencomputer
TRR 183: Verschränkte und synthetische Quanten-Bauelemente	01.07.2016	30.06.2024	Quantencomputer
TRR 183: Transmon Qubits	01.07.2020	30.06.2024	Quantencomputer
Quantensimulatoren von relativistischen Quantenfeldern in gekrümmten Räumen mit Defekt-behafteten optischen Gittern und Graphenen	01.08.2013	31.07.2015	Quantencomputer
Kryogene CMOS Technologie für die Realisierung von klassischen Qubit-Kontrollschaltkreisen	01.08.2019	31.07.2021	Quantencomputer
Gatter mit hoher Fidelität, dynamische Kernspinpolarisierung und Spin-Bahn Kopplung in GaAs zwei-Elektronen Spinqubits.	01.09.2013	31.08.2016	Quantencomputer
Austauschfelder und Relaxationszeiten in Quantenpunkte	01.09.2014	31.08.2016	Quantencomputer

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Spin Dynamik in Graphen Quantenpunkten	01.09.2014	31.08.2017	Quantencomputer
Extreme Simulationen für Quantentechnologien	01.09.2016	31.08.2019	Quantencomputer
Die Komplexität komplexer Quantensysteme	01.09.2017	31.08.2020	Quantencomputer
Regenerative Quanten-Fehlerkorrektur mit Einzelspin-Qubits	01.10.2015	30.09.2017	Quantencomputer
SQAM_Spin Qubits in Künstlichen Molekülen	01.10.2017	30.09.2020	Quantencomputer
Quantenchemie-Simulation mit wechselwirkenden Photonen	01.10.2020	30.09.2022	Quantencomputer
Dephasierung von Elektronenspinqubits in GaAs Quantenpunkten durch die Hyperfeinwechselwirkung	01.11.2014	31.10.2017	Quantencomputer
Quantenkontrolle von Spins in Siliziumkarbid mit Mikroresonatoren	01.11.2016	31.10.2019	Quantencomputer
SPP 1929: Ein Photon-Photon-Quantengatter basierend auf Rydberg-Wechselwirkungen in einem Resonator	01.11.2019	31.10.2022	Quantencomputer

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Auf dem Weg zur Licht-Materie-Quantenschnittstelle: Entwicklung eines Multi-Qubit-Quantenregisters basierend auf paramagnetischen Farbzentren in Diamant	01.11.2020	31.10.2023	Quantencomputer
Charakterisierung hochdimensionaler Verschränkung und Kohärenz	01.11.2020	31.10.2023	Quantencomputer
Quantensimulation von Spinmodellen mit steuerbaren Atomketten	01.12.2016	30.11.2018	Quantencomputer
Das Quanten-Erfüllbarkeitsproblem - Algorithmen und Komplexitätstheoretische Schwierigkeit	01.12.2019	30.11.2022	Quantencomputer
Ein logischer Ansatz zur Quantenmechanik und Quantenkontextualität	01.12.2019	30.11.2022	Quantencomputer
SPP 1929: Quantenkontrolle der dissipativen Erzeugung von Vielteilchenverschränkung in Rydberg-Atomen	01.12.2019	30.11.2022	Quantencomputer
Verifizierung und Charakterisierung von Quantentechnologie	01.12.2020	30.11.2026	Quantencomputer
SFB 787: Quantennetzwerke basierend auf Einzelphotonen	01.01.2008	31.12.2019	Quantenkommunikation
TRR 142: Maßgeschneiderte Frequenzkonverter-Bauelemente	01.01.2014	31.12.2021	Quantenkommunikation

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungsende	Bereich
Verifizierung einer Quantenschlüsselverteilung endlicher Länge und kontinuierlicher Variablen gegenüber beliebigen Lauschangriffen	01.01.2014	31.12.2015	Quantenkommunikation
Prinzipien des Designs von Quanten-Kommunikationssystemen	01.01.2018	31.12.2022	Quantenkommunikation
Kontrollierbarer Transfer von Quanteninformationen in supraleitenden Netzwerken	01.01.2019	31.12.2020	Quantenkommunikation
Silizium-Vakanz Farbzentren in Phosphor-dotiertem Diamant für helle Einzelphotonenemission unter elektrischem Pumpen	01.01.2019	31.12.2021	Quantenkommunikation
Präparation nicht-klassischer Photonzustände in lasergetriebenen Quantenpunkt-Resonator-Systemen unter dem Einfluss akustischer Phononen	01.01.2019	31.12.2021	Quantenkommunikation
Quanten-Crossover des klassischen topologischen Schutzes	01.01.2019	31.12.2021	Quantenkommunikation
EXC 2111: Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST)	01.01.2019	31.12.2025	Quantenkommunikation
Lichtquellen für die Quantenkommunikation in dem spektralen Bereich um 1300 nm	01.01.2020	31.12.2022	Quantenkommunikation
DIP 17: Helle Quantenlichtquellen für eine effiziente Verschränkungsverteilung	01.01.2020	31.12.2024	Quantenkommunikation

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Gezielte Erzeugung komplexer Multiphotonenzustände in miniaturisierten Halbleiter-Quantenbauteilen	01.03.2018	28.02.2021	Quantenkommunikation
Leistungsfähige verschränkte Zustände aus Quantenpunkten	01.03.2020	28.02.2023	Quantenkommunikation
Quanten-Photonik auf einem Silizium Chip	01.04.2013	31.03.2015	Quantenkommunikation
Prinzipien der Quantenkommunikationstechnik	01.04.2015	31.03.2017	Quantenkommunikation
Verschränkte Quantenmikrowellen: Remote-State-Preparation und Quantenillumination mit kontinuierlichen Variablen	01.04.2015	31.03.2017	Quantenkommunikation
Quantenzustandsräume: Entscheidungsprobleme, Informationstheorie und Geometrie	01.04.2016	31.03.2019	Quantenkommunikation
Verschränkte Photonen von einem einzelnen Molekül für Experimente an Einzelemittlern, Quantenspeichern und atomaren Gasen	01.04.2017	31.03.2020	Quantenkommunikation
FOR 1493: Tailoring light matter coupling for ultrafast quantum optics with defect centers in diamond	01.05.2011	30.09.2017	Quantenkommunikation
FOR 1493: Electrical control and read-out of color centers in diamond	01.05.2011	30.09.2017	Quantenkommunikation

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungsende	Bereich
Effiziente Quellen polarisationsverschränkter Photonenpaare auf Basis von deterministischen Quantenpunkt-Mikrolinsen	01.05.2016	30.04.2019	Quantenkommunikation
Festkörper Interface kohärent zwischen Mikrowellen und Telecom-C Licht	01.05.2017	30.04.2020	Quantenkommunikation
Faserbasierte Lichtquelle für verschränkte Photonen mit riesigem regelbarem Frequenzabstand	01.05.2020	30.04.2023	Quantenkommunikation
Quantenlichtquellen basierend auf Quantenpunkt-Mikrokavitäten	01.06.2017	31.05.2020	Quantenkommunikation
Seltene-Erd-basierte Einzelphotonenquellen für die Quantentelekkommunikation, kompatibel mit Spin-Quantenspeichern	01.06.2017	31.05.2020	Quantenkommunikation
SFB 787: Deterministische Quantenbauelemente für Quantenkommunikationsnetzwerke	01.07.2012	31.12.2019	Quantenkommunikation
SFB 1119: Quantum Key Hubs	01.07.2014	30.06.2022	Quantenkommunikation
SPP 1798: Sicherheit für die Kommunikation der Zukunft und compressed sensing	01.07.2015	30.06.2020	Quantenkommunikation
Mathematische Aspekte der Quanteninformation mit kontinuierlichen Variablen	01.07.2016	30.06.2019	Quantenkommunikation

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Kontrollierte Elektron-Phonon Wechselwirkung negativ geladener Silizium-Fehlstellen Zentren in nanostrukturierter Diamantmatrix.	01.07.2018	30.06.2021	Quantenkommunikation
Emission von Photonen-Triplets in Parametrischer Fluoreszenz (chi-3)	01.08.2016	31.07.2019	Quantenkommunikation
Informationsverarbeitung und Sicherheit für kommende Quantenkommunikationsnetzwerke	01.08.2019	31.07.2025	Quantenkommunikation
Aspekte des Quantum Steerings	01.08.2020	31.07.2023	Quantenkommunikation
SPP 1929: Dynamik von Rydbergpolaritonen in quasi eindimensionalen Geometrien	01.09.2016	31.08.2019	Quantenkommunikation
Quantenphotonik auf einem Chip für komplexe Quantennetzwerke	01.09.2019	31.08.2022	Quantenkommunikation
Heterogene Quantensysteme für das Verzögern und Formen von Einzelphotonenpulsen	01.09.2020	31.08.2023	Quantenkommunikation
FOR 1493: Mechanical and Opto-mechanical Interfaces for Single Color Centers in Diamond	01.10.2014	30.09.2017	Quantenkommunikation
Fortgeschrittene Galliumnitrid basierte Quantenbauelemente	01.10.2014	30.09.2017	Quantenkommunikation

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungsende	Bereich
Ist der quanteninformativische Ansatz zur Modellierung des genetischen Codes geeignet?	01.10.2020	31.01.2021	Quantenkommunikation
Dielektrische Nanoresonatoren und Metaoberflächen für die Erzeugung von Photonpaaren	01.11.2018	31.10.2021	Quantenkommunikation
Tensorzerlegungen angewandt auf stark korrelierte Quantensysteme	01.11.2018	31.10.2020	Quantenkommunikation
SPP 1929: Eine Einzelphotonenquelle mit hoher Bandbreite bei Raumtemperatur	01.11.2019	31.10.2022	Quantenkommunikation
Mikrolaser-angeregte Quellen ununterscheidbarer Photonen für Quantennetzwerke	01.11.2020	31.10.2023	Quantenkommunikation
Untersuchungen zu Black-Box Separierungen in der (Quantum-)Kryptographie	01.12.2010	30.11.2016	Quantenkommunikation
Grundlagen der Quantenkommunikation durch atmosphärische Kanäle	01.12.2014	31.05.2018	Quantenkommunikation
Vollständige Charakterisierung von Quanteneffekten von Licht nach der Transmission durch die Atmosphäre	01.12.2014	31.05.2018	Quantenkommunikation
Integrierte Quellen Verschränkter und Ununterscheidbarer Photonen	01.12.2014	30.11.2017	Quantenkommunikation

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungs-ende	Bereich
Quanten und klassische Lichtquellen in Silizium: Verunreinigungen und komplexe Defekte für die Nanophotonik	01.12.2015	30.11.2018	Quantenkommunikation
Transport und Verschränkung von photonischen Bahndrehimpulszuständen in turbulenter Atmosphäre	01.12.2015	30.11.2018	Quantenkommunikation
SFB 813: Theorie und quantenchemische Modellierung von offenschaligen Systemen	01.01.2013	31.12.2017	Quantenmetrologie
SFB 716: Diamantoid-funktionalisierte Nanoporen als Biosensoren	01.01.2015	31.12.2018	Quantenmetrologie
TRR 173: Spin+Chemische Sensorik: Übertragung der Elektronen-Spinpolarisation auf Kernspins zur Steigerung der Sensitivität von NMR Experimenten	01.01.2016	31.12.2019	Quantenmetrologie
SFB 1319: Kalte Atome als ultrasensitive Quantensensoren für chirale Moleküle	01.01.2018	31.12.2021	Quantenmetrologie
EXC 2123: QuantumFrontiers - Licht und Materie an der Quantengrenze	01.01.2019	31.12.2025	Quantenmetrologie
TRR 88: Kernspin qudit Kooperativität durch Elektronenspin-Kopplung	01.01.2019	31.12.2022	Quantenmetrologie
Fortsetzung von „Weiterentwicklung der Quantenkristallographie zur Visualisierung und Charakterisierung chemischer Reaktionen durch Beugungsexperimente“: Von Modellsystemen zu echten Systemen – von Molekülen zu Materialien	01.02.2014	30.06.2019	Quantenmetrologie

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungsende	Bereich
Bauteil- und Kontrolloptimierung zur Implementierung fehlertoleranter, Spin-basierter Quantencomputer in 28Si	01.03.2016	28.02.2019	Quantenmetrologie
FOR 1493: Entanglement-enhanced NV- array sensors for electric and magnetic fields	01.05.2011	30.09.2017	Quantenmetrologie
Semiklassischer Wigner-Zugang zur Berücksichtigung von Quanteneffekten in der Schwingungsspektroskopie	01.05.2015	30.04.2017	Quantenmetrologie
SPP 1601: Hochempfindliche Magnetresonanzspektroskopie auf der Nanoskala durch projektionsbeschränktes Auslesen von NV-Zentren	01.05.2015	30.04.2018	Quantenmetrologie
Orbitale Drehimpuls-Moden hoher Ordnung in hellen, gequetschten Vakuumzuständen des Lichts	01.05.2019	30.04.2022	Quantenmetrologie
Kohärente multi-Quanten-multi-dimensionale Spektroskopie	01.05.2019	30.04.2022	Quantenmetrologie
SPP 1601: Anwendung von Amplituden/Phasenmodulierten Pulsen für dipolare EPR-Spektroskopie	01.06.2012	30.04.2018	Quantenmetrologie
Quantenkristalle aus Materie und Licht	01.06.2014	31.05.2017	Quantenmetrologie
DFG-NSF: Demonstration von Positions- und Geschwindigkeitsmessungen im zerstörungsfreien Quantenregime für eine neue Topologie von Gravitationswellendetektoren	01.06.2016	31.05.2019	Quantenmetrologie

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Quantentechnologien für Kernspinresonanz auf der Nanoskala	01.06.2019	31.05.2024	Quantenmetrologie
Hoch-auflösende Bildgebung mit multi-Parameter Quantenmetrologie	01.06.2019	31.05.2022	Quantenmetrologie
SFB 1128: Transportables Quantengravimeter	01.07.2014	30.06.2019	Quantenmetrologie
SFB 1128: Gravitationsmessung mit Atominterferometrie über lange Basislinien	01.07.2014	30.06.2019	Quantenmetrologie
SFB 1128: Transportable optische Uhren für relativistische Geodäsie	01.07.2014	30.06.2019	Quantenmetrologie
SFB 1128: Frequenzübertragung über große Distanzen mittels Glasfaserverbindungen	01.07.2014	30.06.2019	Quantenmetrologie
Erzeugung und Anwendungen von stark gequetschten Vakuum-Zuständen des Lichtes	01.07.2015	30.06.2018	Quantenmetrologie
SFB 1227: Verschränkung im Impulsraum	01.07.2016	30.06.2024	Quantenmetrologie
SFB 1227: Darstellung von Quantenkorrelationen in komplexen Systemen	01.07.2016	30.06.2024	Quantenmetrologie

Projekttitel	Bewilligungsbeginn	Bewilligungsende	Bereich
SFB 1227: Verschränkte atomare Ensembles mit Einzel-Teilchen-Auflösung für die Quantenmetrologie	01.07.2016	30.06.2024	Quantenmetrologie
SFB 1227: Multi-Ionenspektroskopie für optische Uhren	01.07.2016	30.06.2024	Quantenmetrologie
SFB 1227: Quantenmetrologie mit gefangenen (Anti-)Protonen	01.07.2016	30.06.2024	Quantenmetrologie
SFB 1227: Makroskopisch delokalisierte Quantenzustände der Materie	01.07.2016	30.06.2024	Quantenmetrologie
Synthetische Quanten-Vielteilchensysteme	01.07.2018	30.06.2021	Quantenmetrologie
Quantenmetrologie in optischen Gittern mit Auflösung einzelner Spins	01.07.2018	30.06.2021	Quantenmetrologie
Spin Phänomene in 2D Materialien – Anisotrope Magnete am atomaren Limit	01.07.2018	30.09.2019	Quantenmetrologie
SFB 1309: Quantenchemische Untersuchungen epigenetisch relevanter Enzymmechanismen	01.07.2018	30.06.2022	Quantenmetrologie
FOR 1979: Charakterisierung verschiedener konformationeller Proteinzustände mit Hochdruck-NMR-Spektroskopie	01.08.2013	30.09.2019	Quantenmetrologie

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Quantensensoren für die Lebenswissenschaften	01.08.2014	30.06.2020	Quantenmetrologie
FOR 2724: Quanten-Kühlmaschinen, Sensoren und der dritte Hauptsatz	01.08.2018	31.07.2021	Quantenmetrologie
Quantenkohärente Kontrolle atomarer und molekularer Spins auf Oberflächen	01.08.2020	31.07.2026	Quantenmetrologie
Untersuchung von Quantenkohärenzen in photosynthetischen Lichtsammelkomplexen mittels ultraschneller Einzelmolekülspektroskopie.	01.08.2020	31.07.2023	Quantenmetrologie
Nichtadiabatische Quantenmolekulardynamik komplexer Systeme	01.09.2014	31.08.2016	Quantenmetrologie
Dynamik in der Quantenmetrology	01.09.2016	31.08.2019	Quantenmetrologie
Optische Uhren basierend auf einem Ensemble gefangener Ionen	01.09.2016	31.08.2018	Quantenmetrologie
Nichtklassische Interferometrie für Gravitationswellendetektoren bei einer Wellenlänge von 2.1µm	01.09.2017	31.08.2020	Quantenmetrologie
Quanten-Bildgebung und Spektroskopie im Mittleren Infrarot	01.11.2016	31.10.2021	Quantenmetrologie

Projekttitel	Bewilligungs- beginn	Bewilligungs- ende	Bereich
Q-CORR-Quantenkorrelationen - von zwei zu vielen Teilchen	01.11.2017	31.10.2020	Quantenmetrologie
Augensichere Empfindlichkeitsverbesserung von Laser-Doppler-Vibrometern auf der Basis von gequetschtem Licht	01.11.2019	31.10.2022	Quantenmetrologie
Rydberg-Atom-basierter Detektor für Terahertz-Quellens	01.12.2017	30.11.2019	Quantenmetrologie

Anlage 5 zu Frage 13:
EU-Quantum-Flagship Förderung von Projekten in Deutschland

Projekt	Laufzeit	Gesamtbudget (in Euro)	Budget der deutschen Projektpartner (in Euro)	Projektpartner
AQTION (Advanced quantum computing with trapped ions)	01.10.2018 – 30.09.2021	9.587.250,00	3.022.891,00	Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Toptica Photonics AG Johannes Gutenberg Universität Mainz Akka DSW GmbH
ASTERIQS (Advancing Science and Technology through diamond Quantum Sensing)	01.10.2018 – 30.09.2021	9.747.888,50	4.859.486,00	Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Universität Stuttgart Robert Bosch GmbH Universität Ulm Universität des Saarlandes Universität Leipzig Attocube Systems AG Technische Universität München Johannes Gutenberg Universität Mainz Nvision Imaging Technologies GmbH TTI-Technologie Transfer Initiative GmbH an der Universität Stuttgart Forschungszentrum Jülich GmbH

Projekt	Laufzeit	Gesamtbudget (in Euro)	Budget der deutschen Projektpartner (in Euro)	Projektpartner
CiViQ (Continuous Variable Quantum Communications)	01.10.2018 – 30.09.2021	9.974.006,25	2.434.165,00	Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaft e.V. Huawei-Technologies Düsseldorf GmbH Coriant R&D GmbH Telekom Deutschland GmbH
ipClock (Integrated Quantum Clock)	01.10.2018 – 30.09.2021	9.999.093,75	1.315.075,00	Toptica Photonics AG
macQsimal (Miniature Atomic vapor-Cells Quantum devices for Sensing and Metrology Ap-pLications)	01.10.2018 – 30.09.2021	10.209.943,75	1.682.418,75	Universität Stuttgart Robert Bosch GmbH
MataboliQs (Leveraging room temperature diamond quantum dynamics to enable safe, first-of-ist-kind, multimodal cardiac imaging)	01.10.2018 – 30.09.2021	6.667.801,25	4.380.311,25	Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Nvision Imaging Technologies GmbH Klinikum rechts der Isar der Technischen Universität München Bruker Biospin GmbH
MicroQC (Microwave driven ion trap quantum computing)	01.10.2018 – 30.09.2021	2.363.343,75	1.104.343,75	Universität Siegen Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover

Projekt	Laufzeit	Gesamtbudget (in Euro)	Budget der deutschen Projektpartner (in Euro)	Projektpartner
OpenSuperQ (An Open Superconducting Quantum Computer)	01.10.2018 – 30.09.2021	10.334.392,50	2.376.681,25	Universität des Saarlandes Forschungszentrum Jülich GmbH Eurice European Research and Project Office GmbH
PASQuans (Programmable Atomic Large-Scale Quantum Simulation)	01.10.2018 – 30.09.2021	9.257.515,00	3.457.000,00	Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. Toptica Photonics AG Forschungszentrum Jülich GmbH Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg Freie Universität Berlin
PhoG (Sub-Poissonian Photon Gun by Coherent Diffusive Photonics)	01.10.2018 – 30.09.2021	2.761.866,25	571.250,00	Universität Paderborn
PhoQus (Photons for Quantum Simulation)	01.10.2018 – 30.09.2021	2.999.757,50	348.000,00	Rheinische-Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
QIA (Quantum Internet Alliance)	01.10.2018 – 30.09.2021	9.999.566,39	1.611.592,50	Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. Universität Stuttgart Toptica Photonics AG SAP SE

Projekt	Laufzeit	Gesamtbudget (in Euro)	Budget der deutschen Projektpartner (in Euro)	Projektpartner
QMIGS (Quantum Microwave Communication and Sensing)	01.10.2018 – 30.09.2021	2.999.595,00	530.410,00	Bayerische Akademie der Wissenschaften
Qombs (Quantum simulation and entanglement engineering in quantum cascade laser frequency combs)	01.10.2018 – 30.09.2021	9.335.635,00	1.066.866,25	Technische Universität München Menlo Systems GmbH
QRANGE (Quantum Random Number Generators: cheaper, faster and more secure)	01.10.2018 – 30.09.2021	3.187.282,50	432.222,50	Robert Bosch GmbH
S2QUIP (Scalable Two-Dimensional Quantum Integrated Photonics)	01.10.2018 – 31.03.2022	2.999.298,75	1.209.243,81	Universität Paderborn Technische Universität München Laser Quantum GmbH
SQUARE (Scalable Rare Earth Ion Quantum Computing Nodes)	01.10.2018 – 30.09.2021	2.990.277,50	1.232.341,25	Universität Stuttgart Attocube Systems AG Karlsruher Institut für Technologie
UNIQRN (Affordable Quantum Communication for Everyone: Revolutionizing the Quantum Ecosystem from Fabrication to Application)	01.10.2018 – 30.09.2021	9.979.905,00	2.681.937,50	Fraunhofer Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V. Universität Paterborn VPIPhotonics GmbH

Anlage 6 zu Frage 24:
Konsortien Quantenkommunikation, Quantenmetrologie, Basistechnologien

Quantenkommunikation

Maßnahme/	Projekt	Laufzeit	Gesamtfördersumme in Euro	Projektpartner
QuNET-Initiative		2019-2026	ca. 125 Mio.	Fraunhofer Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik in Jena (Koordinator), Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut Berlin, Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts in Erlangen, DLR-Institut für Kommunikation und Navigation in Oberpfaffenhofen
	Projekt Q.Link.X	2018-2021	ca. 18,5 Mio.	Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (Koordinator), Technische Universität München, Technische Universität Dortmund HighFinesse Laser and Electronic Systems GmbH, Tübingen, Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut, Berlin, Technische Universität Berlin, Universität Stuttgart, Universität Paderborn, Universität des Saarlandes, Saarbrücken, Freie Universität Berlin, Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden, Ruhr-Universität Bochum, Swabian Instruments GmbH, Stuttgart, Leibniz Universität Hannover, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Garching, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Universität Bremen, Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Universität Ulm, Humboldt-Universität zu Berlin, Universität Kassel, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Karlsruher Institut für Technologie und die Ludwig-Maximilians-Universität München
	Projekt QUBE	2017-2021	ca. 3 Mio.	Ludwig-Maximilians-Universität München (Koordinator), das DLR-Institut für Kommunikation und Navigation, Oberpfaffenhofen, Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, Erlangen, OHB System AG, Oberpfaffenhofen und das Zentrum für Telematik, Würzburg.
QuantERA	Projekt HYPER-U-P-S	2018-2021	ca. 360.000	Projektpartner in Deutschland: Universität Würzburg

Maßnahme/	Projekt	Laufzeit	Gesamtfördersumme in Euro	Projektpartner
	Projekt MICROSENS	2018-2021	ca. 550.000	Projektpartner in Deutschland: TU München, Universität Leipzig, Universität Ulm
	Projekt QuICHE	2020-2023	ca. 500.000	Projektpartner in Deutschland: Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf, Universität Paderborn
	Projekt ShoQC	2020-2023	ca. 500.000	Projektpartner in Deutschland: Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts, Erlangen
Post-Quanten-Kryptographie				
	Projekt Aquorypt	2019-2022	ca. 3 Mio.	Projektpartner: Technische Universität München, Fraunhofer-Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit; Garching, Giesecke+Devrient Mobile Security GmbH, München, Infineon Technologies AG, Neubiberg, Siemens Aktiengesellschaft, München, Technische Universität Darmstadt
	Projekt FLOQI	2019-2022	ca. 2,3 Mio.	Projektpartner: operational services GmbH & Co. KG, Technische Universität Berlin, Fraunhofer-Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit; Berlin, Robert Bosch GmbH, Remningen, ESCRYPT GmbH, Bochum, Diebold Nixdorf Systems GmbH, Paderborn, Bayerische Motoren Werke AG, München, D-Trust GmbH, Berlin
	Projekt KLBS	2019-2022	ca. 1,3 Mio.	Projektpartner: Fraunhofer-Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit; Berlin, Technische Universität Berlin, neXenio GmbH, Berlin, Rohde & Schwarz Cybersecurity GmbH, München
	Projekt PQC4MED	2019-2022	ca. 3,5 Mio.	Projektpartner: WIBU-SYSTEMS AG, Karlsruhe, Infineon Technologies AG, Neubiberg, MACIO GmbH, Hamburg, Karlsruher Institut für Technologie, Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH, Bremen, Universität zu Lübeck, SCHÖLLY FIBEROPTIC GMBH, Denzlingen
	Projekt QuantumRISC	2019-2022	ca. 3,5 Mio.	Projektpartner: Fraunhofer-Institut für Sichere Informationstechnologie, Continental Teves AG & Co. OHG, Frankfurt / Main, Elektrotbit Automotive GmbH, Erlangen

Maßnahme/	Projekt	Laufzeit	Gesamtfördersumme in Euro	Projektpartner
				Hochschule RheinMain, Wiesbaden, MTG AG, Darmstadt; Ruhr-Universität Bochum, Technische Universität Darmstadt
	Projekt QuaSiModO2019- 2022		ca. 1,1 Mio.	Projektpartner: gnuu GmbH, Kirchheim, ADVA Optical Networking SE, Planegg, Ludwig-Maximilians-Universität München, Fraunhofer-Institut für Angewandte und Integrierte Sicherheit; Weiden in der Oberpfalz
	Projekt SIKRIN- KRYPTO	2019-2022	ca. 1,5 Mio.	Projektpartner: KSB SE & Co. KGaA, Frankenthal, Technische Universität Kaiserslautern, Technische Universität München

Quantenmetrologie

Maßnahme	Projekt	Laufzeit	Gesamtfördersumme in Euro	Projektpartner
QUTEGA-Pilotprojekte				
	Projekt BrainQSens	2017-2021	2.257.638	Projektpartner: Universität Stuttgart (Koordinator), Robert Bosch GmbH, Universität Ulm, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Carl Zeiss AG, Oberkochen (assoziiert)
	Projekt optclock	2017-2020	4.568.707	Projektpartner: TOPTICA Photonics AG (Koordinator), Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB), Menlo Systems GmbH, HighFinesse GmbH, Qubig GmbH, Universität Siegen, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Forschungsverbund Berlin e.V. – Ferdinand-Braun-Institut – Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, VACOM GmbH

Basistechnologien

Maßnahme	Projekt	Laufzeit	Gesamtfördersumme in Euro	Projektpartner
Schlüsselkomponenten für Quantentechnologien				
	Projekt CaLas	2018-2021	3.931.210	Projektpartner: Menlo Systems GmbH (Koordinator), LAYERTEC GmbH, Forschungsverbund Berlin e. V. – Ferdinand-Braun-Institut – Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik, SpaceTech GmbH, Universität des Saarlandes, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, X-ray Imaging Europe GmbH (assoziiert)
	Projekt FaResQ	2019-2022	1.285.480	Projektpartner: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (Koordinator), Menlo Systems GmbH
	Projekt IDEAL	2019-2022	2.088.008	Projektpartner: Diamond Materials GmbH (Koordinator), NANEO Precision IBS Coatings GmbH, Grintech GmbH, Dausinger & Giesen GmbH, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Leibniz Universität Hannover
	Projekt LINEAL	2018-2021	545.739	Projektpartner: HighFinesse GmbH (Koordinator), Universität Tübingen
	Projekt MARQUAND	2019-2022	785.300	Projektpartner: Technische Universität München (Koordinator), kiutra GmbH
	Projekt MiLiQuant	2019-2022	5.691.340	Projektpartner: Q.ant GmbH (Koordinator), Carl Zeiss AG, Robert Bosch GmbH, Nanoscribe GmbH, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Universität Paderborn
	Projekt QSource	2018-2021	2.130.400	Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF (Koordinator), OPTICA Photonics AG, Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG, Jena-Optronik GmbH
	Projekt QuPAD	2018-2021	1.797.111	Projektpartner: PicoQuant GmbH (Koordinator), Westfälische Wilhelms-Universität Münster, Entropy GmbH
	Projekt VERTICONS	2018-2021	547.730	Projektpartner: Gigatronik Technologies GmbH (Koordinator), Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Universität des Saarlandes, Forschungszentrum Jülich

Maßnahme	Projekt	Laufzeit	Gesamtfördersumme in Euro	Projektpartner
	Projekt PtQUBE	2020-2023	1.403.274	Projektpartner: Karlsruher Institut für Technologie – Physikalisches Institut (Koordinator), Karlsruher Institut für Technologie – Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik, Trans-MIT GmbH
	Projekt DiaQuantFab	2019-2022	1.841.068	Projektpartner: Cis Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH (Koordinator), Diamond Materials GmbH, Ecodiamond GmbH, nano analytik GmbH, Universität Leipzig, Universität Stuttgart, Universität Ulm, Balluff GmbH
Wissenschaftliche Vorprojekte				
	Projekt HoChSEE	2020-2022	462.070	Max-Planck-Institut für die Physik des Lichts
	Projekt Photon-N	2019-2021	349.080	Julius-Maximilians-Universität Würzburg
Initiativprojekte				
	Projekt QPL	2019-2021	8.413.622	Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF

