

## **Antwort**

### **der Bundesregierung**

**auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Dr. Anna Christmann,  
Kai Gehring, Dieter Janecek, weiterer Abgeordneter und der Fraktion  
BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN  
– Drucksache 19/21074 –**

### **Zukunftsinvestitionen und innovationspolitische Maßnahmen im Konjunkturpaket der Bundesregierung**

#### Vorbemerkung der Fragesteller

Am 3. Juni 2020 hat der Koalitionsausschuss ein Konjunkturpaket beschlossen. Das Konjunkturpaket umfasst ein ganzes Bündel an innovationspolitischen Maßnahmen – das sogenannte Zukunftspaket. Damit soll laut Bundesregierung sichergestellt werden, dass Deutschland „gestärkt aus der Krise hervorgeht und langfristig erfolgreich ist“. Auch soll Deutschlands „Rolle als weltweiter Spitzentechnologieexporteur durch insbesondere digitale Zukunftsinvestitionen und Investitionen in Klimatechnologien“ gestärkt sowie das Gesundheitswesen und der Schutz vor Pandemien verbessert werden.

Nach Ansicht der fragestellenden Fraktion besteht gerade jetzt die Notwendigkeit, substantiell und mutig in die Zukunft unseres Landes zu investieren und dabei Ausgaben für Innovation und Forschung zu priorisieren. Dies haben die Fragestellenden mit ihrem Antrag „Zukunftspakt für einen sozial-ökologischen Aufbruch aus der Krise“ (Bundestagsdrucksache 19/19549) bereits deutlich gemacht. Die Antwort auf die Corona-Pandemie muss gleichzeitig zur Lösung der Klimakrise beitragen. Deshalb ist es aus Sicht der Fragestellenden zentral, dass ein Konjunktur- und Investitionspaket die sozial-ökologische Transformation unterstützt und Planungssicherheit für Investitionen in klimafreundliche und ressourcenschonende Technologien und Wirtschaftsweisen schafft. Dies gelingt nur mit umfangreichen und nachhaltigen Investitionen in die öffentliche Infrastruktur, in digitale Anwendungen, in die Energie- und Mobilitätswende sowie in Forschung, Innovation und Bildung.

Die innovationspolitischen Maßnahmen (sogenanntes Zukunftspaket) als Teil des Konjunkturpakets greifen mit Schlagworten wie Künstliche Intelligenz (KI) und Quantentechnologien einige wichtige Zukunftsfelder auf. Auch wird versucht, mit dem Ersatzfinanzierungsfonds und mit Veränderungen bei der steuerlichen Forschungsförderung auf coronakrisenbedingte Herausforderungen in der Innovationsförderung zu reagieren. Diese Anliegen unterstützen die Fragestellenden. Allerdings bestehen viele Unklarheiten und Fragen zur konkreten Ausgestaltung und Wirksamkeit der auf den Weg gebrachten Maßnahmen.

1. Liegen der Bundesregierung Informationen über Veränderungen bei den Ausgaben für Forschung und Entwicklung (FuE) seit Januar 2020, insbesondere der FuE-Ausgaben durch die Wirtschaft, vor?
  - a) Wenn ja, wie genau stellen sich die Veränderungen dar, und wie bewertet die Bundesregierung diese (bitte, sofern vorhanden, nach Betriebsgröße und Branchen aufschlüsseln)?
  - b) Wenn nein, welche Maßnahmen möchte die Bundesregierung ergreifen, um einen besseren Ad-hoc-Überblick über die in Deutschland getätigten FuE-Ausgaben zu erhalten?

Die Fragen 1 bis 1b werden gemeinsam beantwortet.

Die Ausgaben für Forschung und Entwicklung in der Wirtschaft werden jährlich im Auftrag des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) von der SV Wissenschaftsstatistik GmbH erhoben. Die Erhebung erfolgt auf Grundlage der EU-Verordnung 995/2012. Derzeit werden die Unternehmen im Rahmen dieser Erhebung zu ihren FuE-Ausgaben im Wirtschaftsjahr 2019 und zu den geplanten FuE-Ausgaben im Jahr 2020 befragt. Erste Ergebnisse werden im vierten Quartal 2020 vorliegen.

2. Welche zusätzlichen Haushaltsmittel plant die Bundesregierung, mit den im Konjunkturpaket unter der Überschrift „Zukunftspaket“ subsumierten Maßnahmen in den Haushaltsjahren 2020 und 2021 bereitzustellen (bitte als Jahressummen sowie für jede einzelne Maßnahme – Ziffer 32, 33, 34, 35f, 43, 44 – gemäß Vereinbarung des Koalitionsausschusses vom 3. Juni 2020 angeben)?

Mit dem 2. Nachtragshaushalt 2020 vom 16. Juli 2020 werden insbesondere die im Jahr 2020 haushaltswirksamen Maßnahmen zur Umsetzung des vom Koalitionsausschuss am 3. Juni 2020 beschlossenen Konjunktur- und Zukunftspakets abgebildet. Dabei handelt es sich um zusätzliche Ausgabemittel und Mindereinnahmen durch steuerliche Entlastungen. Weitere beschlossene Maßnahmen werden Gegenstand der Haushaltsaufstellung 2021 sein. Bei den abgefragten Maßnahmen handelt es sich im Einzelnen um folgende Beträge:

Die Anhebung der Bemessungsgrundlagenhöchstgrenze für den Fördersatz der steuerlichen Forschungszulage auf 4 Mio. Euro pro Unternehmen (Ziffer 32 des Konjunktur- und Zukunftspakets) ist im Zweiten Corona-Steuerhilfegesetz geregelt. Demnach sind für das Jahr 2020 keine Mindereinnahmen für den Bund zu erwarten. Im Jahr 2021 belaufen sich die zu erwartenden Mindereinnahmen für den Gesamtstaat auf 510 Mio. Euro. Davon entfallen 246 Mio. Euro auf den Bund. Die Mindereinnahmen aus den im zweiten Corona-Steuerhilfegesetz enthaltenen Maßnahmen werden in die Aufstellung des Regierungsentwurfs zum Haushalt 2021 und den Finanzplan bis 2024 einfließen.

Für die außeruniversitären Forschungsorganisationen (Ziffer 33 des Konjunktur- und Zukunftspakets) sind im Zweiten Nachtragshaushalt 2020 insgesamt 500 Mio. Euro zusätzlich veranschlagt. Aus Sicht der Bundesregierung sind im Haushalt 2021 weitere 500 Mio. Euro zu veranschlagen.

Für die projektbezogene Forschung (Ziffer 34 des Konjunktur- und Zukunftspakets) sind nach dem Konjunkturpaket 300 Mio. Euro vorgesehen. Davon sind mit dem Zweiten Nachtragshaushalt bereits 7,2 Mio. Euro im Jahr 2020 und 274,04 Mio. Euro als Verpflichtungsermächtigung veranschlagt (davon 61,14 Mio. Euro mit Fälligkeit im Jahr 2021). Die noch nicht veranschlagten Mittel und Verpflichtungsermächtigungen wurden dem Sondervermögen „Energie- und Klimafonds“ zugewiesen und stehen in den kommenden Jahren für diese Maßnahme zur Verfügung.

Für die Bereiche Ladesäulen-Infrastruktur, Elektromobilität und Batteriezellfertigung (Ziffer 35f des Konjunktur- und Zukunftspakets) wurden dem Sondervermögen „Energie und Klimafonds“ mit dem Zweiten Nachtragshaushalt 2020 insgesamt zusätzlich 2,5 Mrd. Euro zugewiesen. Hiervon sind derzeit im Wirtschaftsplan des Sondervermögens für das Jahr 2020 50 Mio. Euro als Ausgaben und 1,558 Mrd. Euro als Verpflichtungsermächtigungen ausgebracht. Soweit diese auf Jahre aufgeteilt sind, werden davon 273 Mio. Euro im Jahr 2021 fällig.

Für die Förderung der Künstlichen Intelligenz (Ziffer 43 des Konjunktur- und Zukunftspakets) und der Quantentechnologie (Ziffer 44 des Konjunktur- und Zukunftspakets) sind mit dem Zweiten Nachtragshaushalt 2020 von dem vorgesehenen Finanzbedarf von insgesamt 4 Mrd. Euro für die beiden Maßnahmen Verpflichtungsermächtigungen in Höhe von jeweils 1 Mrd. Euro mit Fälligkeit in künftigen Haushaltsjahren ausgebracht worden. Die Bereitstellung der Ausgabemittel wird Gegenstand der kommenden Haushaltsaufstellung sein.

3. Welche zusätzlichen Finanzmittel plant die Bundesregierung, in die Erforschung klimaneutraler Technologien zu investieren (bitte für 2020 und 2021 separat angeben), und durch welche konkreten Maßnahmen soll dies umgesetzt werden?

Die Koalitionsparteien haben sich am 3. Juni 2020 im Rahmen des Zukunftspakets des Konjunkturpakets unter anderem auf Investitionen in Klimatechnologien geeinigt. Forschung und Entwicklung sollen hier eine starke Rolle spielen. Der Finanzbedarf für die einzelnen Ziffern des Zukunftspakets wurde bereits im Koalitionsbeschluss vom 3. Juni 2020 skizziert. Die konkrete Schwerpunktsetzung, Mittelverteilung in Jahrestreichen und Einigung auf Maßnahmen in den einzelnen Ziffern ist momentan Gegenstand von Verhandlungen im Ressortkreis. Dies gilt auch für die Erforschung von Klimatechnologien. Daher können aktuell keine genaueren Angaben hierzu gemacht werden.

4. Was sind, da auch eine Erhöhung der Bemessungsgrundlage für die Forschungszulage Teil des Konjunkturpakets ist, die Gründe dafür, dass jedoch bis heute noch nicht feststeht, welche Stelle die Anträge auf Forschungszulage fachlich prüft (sog. Bescheinigungsstelle)?
5. Bis wann wird die Bundesregierung die Bescheinigungsstelle bestimmt haben, und wann wird diese vollumfänglich einsatzfähig sein?
6. Inwiefern soll aus Sicht der Bundesregierung eine maximale Prüfdauer garantiert werden, innerhalb derer die Bescheinigungsstelle den Antrag eines Unternehmens mit FuE-Aktivitäten prüfen muss?
  - a) Wenn ja, auf wie viele Tage beläuft sich diese maximale Prüfdauer?
  - b) Wenn nein, wie wird die Bundesregierung garantieren, dass die fachliche Prüfung in einem zeitlich angemessenen Rahmen abläuft, und was hält die Bundesregierung für einen angemessenen Zeitrahmen?

Die Fragen 4 bis 6b werden gemeinsam beantwortet.

Die Bescheinigungsstelle wurde auf der Grundlage der Forschungszulagenbescheinigungsverordnung (FZulBV) vom 30. Januar 2020 (BGBl. I S. 118) im März 2020 europaweit ausgeschrieben. Der Zuschlag wurde unter Berücksichtigung der vergaberechtlichen Fristen am 2. Juli 2020 erteilt. Das BMBF hat die Bescheinigungsstelle entsprechend der Vorgabe des § 2 Absatz 1 Satz 3 FZulBV im Gemeinsamen Ministerialblatt (Ausgabe 22/2020) bekannt gegeben.

ben. Die Arbeitsaufnahme der Bescheinigungsstelle ist erfolgt. Voraussichtlich werden bereits in den Sommermonaten die ersten Anträge entgegengenommen. Hierüber wird gesondert informiert werden. Nach § 5 Absatz 3 FZulBV ist die Bescheinigung dem Antragsteller innerhalb von drei Monaten nach Vorlage der vollständigen Unterlagen bekanntzugeben.

7. Wann ist nach Kenntnis der Bundesregierung mit der Genehmigung des Forschungszulagengesetzes durch die Europäische Kommission und damit der Anwendbarkeit des Gesetzes zu rechnen?
8. Sollte die Genehmigung des Forschungszulagengesetzes durch die Europäische Kommission nicht innerhalb der sechsmonatigen Frist und damit nicht bis zum 30. Juni 2020 erfolgt sein,
  - a) welche Folgen hat dies nach Kenntnis der Bundesregierung für die Anwendbarkeit des Gesetzes?
  - b) wie soll der entstandenen Rechtsunsicherheit begegnet werden, und ist dazu gegebenenfalls ein Schreiben des Bundesministeriums der Finanzen geplant?
  - c) welche Gespräche zwischen der Bundesregierung und der Europäischen Kommission fanden zwischen dem Beschluss des Forschungszulagengesetzes und dem Zeitpunkt der Einreichung dieser Anfrage statt?

Die Fragen 7 bis 8c werden gemeinsam beantwortet.

Das Forschungszulagengesetz ist über den 30. Juni 2020 hinaus anwendbar (siehe BGBl. I S. 1596).

9. Hat die Bundesregierung, neben der beschlossenen Verdopplung der Bemessungsgrundlage auf bis zu 4 Mio. Euro pro Unternehmen, alternative Maßnahmen zur Stärkung der steuerlichen Forschungsförderung geprüft?
  - a) Wenn ja, welche Alternativen waren dies, und zu welchem Ergebnis gelangte die Bundesregierung bei dieser Prüfung (bitte die Bewertung für alle Alternativen separat aufzuführen)?

Die Fragen 9 und 9a werden gemeinsam beantwortet.

Alternativ wurde die befristete Erhöhung des Fördersatzes der steuerlichen Forschungszulage auf 50 Prozent geprüft. Ein über den im Forschungszulagengesetz vorgesehenen Zulagensatz von 25 Prozent hinausgehender Fördersatz wäre jedoch nicht ohne weiteres mit den beihilferechtlichen Vorgaben vereinbar. Für den Bereich der experimentellen Entwicklung beträgt die beihilferechtlich maximal zulässige Beihilfemaximalintensität nach der einschlägigen Allgemeinen Gruppenfreistellungsverordnung (AGVO) (Verordnung (EU) Nr. 651/2014 der Kommission vom 17. Juni 2014 zur Feststellung der Vereinbarkeit bestimmter Gruppen von Beihilfen mit dem Binnenmarkt in Anwendung der Artikel 107 und 108 des Vertrags über die Arbeitsweise der Europäischen Union/AEUV) 25 Prozent. AGVO-konform wäre eine 50 prozentige Förderung nur für die Grundlagenforschung und die industrielle Forschung. Unterschiedliche Zulagensätze für die Bereiche Grundlagenforschung/industrielle Forschung und experimentelle Entwicklung wurden aus Gründen insbesondere des damit verbundenen Aufwands auch auf Seiten von Unternehmen für nicht zweckmäßig erachtet.

- b) Inwiefern hat die Bundesregierung dabei insbesondere solche Alternativen geprüft, die die FuE-Ausgaben von kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) anreizen könnten, und wenn ja, wie sähe aus Sicht der Bundesregierung eine KMU-optimale Forschungszulage aus?

Die Bundesregierung ist der Auffassung, dass die Ausgestaltung der steuerlichen Forschungsförderung im Forschungszulagengesetz bereits jetzt starke Anreize für kleine und mittlere Unternehmen bietet, ihre FuE-Ausgaben zu steigern. Durch ein vergleichsweise schlankes und unbürokratisches Verfahren wird ein gerade für KMU attraktives Angebot geschaffen. Unternehmen, die begünstigte FuE-Vorhaben durchführen, haben einen Rechtsanspruch auf die Förderung. Durch die Förderung auch der Auftragsforschung wurde insbesondere solchen kleinen und mittleren Unternehmen der Zugang zur steuerlichen Förderung eröffnet, die keine eigenen Forschungskapazitäten aufbauen können.

- c) Wie bewertet die Bundesregierung grundsätzlich die Wirksamkeit des Instruments der steuerlichen Forschungsförderung in Zeiten der Rezession?

Die steuerliche Forschungsförderung, die als Steuererstattung und damit als steuerlich unbeachtliche Einnahme bis zu einer Höhe von 1 Mio. Euro pro Jahr den Unternehmen gewährt werden kann, führt bei allen anspruchsberechtigten Unternehmen zu Liquiditätsverbesserungen und wird damit Investitionsentscheidungen in weitere FuE-Aufwendungen zielgenau befördern.

10. Liegen der Bundesregierung – vor dem Hintergrund, dass forschende Unternehmen aktuell noch keine fachliche Bescheinigung für ihre Forschungszulage beantragen und diese gegenüber dem Finanzamt gar nicht geltend machen können – Abschätzungen zu den erwarteten Effekten einer Verdopplung der Bemessungsgrundlage auf die FuE-Ausgaben von Unternehmen vor, und wenn ja, mit welchen zusätzlichen FuE-Ausgaben der Unternehmen rechnet die Bundesregierung in den Jahren 2020 und 2025?

Die Effekte, die durch die steuerliche Förderung von Forschung und Entwicklung insgesamt und die nun beschlossene Verdoppelung der Bemessungsgrundlagenhöchstgrenze im Einzelnen ausgelöst werden, werden im Rahmen einer Evaluierung im Jahr 2025 ermittelt.

11. Liegen der Bundesregierung Abschätzungen zu den erwarteten Effekten einer Verdopplung der Bemessungsgrundlage auf die FuE-Ausgaben von kleinen und mittleren Unternehmen vor, und mit welchen zusätzlichen FuE-Ausgaben sowie Veränderungen der Innovatorenquote rechnet die Bundesregierung insbesondere bei KMUs für die Jahre 2020 bis 2025?

Auf die Antwort zu Frage 10 wird verwiesen.

12. Liegen der Bundesregierung Abschätzungen zu den erwarteten Effekten einer Verdopplung der Bemessungsgrundlage auf die FuE-Ausgaben forschungsintensiver Start-ups vor, und mit welchen zusätzlichen FuE-Ausgaben rechnet die Bundesregierung bei diesen Unternehmen für die Jahre 2020 bis 2025?

Auf die Antwort zu Frage 10 wird verwiesen.

13. Mit Einnahmenausfällen in welcher Höhe rechnet die Bundesregierung in den Jahren 2020 und 2025 durch die vorgeschlagene Änderung der Forschungszulage?

Im Jahr 2020 können sich aufgrund der Beantragung der Zulage erst nach Abschluss des Jahres noch keine Steuermindereinnahmen ergeben. Für die Jahre von 2021 bis 2025 werden die zusätzlichen Steuermindereinnahmen aus der Erhöhung der Bemessungsgrundlage wie folgt geschätzt:

Jahr	Betrag in Mio. Euro
2021	510
2022	655
2023	685
2024	695
2025	705

14. Inwiefern hält die Bundesregierung die im Konjunkturpaket vorgeschlagene Veränderung der maximalen Bemessungsgrundlage pro Unternehmen für EU-beihilferechtkonform, und inwiefern muss die geplante Neufassung des Forschungszulagengesetzes erneut von der Europäischen Kommission geprüft werden?
15. Hat die Bundesregierung die dazu notwendige Rechtsprüfung bei der Europäischen Kommission bereits auf den Weg gebracht, und bis wann rechnet sie mit einem Genehmigungsbeschlusses durch die EU-Kommission?

Die Fragen 14 und 15 werden gemeinsam beantwortet.

Staatliche Beihilfen im Sinne des Artikel 107 Absatz 1 AEUV sind nach Artikel 108 Absatz 3 AEUV bei der Europäischen Kommission anzumelden. Beihilfen, die sowohl die allgemeinen als auch die für die betreffende Gruppe von Beihilfen geltenden besonderen Voraussetzungen der AGVO erfüllen, sind von der Anmeldepflicht nach Artikel 108 Absatz 3 AEUV freigestellt. Für die Einhaltung der Vorgaben der AGVO ist jeder Mitgliedsstaat verantwortlich.

Die Mitgliedstaaten sind gemäß Artikel 11 AGVO verpflichtet, der Europäischen Kommission die Kurzbeschreibung jeder auf der Grundlage der AGVO freigestellten Maßnahme einschließlich Änderungen innerhalb von 20 Arbeitstagen nach deren Inkrafttreten zu übermitteln. Die Änderung des Forschungszulagengesetzes durch das Zweite Corona-Steuerhilfegesetz vom 30. Juni 2020 wurde der Europäischen Kommission gem. Artikel 11 AGVO am 20. Juli 2020 mitgeteilt.

16. Inwiefern hat die Bundesregierung Kenntnis darüber, dass sich durch die Corona-Krise Unternehmen aus der anwendungsorientierten Projektförderung zurückziehen, sowohl in bereits bewilligten Projekten als auch in noch zu beantragenden Forschungsprojekten, und welche konkreten Zahlen liegen ihr dazu vor?

Anwendungsorientierte Projekte mit Unternehmen werden u. a. in den institutionell von Bund und Ländern geförderten außeruniversitären Forschungseinrichtungen (insb. bei der Fraunhofer-Gesellschaft) und in der Projektförderung des Bundes durchgeführt. Abschließende Zahlen zu Effekten der Coronapandemie auf die anwendungsorientierte Forschung werden sich erst im Rückblick ergeben.

Die Bundesregierung arbeitet in enger Abstimmung mit den Einrichtungen daran, die Folgen, die aus einem Rückzug von Unternehmen aus der anwendungsorientierten Forschung resultieren können, abzumildern. Prognosen über den Umfang sind zurzeit allerdings mit hohen Unsicherheiten behaftet, u. a. aufgrund des weiteren Verlaufs des Infektionsgeschehens und der daraus resultierenden Effekte auf die Wirtschaft.

Die Bundesregierung bezieht die Frage nach bewilligten Projekten auch auf die Projektförderung des Bundes. Aktuell zeichnet sich keine statistisch signifikante Reduktion der vom Bund ausgesprochenen Bewilligungen ab. Kausalzusammenhänge zur Corona-Krise können derzeit nicht abgeleitet werden. Es ist vor allem zu berücksichtigen, dass sich Änderungen von Unternehmensplanungen nur verzögert in Bewilligungen widerspiegeln, da sowohl Antragstellung als auch die Prüfprozesse bis zur eigentlichen Bewilligung Zeit in Anspruch nehmen. In einzelnen Programmen könnte indes eine Rolle gespielt haben, dass die Antragszahlen in der zweiten Jahreshälfte 2019 aufgrund eines Sondereffekts besonders hoch ausfielen. Zu bei ihr noch nicht beantragten Forschungsprojekten liegen der Bundesregierung keine Kenntnisse vor.

17. Liegen der Bundesregierung Kenntnisse über die Anzahl der beantragten Projekte im Bereich der anwendungsorientierten Forschung mit mindestens einem beteiligten Unternehmen für das erste Halbjahr 2020 vor, und wie hoch stellt sich die Anzahl der beantragten Forschungsprojekte des ersten Halbjahres 2020 zu den ersten Halbjahren in den Jahren 2017, 2018 und 2019 dar (bitte nach Halbjahren und den einzelnen Förderprogrammen des Bundes – z. B. Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand – ZIM, KMU-innovativ, Industrielle Gemeinschaftsforschung – IGF – aufschlüsseln)?

Zu den erbetenen Zahlen wird auf die nachstehende Tabelle verwiesen. Erfasst sind hierin die Anzahl von Anträgen von Unternehmen im Bereich anwendungsorientierter Forschung in Form von Einzelvorhaben sowie die Anzahl von Verbundvorhaben mit Unternehmensbeteiligung unabhängig von einer späteren Bewilligung.

Zu beachten ist, dass unter anderem auch Änderungen von Förderrichtlinien mit Vorzieheffekten oder unterschiedliche Antragsmöglichkeiten zu Veränderungen von Antragszahlen führen können. Dies ist insbesondere für das Zentrale Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) des BMWi im ersten Halbjahr 2020 der Fall und wird an entsprechender Stelle in der nachfolgenden Tabelle gesondert erläutert:

Ressort	Förderprogramm	1. Halbjahr 2020	1. Halbjahr 2019	1. Halbjahr 2018	1. Halbjahr 2017
BMWi	Zentrales Innovationsprogramm Mittelstand (ZIM) Anmerkung: Der sehr niedrige Antragseingang im ZIM im ersten Halbjahr 2020 ist auf Sondereinflüsse zurückzuführen: Die alte ZIM-Richtlinie ist zum 31.12.2019 ausgelaufen. Ende des Jahres 2019 kam es daher zu einem außergewöhnlich hohen Antragseingang, der ungefähr der Hälfte des üblichen Jahresantragseingangs im ZIM entsprach. Hiermit sind hohe Vorzieheffekte verbunden, die den ab Mai beginnenden Antragseingang des ersten Halbjahres 2020 dämpfen. Diese Vorzieheffekte spiegeln sich auch in der hohen Bewilligungszahl des ersten Halbjahres 2020 wider.	274	1160	1062	1316
BMWi	Industrielle Gemeinschaftsforschung (IGF)	555	454	456	505
BMWi	Entwicklung digitaler Technologien	17	48	7	4

Ressort	Förderprogramm	1. Halbjahr 2020	1. Halbjahr 2019	1. Halbjahr 2018	1. Halbjahr 2017
BMWi	Informations- und Kommunikationstechnologien für Elektromobilität (IKT-EM)-intelligente Anwendungen	5	7	7	7
BMWi	Elektro-Mobil	31	33	89	11
BMWi	Energie (0903/683 01, 6092/683 04,6092/686 26)	145	189	176	162
BMWi	FuE-Förderung gemeinnütziger externer Industrieforschungseinrichtungen – Innovationskompetenz (INNO-KOM)	139	121	113	78
BMWi	Luftfahrtforschungsprogramm (LuFo)	100	4	8	182
BMWi	Maritimes Forschungsprogramm	20	17	17	11
BMWi	Raumfahrt	25	31	11	11
BMWi	Verkehrstechnologien	13	8	9	8
BMBF	KMU-Innovativ <small>Anmerkung: Die Ziele der Forschungspolitik des BMBF werden im Wesentlichen in Förderprogrammen definiert, die einen mehrjährigen Orientierungsrahmen für die Förderung bilden. Die Umsetzung der Förderprogramme erfolgt in der Regel auf der Grundlage von Förderrichtlinien zu spezifischen Fragestellungen/Themen. Aufgrund der thematischen Diversität der einzelnen Förderprogramme des BMBF und einer fehlenden vergleichbaren Basis für belastbare Rückschlüsse im Sinne der Fragestellung (u. a. werden neue Förderrichtlinien zu unterschiedlichen Zeitpunkten bekannt gegeben, grundsätzlich bestehen unterschiedliche Antragsfristen, nicht in jedem Jahr werden Förderrichtlinien zu Programmen veröffentlicht) sind hier nur Antragszahlen für die explizit genannte Initiative KMU-Innovativ genannt. Die einzelnen Vorhaben der Initiative sind inhaltlich verschiedenen Förderprogrammen und Förderrichtlinien des BMBF zugeordnet.</small>	71	161	135	92
BMEL	Programm zur Innovationsförderung des BMEL <small>Anmerkung: Zur Bewertung der Zahlen wird angemerkt, dass die vorliegenden Zahlen zu Anträgen und Bewilligungen jeweils im ersten Halbjahr keine Aussagekraft bezüglich der Auswirkungen von Corona haben. Das ist eher eine Zufallsstichprobe jeweils eines halben Jahres. Da die Innovationsförderung (wie auch die meisten anderen Programme) durch Bekanntmachungen immer wieder Wellen von Neubewilligungen produziert, ist ein möglicher Einfluss der Pandemie m.E. durch diese Zahlen nicht feststellbar.</small>	9	4	36	24
BMVI	Automatisiertes und vernetztes Fahren	0	0	2	5
BMVI	Automatisiertes und vernetztes Fahren auf digitalen Testfeldern in Deutschland	0	0	0	7
BMVI	Ein zukunftsfähiges, nachhaltiges Mobilitätssystem durch automatisiertes Fahren und Vernetzung	1	0	0	0
BMVI	Bundesprogramm „Zukunft Schienengüterverkehr“	2	0	0	0
BMVI	Demonstrationsvorhaben im Rahmen der Mobilitäts- und Kraftstoffstrategie (MKS)	0	1	0	0
BMVI	Förderprogramm für Innovative Hafentechnologien (IHATEC)	3	4	6	13
BMVI	FRL Elektromobilität	3	1	2	1

Ressort	Förderprogramm	1. Halbjahr 2020	1. Halbjahr 2019	1. Halbjahr 2018	1. Halbjahr 2017
BMVI	Nationales Innovationsprogramm Wasserstoff- und Brennzellentechnologie (NIP)	1	5	3	18
BMU	Erneuerbar Mobil	3	31	19	8
gesamt		1.417	2.279	2.158	2.463

18. Für welche Förderprogramme und Förderlinien soll der Ersatzfinanzierungsfonds (Nummer 33, Konjunkturpaket) Anwendung finden (bitte alle Förderprogramme und Förderlinien benennen)?

Für den Ersatzfinanzierungsfonds wird im BMBF eine eigene Förderlinie etabliert. Das Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) verstärkt den Haushaltstitel Industrieforschung; gefährdete Projekte des Luftfahrtforschungsprogramms, des Nationalen Weltraumprogramms und des Energieforschungsprogramms werden über das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) aufgefangen.

19. Ab wann wird der Ersatzfinanzierungsfonds zur Finanzierung der Mitfinanzierungsanteile der Unternehmen bereitstehen?

Die möglichst zügige Verausgabung der Mittel setzt größtenteils die Etablierung eigener Förderregularien voraus, die momentan erarbeitet werden.

20. In welchem Umfang (absolut und prozentual) soll der Fonds die Mitfinanzierung der Unternehmen ersetzen bzw. reduzieren?

Eine Unterstützung ist bis zur Höhe des weggefallenen Unternehmensanteils möglich.

21. Wie kann die Ersatzfinanzierung durch den Fonds konkret betragt werden, und welche Akteure sind antragsberechtigt?

Antragsberechtigt für Mittel aus dem Fonds sind die großen außeruniversitären Forschungseinrichtungen Helmholtz-Gemeinschaft (HGF), Fraunhofer-Gesellschaft (FhG), Leibniz-Gemeinschaft (WGL) und Max-Planck-Gesellschaft (MPG). Die Antragsmodalitäten werden momentan erarbeitet.

22. Welche Kriterien müssen Unternehmen erfüllen, damit der Fonds den Finanzierungsanteil der Unternehmen teilweise oder komplett übernimmt (bitte alle Kriterien einzeln benennen und definieren)?

Unternehmen sind nicht antragsberechtigt und werden nicht aus dem Fonds unterstützt.

23. Aus welchen Gründen möchte die Bundesregierung (gemäß Entwurf für einen zweiten Nachtragshaushalt) all jenen erfolgversprechenden Projekten die Unterstützung durch den Ersatzfinanzierungsfonds verweigern, die erst nach dem 3. Juni 2020 begonnen, beantragt oder bewilligt wurden?

Diese Einschränkung wurde im geltenden Haushaltsvermerk nicht aufgenommen.

24. Steht der Ersatzfinanzierungsfonds nur Unternehmen in Kooperationsprojekten mit außeruniversitären Forschungseinrichtungen offen (wie vom Koalitionsausschuss am 3. Juni 2020 vereinbart), oder können auch Unternehmen in Kooperationsprojekten mit Hochschulen ihre Mitfinanzierungsanteile reduzieren?

Es wird auf die Antworten zu den Fragen 21 und 22 verwiesen.

25. Mit welchen neuen, zusätzlichen Ausgaben durch den Ersatzfinanzierungsfonds rechnet die Bundesregierung für die Jahre 2020 und 2021?

Die Bundesregierung rechnet für die Jahre 2020 und 2021 mit zusätzlichen Ausgaben von insgesamt 1 Mrd. Euro.

26. Welche Förderprogramme und Förderlinien – neben dem im Konjunkturpaket genannten SINTEG-Programm und den Reallaboren der Energiewende – werden zusätzlich von der geplanten Ausweitung der projektbezogenen Forschung profitieren (bitte aufschlüsseln, welches Förderprogramm und welche Förderlinie wie viele neue, zusätzliche Mittel für die Jahre 2020 und 2021 erhält)?

Von der geplanten Ausweitung der projektbezogenen Forschung werden insbesondere die Bereiche Klimaschutz und Energieforschung profitieren. Das Konjunktur- und Zukunftspaket befindet sich derzeit in der Umsetzungsphase. Es dürften zahlreiche Förderprogramme und Förderlinien von der geplanten Ausweitung der projektbezogenen Forschung profitieren. Eine genaue Aufschlüsselung darüber, welches Förderprogramm und welche Förderlinie wie viel neue, zusätzliche Mittel für die Jahre 2020 und 2021 erhält, kann in der gegenwärtigen Phase des Verfahrens noch nicht erstellt werden. Zusätzlich zu den im Zukunftspaket des Konjunkturpakets genannten Maßnahmen (Ziffer 34 des Konjunktur- und Zukunftspakets) sind dies insbesondere entsprechende Förderprogramme und Förderlinien des Klimaschutzprogramms 2030.

27. Wird die Ausweitung der projektbezogenen Forschung auch zu zusätzlichen Mitteln für die durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten Kopernikus-Projekte führen, und wenn ja, in welchem Maße sollen bestehende Projekte eine zusätzliche Förderung erhalten, der Förderzeitraum der aktuell in Umsetzung befindlichen Projekte verlängert werden oder neue Kopernikus-Projekte finanziert werden?

Eine solche Ausweitung der Förderung der Kopernikus-Projekte ist aktuell nicht vorgesehen.

28. a) Bis wann wird die Bundesregierung – vor dem Hintergrund des Beschlusses des Deutschen Bundestags vom 16. Januar 2020 (vgl. Bundestagsdrucksache 19/15061), mit welchem die Bundesregierung aufgefordert wurde, die „Mobilitätsforschung [...] auf zukunftsweisende Mobilitätskonzepte“ und nachhaltige Mobilität auszurichten – eine „ressortübergreifende Strategie Mobilitätsforschung“ vorlegen, um damit neue Mobilitätskonzepte für städtische und ländliche Räume zu entwickeln und schnell umsetzen zu können?

Mit der „Hightech-Strategie 2025“ hat die Bundesregierung bereits einen ressortübergreifenden strategischen Rahmen auch zur Mobilitätsforschung aufgestellt. Derzeit findet in Form von Regionalkonferenzen ein breiter Partizipationsprozess zur Weiterentwicklung der Strategie statt.

Im Bundesbericht „Forschung und Innovation 2020“ werden die Forschungsschwerpunkte der Bundesregierung für eine moderne Mobilität genannt. Darüber hinaus gibt es bereits zahlreiche weitere Aktivitäten der Bundesregierung, wie zum Beispiel das „Nationale Kompetenznetzwerk für nachhaltige urbane Mobilität“, das „Bündnis für moderne Mobilität“ und weitere Forschungs- und Investitionsaktivitäten, um neue Mobilitätskonzepte für städtische und ländliche Räume zu entwickeln und schnell umzusetzen. Die Forschung zu neuen Mobilitätskonzepten für städtische und ländliche Räume wird insbesondere auch durch die Innovationsplattform Zukunftsstadt und den dazugehörigen ressortübergreifenden Arbeitskreis bereits vorangetrieben.

Auf diesen bestehenden Prozessen und bereits verabschiedeten Einzelstrategien aufbauend konzipiert die Bundesregierung eine ganzheitliche Mobilitätsforschungsstrategie, die alle relevanten Aspekte der Mobilität der Zukunft umfassen und dabei verstärkt die gesamte Bandbreite der Mobilitätsangebote auch unter klimapolitischen sowie gesellschafts- und sozialwissenschaftlichen Aspekten betrachten wird. Wichtige Aktivitäten und Beschlüsse auf europäischer Ebene zur Mobilität sollen in dieser Strategie berücksichtigt werden. Auch vor Verabschiedung einer Mobilitätsforschungsstrategie können daher auf den bestehenden forschungs- und fachpolitischen Grundlagen bereits neue Mobilitätskonzepte entwickelt und umgesetzt werden.

- b) Bis wann wird die Bundesregierung die geforderte Erweiterung der Forschungsagenda „Nachhaltige urbane Mobilität“ beschließen, und um welche Summe wird das jährliche Budget dadurch anwachsen?

Da das parlamentarische Verfahren für die Bereitstellung möglicher zusätzlicher Mittel aus dem Konjunktur- und Zukunftspaket für das kommende Jahr 2021 noch nicht abgeschlossen ist, kann die Bundesregierung zu genaueren Planungen und Zahlen noch keine Auskunft geben.

- c) Wie definiert die Bundesregierung „nachhaltige Mobilität“, und durch welche konkreten Maßnahmen stärkt die Bundesregierung Forschung und Entwicklung im Bereich „nachhaltige Mobilität“ im Rahmen des Konjunkturpakets (bitte nach den Haushaltsjahren 2020 und 2021 sowie den Bundesministerien aufschlüsseln)?

Die Forschungsagenda „Nachhaltige urbane Mobilität“ ist am Ziel der nachhaltigen Entwicklung ausgerichtet und bezieht sich auf die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Diese leitet Prioritäten aus den internationalen Nachhaltigkeitszielen sowie den „Sustainable Development Goals“ der Agenda 2030 der Vereinten Nationen ab.

Im Übrigen wird auf die Antwort zu Frage 28b hingewiesen.

- d) Plant die Bundesregierung, auch z. B. Reallabore für Sharing-Konzepte verstärkt zu fördern, um den wiederkehrenden Konsum von Mobilität als Dienstleistung zu fördern, und wenn ja, welche Finanzmittel sollen dazu in den Jahren 2020 und 2021 aus dem Konjunkturpaket bereitgestellt werden?

Sharing-Konzepte werden im Rahmen unterschiedlicher Förderprogramme gefördert. So wird z. B. im Rahmen der „Digitalisierung kommunaler Verkehrssysteme“ die Entwicklung multimodaler Mobilitätsplattformen gefördert, die auch unterschiedliche Mobilitätsangebote wie Car-Sharing und Fahrradverleihsysteme in der Nähe zum öffentlichen Verkehr bündeln sollen. Im Bereich Logistik unterstützt die Bundesregierung u. a. Kommunen und Landkreise bei der Erstellung städtischer Logistikkonzepte und Machbarkeitsstudien. Die bereits bewilligten Förderanträge adressieren beispielsweise Fragen zur Errichtung von Mikro-Depots zur Auslieferung von Gütern mit Lastenrädern.

29. Wie viele zusätzliche Haushaltsmittel wird die Bundesregierung mit dem Konjunkturpaket für Forschung und Entwicklung im Bereich der Elektromobilität sowie der Batteriezellfertigung in den Jahren 2020 und 2021 bereitstellen (bitte nach Jahren und Bundesministerien auflisten)?

Da das parlamentarische Verfahren für die Bereitstellung möglicher zusätzlicher Mittel aus dem Konjunktur- und Zukunftspaket für das kommende Jahr noch nicht abgeschlossen ist, kann die Bundesregierung zu den Zahlen noch keine Auskunft geben. Es ist jedoch beabsichtigt – sofern das Parlament zustimmt – mit möglichen zusätzlichen Mitteln das Dachkonzept „Forschungsfabrik Batterie“ weiter zu stärken.

30. Wie wurden die in der KI-Strategie 2018 festgelegten 3 Mrd. Euro auf die zuständigen Ressorts verteilt (bitte nach Ressort und Haushaltsjahr aufschlüsseln), auf welche Förderprogramme und Haushaltstitel haben die Bundesministerien die Finanzmittel verteilt (bitte nach Programm- und Budgetlaufzeit und Budget aufschlüsseln), und wie viele dieser Mittel sind in den Jahren 2019 und 2020 (bis zum Zeitpunkt der Anfrage) bereits abgeflossen?

Bei den genannten Mitteln in Höhe von 3 Mrd. Euro handelt es sich zum einen um die zusätzlich in den Haushalten 2019 und 2020 etatisierten Ausgabe- und Verpflichtungsermächtigungen der 1. und 2. Tranche für Maßnahmen zur Förderung Künstlicher Intelligenz („KI-Strategie“). Die den Ressorts aus beiden Tranchen zugewiesenen Haushaltsmittel sind den Tabellen der Antwort auf die Schriftliche Frage 118 der Abgeordneten Dr. Anna Christmann in BT Bundestagsdrucksache 19/12849 zu entnehmen. Diese verteilen sich wie nachfolgend aufgeführt auf die Förderprogramme und Haushaltstitel der einzelnen Häuser (Haushalte 2019 und 2020).

Darüber hinaus sind auch solche Mittel der KI-Strategie zuzurechnen, die außerhalb der oben genannten, zusätzlich bereitgestellten zwei Tranchen bereits in den Ressorteinzelplänen für Maßnahmen der KI etatisiert sind. Diese Mittel sind in einer Vielzahl von Titeln enthalten, die weder nach der Zweckbestimmung noch hinsichtlich der Gruppierung oder Funktion eindeutig KI-Maßnahmen zugeordnet werden können. Zum Teil handelt es sich auch nur um Teilansätze einzelner Titel.

Förderprogramm (Haushaltstitel, Programmlaufzeit)	2019	2020	2021	2022	2023	Summe	Bislang erfolgter Mittelabfluss
<b>BMJV</b>							
Richtlinie über die Förderung von Vorhaben zur verbraucherbezogenen Forschung und Entwicklung zu „Anwendungen künstlicher Intelligenz zur Unterstützung des Verbraucheralltags (Consumer Enabling Technologies)“ im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung im Verbraucherschutz in Recht und Wirtschaft. Titel 68601, Laufzeit 2020–2022.							
1. Tranche		1,4	1,8	0,3		3,5	0,6
2. Tranche						0	
Errichtung eines KI-Trust-Centers. Ausgabermächtigung in Höhe von 0,5 Mio. Euro für 2020 in Kapitel 0701, Titel 544 01. Verpflichtungsermächtigung in Höhe von 4,5 Mio. Euro für 2021 bis 2023 in Kapitel 0701, Titel 684 03.							
1. Tranche						0	0
2. Tranche		0,5	1,3	1,6	1,6	5	
Gesamtsumme	0	1,4	1,8	0,3		3,5	0,6
1. Tranche							
Gesamtsumme		0,5	1,3	1,6	1,6	5,0	
2. Tranche							
<b>BMWi</b>							
Europäische souveräne Dateninfrastruktur für die Entwicklung und Anwendung von KI-Technologien zur Stärkung der Technologiesouveränität Deutschlands. Titel 683 21, seit 2019 fortlaufend.							
1. Tranche	1,0	1,0	1,0	1,0		4,0	1,24
2. Tranche						0	
Ausbau der Mittelstand 4.0-Kompetenzzentren („KI-Trainer“). Titel 686 22, 2019–2024.							
1. Tranche	5,0	6,0	6,0	2,0		19,0	5,5
2. Tranche		1,0	2,0	2,0	2,0	7,0	
Aufstockung Forschungsförderprogrammlinie Digitale Technologien (KI-Innovationswettbewerb). Titel 683 21, seit 2019 fortlaufend.							
1. Tranche	4	27,1	33,6	27,3		91,9	8,5
2. Tranche		0	25,0	29,0	25,0	79,0	
Stärkung der KI-Kompetenz durch die D-Hub-Initiative. Titel 686 23, seit 2019 fortlaufend.							
1. Tranche						0	0,7
2. Tranche		0,8	0,2	0,2	0,2	1,4	
Aufstockung des Fachtitels Verkehrstechnologien / KI für automatisiertes und vernetztes / autonomes Fahren. Titel 683 11, seit 2019 fortlaufend.							
1. Tranche	0,9	7,34	6,8	5,3	1,5	21,8	4,1
2. Tranche		4,3	5,3	6,4	3	16,3	
Aufstockung der Initiative Industrie 4.0 / KI-Testbed. Titel 686 24, seit 2019 fortlaufend.							
1. Tranche	0	0,7	0,7	0,6		2,0	0
2. Tranche		0,4	0,5	0,5	0,4	1,8	
Aufstockung Luftfahrtforschung für Ausweitung KI-Forschung. Titel 683 31, 2019–2026.							
1. Tranche	0	2,0	4,0	2,0		8,0	2
2. Tranche						0	
KI-Projekte in der Raumfahrt. Titel 683 32, Laufzeit 2020–2023.							

Förderprogramm (Haushaltstitel, Programmlaufzeit)	2019	2020	2021	2022	2023	Summe	Bislang erfolgter Mittelabfluss
1. Tranche						0	0
2. Tranche		0,9	2,6	2,6	0,9	7	
Gaia-X. Titel 683 11, Laufzeit seit 2019 fortlaufend.							
1. Tranche						0	0
2. Tranche		2,6	6,3	7,3	2,8	19	
Gesamtsumme 1. Tranche	10,9	44,1	52,1	40,3	0	147,2	22,1
Gesamtsumme 2. Tranche		7,6	41,8	46,8	34,8	131	
BMAS							
KI-Observatorium. Titel 1107 68411, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche	6,5	6,5	6,5	6,5	0	26	6,7
2. Tranche		0	0	0	0	0	
„Modellprojekt Civic Innovation Platform.“ Titel 1107 68411, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche	1,3	5,5	5,5	5,5	0	17,8	0,6
2. Tranche		0	0	0	0	0	
Zukunftszentren (KI). Titel 1107 68402, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche	2,6	7	5,5	5,5	0	20,6	0
2. Tranche		0	0	0	0	0	
Experimentierräume KI. Titel 1107 68402, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche	1,0	3,0	3,0	3,0	0	10	0
2. Tranche		0	0	0	0	0	
„Zukunftsfonds Digitale Nachhaltigkeit, Arbeit und Gesellschaft“ (Arbeitstitel). Titel 1107 68411, Laufzeit 2019–2023.							
1. Tranche		0	0	0	0	0	0
2. Tranche		3,0	6,0	5,0	2,0	15,9	
Trust Center. Titel 1107 68411, Laufzeit 2019–2023.							
1. Tranche		0	0	0	0	0	0
2. Tranche		1,5	3,8	4,9	4,9	15	
Weiterbildungsplattform. Titel 684 12, Laufzeit 2019–2023.							
1. Tranche		0	0	0	0	0	0
2. Tranche		4,5	8,5	8,5	8,5	30,0	
Gesamtsumme 1. Tranche	11,4	22	20,5	20,5		74,4	7,3
Gesamtsumme 2. Tranche		9	18,2	18,4	15,4	60,9	
BMU							
Förderinitiative „KI-Leuchttürme für Umwelt, Klima, Natur und Ressourcen“ und den Aufbau des Ökosystems für gemeinwohlorientierte und nachhaltige KI. Titel 1601 54401, Laufzeit 2019–2023.							
Gesamtsumme 1. Tranche	2,8	8,0	12,0	4,4		27,2	0,7
Gesamtsumme 2. Tranche		5,0	5,0	6,0	4,0	20,0	

Förderprogramm (Haushaltstitel, Programmlaufzeit)	2019	2020	2021	2022	2023	Summe	Bislang erfolgter Mittelabfluss
<b>BMG</b>							
MOND – Mobiles smartes Neurosensorysystem für die Detektion und Dokumentation epileptischer Anfälle im Alltag. Titel 1504 68605, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche		0,9	1,2	0,9		3,0	0
2. Tranche						0	
KIPRODE. Titel 1504 68605, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche		0,8	0,9	0,4		2,1	0
2. Tranche						0	
SMART Start – Smarte Sensorik in der Schwangerschaft – Ein integratives Konzept zur digitalen, präventiven Versorgung schwangerer Frauen. Titel 1504 68605, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche		1,4	1,3	0,4		3,1	0,1
2. Tranche						0	
SSTeP-KiZ – Smarte Sensorik bei Telepsychotherapie von Kinder und Jugendlichen mit Zwangsstörungen. Titel 1504 68605, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche		0,6	0,6	0,4		1,6	0,2
2. Tranche						0	
AktiSmart-KI – Identifikation von komplexen Aktivitätsmustern durch smarte Sensorik in der geriatrischen Rehabilitation. Titel 1504 68605, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche		0,2	0,5	0,5		1,2	0
2. Tranche						0	
AutoPiLoT – Automatisierte leitlinienkonforme patientenindividuelle Blutproduktezuordnung und smartes Logistikmanagement in der Transfusionsmedizin. Titel 1504 68605, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche		0,4	0,7	0,7		1,8	0,2
2. Tranche						0	
TPI – Die Tumorverhalten-Prädiktions-Initiative: Smarte Daten für die patientenzentrierte Präzisionsonkologie bei Melanom, Brust- & Prostatakrebs. Titel 1504 68605, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche		0,7	0,8	0,6		2,1	0,1
2. Tranche						0	
CovBot Prüfung technischer Möglichkeiten (u. a. Corona-Virus Hotline Assistenten) zur Entlastung des Telefonservice in öffentlichen Einrichtungen im Gesundheitswesen während der Pandemie. Titel 1504 68605, Laufzeit 04.2020–09.2020.							
1. Tranche						0	0,01
2. Tranche		0,2				0,2	
Hinweis: Eine konkretere Benennung der Mittelverausgabung für die 2. Tranche ist derzeit noch nicht möglich; der Bewilligungsprozess zur Rahmenbekanntmachung für die 2. Tranche ist noch nicht abgeschlossen.							
Gesamtsumme	0	4,9	6,0	3,9		14,9	0,6
Gesamtsumme		0,2	0	0	0	0,2	

Förderprogramm (Haushaltstitel, Programmlaufzeit)	2019	2020	2021	2022	2023	Summe	Bislang erfolgter Mittelabfluss
<b>BMF</b>							
KI in den Haushaltsverfahren. Titel 0812 532 01, Laufzeit bis 2022.							
1. Tranche	1,6	2,1	3,8	2,8	0	10,3	0,3
2. Tranche		0	0	0	0	0	
Steuerliche Informationsaustausche (DAC 6). Titel 0815 532 01, Laufzeit bis 2022.							
1. Tranche	0,4	0	0	0	0	0,4	0,1
2. Tranche		0	0	0	0	0	
Überwachung Finanztransaktion (FIU-Analytics). Titel 0813 532 01 – 1,2 Mio. Euro, Titel 0813 812 02 – 0,6 Mio. Euro, Laufzeit bis 2020.							
1. Tranche	1,8	0	0	0	0	1,8	1,8
2. Tranche		0	0	0	0	0	
Steueranalyzesystem (StAS). Titel 0812 532 01 – 1,3 Mio. Euro, Titel 0812 812 02 – 0,87 Mio. Euro, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche	0,4	0,3	0,3	0,3	0	1,3	0,6
2. Tranche		0,9	0	0	0	0,9	
Digitale Mittelstandskooperation Titel 0812 532 01, Laufzeit 2019–2020.							
1. Tranche	0,3	1,0	0	0	0	1,3	0,2
2. Tranche		0	0	0	0	0	
KI-Lab. Titel 0812 532 01 – 19,13 Mio. Euro, Titel 0812 812 02 – 10 Mio. Euro, Laufzeit bis 2023.							
1. Tranche	0	0	0	0	0	0	0
2. Tranche		6,6	7,5	7,5	7,5	29,1	
Gesamtsumme	4,5	3,4	4,1	3,1		15,1	3,0
Gesamtsumme		7,5	7,5	7,5	7,5	30	
<b>BMZ</b>							
Künstliche Intelligenz für Alle – FAIR Forward. Titel 2301 89603, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche	1,1	2,6	2,6	1,6		8	2,2
2. Tranche						0	
Gesamtsumme	1,1	2,6	2,6	1,6		8	2,2
Gesamtsumme		0	0	0	0	0	

Förderprogramm (Haushaltstitel, Programmlaufzeit)	2019	2020	2021	2022	2023	Summe	Bislang erfolgter Mittelabfluss
<b>BMEL</b>							
Künstliche Intelligenz im Bereich Ernährung, Landwirtschaft und gesundheitlicher Verbraucherschutz. Titel 1005 68662, Laufzeit 2020–2023.							
1. Tranche		1,5	1,0	1,0		3,5	0,1
2. Tranche		1,5	5,5	5,5	5,5	18	
Gesamtsumme							0,1
1. Tranche	0	1,5	1,0	1,0		3,5	
Gesamtsumme							
2. Tranche		1,5	5,5	5,5	5,5	18	
<b>BMBF</b>							
Alexander von Humboldt-Professur für KI. Titel 3002 681 01, Laufzeit 2019–2031.							
1. Tranche		4,0	5,0	25,0		34,0	1,1
2. Tranche		0	0	0	13	13	
Datenverfügbarkeit „Methodenforschung Verlaufsstatistik“. Titel 3004 541 01, Laufzeit 2020–2023.							
1. Tranche						0	0
2. Tranche		0,1	0,2	0,2	0,1	0,5	
Lernplattform für Künstliche Intelligenz „KI-Campus“. bis HH 2019 Titel 3004 685 13, ab HH 2020 Titel 3003 685 18, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche	1,0	3,0	4,0	6,0		14,0	1,2
2. Tranche						0	
Förderung von Projekten zum Thema „Anwendung von Methoden der Künstlichen Intelligenz in der Praxis“. Titel 3004 683 21, Laufzeit 2020–2022.							
1. Tranche		5,7	9,4	3,8		18,9	0,3
2. Tranche						0	
Förderung von Projekten zum Thema „Erklärbarkeit und Transparenz des Maschinellen Lernens und der Künstlichen Intelligenz“. Titel 3004 683 21, Laufzeit 2019–2023.							
1. Tranche	0,2	2,6	3,7	2,4		8,9	0,5
2. Tranche					0,5	0,5	
Förderung von KI-Nachwuchswissenschaftlerinnen. Titel 3004 683 21, Laufzeit 2020–2024.							
1. Tranche						0	0
2. Tranche		5,4	6,4	7,4	8	27,2	
Förderung von KI-Laboren und der Qualifizierung im Rahmen von Forschungsvorhaben im Gebiet Künstliche Intelligenz. Titel 3004 683 21, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche	2,2	7,2	8,6	0,1		18,1	4,7
2. Tranche						0	
Auf- und Ausbau der KI-Kompetenzzentren. Titel 3004 683 21, Laufzeit 2018–2022.							
1. Tranche	7,6	4,5	3,3	16,7		32,1	11,8
2. Tranche		9,7	13,8	9,4		32,9	
BMBF-Beitrag zu GAIA-X. Titel 3004 683 21, Laufzeit 2020–2022.							
1. Tranche						0	0,3
2. Tranche		2,9	2,8	2,5		8,2	
Forschungsvorhaben zur Datenverfügbarkeit, -synthese und -analyse. Titel 3004 683 21, Laufzeit voraussichtlich 2020–2023.							

Förderprogramm (Haushaltstitel, Programmlaufzeit)	2019	2020	2021	2022	2023	Summe	Bislang erfolgter Mittelabfluss
1. Tranche						0,0	0,3
2. Tranche		0	5,0	7,7	20	32,7	
KI-basierte Elektroniklösungen für sicheres autonomes Fahren. Titel 3004 683 23, Laufzeit 2018–2022.							
1. Tranche	1,0	5,0	5,0	5,0		16,0	3,0
2. Tranche						0	
Einsatz von KI zur Früherkennung von Straftaten (in Kooperation mit dem BMI). Titel 3004 683 27, Laufzeit 2020–2023.							
1. Tranche						0	0
2. Tranche		1,0	1,0	1,0	0	3,0	
Digitale Fortschrittshubs Gesundheit. Titel 3004 685 31, Laufzeit voraussichtlich 2020–2024.							
1. Tranche						0	0
2. Tranche		2,0	7,0	7,0	11,0	27,0	
Aufstockung der Förderrichtlinie Computational Life Science. Titel 3004 685 31, Laufzeit 2019–2023.							
1. Tranche	3,0	7,5	8,5	9,0		28,0	4,5
2. Tranche		0	2,5	2,5	3,0	8,0	
Gesamtsumme 1. Tranche	15,0	39,5	47,5	68		170,0	27,7
Gesamtsumme 2. Tranche		21,1	38,7	37,7	55,6	153,0	
BMI							
Untersuchung von Sicherheitseigenschaften von KI-Systemen. Titel CI2/BSI TK24, Laufzeit seit 2020 fortlaufend.							
1. Tranche						0	0
2. Tranche		0,6	1,6	1,9		4,1	
KI in Netzinfrastrukturen und Digitalfunk BOS Titel 0622 54401, Laufzeit 2020–2022.							
1. Tranche						0	0
2. Tranche		0,2	0,1	0,0		0,3	
THW Reallabore. Titel KM3/THW, Laufzeit 2019–2022.							
1. Tranche	0,8					0,8	0,3
2. Tranche		0,2	0,4	0,9		1,5	
KI- basierte Analyse in der Fernerkundung. Titel HIII5/BKG, Laufzeit seit 2019 fortlaufend.							
1. Tranche	1,7					1,7	0
2. Tranche						0	
Umsetzung der polizeilichen KI-Strategie. Titel PG2020, Laufzeit seit 2019 fortlaufend.							
1. Tranche	0,5	0,5				1	0,8
2. Tranche						0	
Erkennung von Cyberangriffen. Titel B5/Bpol, Laufzeit seit 2020 fortlaufend.							
1. Tranche						0	0
2. Tranche		0,1	0,1			0,3	
KI in der Detektion von Funksignalen. Titel B5/Bpol, Laufzeit seit 2020 fortlaufend.							
1. Tranche						0	0
2. Tranche		0,1	0,2	0,1		0,4	

Förderprogramm (Haushaltstitel, Programmlaufzeit)	2019	2020	2021	2022	2023	Summe	Bislang erfolgter Mittelabfluss
Methodik und Daten der amtlichen Statistik für die qualitätsgesicherte Anwendung von Künstlicher Intelligenz (KI) und maschinellem Lernen in der Statistikproduktion. Titel DGI2/StBA, Laufzeit 2020–2022.							
1. Tranche						0	
2. Tranche		0,1	0,1	0,2		0,3	0
Gesamtsumme							
1. Tranche	3,0	0,5	0	0		3,5	1,0
Gesamtsumme							
2. Tranche		1,3	2,5	3	0	6,8	0
BKM							
Sonderprogramm Autonom – Künstliche Intelligenz und Darstellende Künste. Titel 0452 68417, Laufzeit 2010–2021.							
1. Tranche	0	0,5	0,5			1,0	
2. Tranche						0	0
KI gegen Desinformation – Deutsche Welle. Titel 0452 68417, Laufzeit 2020–2021.							
1. Tranche						0	
2. Tranche		0,2	0,1			0,3	0
KI für den Kulturgutschutz – Fraunhofer SIT. Titel 0452 68417, Laufzeit 2020–2021.							
1. Tranche						0	
2. Tranche		0,1	0,1			0,2	0
Multimodales Mining von Zeitzeugeninterviews zur Erschließung von audiovisuellem Kulturgut – HdG. Titel 0452 68417, Laufzeit 2020–2022.							
1. Tranche						0	
2. Tranche		0,1	0,3	0,1		0,5	0
Gesamtsumme							
1. Tranche	0	0,5	0,5	0		1,0	
Gesamtsumme							
2. Tranche		0,4	0,5	0,1	0	1,0	0

Anmerkung: Alle Angaben in Mio. Euro. Durch Rundung auf erste Nachkommastelle können sich Differenzen ergeben.

31. Bis wann wird die Bundesregierung die sogenannte dritte Tranche des KI-Budgets verteilen?

Auf die Antwort der Bundesregierung auf die Schriftliche Frage 11 der Abgeordneten Dr. Anna Christmann auf Bundestagsdrucksache 19/20374 wird verwiesen.

32. Handelt es sich bei den im Konjunkturpaket gemäß Beschluss des Koalitionsausschusses vom 3. Juni 2020 vorgesehenen 2 Mrd. Euro für KI um einen Teil der mit der KI-Strategie angekündigten 3 Mrd. Euro oder um zusätzliches Geld, und wie soll es auf die Bundesministerien und Haushaltsjahre verteilt werden?
33. Wenn es sich um zusätzliches Geld handelt, in welchem Zeitraum und für welche Schwerpunkte plant die Bundesregierung, die weiteren 1,5 Mrd. Euro aus der KI-Strategie zu verausgaben, die nach Abzug der ersten drei „KI-Tranchen“ von je 500 Mio. Euro noch ausstehen?

Die Fragen 32 und 33 werden gemeinsam beantwortet.

Mit dem Konjunktur- und Zukunftspaket werden die bis zum Jahr 2025 geplanten Investitionen in KI von 3 Mrd. Euro auf 5 Mrd. Euro erhöht. Die Etatisierung und Verwendung der Mittel wird derzeit innerhalb der Bundesregierung abgestimmt.

Mit Veröffentlichung der Strategie zur Förderung Künstlicher Intelligenz hat die Bundesregierung angekündigt, bis einschließlich des Jahres 2025 insgesamt etwa 3 Mrd. Euro für die Umsetzung der Strategie zur Verfügung stellen zu wollen. Die Schwerpunkte bei der Verwendung weiterer Mittel werden an Zielen und Maßnahmen der KI-Strategie sowie flexibel auf konkreten Bedarf ausgerichtet.

34. Wie werden die Standorte, an denen neue Supercomputer entstehen sollen (vgl. Nummer 43 des Konjunkturpakets) ausgewählt?

Die Abstimmung innerhalb der Bundesregierung über die Ausgestaltung der Maßnahmen zu Ziffer 43 des Konjunktur- und Zukunftspakets ist noch nicht abgeschlossen.

35. Mit Ausgaben in welcher Höhe rechnet die Bundesregierung für die Beschaffung neuer Supercomputer (bitte nach Haushaltsjahren aufschlüsseln)?

Die Abstimmung innerhalb der Bundesregierung über die Ausgestaltung der Maßnahmen zu Ziffer 43 des Konjunktur- und Zukunftspakets ist noch nicht abgeschlossen.

36. Plant die Bundesregierung, eine Abstimmung mit europäischen Staaten, um Kooperationen zum Aufbau und zur Nutzung von bestehenden und neuen Supercomputern bzw. Höchstleistungsrechnern aufzubauen, und welche Abstimmungen dazu haben in der Vergangenheit bereits stattgefunden?

Die Bundesregierung beteiligt sich seit der Gründung im Jahr 2018 an dem Gemeinsamen Unternehmen EuroHPC. Abstimmungen zum Aufbau eines europäischen Ökosystems des Höchstleistungsrechnens finden in diesem Rahmen laufend statt.

Über das europäische „Partnership for Advanced Computing in Europe“ (PRACE) haben europäische Forscherinnen und Forscher Zugang zu Supercomputern in fünf europäischen Ländern, unter anderem zu den deutschen Höchstleistungsrechnern des Gauss Centre for Supercomputing.

37. Inwieweit ist das 2018 in der KI-Strategie definierte Ziel erreicht, ein „Programm zur wissenschaftlichen Nachwuchsförderung und Lehre im Bereich KI“ (vgl. Strategie der Bundesregierung über Künstliche Intelligenz, 2018) aufzulegen, um KI-Nachwuchstalente im Bereich Forschung, Entwicklung und Anwendung in Deutschland zu halten und neue zu gewinnen (bitte nach Programmlaufzeit, Umsetzungsstand und Budget aufschlüsseln)?

Vielfältige Maßnahmen der Bundesregierung zielen bereits darauf ab, Nachwuchstalente und Lehre im Bereich Künstliche Intelligenz zu fördern.

Das BMBWF hat insbesondere folgende Maßnahmen mit dieser Zielsetzung im Rahmen der KI-Strategie gestartet:

Mit der Maßnahme zur Förderung von KI-Nachwuchswissenschaftlerinnen soll gezielt der Anteil qualifizierter Frauen in der deutschen KI-Forschung gesteigert und ihr wissenschaftliches Profil nachhaltig gestärkt werden. Dafür sind in den Jahren von 2020 bis 2024 rund 34 Mio. Euro vorgesehen. Die Forschungsprojekte starten im Jahr 2020.

Mit einer laufenden Maßnahme zur Einrichtung von KI-Laboren wird die Qualifizierung im Rahmen von Forschungsvorhaben im Gebiet KI gefördert. Dafür sind in den Jahren von 2019 bis 2022 rund 18 Mio. Euro vorgesehen.

Das Forschungs- und Entwicklungs-Verbundprojekt „KI-Campus“ verfolgt u. a. das Ziel, Aus- und Weiterbildungsmöglichkeiten im Bereich der Künstlichen Intelligenz für eine große Bandbreite von Lernenden zu schaffen und damit die KI-Kompetenzen zu stärken. Dazu wird auch eine auf das Thema KI spezialisierte digitale Lernplattform pilothaft aufgebaut. Dafür sind in den Jahren von 2019 bis 2023 bis zu 14 Mio. Euro vorgesehen. Die Maßnahme startete am 1. Oktober 2019.

Auch im Rahmen einer strategischen Förderinitiative der Deutschen Forschungsgemeinschaft zur Künstlichen Intelligenz werden Nachwuchstalente gefördert.

38. Wie viele Tenure-Track-Professuren im Bereich KI wurden wo zwischen 2018 und Juni 2020 in durch den Bund finanzierten Programmen für Nachwuchsforscherinnen und Nachwuchsforscher (Professorinnenprogramm etc.) neu geschaffen?

Mit dem Bund-Länder-Programm zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses (Tenure-Track-Programm) wurden im Zeitraum von April 2019 bis Juni 2020 insgesamt neun Tenure-Track-Professuren im Bereich KI an den folgenden acht Universitäten neu geschaffen: Universität Stuttgart (2), sowie Humboldt-Universität zu Berlin, Universität Gießen, Universität Hannover, Universität Jena, Universität Kiel, Universität Magdeburg und Technische Universität München (jeweils 1). Das Professorinnenprogramm dagegen ist nicht auf bestimmte Fachbereiche, sondern allgemein auf die Erhöhung der Anzahl von Professorinnen sowie die Verbesserung von Strukturen im Sinne der Chancengleichheit an deutschen Hochschulen ausgerichtet. Nach Durchführung von regulären Berufungsverfahren werden danach im Rahmen einer Anschubfinanzierung Erstberufungen von Wissenschaftlerinnen auf die jeweils von den Hochschulen ausgeschriebene Professur für die Dauer von 5 Jahren gefördert, soweit ein externes Begutachtungsgremium das von der Hochschule im Rahmen der Förderbedingungen vorgelegte Konzept zur Chancengerechtigkeit positiv bewertet hat.

39. Durch welche konkreten Maßnahmen und Programme fördert die Bundesregierung wirtschaftliche Ausgründungen aus der Wissenschaft im Bereich KI (bitte nach Haushaltsjahren 2018 bis 2020, Projekttitel, Projektkurzbeschreibung, zuständigem Ressort, Budget und Laufzeit aufschlüsseln)?

Die wirtschaftliche Verwertung wissenschaftlicher Projekte, auch in Form von Ausgründungen, ist ein übergeordnetes und allgemeines Ziel der Forschungsförderung des BMBF, das auch von KI-spezifischen Fördermaßnahmen adressiert wird.

Konkret fördert die Bundesregierung mit dem Programm „EXIST – Existenzgründungen aus der Wissenschaft“ bereits im bestehenden Förderrahmen KI-Ausgründungen in allen Phasen des Gründungsprozesses:

Das Programm EXIST Gründungskultur (EXIST IV und EXIST Potentiale) zielt auf die Weiterentwicklung und Verstetigung der in den vergangenen Jahren entstandenen Gründungsnetzwerke an Hochschulen und unterstützt insbesondere kleinere und mittlere Hochschulen, die bislang noch keine EXIST-Förderung in Anspruch genommen haben. Mit EXIST Potentiale sollen durch frühzeitige Sensibilisierungs- und Qualifizierungsmaßnahmen Studierende an das Thema Gründungen herangeführt werden. Themen mit hoher gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Relevanz, wie die Anwendung von KI beim Mittelstand stehen dabei besonders im Fokus der Gründungsakquise. Mit den Programmsäulen EXIST Gründerstipendium (EGS) und EXIST Forschungstransfer (EFT) werden jährlich ca. 260 Gründungsteams bei der unmittelbaren Produktentwicklung, Businessplanerstellung und Gründungsvorbereitung unterstützt. Über den German Accelerator (GA) werden die Internationalisierung und Skalierung von Start-ups in den gerade für die Anwendung von KI relevanten Wachstumsmärkten USA, China und Südostasien gezielt unterstützt.

Ausgründungen aus der Wissenschaft spielen gerade bei der Anwendung Künstlicher Intelligenz für Produktinnovationen und damit für das wirtschaftliche Wachstum in nahezu allen Bereichen in den kommenden Jahren eine entscheidende Rolle. Die Bundesregierung hat deshalb in dem Konjunktur- und Zukunftspaket zusätzliche Mittel in Höhe von 2 Mrd. Euro für die Anwendung Künstlicher Intelligenz, darunter auch von KI-Gründungen, und für die dafür erforderliche Ausrichtung der Forschungs- und Transferstrukturen bereitgestellt.

Im Rahmen von EXIST werden dazu spezifische Angebote in allen drei Programmsäulen mit dem Ziel umgesetzt, die Anzahl und Qualität an KI-Gründungen deutlich zu erhöhen. Dafür werden – vorbehaltlich der weiteren Finanzplanung bis zum Jahr 2024 – die Haushaltsansätze für das EXIST Programm in den nächsten 4 Jahren um gut 60 Mio. Euro aufgestockt.

BMW i						
	EXIST-Gesamt	davon EGS	davon EFT	davon EXIST IV	davon EXIST-Potentiale	davon GA
2018	66,12	26,47	33,95	0,814		4,88
2019	109,95	27,40	35,73		37,78	9,04
2020	100,66	26,45	44,74		24,81	4,67

Anmerkung: Alle Angaben in Mio. Euro.

40. Durch welche konkreten Maßnahmen möchte die Bundesregierung die im Konjunkturpaket unter Nummer 43 definierten Ziele erreichen, und welche Finanzmittel werden dazu zusätzlich in den Jahren 2020 und 2021 bereitgestellt für die Ziele
- „Kompetenzzentren für KI-Forschung werden wir langfristig stärken und eng mit der regionalen Wirtschaft in Anwendungshubs verzahnen.“,
  - „In zukunftsweisenden Anwendungsfeldern werden wir, ausgehend von exzellenten Forschungs- und Transferstrukturen, KI-Ökosysteme von internationaler Strahlkraft aufbauen.“,
  - „die Attraktivität für Spitzenforscher und Nachwuchstalente so verbessern, dass die Bedingungen am KI-Standort Deutschland im internationalen Vergleich zu den weltweit besten zählen.“?
41. Welche Planungen existieren seitens der Bundesregierung zur Förderung eines europäischen KI-Netzwerks, das mit dem Konjunkturpaket der Bundesregierung unter dem Stichwort „KI made in Europe“ erstmals angekündigt wurde, und mit Finanzmitteln in welcher Höhe plant die Bundesregierung, ein solches europäische KI-Netzwerk im Jahr 2020 und in den Folgejahren zu unterstützen?

Die Fragen 40 bis 41 werden gemeinsam beantwortet.

Die Abstimmung innerhalb der Bundesregierung über die Ausgestaltung der Maßnahmen zu Ziffer 43 des Konjunktur- und Zukunftspakets ist noch nicht abgeschlossen.

42. Wie lautet der aktuelle Stand des seit 2018 von der Bundesregierung angekündigten Deutsch-Französischen-KI-Kompetenzzentrums, und welches Budget soll hierfür ab 2021 veranschlagt werden?

Im Rahmen des Deutsch-Französischen Ministerrats am 16. Oktober 2019 wurde zwischen den deutschen und französischen Forschungs- und Wirtschaftsressorts eine gemeinsame KI-Roadmap unterzeichnet und damit die Grundlage für ein gemeinsames KI-Forschungs- und Innovationsnetzwerk gelegt. Mit der Unterzeichnung einer Declaration of Intent im April 2020 einigten sich Deutschland und Frankreich verbindlich darauf, die gemeinsame Zusammenarbeit in der KI-Forschung zu intensivieren. Die KI-Kompetenzzentren in Deutschland und die KI-Institute in Frankreich werden künftig noch enger zusammenarbeiten, etwa durch gemeinsame Forschungsprojekte oder den Austausch von wissenschaftlichem Personal. Die bilateralen Gespräche dauern derzeit noch an. Zudem sind die zu veranschlagenden Mittel Gegenstand der Verhandlungen zur Haushaltsaufstellung der Jahre ab dem Jahr 2021.

43. Wie lautet der aktuelle Stand des im Koalitionsvertrag zwischen CDU, CSU und SPD vereinbarten „Zentrums für digitale Innovationen in der Systemforschung“, welches gemeinsam mit Polen aufgebaut werden soll, und welches Budget ist hierfür in den Jahren 2020 und 2021 eingeplant?

Das angesprochene Zentrum befindet sich seit dem Jahr 2019 in der Aufbau-phase. Dafür sind Bundesmittel in Höhe von rund 3,2 Mio. Euro für 2020 eingeplant. Die Höhe der Bundesmittel für das Jahr 2021 ist Gegenstand der aktuellen Haushaltsverhandlungen.

44. Wie genau plant die Bundesregierung, vor dem Hintergrund, dass in den USA und in China mehrere 10 Mrd. US-Dollar jährlich für Forschung und Entwicklung von KI investiert werden, mit 5 Mrd. Euro für den Zeitraum von fünf Jahren den KI-Standort Deutschland zu dem „weltweit besten“ zu machen (vgl. Nummer 43, Konjunkturpaket)?

Ein Vergleich der finanziellen Aufwendungen für Forschung und Entwicklung von KI zwischen Nationen ist vor dem Hintergrund potentiell sehr unterschiedlicher Erhebungsgrundlagen in der Regel nicht ohne weiteres möglich. Zudem werden die Bundesmittel zur Förderung von Forschung und Entwicklung von KI flankiert durch Mittel der Länder. Ebenfalls nicht zu vernachlässigen sind Investitionen von Unternehmen. Darüber hinaus ist Deutschland Teil und maßgeblicher Treiber eines europäischen KI-Ökosystems, in dem weitere Mittel der Forschungsförderung bereitgestellt werden und in dem gemeinsam mit europäischen Partnern Forschung und Entwicklung von KI nach europäischen Werten vorangetrieben wird. Dementsprechend wird die KI-Strategie der Bundesregierung in diesem Jahr fortgeschrieben. Sie befindet sich derzeit in der Ressortabstimmung.

45. Welche KI-Projekte, die einen besonderen Fokus auf soziale und ökologische Nachhaltigkeit legen, werden durch die Bundesregierung gefördert (bitte nach Projekttitle, Projektkurzbeschreibung, zuständigem Ressort, Laufzeit und Fördervolumen aufschlüsseln)?

Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) hat am 21. August 2019 die Förderinitiative „KI-Leuchttürme für Umwelt, Klima, Natur und Ressourcen“ gestartet. Gefördert werden Projekte, die Künstliche Intelligenz nutzen, um ökologische Herausforderungen zu bewältigen und die beispielgebend sind für eine umwelt-, klima- und naturgerechte Digitalisierung. Dafür gibt es zwei Förderlinien (FL), die Projekte verschiedener Entwicklungsstadien adressieren:

Der Call for Participation „KI für den Umweltschutz“ (FL 1) suchte kreative und innovative Ideen für ökologische Herausforderungen. Das Verfahren ermöglichte Bewerberinnen und Bewerbern mit oder ohne Fördererfahrung ihre Kompetenzen und Ideen einzubringen. Der Call richtete sich vor allem an interdisziplinäre Teams. Ziel ist es, die Gemeinschaft, die sich mit den Chancen digitaler Technologien für die Umwelt beschäftigt, zu verbreitern.

Die zweite Förderlinie „Anwendungsorientierung und -fundierung“ richtet sich an Projekte mit einem bereits höheren Reifegrad. Sie zielt darauf ab, Entwicklung, Einsatz und Vermittlung KI-basierter Anwendungen für ökologische Herausforderungen zu fördern (FL 2). Aus rund 300 eingereichten Ideen wurden zunächst 13 Projekte der FL 1 und 13 Projekte der FL 2 ausgewählt.

Laufzeit: 2020 – 2023.

Gesamtvolumen: Zur Aufteilung der Haushaltsmittel auf das Förderprogramm wird auf die Antwort zu Frage 30 verwiesen.

„Modellprojekt Zukunftsfonds Digitale Arbeit und Gesellschaft“ (Arbeitstitel): Das Modellprojekt ist dem Aufbau des gemeinsam mit BMU und das Bundesministerium für Familie, Senioren, Frauen und Jugend (BMFSFJ) geplanten „Zukunftsfonds Digitale Nachhaltigkeit, Arbeit und Gesellschaft“ vorangestellt. Es umfasst den Aufbau einer Matching-Plattform (Civic Innovation Plattform) sowie die Erprobung einer zweistufigen Förderung und intensiven Begleitung von KI-Projekten durch Beratungs- und Vernetzungsworkshops im Bereich von Zivilgesellschaft, Verwaltung und KMU zu Themen in der Ressortzuständigkeit des BMAS.

Laufzeit: 2019 – 2022.

Gesamtvolumen: 17,8 Mio. Euro.

Unter dem Arbeitstitel „Zukunftsfonds Digitale Arbeit, Nachhaltigkeit und Gesellschaft“ arbeiten das Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), BMU und BMFSFJ am Aufbau eines Ökosystems für gemeinwohlorientierte und nachhaltige KI. Das Projekt wird die in Ressortzuständigkeit der drei Häuser verantworteten Förderprogramme mit den Schwerpunkten Nachhaltigkeit, Arbeitswelt, Sozialwesen und Gesellschaft verbinden: durch gemeinschaftlich genutzte Infrastrukturen, eine übergeordnete Vernetzung, Kommunikation und Communitybuilding.

Laufzeit: 2020 – 2023.

Gesamtvolumen: 48,4 Mio. Euro (BMAS: 15,9 Mio. Euro; BMU: 20,0 Mio. Euro; BMFSFJ: 12,5 Mio. Euro).

Das BMBF verfolgt drei solcher KI-Projekte.

Das Programm „ReziProK“ des Verbundvorhabens „EIBA“. Das Ziel des Verbundprojektes ist die Entwicklung einer Maschine zur Identifikation und Zustandsbewertung von Altteilen. Damit wird ein wichtiger Beitrag zur Kreislaufschließung durch digitale Technologien geleistet. Mit dem Einsatz von Methoden der Künstlichen Intelligenz soll die Maschine in der Lage sein, Produkte zu erkennen und mit weiteren verfügbaren Informationen zu vergleichen. Durch die kontinuierliche Erweiterung der Daten soll sie sich zudem an neue Produkte und Anforderungen anpassen. Der Mensch soll dabei nicht durch die Maschine ersetzt, sondern unterstützt werden.

Laufzeit: 01.09.2019 – 31.08.2022.

Gesamtvolumen: 1,41 Mio. Euro.

Das Programm „ReziProK“ des Verbundvorhabens „LongLife“. Das Projektkonsortium von „LongLife“ will die Barrieren für eine längere Nutzung technischer Komponenten abbauen und damit zu einer deutlichen Ressourceneinsparung beitragen. Dies soll über die Kombination von technischen und betriebswirtschaftlichen Elementen erreicht werden. Zum einen werden Methoden und Werkzeuge für eine möglichst sichere Prognose der Restlebensdauer von gebrauchten technischen Komponenten entwickelt. Zum anderen sollen innovative Referenz-Geschäftsmodelle entstehen, die auf diese Prognosen aufbauen und eine Weiterverwendung, z. B. als kaskadierte Nutzung, für alle Beteiligten wirtschaftlich interessant machen.

Laufzeit: 01.07.2019 – 30.06.2022.

Gesamtvolumen: 1,24 Mio. Euro.

Das Programm „KMU-innovativ“ des Verbundvorhabens Ressourceneffizienz „KI-EasyMould“. Das Ziel des Verbundprojektes ist die signifikante Ressourceneinsparung durch die Entwicklung eines KI-gestützten Prägesystems für Stanzmaschinen im Verpackungsbereich. Dieses beinhaltet die technische Entwicklung der Schnellwechsellinien, der sog. Prägesleeves sowie eine Regel- und Überwachungseinheit mit KI-gestützter Qualitätsüberwachung. Die technische Machbarkeit und Leistungsfähigkeit wird anhand eines zu entwickelnden Demonstrators nachgewiesen.

Laufzeit: 01.07.2019 – 30.06.2021.

Gesamtvolumen: 0,88 Mio. Euro.

46. Welches Budget wird mit dem beim Bundesministerium für Wirtschaft und Energie angesiedelten KI-Innovationswettbewerb bereitgestellt, und in welcher Form findet eine Zusammenarbeit zwischen den Gewinnerinnen und Gewinnern des Wettbewerbs und dem sich im Aufbau befindenden Dateninfrastrukturprojekt GAIA-X statt?

Der KI-Innovationswettbewerb wurde im Januar 2019 gestartet. Nachdem das Projekt GAIA-X anlässlich des Digital-Gipfels Ende Oktober 2019 öffentlich angekündigt wurde, hatte sich gezeigt, dass viele der beim KI-Innovationswettbewerb geförderten Vorhaben unmittelbare Anknüpfungspunkte an das Projekt GAIA-X aufweisen. Etliche Partner in den geförderten Gewinnervorhaben engagieren sich in entsprechenden GAIA-X Arbeitsgruppen. Vor diesem Hintergrund wurde ein zweiter Förderaufruf beim KI-Innovationswettbewerb gezielt auf GAIA-X ausgerichtet. Die ausgewählten Vorhaben aus den Bereichen Bauwirtschaft/Building Information Modeling, Finanzdienstleistungen/Datensouveränität sowie Umwelt/Landwirtschaft befinden sich aktuell in der förmlichen Antragsphase und sollen Anfang des Jahres 2021 starten. In Summe beläuft sich das Förderbudget der Vorhaben des KI-Innovationswettbewerbs, die unmittelbar auf GAIA-X einzahlen bzw. einzahlen werden, auf rund 75 Mio. Euro bis zum Jahr 2023. Das Gesamtbudget (inkl. Eigenanteilen der geförderten Partner) beträgt damit rund 125 Mio. Euro.

47. Plant die Bundesregierung, sich an der aktuell in der Entstehung befindenden Entität GAIA-X zu beteiligen?
- a) Wenn ja, in welcher Höhe plant die Bundesregierung, sich daran zu beteiligen?
- b) Wenn nein, warum nicht?

Die Fragen 47 bis 47b werden gemeinsam beantwortet.

Gründungsmitglieder der GAIA-X-Vereinigung sind 22 Unternehmen aus Deutschland und Frankreich. Der Bund wird nicht zu den Gründungsmitgliedern gehören. Ob der Bund im weiteren Prozess beitreten wird, wird derzeit intern noch geprüft. Klar ist, dass die Bundesregierung das Projekt weiterhin unterstützen und flankieren wird.

48. Mit welchen Mitteln förderte bzw. fördert die Bundesregierung Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien in den Jahren 2015 bis 2020 (bitte nach Haushaltsjahren und Ressort aufschlüsseln)?

Die Bundesregierung förderte bzw. fördert die Quantentechnologien zwischen 2015 und 2020 im Forschungsrahmenprogramm der Bundesregierung zur IT-Sicherheit „Selbstbestimmt und sicher in der digitalen Welt 2015 – 2020“ sowie in dem im September 2018 beschlossenen Regierungsprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“. Dafür wurden bzw. werden die folgenden Mittel bereitgestellt:

	2015	2016	2017	2018	2019	2020
BMBF	5,2	9,2	16,0	12,8	33,0	33,7
BMWi						3,0

Anmerkung: Alle Angaben in Mio. Euro.

Darüber hinaus befassen sich Institute der Fraunhofer- und Max-Planck-Gesellschaft, Einrichtungen der Helmholtz- und der Leibniz-Gemeinschaft so-

wie Ressortforschungseinrichtungen mit Forschung und Entwicklung in den Quantentechnologien.

49. Mit welchen Mitteln plant die Bundesregierung, Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien in den Jahren 2020 bis 2023 zu fördern (bitte nach Haushaltsjahren und Ressort aufschlüsseln)?

Im Rahmen des Forschungsrahmenprogramms der Bundesregierung zur IT-Sicherheit „Selbstbestimmt und sicher in der digitalen Welt 2015-2020“ sowie im Regierungsprogramm „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ in den Jahren von 2020 bis 2023 die in der folgenden Tabelle aufgeführten vorläufigen Mittelfestlegungen geplant:

	2020	2021	2022	2023
BMBF	4,0	48,2	61,4	72,5
BMWi		9,5	20,8	16,0

Anmerkung: Alle Angaben in Mio. Euro. Mittelangaben gemäß der aktuellen Finanzplanung.

Zu den Aktivitäten der außeruniversitären Forschungseinrichtungen und Ressortforschungseinrichtungen siehe Antwort zu Frage 48.

50. Mit welchen Projekten förderte bzw. fördert die Bundesregierung Forschung und Entwicklung von Quantentechnologien in den Jahren 2015 bis 2020 (bitte alle Projekte mit Angaben zum Projekttitle, Projektkurzbeschreibung, Mittelempfänger, Budget und Laufzeit auflisten)?

Für die Beantwortung der Frage wird auf die Tabelle in Anlage 1\* verwiesen.

Diese Tabelle gibt Aufschluss über die Projekte zur Forschung und Entwicklung im Bereich Quantentechnologie.

51. 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
- „ein neues industrielles Standbein sowohl hinsichtlich Hard- als auch Software aufbauen“,
  - „eine substantielle Förderung von Unternehmens- und Start-up-Gründungen“,
  - „gemeinsame neue Spitzencluster aus Wissenschaft und Industrie“?

Die Fragen 51 bis 51c werden gemeinsam beantwortet.

Die Abstimmung innerhalb der Bundesregierung zum weiteren Vorgehen ist noch nicht abgeschlossen.

52. Bis wann wird die Bundesregierung den Auftrag zum Bau von Quantencomputern vergeben, und mit Ausgaben in welcher Höhe plant die Bundesregierung für den Bau von mindestens zwei Quantencomputern?

Es wird auf die Antwort zu Frage 50 verwiesen.

\* Von einer Drucklegung der Anlage wird abgesehen. Diese ist auf Bundestagsdrucksache 19/21858 auf der Internetseite des Deutschen Bundestages abrufbar.

53. Wurden die Konsortien zum späteren Betrieb der Quantencomputer in einem offenen Verfahren ausgeschrieben?
- Wenn ja, wie lauten die Ausschreibungskriterien, und wann startete die Ausschreibung?
  - Wenn nein, warum nicht?

Die Fragen 53 bis 53b werden gemeinsam beantwortet.

Es wird auf die Antwort zu Frage 51 verwiesen.

54. Wie hoch ist der Anteil der Auswahl- und Vergabeverfahren für Forschung und Entwicklung im Bereich Quantentechnologien, bei denen durch Bundesministerien externe Kommissionen, Expertinnen- bzw. Experten- oder Beratungsgremien zur Unterstützung bei der Auswahl eingesetzt werden (bitte den Anteil einzeln nach Bundesministerien für die Jahre 2015 bis 2020 angeben)?

Auswahl- und Vergabeverfahren für Projekte in Forschung und Entwicklung im Bereich Quantentechnologien erfolgen auf Grundlage der Förderrichtlinien bzw. -initiativen im Rahmen der Programme „Selbstbestimmt und sicher in der digitalen Welt 2015 – 2020“ sowie „Quantentechnologien – von den Grundlagen zum Markt“ unter Beteiligung externer Experten.

55. Welche Bedeutung misst die Bundesregierung den Hochschulen in der Erforschung von Quantentechnologien bei, und teilt die Bundesregierung die Ansicht der Quantum Alliance, dass der „Dreh- und Angelpunkt“ die Universitäten seien, da diese die „hochqualifizierten und dringend benötigten Quanteningenieure der Zukunft ausbilde“ (vgl. Pressemitteilung der Quantum Alliance vom 15. Juni 2020)?

Die Hochschulen in Deutschland sind im Bereich der Quantentechnologien gut aufgestellt; sie tragen insbesondere exzellentes Know-how aus dem Bereich der Grundlagenforschung bei. Die Bundesregierung zielt mit ihren Aktivitäten darauf, dieses Know-how mit der Expertise von außeruniversitären Forschungseinrichtungen zu Technologieentwicklung und Engineering sowie mit unternehmerischem Engagement zu verknüpfen. Des Weiteren nehmen die Hochschulen herausragende Aufgaben für die Nachwuchsgewinnung und die Ausbildung in den Quantentechnologien wahr. Sie sind daher ein wichtiger Teil des Ökosystems zur Entwicklung des Themenfeldes in Deutschland.

56. Wie viele Tenure-Track-Professuren wurden zwischen 2015 und Juni 2020 im Bereich Quantentechnologien in durch den Bund finanzierten Programmen für Nachwuchsforscherinnen und Nachwuchsforscher (Professorinnenprogramm etc.) neu geschaffen?

Mit dem Bund-Länder-Programm zur Förderung des wissenschaftlichen Nachwuchses (Tenure-Track-Programm) wurden im Zeitraum von April 2019 bis Juni 2020 insgesamt drei Tenure-Track-Professuren im Bereich Quantentechnologien an folgenden zwei Universitäten neu geschaffen: Technische Universität München (2) und Universität Stuttgart (1). Hinsichtlich des Professorinnenprogramms wird auf die Antwort zu Frage 39 verwiesen.

## Anlage 1 zur Beantwortung von Frage 50.

Zuwendungs-empfänger	Beginn	Ende	Zuwendung	Thema	Kurzbeschreibung
<b>BMBF</b>					
VACOM Vakuum Komponenten & Messtechnik GmbH	01.05. 2017	30.04. 2020	213.771	Verbundprojekt: Optische Einzel-Ionen Uhr für Anwender (optIclock) - Teilvorhaben: Vakuumkomponenten und -kammern aus Aluminium für Ionenuhren	Zur optimalen Erfüllung der technischen Anforderungen an die Vakuumapparatur müssen im hier vorgestellten Teilvorhaben speziell angepasste Komponenten (elektrische Vakuumdurchführungen und optische Vakuumfenster) entwickelt und auf die Aufgabenstellung maßgeschneiderte Vakuumkammern gebaut werden. Die Komponenten und Kammern müssen dabei weitestgehend aus Aluminiumlegierungen ausgeführt werden. Darüber hinaus soll im Teilvorhaben der vakuumseitige, mechanische Aufbau der Ionenfalle UHV-optimiert realisiert werden. In AP1 wird ein kompakter Uhrenlaser entwickelt. Dazu ist es nötig, den Resonator isoliert von Vibrationen und Temperaturschwankungen in einer kompakten Vakuumkammer aus Aluminiumlegierungen zu halten. In AP2 wird eine Paulfalle entwickelt, die in eine leichte und kompakte Vakuumapparatur mit großem optischen Zugang eingebaut wird. Hierfür wird eine passende Verbindungstechnologie zum Fügen der Komponenten an die Kammer entwickelt. Neben der sphärischen Paulfalle wird in einem zweiten Entwicklungszweig in AP3 eine lineare Falle miniaturisiert und in einen kompakten Vakuumaufbau bestehend aus einer kompakten Vakuumkammer aus Aluminiumlegierungen mit integrierten elektrischen Durchführungen eingebaut.

TOPTICA Photonics AG	01.05. 2017	31.10. 2020	1.019.025	Verbundprojekt: Optische Einzel-Ionen Uhr für Anwender (optIclock) - Teilvorhaben: Laserpräparation und Gesamtintegration der optIclock	Im Rahmen des Projekts "Optische Einzelionen-Uhr für Anwender" (optIclock) soll ein Demonstrator einer dauerbetriebsfesten optischen Uhr unter maßgeblicher Beteiligung von Industrieunternehmen entwickelt werden. Höchstpräzise Uhren sind eine der prominentesten Anwendungen der Quantentechnologie. Diese neueste Generation von Uhren basiert auf optischen Übergängen in neutralen Atomen oder geladenen Ionen. Prototypen in führenden internationalen Metrologie-Laboratorien erreichen heute Genauigkeiten von wenigen Teilen in 10 <sup>18</sup> , was einer Gangabweichung von ca. einer Sekunde über das Alter des Universums entspricht. Mit einem solchen Gerät erschließen sich viele kommerzielle Anwendungen mit bisher unerreichter Präzision, wie z. B. im Bereich der Synchronisation von großen Datennetzwerken in der Telekommunikation und von Radioteleskopen, sowie in der Erdbeobachtung zur Messung von Höhendifferenzen und schließlich zur Verbesserung von Zeitskalen und der Navigation in globalen Satelliten-Navigationssystemen wie GPS und GALILEO. Der Lösungsweg ist so gewählt, dass die erforderlichen Untersuchungen und Sonderentwicklungen innovativ aber zeitgleich risikominimiert sind. In drei Hauptsträngen entwickelt TOPTICA führend das Mehrfarbenlasersystem für Präparation, Laserkühlung und Detektion der Yb <sup>+</sup> Ionen, das Lichtverteilungs- und Lichtschaltssystem sowie das Gesamtsystem optIclock bestehend aus zwei 19"-Rack-Schränken. In enger Zusammenarbeit mit HighFinesse wird in einem vierten Hauptstrang an der Frequenzstabilisierung dieses Lasersystems geforscht. An zwei weiteren Arbeitspaketen (Software und Evaluation der optIclock) ist TOPTICA als Gesamtsystemintegrator maßgeblich beteiligt. Für Details siehe dazu die Teilvorhabensbeschreibung.
-------------------------	----------------	----------------	-----------	--	--

Menlo Systems GmbH	01.05.2017	31.10.2020	599.995	<p>Verbundprojekt: Optische Einzel-Ionen Uhr für Anwender (optIclock) - Teilvorhaben: Uhrenlasersystem</p>	<p>Das Ziel des Teilvorhabens ist die Bereitstellung eines robusten, kompakten und ultrastabilen Uhrenlasersystems. Das Uhrenlasersystem ist von zentraler Bedeutung für die Ziele des Verbunds, da die Kurzzeitstabilität der optischen Yb+ Uhr ausschließlich von der Stabilität des Uhrenlasers abhängt. Das vorgeschlagene Uhrenlasersystem ist so konzipiert, dass es unter normalen Laborbedingungen nach Transport justagefrei eingesetzt werden kann. Die anstehenden Aufgaben im Arbeitspaket 1 (Uhrenlasersystem) sind in sieben Unterarbeitspakete unterteilt und entsprechend den Kernkompetenzen der beteiligten Kooperationspartner zugeteilt. Menlo Systems ist für die Gesamtkoordination von Arbeitspaket 1 zuständig und leitet die Unterarbeitspakete 1.2-1.7. Das Arbeitspaket 1.1 (Design &amp; Fertigung des ECDL-Mopa-Moduls (external cavity diode laser-master oscillator power amplifier), &amp; Support) wird von dem FBH und der HUB geleitet. Das Arbeitspaket 1.2 befasst sich mit der prinzipiellen Konzeptionierung des im Projektverlauf zu realisierenden Uhrenlasersystems. Das Arbeitspaket 1.3 befasst sich mit dem Aufbau und der Charakterisierungen eines Prototyps des Uhrenlasersystems bei einer Wellenlänge von 1542 nm. Ziel ist es, sicherzustellen, dass die Kernkomponenten des Uhrenlasersystems funktionsfähig sind und die notwendige Spezifikationen für das Gesamtsystem erreicht werden können. Das Ziel von AP 1.4 ist die Definition der Spezifikationen und Anforderungen für das finale Uhrenlasersystem bei einer Wellenlänge von 871 nm und der einzelnen Systemkomponenten. Danach wird das Uhrenlasersystem bei 871 nm (inklusive SHG und Faserlängenstabilisierung) aufgebaut (AP 1.5) und charakterisiert (AP 1.6). Das letzte Arbeitspaket (AP 1.7) ist der Integration des Uhrenlasers im Gesamtsystem gewidmet.</p>
HighFinesse Laser and Electronic Systems GmbH	01.05.2017	31.10.2020	239.764	<p>Verbundprojekt: Optische Einzel-Ionen Uhr für Anwender (optIclock) - Teilvorhaben: Optische Interferometer für eine MHz-genaue Frequenz-Messung und Regelung von Lasern</p>	<p>Das Ziel des Vorhabens ist die Realisierung eines optischen Interferometers, welches die Frequenz-Messung und Regelung der im Verbundprojekt verwendeten Laser erlaubt. Dabei wird eine bislang unzugängliche Stufe der Genauigkeit für die simultane Messung und Regelung von fünf Laserfrequenzen im MHz-Bereich angestrebt. Ebenfalls neu ist die Anforderung an die Temperaturunempfindlichkeit der zu realisierenden Interferometer, um eine Anwendung außerhalb von Laboratorien zu ermöglichen. Für die Realisierung ist daher die Entwicklung eines gezielt für die geplante Anwendung abgestimmten, hochpräzisen und Temperatur-stabilen Interferometer-Arrays erforderlich. Ebenfalls zu entwickeln sind faseroptische Lichtleiter und -schalter, um Laserlicht in einem breiten optischen Band transversal einmodig an die Interferometer zu führen, sowie integrierte, digitale Messdatenerfassung, -verarbeitung und Regelsignalerzeugung zur Weitergabe an die Lasersysteme.</p>

Rheinische Friedrich- Wilhelms- Universität Bonn	01.05. 2017	30.04. 2020	198.486	Verbundprojekt: Optische Einzel-Ionen Uhr für Anwender (optIclock) - Teilvorhaben: Abbildung und Strahlformung	Das Ziel des Teilvorhabens "Abbildung und Strahlformung" ist die Realisierung und Charakterisierung von kompakten optischen Aufbauten zur Abbildung von Ionen in Ionenfallen sowie zur Abbildung von fasergeführter Laserstrahlung mit achromatischer Strahlformung auf die gefangenen Ionen der sphärischen (Arbeitspaket AP2) und linearen Paulfalle (Arbeitspaket AP3) des Verbundprojektes optIclock. Diese Optiken sind Beiträge zur Entwicklung eines Demonstrators einer optischen Uhr, welcher gegenüber bisherigen Realisierungen in stabilisierten Laborsystemen unerreichte Kompaktheit und Robustheit gegenüber Transporten erfüllt und weiterhin eine computergesteuerte Optimierung der Optiken ermöglicht. Dabei wird die erforderte intrinsische Robustheit durch die zu speziell zu entwickelnden mechanischen Halterungen der Optiken und die Kompaktheit der optischen Systeme erreicht. Zusätzlich werden die Halterungen um elektronisch ansteuerbare, hochpräzise Positioniersysteme ergänzt um nach einem Transportvorgang optimale Betriebsbedingungen automatisch ohne besonderen Nutzereingriff herstellen zu können. In diesem Arbeitspaket sollen Abbildungssysteme für beide Arten von Ionenfallen entworfen sowie aufgebaut und charakterisiert werden. Laserstrahlung unterschiedlicher Wellenlänge muss achromatisch mit einer Strahltaile von ca. 20-30 µm auf das Ion fokussiert werden. Dazu müssen mechanisch hochstabile und elektronisch positionierbare, achromatische Abbildungssysteme für Licht aus Glasfasern auf das Ion entworfen, gebaut und charakterisiert werden. Umgekehrt muss Fluoreszenzlicht bei 370 nm vom Ion mit hoher numerischer Apertur wahlweise auf eine Kamera abgebildet werden. Dies muss in einem möglichst kompakten und kostengünstigen Aufbau für die beiden Ionenfallen mit Vakuumsystemen in AP2 und AP3 realisiert werden. Zudem wird eine hohe Robustheit für Transporte angestrebt.
--	----------------	----------------	---------	--	---

Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB)	01.05.2017	31.10.2020	1.185.587	<p>Verbundprojekt: Optische Einzel-Ionen Uhr für Anwender (optIclock) - Teilvorhaben: Physikalisches Gesamtkonzept einer robusten, dauerbetriebsfesten Ionen-Uhr für den Einsatz außerhalb der Laborumgebung</p>	<p>Ziel des Teilvorhabens der Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) sind Beiträge zur Entwicklung eines Demonstrators einer optischen Uhr, der gegenüber dem existierenden Laborsystem Portabilität und eine anwenderbezogene Bedienung bietet. Bisher sind keine kontinuierlichen Messungen über Zeiträume von Wochen möglich, da die aktuellen Aufbauten in kurzen Abständen manuelle Eingriffe erfordern, wie etwa die Justage optischer Wege und der Laser. Die im Rahmen des Projekts erreichten technischen Verbesserungen und Dauerbetriebsfestigkeit werden es erlauben neue Experimente im Bereich der Grundlagenforschung durchzuführen und in neue Bereiche der Frequenzauflösung vorzustoßen. Hierfür stellt die PTB die Technologie des Laborsystems der optischen Uhr zur Verfügung und entwickelt zusammen mit wissenschaftlichen und industriellen Partnern eine optische Uhr, die die Möglichkeiten der Quantentechnologie für Anwender demonstriert und gleichzeitig in der Grundlagenforschung deutliche Verbesserungen ermöglicht. Im Rahmen des Teilvorhabens sollen Ionenfallen entwickelt werden, die einen robusten optischen Zugang, ein Ultrahochvakuum unter 1E-10 mbar und gleichzeitig niedrige Erwärmung der Umgebung des gespeicherten Teilchens ermöglichen. Zusätzlich soll für die nächste Generation optischer Uhr die Möglichkeit einer Ionenfalle für mehrere Ionen in einem kompakten Aufbau mit guten optischen und elektrischen Zugang untersucht werden. Neben den Physics Packages unterstützt die PTB durch Ihre Expertise auf dem Gebiet hochstabiler Laser die Arbeit der anderen Partner bei der Entwicklung eines dauerbetriebsfesten Uhrenlasers, auch unter erschwerten Bedingungen. Um eine Steuerung der optischen Uhr inkl. diverser Prozesse zur Ausfallsicherheit zu schaffen wird im Rahmen von AP 8 ein Dienstleistungsauftrag an die Firma Quartiq vergeben, die besondere Expertise auf diesem Gebiet besitzt. Final wird das Gesamtsystem in der PTB durch Vergleich mit anderen Atomuhren in AP 10 evaluiert.</p>
---	------------	------------	-----------	--	---

Forschungsverbund Berlin e.V.	01.05.2017	31.10.2020	395.847	<p>Verbundprojekt: Optische Einzel-Ionen Uhr für Anwender (optlock) - Teilvorhaben: Erforschung eines mikrointegrierten Uhren-Lasermoduls</p>	<p>Ziel des Vorhabens ist die Erforschung, Entwicklung und Realisierung von GaAs basierten Diodenlaserchips für den Einsatz in einer bei 871 nm emittierenden kohärenten Strahlquelle, die für den Lokoszillator einer portablen Ytterbium-Ionen-Uhr eingesetzt werden kann. Ferner soll Verfahren der hybriden Mikrointegration erforscht und so umgesetzt werden, dass ein extended cavity Diodenlasermodul mit integriertem Leistungsverstärker implementiert werden kann, das in der portablen optischen Uhr zum Einsatz kommt. In Bezug auf die Chips werden neuartige Chipdesigns entwickelt, die die Realisierung von extended cavity Diodenlaser mit hochstabilem und -reinem Emissionsspektrum ermöglichen sowie Leistungsverstärker mit exzellentem Strahlprofil und reduzierter Spontanemission zur Verfügung stellen. Ferner wird der Einsatz einer weltweit einmaligen Mikrointegrationstechnologie die Masse und den Formfaktor im Vergleich zu kommerziellen Systemen um den Faktor 10 bzw. 100 reduzieren und erstmals für den Feldeinsatz geeignete Lasermodule für eine optische Uhr bereitstellen. Die Arbeitsorganisation des Teilvorhabens gliedert sich in 6 Arbeitspakete. In AP 1.1.1 wird das Design des Lasermoduls erarbeitet, in AP 1.1.2 erfolgt das Design und die Herstellung der Diodenlaser-Chips. In AP 1.1.3 und AP 1.1.4 erfolgt die Untersuchung und Erforschung der Halbleiterchips statt. In AP 1.1.5 wird das UhrenLaserModul mikrointegriert. In AP 1.1.6 umfasst die Unterstützung der Projektpartner bei der Integration des UhrenLaserModuls in das Uhrenlaser System, bei der Integration des Uhrenlaser Systems in die optische Uhr sowie beim Betrieb der optischen Uhr in Bezug auf alle das UhrenLaserModul betreffenden Aspekte.</p>
-------------------------------	------------	------------	---------	---	--

Qubig GmbH	01.05. 2017	31.10. 2020	187.345	<p>Verbundprojekt: Optische Einzel-Ionen Uhr für Anwender (optIclock) - Teilvorhaben: Fasergekoppelte Freistrah-EOMs</p>	<p>Im Rahmen dieses Teilvorhabens soll eine neue Generation elektro-optischer Modulatoren (EOM) entwickelt werden, die den hohen Anforderungen des Gesamtvorhabens hinsichtlich schneller Schaltzeiten, Kompaktheit und Robustheit genügen sollen. Derzeitige Modelle leiden vor allem unter mangelnder thermischer Stabilität, was die Funktionalität des Gesamtsystems in Bezug auf effiziente Prozessführung und vor allem Robustheit beeinträchtigt. Die Entwicklung einer Hybridtechnologie bestehend aus Freistrah-EOMs und Faseroptik soll dies beheben. Ziel ist, durch grundlegend neue Ansätze beim EOM Design und einer speziellen Kristallauswahl die Strahlstabilität von Freistrah-Modulatoren derart zu verbessern, dass selbst die stabile Einkopplung in eine optische Faser mit minimalen Verlusten möglich wird. Das Teilvorhaben "Fasergekoppelte Freistrah-EOMs" ist bezogen auf das Gesamtvorhaben, dem Arbeitspaket AP7 unterzuordnen. Zur Realisierung des Teilprojekts werden von der Qubig GmbH zwei Arbeitspakete vorgesehen. In AP7.2 wird das Ziel verfolgt, eine neue Generation von Freistrah-EOMs zu entwickeln, die durch eine erhöhte Modulationseffizienz sowie einer verbesserten Strahlrichtungsstabilität ausgezeichnet sind. Im Arbeitspaket AP7.7 wird der Versuch unternommen, ein Hybridsystem bestehend aus den in AP7.2 entwickelten Freistrah-EOMs und einer ausgeklügelten Faserkopplungsvorrichtung zu realisieren.</p>
------------	----------------	----------------	---------	--	--

Universität Siegen	01.05. 2017	31.10. 2020	482.100	Verbundprojekt: Optische Einzel-Ionen Uhr für Anwender (optlock) - Teilvorhaben: Kompakter Ionenfallen- Chipträger in Dickschicht- Technologie als Vakuuminerface	Das hier vorstellte Vakuumsystem soll auf kompakte Art UHV-Drucke erlauben und gleichzeitig eine hohe Anzahl an elektrischen Verbindungen auf kleinstem Raum, möglichst ohne zusätzliche Kontaktierungsschritte (und damit zusätzliche Fehlerquellen) bereitstellen. Die hier vorgestellte Lösung für Konnektivität mit Hilfe der Dickschichttechnologie ist für alle Anwendungen auf kleinstem Raum von Interesse. Der Ansatz hat ebenfalls ein mögliches kommerzielles Potential bei Schnittstellen, welche für spezielle Benutzervorgaben maßgeschneidert sind. Kern des Vakuum-Setups wird die auf einen keramischen Halter montierte Falle sein. Der massive keramische Halter bietet eine solide mechanische Basis mit hoher thermischer Leitfähigkeit. Der Chipträger wird auch als Teil des Vakuumsetups fungieren, welches mittels Indiumdichtringen an den Vakuumrezipienten und den optischen Zugang angeschlossen wird. Der Keramikträger wird mit mehreren leitfähigen und isolierenden Schichten im Dickschichtverfahren bedruckt und dient somit als robustes und kompaktes Vakuum-Interface für alle zum Betrieb der Falle notwendigen Spannungen Strömen und Signalen. Der optische Zugang wird durch einen idealerweise metallfreien Viewport mit antireflexbeschichteten Fenstern erreicht. Siegen hat eine ähnliche Konstruktion bereits in Betrieb, welche einen optischen Zugang sowohl für alle Laser als auch für den optischen Nachweis der Kühlfluoreszenz und zur Zustandsbestimmung bietet. Der für dieses Projekt entwickelte Viewport wird antireflex-beschichtet sein für die Wellenlänge des Ionisationslasers bei 399 nm, für den Kühlaser bei 369 nm, sowie die Laser, welche dem optischen Pumpen in D- und F-Zustände entgegenwirken mit Wellenlängen bei 935 und 760 nm. Gegenüber dem in Siegen im Einsatz befindlichen Viewport wird eine Zugang von Lasern aus verschiedenen Raumrichtungen notwendig sein, um die Mikrobewegung der Ionen zu analysieren und zu minimieren.
-----------------------	----------------	----------------	---------	--	--

<p>Robert Bosch Gesellschaft mit beschränkter Haftung</p>	<p>01.08.2017</p>	<p>31.01.2021</p>	<p>586.500</p>	<p>Verbundprojekt: Neuartige Gehirn-Maschine-Schnittstelle basierend auf Quantensensoren (BrainQSens) - Teilvorhaben: Aufbau miniaturisiertes Sensorsystem</p>	<p>Ziel des Projekts ist die Entwicklung einer neuartigen Sensortechnologie die eine Mensch Maschine Interaktion gesteuert über das gezielte Auswerten neuronaler Magnetfelder des Gehirns ermöglicht. Eine solche Anwendung war wegen der fehlenden empfindlichen Sensortechnologie bisher nicht realisierbar, die aber in diesem Projekt durch die Anwendung quantenmechanischer Messprinzipien ermöglicht werden soll. Das Potenzial von Quantensensoren liegt darin begründet, dass in einem Festkörpersensor 10<sup>12</sup> Sensitive atomare Zellen in Festkörpern mit der Größe von 1 mm<sup>3</sup> in kohärenter Anregung für eine Einzelmessung genutzt werden. Im Rahmen der Arbeiten soll die Empfindlichkeit von Dampfzellen und NV-basierten Festkörpermagnetometern durch verbesserte Anregungs- und Abfrageprotokolle zu steigern und diese Quantensensoren zu miniaturisieren. Am Ende des Projekts sollen Magnetfelder des auditiven Kortexes mit einem Demonstrator nachgewiesen werden. Bei der Entwicklung optisch betriebener Quantensensoren müssen Wege gefunden werden, eine effiziente Lichtführung zur optimalen optischen Anregung Lichtsammlung zu erreichen und diese mit der notwendigen Mikrowellentechnologie in einem kompakten Gehäuse zu vereinen. Oberstes Ziel ist das Erreichen hoher Magnetfeldempfindlichkeiten. Bei der Entwicklung endoskopischer Sensorköpfe sollen Ansätze verfolgt werden die ein rein optisches Anregungsschema, ohne zusätzliche Mikrowellenanregung ermöglichen. Um gegen äußere Störfelder robust zu sein sollen hybride Gradiometer-Konfigurationen aus Gaszellen- und Diamantmagnetometern entwickelt werden die Streufeldsignale aus dem Messsignal herausfiltern. Darüber hinaus müssen robuste Software-Algorithmen und Protokolle für die kohärente Kontrolle der verwendeten Quantensysteme und die Auswertung der Messwerte entwickelt werden. Weiterhin wird sich ein Teil der Arbeit auf die Entwicklung von NV-dotiertem Diamant konzentrieren.</p>
---	-------------------	-------------------	----------------	--	---

Universität Stuttgart	01.08. 2017	31.07. 2020	824.328	Verbundprojekt: Neuartige Gehirn- Maschine-Schnittstelle basierend auf Quantensensoren (BrainQSens) - Teilvorhaben: Entwicklung miniaturisiertes Sensorsystem	Mensch-Maschine Schnittstellen (MMS) wie die Maus oder das Touch-Display sind allgegenwärtige und unverzichtbare Bestandteile des täglichen Lebens, ob in der Produktion, der Verwaltung oder im privaten Umfeld. Der nächste logische Schritt wäre das Ersetzen der manuellen Bedienung dieser MMS durch eine berührungslose Interaktion, basierend auf dem gezielten Auswerten von Gedanken im Gehirn. Versuche, solche universell einsetzbaren Gehirn-Maschine Schnittstellen zu schaffen scheitern bisher sowohl an der Ungenauigkeit, Störanfälligkeit, Baugröße und den Kosten der zugrundeliegenden Sensoren. Dieses Projekt möchte auf der Sensorikseite die technologischen Voraussetzungen für eine solche Schnittstelle schaffen, nämlich die Entwicklung eines bei Raumtemperatur arbeitenden Magnetfeldsensors der in der Lage ist, Hirnaktivität bei einer bestimmten Stimulation (z. B. hören eines Tons) zu erfassen und entsprechende Signale des auditiven Kortex nachzuweisen. Dazu soll ein Netzwerk von miniaturisierten, ultraempfindlichen, auf Quanteneffekten beruhenden Magnetfeldsensoren entwickelt werden. Die Forschung in diesem Projekt konzentriert sich sowohl auf Grundlagenaspekte der Magnetfeldmessung in Festkörper-Quantensystemen als auch auf die praktische Implementierung dieser Systeme in eine umsetzbare, miniaturisierbare und kosteneffiziente Technologieplattform. Wir wollen Wege finden, die Empfindlichkeit von Festkörpermagnetometern zu verbessern und den Einfluss von Störsignalen durch Streufelder und das Erdmagnetfeld zu minimieren. Dieser zweite Aspekt der Streufeldunterdrückung soll durch die Kombination von Festkörpermagnetometern (basierend auf Stickstoff-Fehlstellenzentren in Diamant) mit Dampfzellenmagnetometern in einer Magnetfeldgradiometer-Anordnung adressiert werden. Die Streufeldunterdrückung ist Voraussetzung dafür, eine universelle Nutzung dieser Sensoren zur Hirnaktivitätserkennung außerhalb abgeschirmter Räume unter normalen Umgebungsbedingungen zu ermöglichen.
--------------------------	----------------	----------------	---------	--	---

Johannes Gutenberg-Universität Mainz	01.08.2017	31.01.2021	428.640	Verbundprojekt: Neuartige Gehirn-Maschine-Schnittstelle basierend auf Quantensensoren (BrainQSens) - Teilvorhaben: Alkali-Gas Magnetometrie, endoskopische Magnetometrie Systeme und Alkali-NV Gradiometrie	Mensch-Maschine Schnittstellen (MMS) wie die Maus oder das Touch-Display sind allgegenwärtige und unverzichtbare Bestandteile des täglichen Lebens, ob in der Produktion, der Verwaltung oder im privaten Umfeld. Der nächste logische Schritt wäre das Ersetzen der manuellen Bedienung dieser MMS durch eine berührungslose Interaktion, basierend auf dem gezielten Auswerten von Gedanken im Gehirn. Versuche, solche universell einsetzbaren Gehirn-Maschine Schnittstellen zu schaffen scheitern bisher sowohl an der Ungenauigkeit, Störanfälligkeit, Baugröße und den Kosten der zugrundeliegenden Sensoren. Dieses Projekt möchte auf der Sensorikseite die technologischen Voraussetzungen für eine solche Schnittstelle schaffen, nämlich die Entwicklung eines bei Raumtemperatur arbeitenden Magnetfeldsensors der in der Lage ist, Hirnaktivität bei einer bestimmten Stimulation (z. B. hören eines Tons) zu erfassen und entsprechende Signale des auditiven Kortex nachzuweisen. Dazu soll ein Netzwerk von miniaturisierten, ultraempfindlichen, auf Quanteneffekten beruhenden Magnetfeldsensoren entwickelt werden.
Universität Ulm	01.08.2017	31.07.2020	418.170	Verbundprojekt: Neuartige Gehirn-Maschine-Schnittstelle basierend auf Quantensensoren (BrainQSens) - Teilvorhaben: Kohärente Kontrolltechniken für Diamant-Sensoren	Dieses Teilvorhaben möchte auf der Sensorikseite die technologischen Voraussetzungen für die Entwicklung eines bei Raumtemperatur und unter Umgebungsbedingungen (unter normalen Hintergrundfeldern wie dem Erdmagnetfeld) arbeitenden Magnetfeldsensors schaffen, der in der Lage ist, Hirnaktivität bei einer bestimmten Stimulation (z. B. durch Hören eines Tones) zu erfassen und entsprechende Signale des auditiven Kortex nachzuweisen.
Johannes Gutenberg-Universität Mainz	01.09.2018	31.08.2021	308.400	Verschränkte Rydbermaterie für Quantensensoren und Quantensimulatoren (ERyQSenS)	JGUM wird, in Zusammenarbeit mit den Partnern im EU Netzwerk, einen Sensor für elektrische und für Mikrowellen-Felder aufbauen, optimieren und betreiben. Zusätzlich zu der hohen Empfindlichkeit, die durch die speziellen Eigenschaften der Rydbergzustände erreicht wird, hat er eine sub- $\mu\text{m}$ räumliche Auflösung. Zusätzlich untersucht JGUM ein Rydberg-Ionen Mikroskop. JGUM simuliert räumliche Strukturänderungen in Ionenkristallen, induziert durch Rydberg Anregungen.

Universität des Saarlandes	01.06.2018	31.05.2022	252.264	<p>Verbundprojekt: Non-equilibrium dynamics in Atomic systems for QUAntum Simulation (NAQUAS) - Teilvorhaben: Theorie der Nichtgleichgewicht-Dynamik von atomaren Systemen in optischen Resonatoren</p>	<p>Der Fortschritt in unterschiedlichen Gebieten der Physik hat es erlaubt, die Kontrolle von Quantendynamik in spezifischen Systemen und Materialien zu realisieren und damit den Weg zu Quantentechnologien geebnet. Das jedoch erfordert jetzt, dass man die offenen Probleme der statistischen Physik der Nichtgleichgewicht-Prozesse untersucht und versteht, um die Kontrolle der Quantendynamik von Vielteilchensystemen zu erreichen. Dieses Projekt widmet sich der Untersuchung und Kontrolle der Nichtgleichgewicht-Eigenschaften von Quanten-Vielteilchensystemen, deren Dynamik in der Nähe eines Quanten-Phasen-Übergangs von äußeren Kräften getrieben wird. Insbesondere liegt der Fokus unserer Forschung auf langsamen zeitlichen Änderungen der antreibenden Kräfte und stützt sich auf dem sogenannten Kibble-Zurek-Paradigma (KZM). Dieses Paradigma verbindet Gleichgewicht- mit Nichtgleichgewicht-Eigenschaften von kritischen Systemen und liefert einen wichtigen Benchmark von Hypothesen, die auf universellen Skalierungsgesetzen basieren. In diesem Projekt werden wir die Vorhersagekraft des KZ-Paradigmas aufklären und es erweitern, indem quantenkritische Systeme untersucht werden, deren Komponenten durch lang-reichweitige Kräfte wechselwirken und/oder die von topologischen Phasen-Übergängen in Gleichgewicht charakterisiert sind. Für diesen Zweck werden wir innovative theoretische Konzepte der Physik der kondensierten Materie, der Quantenoptik, der statistischen Physik, und der Quanten-Information durch fortgeschrittene Experimente mit Quanten-Gasen von ultrakalten Atomen verifizieren. Auf kurze Sicht gesehen werden wir diese Kenntnisse nutzen, um durchführbare Protokolle für Quanten-Simulatoren zu entwickeln. Wir erwarten, dass die Ergebnisse dieses Projekts einen Schlüsselbeitrag liefern werden für die Entwicklung der nächsten Generation von Quanten-Simulatoren.</p>
Technische Universität München	01.04.2018	30.06.2021	210.000	<p>Verbundprojekt: Quantum Code Design and Architecture (QCDA) - Teilvorhaben: Architekturen für kontinuierliche Variablen</p>	<p>Fehlerkorrigierende Methoden sind für die Quanteninformationsverarbeitung von zentraler Bedeutung. Typischerweise basieren diese auf Codes, die Information redundant in endlich-dimensionale Quantensysteme (Qubits) einbetten. Ziel dieses Vorhabens ist es, entsprechende Verfahren für kontinuierliche, also bosonische Quantensysteme zu entwickeln. Insbesondere sollen Codierungs/Decodierungsverfahren unter Verwendung limitierter technologischer Ressourcen, sowie die aktive Stabilisierung und Manipulation codierter Information untersucht werden.</p>

Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.	01.04.2018	31.03.2021	206.690	Verbundprojekt: Quantum Technologies For Lattice Gauge theories (QTFLAG) - Teilvorhaben: Klassische und Quanten-Simulation von Gittereichtheorien	Quanteneichfeldtheorien bilden einen grundlegenden Teil unseres Verständnisses der Teilchenphysik. Ihre diskrete Formulierung als Gittereichtheorien, eingeführt durch Wilson, liefert eine leistungsfähige Möglichkeit, sie auch in nichtstörungstheoretischen Regimen zu berechnen. Die übliche Formulierung sorgt für intrinsische Limitationen, wie die Simulation von Echtzeitdynamiken. Es ist daher von fundamentalem Interesse, neue Ansätze zu entwickeln. Dies ist das Ziel des QTFLAG-Projektes, das sich auf die Entwicklung von Quantentechnologien für diese speziellen Zielsetzungen fokussieren wird. Die theoretische Forschung wird zwei Richtungen verfolgen, nämlich die klassischen Simulationen basierend auf Tensornetzwerken und die Quantensimulationen.
Universität des Saarlandes	01.04.2018	31.03.2021	229.660	Verbundprojekt: Quantum Technologies For Lattice Gauge theories (QTFLAG) - Teilvorhaben: Tensornetzwerkmethoden für Quantenlinkmodelle	Eichtheorien beschreiben fundamentale Naturvorgänge wie die Interaktion elementarer hochenergetischer Teilchen im Standardmodell oder Frustration und topologische Ordnung in kondensierter Materie. Obgleich diese Systeme an zentraler Stelle unseres Verständnisses grundlegendster Prozesse stehen, entziehen sie sich den meisten Untersuchungsansätzen jenseits des störtheoretischen Regimes, sobald Echtzeitdynamik, endliche fermionische Dichten und andere Probleme mit komplexer Wirkung auftreten, und das berühmte Vorzeichenproblem die Erfolgsaussichten von Monte-Carlo-Methoden beschneidet. Die Entwicklung neuartiger Ansätze ohne solche Einschränkungen wird den Weg zu noch nie dagewesenen Forschungsmöglichkeiten und Entwicklungen ebnen. Projektziel ist die Entwicklung quantenbasierter experimenteller und theoretischer Werkzeuge ohne Vorzeichenproblem zur Simulation stark korrelierter Vielkörperquantensysteme mit abelschen und nicht-abelschen dynamischen Freiheitsgraden und zur Anwendung bei der Untersuchung niederdimensionaler Eichtheorien. Das Projekt wird klassische Simulationsmethoden auf Basis von Tensornetzwerken entwerfen und Quantensoftware auf experimentellen Quantensimulationsplattformen entwickeln und betreiben. Die klassischen und die Quantensimulationsansätze sind verbunden und profitieren von dem jeweils anderen, können aber als Werkzeuge das Forschungsziel eigenständig erreichen, was die Erfolgchancen des Gesamtprojektes erhöht. Dieses Teilprojekt widmet sich der Entwicklung und Anwendung von Tensornetzwerkmethoden, um die Quanten-Link-Repräsentation von Gittereichtheorien zu untersuchen. Das Hauptziel besteht darin, unter Ausnutzung der kürzlich eingeführten Plattform einige der schwierigsten Probleme aus der Forschung anzugehen. Darüber hinaus werden die Entwicklung experimenteller Werkzeuge und Ansätze unterstützt, um in Zusammenarbeit mit den experimentellen Gruppen im Konsortium die Quantensimulation von Gittereichtheorien durchzuführen.

Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen	01.04.2018	31.03.2021	293.760	Verbundprojekt: Langreichweitiger Quantenbus für Elektronenspins in Silizium (SiQuBus) - Teilvorhaben: Transfer und Manipulation von Spinqubits in einem SiGe-Quantenbus	Elektronenspins in Silizium sind äußerst vielversprechend für die Repräsentation eines Quantenbits, weil zum einen gatterbasierte Elektronenfallen aufgrund der industriellen Siliziumtechnologie skalierbar herstellbar sind, und zum anderen der Elektronenspin hervorragende Kohärenzzeiten aufweist. Fehlender Baustein für eine skalierbare Quantencomputerarchitektur ist die kohärente Übertragung von Quanteninformation auf einer Distanz von ca 10 Mikrometern. Ein solcher Quantenbus (QuBus) schafft Raum für elektrische Zuleitungen und geg. klassische Kontrollelektronik auf dem Chip. Ziel des Teilvorhabens ist die Realisierung eine QuBus mit Hilfe einer linearen Anordnung von metallischen Gattern auf einer Silizium-Germanium-Quantentopf-Heterostruktur, die eine bewegliche Elektronenfalle bei einer Temperatur von 10 mK realisiert. Mithilfe von elektrischen Wechselfeldern können so einzelne Elektronenspins kohärent und lateral entlang der Heterostruktur mit einer Geschwindigkeit von 1 bis 10 m/s bewegt werden. Dieser Ansatz wird mit QuBit-Manipulation mittels elektrischer Wechselfelder kombiniert, so dass verschränkte Qubit-Paare generiert werden können, die zur Teleportation eines Quantenzustands auf QuBus-Länge genutzt werden können.
---	------------	------------	---------	--	---

Freie Universität Berlin	01.04.2018	31.03.2021	214.800	Verbundprojekt: 2D hybrid materials as a platform for topological quantum computing (TOPOQUANT) - Teilvorhaben: Theorie zu 2D Hybridmaterialien als Plattform für topologische Quantenrechner	Der zu erwartende topologische Schutz in Majorana-Qubits verspricht dekohärenzfreie und fehlertolerante Quanteninformationsverarbeitung. Dank materialtechnischer und experimenteller Fortschritte der letzten Jahre ist es in mehreren Forschungslaboratorien Routine geworden, individuelle Majorana-Zustände zu realisieren und zu beobachten. Der Gesamtverbund wird die Forschung zu Majorana-Zuständen auf zweifache Weise auf die nächste Ebene heben. Erstens werden wir sauberere InAs-basierte Systeme sowie neuartige InSb-Systeme entwickeln, die die Integration mehrerer Majorana-Drähte ermöglichen. Zweitens werden wir die schnelle elektronische Steuerung sowie die Messtechniken optimieren, die direkt angewendet werden können, um die physikalischen Eigenschaften von Majorana-Zuständen zu untersuchen und grundlegende Quantenoperationen zu implementieren. Dieses Teilvorhaben ergänzt die experimentellen Anstrengungen des Konsortiums um ein abgestimmtes theoretisches Programm. Die theoretischen Anstrengungen zielen zunächst auf eine detaillierte und realistische Modellierung der experimentellen Nanobaelemente und auf eine Unterstützung bei der Interpretation der Messungen. Darüber hinaus wird das Projekt intrinsisch theoretische Forschung beinhalten, die in das experimentelle Programm rückkoppeln wird. Erstens wird es um ein umfassendes und mikroskopisches Verständnis der Quasiteilchenvergiftung in diesen Devices gehen. Zweitens wird sich die Theorie darauf konzentrieren, neue experimentelle Möglichkeiten für die Majorana-Physik vorzuschlagen und zu analysieren, die als Ergebnis der experimentellen Entwicklungen in diesem Konsortium verfügbar werden.
Forschungsverbund Berlin e.V.	01.06.2018	31.05.2021	290.400	Verbundprojekt: Polariton lattices: a solid-state platform for quantum simulations of correlated and topological states (InterPOL) - Teilvorhaben: Entwicklung von Polaritonengittern mit korrelierten und topologischen Zuständen für die Quantensimulation	Das Ziel des Teilvorhabens am Paul-Drude-Institut (PDI) ist die Untersuchung und Herstellung von Polaritonengittern in Halbleiter-Mikrokavitäten, die für Quantensimulationen geeignet sind. Hierfür werden sowohl statische Gitter untersucht, die mittels eines mehrstufigen Molekular-Strahl-Epitaxie-Prozesses hergestellt werden, als auch durchstimmbare Gitter, die durch die Modulation von akustischen Oberflächenwellen ("surface acoustic waves", SAWs) erzeugt werden. Die Gitter werden für Quantensimulatoren mit stark korrelierter Phasen und topologischen Schutz eingesetzt.

Universität Ulm	01.04. 2018	31.03. 2021	276.168	Verbundprojekt: Scalable Electrically Read Diamond Spin Qubit Technology for Single Molecule Quantum Imagers (Q- Magine) - Teilvorhaben: Durch Quantentechnologie unterstützte Einzelmolekül - NMR- Spektroskopie	Q-Magine bietet einen revolutionären Ansatz für NV-Spinmessungen, indem es eine hybride photoelektrische Detektion von NV-Elektronenspins bei Raumtemperatur entwickelt. Diese Technik erhöht das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) im Vergleich zu optischen Ausleseverfahren. Die elektrische Ausleseverfahren wird genutzt, um eine Strukturanalyse Verfahren einzelner Proteine auf einem "Quantenchip" zu ermöglichen. Diese Technologies hat ein hohes Anwendungspotenzial in der Biologie. Das Ulmer Team wird sich auf die Entwicklung neuer hochauflösender Sensorik Verfahren konzentrieren und diese mit der elektrischen Auslesung von NV-Zentren Spin kombinieren. Q-Magine Sensoren basieren auf der photoelektrischen Detektion von magnetischen Resonanzen (PDMR) von NV-Diamant-Spins. Diese Technik (Abb.1) wurde kürzlich von den Antragstellern gemeinsam eingeführt. Die kohärente Spinmanipulation und die elektrische Auslesung auf einem Chip wurden demonstriert und zum Patent angemeldet. Der Vorteil von PDMR gegenüber der Optischen Detektion der Magnetresonanz (ODMR), die derzeit weit verbreitet für die Auslesung von NV-Spin ist, liegt bei ~ 1000 (und mehr) mal höheren Signalraten, Miniaturisierung, Kompaktheit, Skalierbarkeit und der Möglichkeit der Anbindung an die Peripherieelektronik. Das Q-Magine-Projekt befasst sich mit der Entwicklung eines einzelnen NV-Diamant-Chips, der Modellierung der Bauteilantwort und fortschrittlichen Quantenausleseprotokollen. Diese Technik wird zum ersten Mal für Sensing-Protokolle eingesetzt, um Technologien zu entwickeln, die die Detektion einzelner Moleküle mittels NMR-Detektion ermöglichen.
Universität Ulm	01.06. 2018	31.05. 2021	223.140	Verbundprojekt: Spin- based nanolytics - Turning today's quantum technology research frontier into tomorrow's diagnostic devices (NanoSpin) - Teilvorhaben: Entwicklung der Kernspinresonanz auf der Nanoskala	Dank ihrer unübertroffenen Spezifität, sind die spin-basierten Analysemethoden Kernspinresonanzspektroskopie (NMR) und Elektronenspinresonanzspektroskopie (ESR) Methoden die eine zentrale Rolle in Biologie, Chemie, Medizin und Physik spielen. Sowohl NMR als auch ESR sind limitiert durch die bei Raumtemperatur sehr kleine thermischen Polarisierung der Proben. Die daraus resultierende eingeschränkte Sensitivität und die hohen Gerätekosten verhindern ihre weite Verbreitung und beschränken diese auf eine relative kleine Zahl von spezialisierten Gruppen, die die hohen Anschaffungs- und Betriebskosten leisten können. Das NanoSpin-Projekt greift dies Problematik mit dem Ziel auf, eine hocheinsensitive Spinanalytik zu entwickeln und diese auf kostengünstigen Chipstrukturen zu integrieren und dadurch weithin nutzbar zu machen. Ulmer Teilprojekt wird Hyperpolarisationsverfahren des Nanospin-Konsortiums zur nanoskaligen Kernspinresonanz nutzen.

NVision Imaging Technologies GmbH	01.06.2018	31.05.2021	279.060	Verbundprojekt: Spin-based nanolytics - Turning today's quantum technology research frontier into tomorrow's diagnostic devices (NanoSpin) - Teilvorhaben: Diamantbasierte Hyperpolarisation für die NMR-Spektroskopie	Das NanoSpin-Konsortium wird Forschungen in den Bereichen der theoretischen und experimentellen Physik, der Materialwissenschaften, der NMR-Spektroskopie sowie der Elektrotechnik mit dem Ziel betreiben, die diamantbasierte Hyperpolarisation als Methodik zur signifikanten Performancesteigerung bei der spinbasierten Analytik (NMR- und ESR-Spektroskopie) zu etablieren. Dabei soll sowohl der Prototyp eines portablen, kombinierten Hyperpolarisations-NMR-ESR-Spektrometers entstehen als auch die Verwendung der Methodik in kommerziellen NMR-Spektrometern prototypisch realisiert werden. Um die wissenschaftlichen Durchbrüche im Bereich der diamantbasierten Hyperpolarisation auf Geräte für Anwendungen zu übertragen, wird NVision die bei USTUTT entwickelte IC-Spektrometerhardware und -software mit dem hergestellten Diamantkern integrieren, um mit zusätzlich integrierter optischer Anregung, verbesserter Probenhandhabung und Hyperpolarisierungssoftware und -steuerung folgende Ergebnisse zu erzielen: Ein DNP-fähiges tragbares EPR / NMR-Spektrometer für extrem empfindliche NMR- und EPR-Detektion von Nanolitervolumen
Universität Stuttgart	01.06.2018	31.05.2021	302.904	Verbundprojekt: Spin-based nanolytics - Turning today's quantum technology research frontier into tomorrow's diagnostic devices (NanoSpin) - Teilvorhaben: Integrierte Schaltungen für die Steuerung und das Auslesen von Kern- und Elektronenspins bei der diamantbasierten Hyperpolarisation	Das NanoSpin-Konsortium wird Forschungen in den Bereichen der theoretischen und experimentellen Physik, der Materialwissenschaften, der NMR-Spektroskopie sowie der Elektrotechnik mit dem Ziel betreiben, die diamantbasierte Hyperpolarisation als Methodik zur signifikanten Performancesteigerung bei der spinbasierten Analytik (NMR- und ESR-Spektroskopie) zu etablieren. Dabei soll sowohl der Prototyp eines portablen, kombinierten Hyperpolarisations-NMR-ESR-Spektrometers entstehen als auch die Verwendung der Methodik in kommerziellen NMR-Spektrometern prototypisch realisiert werden. Das an der Universität Stuttgart durchgeführte Teilvorhaben beschäftigt sich dabei mit der Erforschung und prototypischen Realisierung neuer Hardware Anrege- und Auslesekonzepte für die ESR- und NMR-Spektroskopie. Durch das sehr hohe Miniaturisierungspotential sowie die erheblich geringeren Fertigungskosten der verwendeten integrierten Schaltungstechnik gegenüber konventionellen Ansätzen eröffnen die Ergebnisse dieses Teilvorhabens vollständig neue Märkte für die spinbasierte Analytik wie z. B. den Markt der personalisierten Medizin.

Universität Ulm	01.06. 2018	31.05. 2021	188.028	Verbundprojekt: Spin-based nanalytics - Turning today's quantum technology research frontier into tomorrow's diagnostic devices (NanoSpin) - Teilvorhaben: Entwicklung von Quantenkontrollmethoden zur diamantbasierten Hyperpolarisation und zur Entwicklung der Kernspinresonanz auf der Nanoskala	Das gesamte NanoSpin-Konsortium verfolgt das Ziel, durch Forschungsarbeiten in den Bereichen theoretische Physik, Experimentalphysik, Materialwissenschaften, Chemie und Ingenieurwissenschaften, die diamantbasierte Hyperpolarisation als Methodik für die spinbasierte Analytik bereitzustellen.
Leibniz Universität Hannover	01.04. 2018	31.03. 2021	365.352	Verbundprojekt: Controlling EPR and Bell correlations in Bose-Einstein condensates (CEBBEC) - Teilvorhaben: Inertialsensor jenseits des Standard-Quantenlimits	Dieses Projekt vereint Wissenschaftler aus den Feldern Quanteninformationstheorie, Bose-Einstein-Kondensation und Atominterferometrie, um Einstein-Podolsky-Rosen- und Bell-Verschränkung in Bose-Einstein-Kondensaten zu erzeugen, zu detektieren und nutzbar zu machen.

Universität Konstanz	01.04. 2018	31.03. 2021	289.200	Verbundprojekt: Optomechanische Quantensensoren bei Raumtemperatur (QuaSeRT) - Teilvorhaben: Nanomechanische Plattform für kohärente Messprotokolle (NanoKoM)	Das Projekt QuaSeRT setzt sich zum Ziel, optomechanische Quantensensoren bei Raumtemperatur zu realisieren. Um kohärente Messprotokolle bereits vor dem Erreichen des quantenmechanischen Grundzustands charakterisieren und untersuchen zu können, soll eine klassische Testplattform implementiert werden, mit der kohärente Zustandsmanipulationen erforscht werden können. Zu diesem Zweck wird ein nanomechanisches Zwei-Moden-System verwendet, welches durch die beiden stark gekoppelten fundamentalen Biegemoden eines nanomechanischen Saitenresonators realisiert wird. Dieses System erfüllt alle dafür erforderlichen Voraussetzungen: Eine hohe mechanische Güte bei Raumtemperatur und damit eine lange Kohärenzzeit, fein abgestimmte Eigenfrequenzkontrolle über dielektrische Signalwandlung, sowie eine starke Kopplung und damit die Durchführbarkeit kohärenter Operationen innerhalb der Kohärenzzeit. Grundsätzlich ist bekannt, dass derartige Zwei-Moden-Systeme gekoppelter harmonischer Oszillatoren Analogien zur Dynamik von quantenmechanischen Zwei-Niveau-Systemen aufweisen. Allerdings sind diese quanten-klassischen Analogien experimentell nur wenig erforscht, und beschränken sich auf Landau-Zener Übergänge und einfache Blochkugel-Manipulationen. Ziel des vorliegenden Teilvorhabens ist die systematische Untersuchung und experimentelle Nutzung des Zwei-Niveau-Systems als Testplattform zur kohärenten Zustandskontrolle. Dies beinhaltet einerseits die Implementierung klassischer Shortcuts to Adiabaticity, mit denen Zustände auf schnellerem Wege als durch einen adiabatischen Übergang präpariert werden können, andererseits die Untersuchung klassischer Superpositionszustände und klassischer Interferometrie zur Zustandsdetektion.
-------------------------	----------------	----------------	---------	--	---

Westfälische Wilhelms- Universität Münster	01.04. 2018	31.03. 2021	299.520	Verbundprojekt: Organic Quantum Integrated Devices (ORQUID) - Teilvorhaben: Nanophotonische Quantenschaltkreise	Unsere Gesellschaft ist auf sicherer Kommunikationswege, leistungsstarke Rechner und präzise Sensoren angewiesen. Technologien um solche zu realisieren können drastisch verbessert werden wenn in ihnen Quantenobjekte eingesetzt werden die miteinander kooperieren. Dadurch lassen sich große Datenmengen physikalisch sicher speichern und verarbeiten, sowie Präzisionsmessungen von Kräften und Feldern durchführen. Einzelne Quanten – Photonen, Elektronen und Phononen – stellen bereits neue Funktionalität zur Verfügung. Um Quantentechnologien jedoch erfolgreich einsetzen zu können ist es notwendig unterschiedliche Quantensysteme miteinander zu verbinden, auf skalierbare und praktikable Art und Weise. Im ORQUID Projekt sollen einzelne organische Moleküle als Schnittstelle zwischen den obigen drei Quantensystemen verwendet werden. Einzelmoleküle sollen mit Licht in Wellenleitern und Kavitäten interagieren um einzelne Photonen zu erzeugen und zu detektieren, als direkte Verbindung zur Quantenphotonik. Einzelmoleküle sollen ebenfalls bewegliche Ladungsträger in nanoelektronischen Schaltkreisen detektieren um koheränten Informationsaustausch zwischen Ladungen und der Umgebung zu erlauben. Weiterhin sollen Einzelmoleküle die in nanomechanische Bauteile und zweidimensionale Materialien eingebettet sind dazu verwendet werden nanoskalige Kräfte und Auslenkungen zu messen. Durch die Umsetzung dieser drei Schnittstellen auf einer gemeinsamen Plattform sollen flexible Hybridsysteme erstellt werden um Quantentechnologien nutzbar zu machen.
---	----------------	----------------	---------	---	---

<p>Leibniz Universität Hannover</p>	<p>01.07. 2018</p>	<p>30.06. 2021</p>	<p>410.107</p>	<p>Verbundprojekt: Trapped Atom Interferometers in Optical Lattices (TAIOL) - Teilvorhaben: Experimentelle und theoretische Untersuchung von gefangenen Atominterferometern in optischen Gittern</p>	<p>Das Teilprojekt zielt darauf ab, Probleme zu lösen, die bisher den Skalierungsfaktor oder die Genauigkeit von Atominterferometern einschränkten. Durch das Verschieben aktueller Limitierungen können diverse Arten von Kräften (Trägheit, Elektromagnetismus, Gravitation usw.) von fundamentaler oder angewandter Relevanz präzise erfasst werden. Das anzugehende Problem besteht darin die kohärente Trennung zwischen gefangenen atomaren Ensembles von wenigen Mikrometern auf mehrere Millimeter zu erhöhen. Experimentell wird dies durch die Ansteuerung von zwei gegenläufigen Bloch-Gittern realisiert, die einen symmetrischen Strahlteiler realisieren. Die anfängliche Trennung eines atomchippgenerierten BEC wird mit Hilfe eines Doppel-Bragg-Strahlteilerpulses durchgeführt, der es erlaubt, jedes Gitter mit einer Resonanzgeschwindigkeitsklasse zu speisen. Diese hochsymmetrische Konfiguration hat klare Vorteile gegenüber früheren Ansätzen, was die Vermeidung von anfänglichen Verlusten von Atomen, die Aufhebung systematischer Effekte, und die Möglichkeit betrifft, den Einsatz von Tausenden von Photonenrückstößen anzustreben, dank der Verwendung von delta-kicked kollimierten BECs mit sub-nK Expansionsenergien. In den Blochgittern erfolgt für die gesamte Dauer des Interferometers ein transversaler Einschluss. Diese eingeschlossene Konfiguration erlaubt es, die begrenzte Driftzeit in frei fallenden Atominterferometern zu umgehen. Alle Schritte dieser experimentellen Sequenz werden einer sorgfältigen Modellierung und Simulation unterzogen, um sie zu optimieren und einen Betrieb an den fundamentalen Grenzen des Systems zu ermöglichen. Die Verwirklichung der Ziele des Teilprojekts hat für das gesamte Konsortium eine klare Bedeutung, da die Multi-Gitter-Splitting-Techniken gemeinsam mit zwei weiteren Partnern (CNR-INO und SYRTE für Beat-Gitter) erforscht werden.</p>
<p>Technische Universität München</p>	<p>01.08. 2018</p>	<p>31.07. 2023</p>	<p>4.488.552</p>	<p>Modulare Photonische Quantentechnologien (MOQUA)</p>	<p>In den letzten Jahren haben sich nano-photonische Technologien hin zum Limit einzelner Photonen entwickelt und grundlegende Experimente haben die Machbarkeit einzelner Komponenten für sichere Kommunikation und dezentrale Quantennetzwerke nachgewiesen. Dennoch benötigt der Übergang von Machbarkeitsstudien zu ernsthaften Anwendungen weitere erhebliche Verbesserungen hinsichtlich Geschwindigkeit und Genauigkeit sowie eine modulare Implementierung der einzelnen Komponenten, wodurch der wichtige Aspekt der Skalierbarkeit ermöglicht wird. Das Ziel dieses Projektvorschlages ist die Entwicklung von modularen Bauelementen die essentiell sind für zukünftige photonische Quantentechnologien, wie Quantenkommunikation und dezentrale Quanteninformationsverarbeitung mittels eines "Quanten-Internets". Weiterhin soll ihr Potential nachgewiesen und optimiert werden indem sie für bahnbrechende Experimenten kombiniert werden, welche ihrerseits neuartige Quantentechnologien ermöglichen.</p>

Universität Stuttgart	01.08. 2018	31.07. 2021	307.608	Verbundprojekt: Theory blind Quantum control (TheBlinQC) - Teilvorhaben: Experimenteller Nachweis der blinden Quantenkontrolle	In dem Verbundprojekt entwickeln mehrere Theoriegruppen ein Softwarepaket, dass schliesslich an einem experimentellen Aufbau (stark wechselwirkende Rydbergatome) getestet und anhand der erzielten experimentellen Ergebnisse weiterentwickelt wird.
Max-Planck- Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.	01.07. 2018	30.06. 2021	604.887	Verbundprojekt: Towards Room Temperature Quantum Technologies (RouTe) - Teilvorhaben: Licht- Materie- Quantenplattformen im Regime der starken Kopplung	Traditionell wird Licht als das Werkzeug schlechthin angesehen, um die Dynamik von atomaren Anregungen oder interner molekularer Vibrationen zu manipulieren. In jüngster Zeit ist jedoch erkannt worden, dass die starke Modifikation elektromagnetischer Moden in Nanowellenleitern und Mikroresonatoren einen genauso wirkungsvollen Mechanismus bereitstellt. Unser Ansatz besteht darin starke Kopplung als effektiven Mechanismus zu etablieren um damit beispielsweise Quantennetzwerke oder Vakuum-veränderte Materialien zu realisieren. Wir verwenden dabei zwei komplementäre Ansätze. Im ersten muss jedes einzelne Molekül entlang eines Nanowellenleiters kontrolliert werden (MPL). Beim zweiten wird eine Vielzahl von organischen Molekülen (die genaue Zahl ist weder bekannt noch entscheidend) an einen Mikroresonator gekoppelt (MPSD). Die zweite Plattform zeigt bereits erste kohärente Dynamiken. Aufgrund dieses Ergebnisses ist ein Hauptziel dieses Teilvorhabens in Zukunft durch Vakuum-Modifikation als Werkzeug, neuartige Materialien mit verbesserten Transporteigenschaften und chemischen Eigenschaften zu entwickeln (MPSD). Der erste Ansatz versucht stattdessen auf mikroskopischer Ebene Licht-Materie- Wechselwirkung zu verstehen, um einen Weg aufzuzeigen, wie man zu rauschgeschützten Quantennetzwerken kommt (MPL). Dazu muss eine definierte Anzahl von Molekülen, zunächst mit elektrischen Feldern so manipuliert werden, dass alle Emissionsfrequenzen gleich sind. Bei genügend starker Kopplung an den Wellenleiter wird dies zu neuartigen kollektiven Effekten führen. Das System wird im weiteren als eine Testumgebung für die Implementierung von kürzlich neuentwickelten theoretischen Konzepten verwendet, welche verdeutlichen, dass stark gekoppelte Ensembles von Quantenemittern in der Empfindlichkeit bezüglich Frequenzmessungen und bei der Bildung von robusten Quanteninformationsspeichern, nichtwechselwirkende Ensembles von Quantenemittern bei weitem übertreffen.

<p>Leibniz Universität Hannover</p>	<p>01.08. 2018</p>	<p>31.07. 2022</p>	<p>1.616.760</p>	<p>Quanteninertialsensor mit geführten Materiewellen (QuIS-g)</p>	<p>Optik ohne Fasern ist heute im Alltag, etwa im Automobilbau, unvorstellbar. Im Projekt-vorschlag Quanteninertialsensor mit geführten Materiewellen (QuIS-g) soll der Technologiesprung von Freistrahloptik zu Fasern auf Materiewellen übertragen und ein Inertialsensor beruhend auf einem Interferometer mit geführtem ultra-kaltem Kalium realisiert werden. Mithilfe der erwarteten hohen Empfindlichkeit und überragenden Langzeitstabilität eines solchen Sensors gegenüber konventionellen Inertial Measurement Units (IMU) soll die derzeit bestehende gegenseitige Abhängigkeit von Inertial-navigationssystemen und GNSS beseitigt werden. Generell bietet das Führen von Atomen in optischen Wellenleitern gegenüber Lichtpulsuminterferometern die Vorteile eines erheblich größeren Dynamikbereichs sowie intrinsisch simpler Änderung des modus operandi, beispielsweise zwischen Empfindlichkeit auf Rotationen oder Beschleunigungen auf verschiedenen Achsen. Insbesondere wird bereits mit konservativen Annahmen eine durch Quantenprojektionsrauschen limitierte Empfindlichkeit pro Zyklus auf Beschleunigungen <math>\sigma_a = 5 \times 10^{-7} \text{ m/s}^2</math> und auf Rotationen <math>\sigma_{rot} = 5 \times 10^{-6} \text{ rad/s}</math> erwartet. Dabei erlaubt die Wahl des Elements Kalium die effiziente Kontrolle von inneratomaren Interaktionen durch externe Magnetfelder und hebt somit bisher vorherrschende Dichtelimitierungen auf. Insgesamt ermöglicht dieses Projekt für die Zukunft den breiten industriellen und kostengünstigen on-board-Einsatz kompakter Quantensensoren für die autonome Navigation in Bereichen schlechter oder nicht-vorhandener Abdeckung durch GNSS und schließt damit eine bedeutende Lücke, z. B. in der konkreten Anwendung für autonomes Fahren von Kraftfahrzeugen, der Navigation in akuten Gefahrenlagen und der Navigation von Weltraumsonden.</p>
---	------------------------	------------------------	------------------	---	---

Friedrich-Schiller-Universität Jena	01.10.2018	30.09.2023	4.127.400	Multimodales Quantum Imaging für die Lebenswissenschaften (QuantIm4Life)	Auf Quantenkorrelation und Verschränkung beruhende Abbildungsverfahren haben ein hohes Potential zur Realisierung verbesserter Bildgebungsmodalitäten. Bisher wurden derartige Quantum Imaging Verfahren aber nur in Prinzipdemonstrationen gezeigt, welche fundamentale Verfahrensvorteile nachweisen konnten. Um eine echte Bewertung der in Anwendungen realisierbaren Vorteile vornehmen zu können, müssen zunächst die grundsätzlichen Vorteile in spezifische messtechnische Mehrwerte umgesetzt und dedizierte anwendungsangepasste Messsysteme entwickelt werden. In Verfolgung dieser Ziele wird die Arbeitsgruppe QuantIm4Life das vielversprechende, grundlegend bereits demonstrierte quantenoptische Abbildungsverfahren des Quantum Ghost Imaging konzeptionell erweitern und technologisch so weiterentwickeln, dass die vorhandenen Vorteile für Messaufgaben in den Lebenswissenschaften optimal ausgenutzt werden können. Die entwickelten bildgebenden Verfahren werden im Laufe des Projekts zu hochintegrierten Demonstratoren weiterentwickelt, welche spezifische Messaufgaben in den Lebenswissenschaften erfüllen können.
Leibniz Universität Hannover	01.01.2019	31.12.2023	3.329.960	Photonische Quantenschaltkreise für quantenbasiertes maschinelles Lernen (PQuMaL)	Kognitive Technologien, d.h. Maschinenkonzepte, die z. B. "selbständiges Lernen" und "Problemlösen" beherrschen und heutzutage zunehmend Anwendung finden, haben bestehende Rechenressourcen an deren Grenze gebracht. Neue quantenmaschinelle Lernalgorithmen versprechen eine Beschleunigung solcher rechenintensiven Anwendungen. Ziel dieses Vorhabens ist –zusammen mit dem Aufbau einer Nachwuchsforscherguppe– die Entwicklung einer photonischen Quantenplattform, die spezifisch auf die Nutzung des quantenmaschinellen Lernens zugeschnitten ist.
Technische Universität Berlin	01.08.2018	31.07.2023	2.163.708	Quantenkommunikations-Systeme auf Basis von Einzelphotonenquellen (QuSecure)	Ziel des Projektes QuSecure ist die Entwicklung eines ultimativ-sicheren Kommunikations-Netzwerkes auf der Basis von Quantenlichtquellen. In diesem Zuge wird das volle Potential halbleiterbasierter Einzelphotonenquellen ausgeschöpft, um auch Apparate-unabhängige Szenarien zur Quantenschlüsselverteilung zu implementieren.

Forschungszentrum Jülich GmbH	01.01.2019	31.12.2023	3.029.700	Einzelvorhaben: Elektrische Quantenschaltkreise - von Topologie zu Quanteninformation	Diese Nachwuchsgruppe wird die Topologie des Transports in elektrischen Schaltkreisen im Nichtgleichgewicht untersuchen. Topologische Zustände sind intrinsisch gegenüber äußeren Störungen geschützt, und bieten deshalb eine vielversprechende Perspektive für fehlerresistentes Quantencomputing. Bisher hat sich die aktuelle Forschung vor allem auf Festkörpermateriale mit topologischer Bandstruktur konzentriert, die jedoch experimentell schwer zugänglich sind. Dieses Projekt baut auf der neuartigen Erkenntnis, dass elektrische Schaltkreise topologisch sein können, selbst wenn deren einzelnen Bausteine es nicht sind. So wird die Topologie erheblich leichter zugänglich gemacht, und neue Impulse für eine Industrialisierung von Quantencomputern gesetzt. Darüberhinaus werden weitere unerwartete Anwendungen von topologischem Quantentransport erforscht. So könnte ein neuer, bisher unbekannter fraktionaler Transport-Effekt zu neuen Messtechnologien unterhalb der Auflösungsgrenze eines Detektors führen.
HighFinesse Laser and Electronic Systems GmbH	01.09.2018	31.08.2021	386.931	Verbundprojekt: Linienbreiten-Analyse und Frequenzrauschmessung schmalbandiger Laserlichtquellen - Teilvorhaben: Entwicklung des Linienbreiten-Analysators	Eine Vielzahl quantentechnologischer Anwendungen mit Atomen, Ionen und Molekülen erfordert die Verwendung von schmalbandigen Laserlichtquellen mit hohem Kohärenzgrad. Die Kohärenzeigenschaften des Lasers bestimmen die Fidelität der Präparation, die Kontrolle und das Auslesen von atomaren oder molekularen Zuständen und sind daher für die Quantensimulation, die Quanteninformationsverarbeitung und Quantenmetrologie von zentraler Bedeutung. Die Anforderungen an eben jene Kohärenzeigenschaften der Laser wachsen rapide und mit ihnen auch der Bedarf für die präzise Charakterisierung und kontrollierte Beeinflussung dieser Eigenschaften. Die Angabe der Laserfrequenz, Laserlinienbreite und deren Schwankungen sind sowohl für die Hersteller von Lasern als auch für deren Anwender in der Quantentechnologie essentiell. Das Ziel unseres Teilvorhabens ist, eine Messtechnologie für die Analyse und Regelung der Kohärenz von schmalbandigen (kHz-Bereich) Laserlichtquellen zu entwickeln. Im Rahmen des Projekts wird ein Lösungsansatz umgesetzt, der solide Interferometer mit ultra-rauscharmen Photodetektoren verwendet und damit die empfindliche Messung von Laserfrequenzrauschen über große Wellenlängenbereiche erlaubt. Das ausgewählte Verfahren ist zum einen unempfindlich auf Störquellen (z. B. aufgrund des Luftschalls), zum anderen können weitere elektronisch und mechanische Rauschquellen eliminiert werden. Das Messprinzip bietet über die Detektion des Frequenzrauschens hinaus noch die Möglichkeit zur Regelung von Laserfrequenzfluktuationen und -linienbreiten. Das hier beschriebene Teilvorhaben "Entwicklung des Linienbreiten-Analysators" ist im Verbund "Linienbreiten-Analyse und Frequenzrauschmessung schmalbandiger Laserlichtquellen" das zentrale Entwicklungsprojekt.

Eberhard Karls Universität Tübingen	01.09. 2018	31.08. 2021	158.808	Verbundprojekt: Linienbreiten-Analyse und Frequenzrausch- Messung schmalbandiger Laserlichtquellen - Teilvorhaben: Kohärente Präparation hochangeregter atomarer Zustände mittels linienbreitenstabilisierte r Lasersysteme	Das Ziel dieses Teilvorhabens ist die kohärente Anregung von Rydbergzuständen in einem Experiment mit ultrakalten Rubidium-Atomen. Da die Umsetzung der Anregung in diese Zustände sowie ihre mögliche optische Detektion eine Linienbreite der beteiligten Laser im Bereich von weniger als 10kHz benötigt, bietet sich hier eine konkrete Einsatzmöglichkeit für den von HighFinesse zu entwickelnden Linienbreiten-Analysator. Die Universität möchte schon bei der Konzeption zu einer Optimierung des Analysators für quantentechnologische Anwendungen beitragen. Im Rahmen der Evaluation sind weitere Verbesserungsvorschläge und Optimierungen geplant. Die Evaluation soll an der Universität Tübingen an einem ein Rubidium-Rydbergexperiment, an dem die kohärente Anregung der Rydbergatome getestet werden kann, erfolgen. Das hier beschriebene Teilvorhaben "Kohärente Präparation hochangeregter atomarer Zustände mittels linienbreitenstabilisierter Lasersysteme" ist im Verbund "Linienbreiten-Analyse und Frequenzrausch-Messung schmalbandiger Laserlichtquellen" das zentrale Projekt für die Umsetzung der instrumentellen Entwicklung in eine neue quantentechnologische Anwendung.
---	----------------	----------------	---------	---	---

<p>Universität Paderborn</p>	<p>01.08.2018</p>	<p>31.07.2023</p>	<p>2.818.800</p>	<p>Quantenkommunikation mit integrierter Optik im Zusammenhang mit supraleitender Elektronik (ISOQC)</p>	<p>In Quantenkommunikationssystemen müssen Quellen, Verarbeitung und Messung von Quantenlicht auf modulare Weise zusammengestellt werden, um ein gewisses Protokoll durchzuführen. Manche der benötigten Komponenten haben sehr spezifische Betriebsbedingungen. In den letzten Jahren hat sich integrierte Optik als vielversprechender Lösungsansatz abgezeichnet, der viele von diesen Bedingungen erfüllt. In der klassischen Optik und Telekommunikationstechnologie ist die integrierte Optik auf Lithiumniobatbasis eine der bewährtesten Techniken. Auch in der Quantenoptik hat diese Vorgehensweise sämtliche Vorteile wie beispielweise geringe Transmissionsverluste über ein breites Transparenzfenster zur Integrierung mit anderen Systemen, hocheffiziente Kopplung zu Einzelmodenfasern und hocheffiziente, nichtlineare sowie elektrooptische Eigenschaften. Was auf dieser Basis fehlt, ist die hocheffiziente Detektion, um die Quantenschaltkreise zu schließen. Das Hauptziel dieses Teilvorhabens ist somit die Integrierung und Ausnutzung von hocheffizienten, supraleitenden Detektoren auf nichtlinearen Wellenleitern in Lithiumniobat, um neue Funktionalitäten in der Quantenoptik zu ermöglichen. Die Herausforderung besteht darin, die Vorteile von Lithiumniobat zu bewahren, während der Nutzung von tiefen Temperaturen. Um dieses Ziel zu erreichen, werden wir die Lithiumniobattechnologie an der Universität Paderborn zusammen mit der supraleitenden Detektortechnologie vom National Institute for Standards and Technology (NIST), Boulder, Colorado vereinen. Unter anderem geht es darum, die Eigenschaften des Lithiumniobatwellenleitersubstrats an den supraleitenden, dünnen Schichten anzupassen sowie die nichtlinearen Eigenschaften des Lithiumniobats bei tiefen Temperaturen zu optimieren. Diese Komponenten werden in der Zukunft als Teile eines großen Quantenkommunikationssystems betrachtet, die als flexible und notwendige Verknüpfungen zwischen anderen Komponenten fungieren.</p>
------------------------------	-------------------	-------------------	------------------	--	---

Menlo Systems GmbH	01.11.2018	31.10.2021	589.440	Verbundprojekt: Kompaktes, hochstabiles Lasersystem für Quanten- Informationsverarbeitung mit Calcium-Ionen (CaLas) - Teilvorhaben: Optische Referenz mit Frequenzkammsystem	Konkretes Ziel des CaLas Gesamtverbundes ist die Entwicklung eines kompakten Lasersystems für die Quanteninformationsverarbeitung. Menlo Systems (MEN) übernimmt den Entwurf und die Integration des Gesamtsystems und ist damit der zentrale Akteur des Verbundprojekts. Dies begründet auch MENs Rolle als Verbundkoordinator. Zusätzlich entwickelt MEN zentrale Subsysteme selbst. MENs Entwicklungsziele lassen sich in vier Bereiche gliedern: 1. Konzeption und Integration des Gesamtsystems in den Bereichen Hardware und Software mit Definition der Schnittstellen. Die Steuerungselektronik und Software und für das Gesamtsystem wird von MEN entwickelt. Außerdem übernimmt MEN eine Charakterisierung des Gesamtsystems. 2. MEN wird eine grundlegende Verbesserung optischer Referenzen in Bezug auf deren Vibrationsisolierung durchführen. Dazu wird die optische Referenz vorzugsweise passiv schallisoliert und gefedert aufgehängt. Eine aktive Entkopplung wird als Mitigation in Betracht gezogen, falls ein passiver Schutz nicht ausreichen sollte. 3. Es wird ein kompakter Frequenzkamm (19", 3HE) entwickelt, basierend auf MEN's Ultra-Low-Noise Technologie. Um eine schnelle Modenzahlbestimmung zu erreichen, wird dabei auf eine Doppelkammasführung oder, als Mitigation, auf eine schnelle, weit verstellbare Repetitionsrate gesetzt. Darüber hinaus soll der Masteroszillator des Kammes effizient verbreitert werden, um Schwebungsdetektionseinheiten bei 794, 844, 854 und 866 nm zu versorgen. 4. Das Gesamtsystem benötigt eine kompakte, breitbandige, störteste und über Software steuerbare Regelungselektronik für ca. ein Dutzend Regelkreise. Dies wird von MEN auf Basis von neu zu entwickelnden Schaltungen bereitgestellt. Außerdem ist zu beachten, dass analoge und digitale Signale sich nicht stören dürfen, der Betrieb stabil und sicher gegen ESD/EMV Störungen ist.
LAYERTEC GmbH	01.11.2018	31.10.2021	281.250	Verbundprojekt: Kompaktes, hochstabiles Lasersystem für Quanten- Informationsverarbeitung mit Calcium-Ionen (CaLas) - Teilvorhaben: Optiken für Hochfinesse-Resonatoren im NIR-Bereich	Der Verbund CaLas strebt zur Verbesserung von Quantencomputern die Entwicklung eines kompakten hoch stabilen Lasersystems zur Kühlung, Anregung und Auslesung von Ca-Atomen an. Eine der Kerninnovationen ist ein Hochfinesse-Resonator, der die spektrale Reinheit und Stabilität des Gesamtsystems sicherstellt. LAYERTEC erarbeitet hierfür extrem verlustarme Spiegel, die bei 1542nm einen Reflexionsgrad von R=99,992 % und einen Transmissionsgrad von T=0,004 % bzw. bei 729nm R=99,9984 % und T=0,0008 % aufweisen.

SpaceTech GmbH	01.11.2018	31.10.2021	139.122	Verbundprojekt: Kompaktes, hochstabiles Lasersystem für Quanten- Informationsverarbeitung mit Calcium-Ionen (CaLas) - Teilvorhaben: Erforschung von CdMnTe-basierten, mikrointegrierten Isolatoren	Im Teilvorhaben sollen die Möglichkeit der Mikrointegration optischer Isolatoren erforscht werden, sowie die für die Lasermodule des Gesamtvorhabens erforderlichen Isolatoren aufgebaut und charakterisiert werden. Hierzu ist eine hochkompakte Magnetanordnung zu entwickeln und eine Konstruktion zu erstellen, die äußerst kompakt ist, eine Magnetintegration trotz großer magnetischer Kräfte ermöglicht und gleichzeitig eine spannungsfreie Montage der Optiken ermöglicht.
Universität des Saarlandes	01.11.2018	31.10.2021	101.820	Verbundprojekt: Kompaktes, hochstabiles Lasersystem für Quanten- Informationsverarbeitung mit Calcium-Ionen (CaLas) - Teilvorhaben: Systemanwendung für Quanten-Netzwerk-Technologie	Die Arbeitsziele dieses Teilprojekts im Rahmen des Gesamtverbunds sind: - Detaildefinition der Anforderungen an das Calcium-Lasersystem aus der Sicht zukünftiger Anwender, d.h. Festlegung der quantitativen Zielparameter und qualitativen Zieleigenschaften des Systems in der geplanten Anwendung. - Identifikation geeigneter Messungen, um die Anforderungen bezüglich der Funktion und des Zusammenwirkens der Teilkomponenten und bezüglich der Grenzen der Spezifikationen zu validieren. - Durchführung der geplanten Messungen zur Validierung des Systems. - Einsatz des Systems in laufenden Experimenten zur Quantennetzwerktechnologie. - Erstellung von Berichten bezüglich der quantitativen und qualitativen Systemeigenschaften in der realen Anwendung.

Humboldt-Universität zu Berlin	01.10.2018	30.09.2023	3.643.700	Diamant-Nanophotonik für On-Chip Quantentechnologie (DiNOQuant)	Das überspannende Ziel des Projekts "Diamant-Nanophotonik für On-Chip Quantentechnologie" ist die Zusammenführung von Defektzentren in Diamant und integrierten nanophotonischen Strukturen in kompakte on-chip Module und die Demonstration von Verschränkungsoperationen zwischen diesen. Dies ist ein entscheidender Schritt in Richtung Quanteninformationsverarbeitung basierend auf optisch aktiven Festkörpermaterialien. Defektzentren die mit hohen Raten (~5 kHz) skalierbar verschränkt werden, bilden die Grundlage zu Quantennetzwerken, die für entfernte Quantenkommunikation oder komplexes Quantencomputing genutzt werden können. Die Motivation für dieses Vorhaben ergibt sich aus dem technologischen Defizit, dass die Nanostrukturierung von Diamant weltweit noch nicht vergleichbar mit anderen Halbleitertechnologien ist. Für einen Sprung in eine Diamanttechnologie muss daher ein umfassendes Know-how in der Fertigung mit Expertise in Quantenoptik mit Festkörpermanosystemen zusammengeführt werden. Das Vorhaben baut daher auf existierenden Arbeiten mit Defektzentren in Diamant und den einzigartigen Fertigungsprozessen des Ferdinand-Braun-Instituts auf. Dadurch wird ein bislang unerreichtes Level an Strukturierungsqualität, Reproduzierbarkeit, und Skalierbarkeit möglich. Speziell werden durch sogenannte Waferbonding Verfahren Diamant und photonische Schaltkreise miteinander verbunden. Eine solche Plattform kann als "Toolbox" dann generell für die photonische Integration etablierter und neuer Defektzentren in Diamant verwendet werden. Konkrete Beispiele, die im Rahmen dieses Vorhabens realistisch erreicht werden können, sind sowohl sehr helle Quantenlichtquellen die für kommerzielle Anwendungen in ein kompaktes Gehäuse integriert werden, also auch höchst-effiziente Spin-Photonen-Schnittstellen die zur Demonstration von Verschränkungsoperationen benutzt werden.
AKKA DSW GmbH	01.11.2018	31.10.2021	153.950	Verbundprojekt: VERsatile Trapped Ion CONTROL System (VERTICONS) - Teilvorhaben: Hard- und Softwareentwicklung des Kontrollsystems	Dieses Vorhabens befasst sich mit der Entwicklung eines modularen, flexiblen und vielseitigen Hard- und Softwaresystems zur Kontrolle von Quantensystemen. Gigatroniks GmbH soll auf Basis moderner System-on-a-chip Technologie dieses Kontrollsystem nach Industriestandards erfolgen entwickeln, und durch kommerzielle
Universität des Saarlandes	01.11.2018	31.10.2021	91.620	Verbundprojekt: VERsatile Trapped Ion CONTROL System (VERTICONS) - Teilvorhaben: Quantenkontrolltheorie für Festkörperquantensysteme und Ionen	Der Verbund befasst sich mit der Entwicklung eines modularen, flexiblen und vielseitigen Hard- und Softwaresystems zur Kontrolle von Quantensystemen. Das Universität des Saarlandes Teilvorhaben konzentriert sich auf die Entwicklung und Implementierung einer Quantenkontrollarchitektur und unterstützt die Entwicklung entsprechender Softwaremodule nach Industriestandards.

Johannes Gutenberg-Universität Mainz	01.11.2018	31.10.2021	175.080	Verbundprojekt: VERsatile Trapped Ion CONtroll System (VERTICONS) - Teilvorhaben: Weiterentwicklung und Tests des Verticons Kontrollsystems	Das Thema des Vorhabens befasst sich mit der Entwicklung eines modularen, flexiblen und vielseitigen Hard- und Softwaresystems zur Kontrolle von Quantensystemen. Die Universität Mainz soll dieses Kontrollsystem in den experimentellen Aufbau integrieren, testen und verifizieren und anschließend wissenschaftliche verwerthen.
Forschungszentrum Jülich GmbH	01.05.2020	31.10.2021	127.080	Verbundprojekt: VERsatile Trapped Ion CONtroll System (VERTICONS) - Teilvorhaben: Quantenkontrollmethoden für Quanteninformationsverarbeitung	Das Thema des Gesamtvorhabens befasst sich mit der Entwicklung eines modularen, flexiblen und vielseitigen Hard- und Softwaresystems zur Kontrolle von Quantensystemen. Das Forschungszentrum Jülich wird sich mit der Entwicklung komplexer Kontrollalgorithmen an dem Vorhaben beteiligen und auch die Umsetzung dieser in der Form hochentwickelter Softwaremodule unterstützen.
Universität Stuttgart	01.09.2018	31.08.2023	5.045.820	Silizium-Photonik in sicheren Quantennetzwerken (SiSiQ)	Das Ziel des Projektes ist der Aufbau einer Arbeitsgruppe, die sich Quantennetzwerken und der Implementation von Protokollen zur Datenübertragung und verteilten Rechnungen widmet. Dabei werden die Vorteile von Quantenrechnen und Quantenkryptographie vereint, um Nutzern mit nur minimalen Quantenressourcen zu ermöglichen, Rechnungen absolut sicher an einen Quantencomputer oder Quantenserver auszulagern. Die wesentlichen Netzwerkkomponenten basieren auf photonischer Siliziumtechnologie. Photonische Systeme sind ideal für das Studium und die Implementation von Quantennetzwerken, da ein einziges physikalisches System genutzt werden kann, um Quanteninformation sowohl zu senden als auch zu verarbeiten. Wir werden effiziente Einzelphotonenquellen sowie integrierte Schaltkreise entwickeln. Die Komponenten werden dann eingesetzt, um sichere verteilte Rechnungen in Quantennetzwerken durchzuführen. Somit können wir fundamental neuartige Möglichkeiten für sichere Informationsverarbeitung erforschen.

PicoQuant GmbH. Unternehmen für optoelektronische Forschung und Entwicklung	01.11.2018	28.02.2021	423.024	<p>Verbundprojekt: Ultraschnelle Quantenschlüssel-Verteilung durch Parallelisierung der Detektionskanäle (QuPAD) - Teilvorhaben: Vielkanalige TCSPC-Elektronik</p>	<p>Das Verbundvorhaben verfolgt das Ziel, Schlüsselkomponenten zu entwickeln, die es ermöglichen sollen, die Übertragungsrate in der Quantenkommunikation und insbesondere in der Quantenschlüssel-Verteilung (quantum key distribution - QKD) gegenüber bisherigen Ansätzen signifikant zu erhöhen. Im Kern soll dieses durch eine Parallelisierung der Detektionskanäle erreicht werden. Hierzu soll als eine Kernkomponente ein Array aus 8x8 einzelnen Detektorelementen auf der Basis von supraleitenden Nanodrähten (superconducting nanowire single photon detector – SNSPD) in einem neuartigen, für 64 Kanäle ausgelegten, kompakten 3K Kryostaten im 19" Rackformat realisiert werden. Zur pikosekundengenauen Bestimmung der Photonenankunftszeiten wird, als weitere Kernkomponente, eine Elektronik zur zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung (Time-Correlated Single Photon Counting - TCSPC) erforscht, die es ermöglicht, die Signale der 64 Detektorelemente parallel zu erfassen und unter hohem Datendurchsatz applikationsspezifisch zu verarbeiten. Im Rahmen dieses Teilvorhabens soll die neuartige 64-kanalige TCSPC-Elektronik entstehen. Ein zu lösendes Problem dabei besteht in der zu erwartenden hohen Datenrate und daraus resultierenden großen Datenvolumina bei Verwendung von 64 parallel arbeitenden Kanälen. Zur Lösung des Problems sollen daher die Daten nicht mehr an einen Host-Computer, sondern direkt an einen externen feldprogrammierbaren Logikbaustein (Field Programmable Gate Array, FPGA) übertragen werden, in dem dann eine applikationsspezifische Daten(vor)verarbeitung und damit Datenreduktion stattfinden kann. Darüber hinaus ist ein breitbandiger Vorverstärker für 64 Kanäle zu erforschen, da die direkten Ausgangssignale des SNSPD-Arrays eine zu geringe Amplitude haben, um direkt mit der TCSPC-Elektronik verarbeitet zu werden. Die wesentliche Herausforderung liegt hierbei darin, dass der Detektor und somit eventuell auch der Vorverstärker im Kryostaten betrieben werden muss.</p>
---	------------	------------	---------	--	---

Entropy GmbH	01.11. 2018	28.02. 2021	102.807	Verbundprojekt: Ultraschnelle Quantenschlüssel- Verteilung durch Parallelisierung der Detektionskanäle (QuPAD) - Teilvorhaben: Kompakte Kühlplattform für 64- Kanal SNSPD-Array	Das Verbundvorhaben verfolgt das Ziel Schlüsselkomponenten zu entwickeln, die es ermöglichen sollen die Übertragungsrate in der Quantenkommunikation und insbesondere in der Quantenschlüssel-Verteilung (quantum key distribution - QKD) gegenüber bisherigen Ansätzen signifikant zu erhöhen. Im Kern soll dieses durch eine Parallelisierung der Detektionskanäle erreicht werden. Hierzu soll als eine Kernkomponente ein Array aus 8x8 einzelnen Detektorelementen auf der Basis von supraleitenden Nanodrähten (superconducting nanowire single photon detector – SNSPD) in einem neuartigen, für 64 Kanäle ausgelegten, kompakten 3K Kryostaten im 19" Rackformat realisiert werden. Zur pikosekundengenauen Bestimmung der Photonenankunftszeiten wird, als weitere Kernkomponente, eine Elektronik zur zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung (Time-Correlated Single Photon Counting - TCSPC) erforscht, die es ermöglicht, die Signale der 64 Detektorelemente parallel zu erfassen und unter hohem Datendurchsatz applikationsspezifisch zu verarbeiten.
--------------	----------------	----------------	---------	---	--

Westfälische Wilhelms- Universität Münster	01.11. 2018	28.02. 2021	1.271.280	Verbundprojekt: Ultraschnelle Quantenschlüssel- Verteilung durch Parallelisierung der Detektionskanäle (QuPAD) - Teilvorhaben: Supraleitende Einzelphotonendetektor -Arrays	Das Verbundvorhaben verfolgt das Ziel Schlüsselkomponenten zu entwickeln, die es ermöglichen sollen die Übertragungsrate in der Quantenkommunikation und insbesondere in der Quantenschlüssel-Verteilung (quantum key distribution - QKD) gegenüber bisherigen Ansätzen signifikant zu erhöhen. Im Kern soll dieses durch eine Parallelisierung der Detektionskanäle erreicht werden. Hierzu soll als eine Kernkomponente ein Array aus 8x8 einzelnen Detektorelementen auf der Basis von supraleitenden Nanodrähten (superconducting nanowire single photon detector – SNSPD) in einem neuartigen, für 64 Kanäle ausgelegten, kompakten 3K Kryostaten im 19" Rackformat realisiert werden. Zur pikosekundengenauen Bestimmung der Photonenankunftszeiten wird, als weitere Kernkomponente, eine Elektronik zur zeitkorrelierten Einzelphotonenzählung (Time-Correlated Single Photon Counting - TCSPC) erforscht, die es ermöglicht, die Signale der 64 Detektorelemente parallel zu erfassen und unter hohem Datendurchsatz applikationsspezifisch zu verarbeiten. Im Teilvorhaben der WWU Münster soll die Realisierung des Detektorarrays durchgeführt werden. Dazu soll sowohl Technologieentwicklung zur parallelen Herstellung und Ansteuerung von 64 Detektoren als auch die Charakterisierung der Detektorelemente durchgeführt werden. Um eine reproduzierbare Aufbau- und Verbindungstechnik zu entwickeln, soll die für die Implementierung der Detektorarrays notwendige nanophotonische Plattform weiterentwickelt werden. Diese soll auf skalierbaren Methoden der Nanofertigung basieren, um dadurch die Fertigung vieler Komponenten simultan zu ermöglichen. Neben der experimentellen Realisierung der Detektorarrays sollen numerische Simulationen durchgeführt werden, um auch die Modellentwicklung wellenleiter-gekoppelter Einzelphotonendetektoren voranzutreiben. Durch zusätzliche Prozessoptimierung soll darüber hinaus die Bauteilausbeute optimiert werden, um eine effiziente Verwertung der Chips zu garantieren.
Leibniz Universität Hannover	01.03. 2019	28.02. 2022	601.506	Verbundprojekt: Integrierte Diamant- Ionen-Fallen (IDEAL) - Teilvorhaben: Diamant Mikro- Materialbearbeitung mit Femtosekundenlaser	Das Hauptziel dieses Teilvorhabens ist eine industrielle Technologie für die hochpräzise Mikrobearbeitung von CVD-Diamantwafern und das Einschreiben von Lichtwellenleitern in CVD-Diamant mit fs-Laser zu entwickeln und kommerziell verfügbar zu machen. Die entwickelten fs-Lasertechnologien werden das Hauptwerkzeug für die Herstellung von Diamant- Ionenfallen mit integriertem faseroptischen Interface und integrierter Detektionsoptik (IDEAL-Ionenfallen) sein.
Dausinger & Giesen GmbH	01.03. 2019	28.02. 2022	418.525	Verbundprojekt: Integrierte Diamant- Ionen-Fallen (IDEAL) - Teilvorhaben: UV- Femtosekunden- Lasersystem für Diamant- Mikromaterialbearbeitu ng	- Industrielles UV-Femtosekunden-Lasersystem für die Mikromaterialbearbeitung mit einzigartigen Spezifikationen: Pulsdauer = 300 fs, Pulsenergie 300 µJ bei 343 nm und Repetitionsrate 75 kHz. - Aktuelle Scheibenlasersysteme basieren auf Yb:YAG mit einer Ve

NANEO Precision IBS Coatings GmbH	01.03. 2019	28.02. 2022	179.850	Verbundprojekt: Integrierte Diamant- Ionen-Fallen (IDEAL) - Teilvorhaben: Herstellung verlustarmer ITO- Schichten durch Ionenstrahlputtern für die optische Schnittstelle der 3D- Ionenfalle	Im Teilvorhaben von Naneo wird erforscht, wie hochtransparente (von 370 bis 935 nm) elektrisch gut leitende und minimal streuende Schichten aus ITO (Indium-Zinn-Oxid) hergestellt und in eine Antireflexions(AR)-Schicht integriert) werden können. Diese Schichten werden auf Mikrolinsen und Diamant-Wellenleiter-Endflächen aufgebracht, die Licht zu und von den Atomen die 3-D-Ionenfalle der PTB transportieren (optische Schnittstelle). Dadurch kann die Ionenfalle wesentlich anwendungsfreundlicher aufgebaut werden. Zur Realisierung der angestrebten Schichteigenschaften wird das Ionenstrahlputtern (IBS) eingesetzt. IBS ermöglicht in einzigartiger Weise den Beschichtungsvorgang zu kontrollieren. Durch Variation der Prozessparameter lässt sich die Energie, die in die aufwachsende Schicht eingebracht wird, in so weiten Grenzen beeinflussen, wie es bei keinem anderen Beschichtungsverfahren möglich ist. Damit können Struktur und Eigenschaften der Schichten sehr stark beeinflusst werden. Der zentrale Arbeitskern des Teilvorhabens besteht in der systematischen Variation aller relevanten Prozessparameter des IBS-Prozesses: Art des Sputtergases, Energie des Ionenstrahls, eventuell Intensität des Ionenstrahls und Beschusswinkel des Targets, Höhe des Reaktivgasdruckes während der Beschichtung, Art des Reaktiv-gases (ionisiert, neutral), Art des zusätzlichen Ionenbeschusses und die Temperatur während des Aufwachsens der Schicht. Die erzielten Schichteigenschaften werden vermessen und ein Prozess optimiert für die gewünschten Schichteigenschaften. Die technischen Arbeitsziele sind definiert durch die folgenden Anforderungen: 1. Erzielung der folgenden Eigenschaften für die ITO-Schichten: Transmission bei 370 nm > 75 %; Elektrische Leitfähigkeit < 100 uOhm*cm; Streulicht (TIS) bei 370 nm < 0,1 %. 2. Integration der ITO-Schicht als oberste Schicht in ein AR-Schicht-System, das bei den Wellenlängen 390, 760 und 935 nm eine Reflexion < 1 % ermöglicht.
--	----------------	----------------	---------	--	---

GRINTECH GmbH	01.03.2019	28.02.2022	204.714	Verbundprojekt: Integrierte Diamant-Ionen-Fallen (IDEAL) - Teilvorhaben: Gradientenindexoptiken für Integrierte Diamant-Ionen-Fallen	Im Teilvorhaben der GRINTECH wird in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern das Design der optischen Detektion und zusätzlicher Laserzugänge für eine Diamant-Ionenfalle (IDEAL-Ionenfalle) entwickelt. Diese mikrooptischen Komponenten sollen auf Basis von Gradientenindex- (GRIN-) Linsen und Linsenarrays realisiert werden, da sich GRIN-Linsen aufgrund ihrer Dimensionen und Geometrie für die Anwendung in kompakten Mikrooptiksystemen besonders anbieten. Dazu müssen Entwicklungen erfolgen um den bisher nutzbaren Wellenlängenbereich für GRIN-Linsen hoher Numerischer Apertur nach 370nm auszudehnen. Weiterhin müssen die Komponenten und die eingesetzten Montagetechnologien für den Einsatz im Ultrahochvakuum qualifiziert werden. Die Quantensimulation, Quanteninformation oder Quantenmetrologie verlangen eine hohe Kontrolle des atomaren Ionen-Ensembles in RF-Feldern und hochgenaue integrierte mikro-optische Zugänge für die Detektion und Laserspektroskopie. Dazu sind leitfähige AR-Schichten auf den Komponenten oder auf optischen Fenstern notwendig, um die Ionen nicht zu stören. Die Fragestellungen werden in enger Zusammenarbeit mit den Projektpartnern, insbesondere PTB und Naneo, erforscht. Als Ergebnis soll ein an die Anforderungen von Ionenfallen angepasstes fasergekoppeltes GRIN-Linsenarrays als Demonstrator dem Projektpartner PTB zur Verfügung gestellt werden. Solche Arrays sind eine Schlüsselkomponente für den Erfolg des Gesamtprojekts, da sich nur mit Hilfe integrierter fasergekoppelter Mikrooptiken kompakte und skalierbare Ionenfallen konzipieren lassen, die an Kundenspezifikationen angepasst werden können und später durch die Projektpartner (Spin-Off der PTB oder DM) vermarktet werden können.
Diamond Materials GmbH	01.03.2019	28.02.2022	279.650	Verbundprojekt: Integrierte Diamant-Ionen-Fallen (IDEAL) - Teilvorhaben: Diamant für die Ionenfallen der Zukunft	Ionenfallen spielen für die zweite Generation der Quantentechnologien (QT) eine entscheidende Rolle. Sie stellen die Schlüsselkomponente für die Quantenmanipulation von Ionen in Atomuhren, für Quantensimulatoren und für Netzwerke dar, in denen Quanteninformation in Ionen gespeichert wird. Derzeit sind kommerziell keine Ionenfallen am Markt erhältlich. Diesem Missstand wollen wir in diesem Projekt begegnen und im Rahmen des Konsortiums eine Lieferkette aufbauen an deren Ende eine standardisierte Ionenfalle steht, die höchsten Anforderungen genügt und weltweit vermarktet wird.

<p>Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</p>	<p>01.02.2020</p>	<p>31.01.2023</p>	<p>516.600</p>	<p>Verbundprojekt: Plattform für Tieftemperatur Qubit Experimente (PtQUBE) - Teilvorhaben: Supraleitende Qubits für ADR-Kryostate</p>	<p>Ziel des beantragten Teilvorhabens für das Verbundprojekt PtQUBE ist es eine universelle Tieftemperatur-Qubit Plattform für adiabatische Entmagnetisierungs-Kryostate (engl. Adiabatic Demagnetization Refrigerator, ADR) zu entwickeln, die für den Betrieb von supraleitenden Qubits geeignet ist. Bei dem vorgeschlagenen Teilvorhaben wird ein besonderes Augenmerk auf die magnetische Isolierung der supraleitenden Qubits gelegt, da die Kaltstufe des ADR- Kryostaten Magnetfelder benötigt, die weit oberhalb der supraleitungsunterdrückenden kritischen Magnetfelder der Qubits sind. Im Hinblick auf das Fernziel, eines leicht einsetzbaren, supraleitenden oder halbleitenden Quanten-Computers, ist es mit der vorgeschlagenen Plattform möglich, dem Anwender langfristig eine abstrakte Qubit-Architektur bereitzustellen, auf der er seine Qubit-Algorithmen ohne oder mit nur geringen Kenntnissen der verwendeten Hardware ausführt.</p>
<p>Sondervermögen Großforschung beim Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</p>	<p>01.02.2020</p>	<p>31.01.2023</p>	<p>380.250</p>	<p>Verbundprojekt: Plattform für Tieftemperatur Qubit Experimente (PtQUBE) - Teilvorhaben: Integrierte Elektronik für supraleitende Qubits in ADR-Kryostaten</p>	<p>Ziel des beantragten Verbundvorhabens PtQUBE ist es, eine universelle Tieftemperatur-Qubit Plattform für Adiabatische Entmagnetisierungs-Kryostate (ADR) zu entwickeln, die für den Betrieb von supraleitenden Qubits geeignet ist. Das hier beantragte Teilvorhaben hat die Entwicklung einer nutzerfreundlichen integrierten Manipulations- und Ausleseelektronik für supraleitende Qubits zum Ziel. Diese Elektronik ist ein integraler Bestandteil der PtQUBE Plattform und wird aus den drei Bestandteilen FPGA Digitalelektronik, ADC/DAC-Elektronik und Mischerelektronik bestehen. Die angestrebte Integration von Manipulations- und Empfangspfad wird insbesondere auch Experimente ermöglichen, die weit über die Möglichkeiten einzelner Laborgeräte wie sie heute standardmäßig eingesetzt werden, hinausgeht. Gleichzeitig wird im Rahmen des Vorhabens PtQUBE eine enge Integration in das Softwareframework Qkit angestrebt, um einerseits eine möglichst einfache Ansteuerung der Plattform zu ermöglichen und andererseits die Auswertung der Messdaten in einer kohärenten Arbeitsumgebung sicherzustellen.</p>

Physikalisch- Technische Bundesanstalt (PTB)	01.03. 2019	28.02. 2022	403.763	Verbundprojekt: Integrierte Diamant- Ionen-Fallen (IDEAL) - Teilvorhaben: Entwicklung und Charakterisierung von Diamant-Ionenfallen mit integrierter optischer Schnittstelle	In diesem Teilvorhaben wird das Design der Diamant-Ionenfalle mit integrierter optischer Detektion und Laserzugängen (die IDEAL-Ionenfalle) entwickelt, aus den zugelieferten Teilen integriert aufgebaut und getestet. Die besondere Herausforderung ist, kompakte und skalierbare Ionenfallen herzustellen, die zum einen eine hohe Kontrolle des atomaren Ionen-Ensembles in präzisen RF-Feldern erlauben, und zum anderen präzise integrierte mikro-optische Zugänge für die Detektion und Laserspektroskopie bieten ohne die Ionen zu stören. Zudem soll eine einfache, reproduzierbare Montage entwickelt werden, die eine Kommerzialisierung hochwertiger, kundenspezifischer Ionenfallen erlaubt. Aufgrund der Komplexität von Ionenfallen gibt es bisher keinen kommerziellen Anbieter auf dem Markt. Diamant ist ein neues Material für Ionenfallen, welches ausgezeichnete Eigenschaften in Sachen präziser Formtreue, geringe RF-Verluste und hoher Wärmeleitfähigkeit hat. Mittels finiter Elemente Rechnungen wird das Design der Falle optimiert für minimale Störungen der gespeicherten Ionen aufgrund von RF-Streufeldern oder statischer Aufladungen an Isolatoren. Mikrooptiken werden ausgelegt, um optimale Detektionseffizienzen zu bieten und 3D Laserzugang für die optimale Kontrolle der gespeicherten Ionen zu haben. Dabei sollen alle Laser per Glasfaser an die Falle gebracht werden. Das Teilvorhaben stellt einen zentralen Knoten im Gesamtverbund dar, da hier alle technologischen Entwicklungen zusammen verknüpft werden und in das Design der Falle einfließen. PTB wird in enger Abstimmung mit den Partnern die einzelnen Entwicklungen begleiten und sicherstellen, dass diese den Anforderungen für den Betrieb einer Ionenfalle entsprechen. Die IDEAL-Falle wird in diesem Teilvorhaben zusammengebaut. Eine robuste Montage der Falle wird entwickelt, die die benötigte Präzision gewährleistet. PTB wird den gebauten Demonstrator vermessen und auf seine Eignung als UHV-taugliche Ionenfalle testen.
---	----------------	----------------	---------	--	--

<p>Menlo Systems GmbH</p>	<p>01.02.2019</p>	<p>31.01.2022</p>	<p>430.150</p>	<p>Verbundprojekt: Faser-Resonatoren für die lichtbasierte Quantentechnologie (FaResQ) - Teilvorhaben: Faserbasierte optische Modenfilter für Frequenzkämme</p>	<p>Das Verbundprojekt FaResQ befasst sich mit faserbasierten optischen Resonatoren als miniaturisierte, modulare quantenoptische Bauelemente. Der Verbund will den faserbasierten Resonator für unterschiedliche quantentechnologische Anwendungen nutzbar zu machen. Das Bauelement hat das Potential, die präzise Kontrolle der Eigenschaften von Licht sowie dessen Kopplung an Materie entscheidend zu verbessern. Schlüsselbestandteile der Quantentechnologie sind auch hochgenaue kohärente Lichtquellen wie etwa Frequenzkämme. Das Teilvorhaben "faserbasierte optische Modenfilter für Frequenzkämme" will den vom Verbund entwickelten faseroptischen Resonator so anpassen, dass er in ein Frequenzkammsystem integriert werden kann. Hier soll der Resonator durch gezielte Selektion optischer Moden die Kammstruktur des Spektrums auf Anwendungen anpassen, die einen besonders großen Modenabstand erfordern, z. B. für die hochgenaue Kalibration astronomischer Spektrographen. Hier sieht Menlo Systems GmbH den ersten Markt für den gefilterten Frequenzkamm. Es existieren jedoch weitere Anwendungsfelder, in die nach erfolgreicher Markteinführung nach Projektende mit dem System expandiert werden soll. Der faserbasierte Resonator führt gegenüber der bestehenden Lösung zu einer beachtlichen Miniaturisierung, zu einer Vereinfachung des Aufbaus, zu einer Steigerung der Zuverlässigkeit bzw. Robustheit gegen Umwelteinflüsse, und zu einer deutlichen Kostensenkung. Dies sollte die Technologie für einen größeren Nutzerkreis attraktiv machen.</p>
---------------------------	-------------------	-------------------	----------------	---	--

Rheinische Friedrich- Wilhelms- Universität Bonn	01.02. 2019	31.01. 2022	855.330	Verbundprojekt: Faser- Resonatoren für die lichtbasierte Quantentechnologie (FaResQ) - Teilvorhaben: Faser- Resonatoren für den ultravioletten Spektralbereich und kohärente Spin- Manipulationen mittels integrierten Mikrowellenelementen	Optische Resonatoren spielen eine zentrale Rolle bei der Wechselwirkung von atomaren Qubits mit dem Lichtfeld. Eine wesentliche Aufgabe ist es hierbei durch die Modifikation der photonischen Zustandsdichte und die Überhöhung der Feldstärke im Resonator eine starke, kontrollierte Kopplung des Lichtfeldes an die materielle Qubits im Resonator zu ermöglichen. Zusätzlich sehen viele Anwendungsszenarien den Transport von Quanteninformation in Einzelmoden-Fasern vor, so dass eine effiziente Ankopplung der Resonatormode an eine Einzelmodenfaser wünschenswert ist. Optische Faser-Resonatoren (OFRs) kombinieren die Vorzüge konventioneller optischer Resonatoren mit einem guten Zugang zum Resonator-Volumen und einer effizienten Ankopplung an Einzelmodenfasern. Auf der Basis von OFRs lassen sich kompakte Resonatoren mit kleinem Modenvolumen realisiert, bei denen das Regime der starken Kopplung schon mit einem einzigen Atom mit Finessen von etwa 100 000 erreicht werden kann. Ein weiterer Vorteil ist die aufgrund der Miniaturisierung hohe passive Stabilität der Resonator-Frequenz. In dem Teilvorhaben sollen zwei konkrete Anwendungen von OFRs als Schlüsselkomponente für eine lichtbasierte Quantentechnologie demonstriert werden. Zum einen sollen OFRs für den ultravioletten (UV) Spektralbereich entwickelt werden, mit deren Hilfe einzelne gefangene Ionen mit UV-Photonen effizient wechselwirken können. Zum anderen sollen Mikrowellen-Elemente, mit deren Hilfe besonders schnelle kohärente Spin-Manipulationen von atomaren Qubits durchzuführen werden können, direkt in OFRs integriert werden.
--	----------------	----------------	---------	---	--

Universität Leipzig	15.05. 2019	14.05. 2022	237.840	Verbundprojekt: Standardisierungen in der Herstellung und Verarbeitung von Quantenmaterialien am Beispiel von NV- Farbzentren in Diamant zur Realisierung eines hochpräzisen auf Quanteneffekten beruhenden Amperemeters (DiaQuantFab) - Teilvorhaben: Erforschung von Ionenimplantation als Herstellverfahren	Quantendefekte in Isolatoren und Halbleitern, wie beispielsweise Farb-Zentren in Diamant erlauben vielfältige Anwendungen in der Quantensensorik, Quantenkommunikation und Quantencomputing. Diese erhalten auch unter Umgebungsbedingungen Quantenkohärenzen von einigen Millisekunden und sogar Verschränkung aufrecht. Bisher gelingt es nur in universitärem Maßstab mit solchen Quantensystemen zu arbeiten. Um diese vielfach erprobten Ansätze auf ein industrierelevantes Level zu heben, müßen neue mikrosystemtechnische Schritte erarbeitet bzw. bekannte Halbleitertechnologien angewendet werden. Diese erfordern einen interdisziplinären Ansatz, da optische, elektronische und materialwissenschaftliche Komponenten und Kompetenzen zusammengeführt werden müßen. Damit geht die Notwendigkeit einher, die industrielle Herstellung entsprechender Quantenmaterialien in Deutschland weiter zu etablieren. Das Fehlen dieser Basis in Deutschland ist ein Grund dafür, dass eine industrielle Umsetzung für einen großen Teil des technisch bereits demonstrierten noch nicht oder nur in ersten Ansätzen gegluückt ist. Im Verbundvorhaben wird entlang der Prozesskette von der Synthese der Diamanten bis zur industrierelevanten Applikation an einem einheitlichen Verständnis von Messgrößen gearbeitet, aus denen fehlende Qualitätsstandards ableitbar sind. So kann ein wichtiger Schritt für die Akzeptanz optischer Quantentechnologien gelingen. Auf Basis von NV-Farbzentren in synthetischem Diamant werden ein industriell einsetzbarer hochempfindlicher Magnetfeldsensor und ein kalibrationsfreies Amperemeter entwickelt. Möglich wird dies durch die Quanteneigenschaften dieser NV-Zentren in Diamant, deren Messgrößen sich auf fundamentale Größen (g- Faktor, Bohrsches Magneton) zuruückföhren lassen.
------------------------	----------------	----------------	---------	--	--

Universität Stuttgart	15.05. 2019	14.05. 2022	246.528	<p>Verbundprojekt: Standardisierungen in der Herstellung und Verarbeitung von Quantenmaterialien am Beispiel von NV-Farbzentren in Diamant zur Realisierung eines hochpräzisen auf Quanteneffekten beruhenden Amperemeters (DiaQuantFab) - Teilvorhaben: Erforschung von Aufbau und Ansteuerung des Sensorsystems</p>	<p>Das Ziel dieses Projektes besteht darin für Quantendefekte in Diamant Industrie-standards für Herstellung und Integration zu entwickeln und am Beispiel von zwei konkreten vermarktbareren, kalibrationsfreien Applikationen zu demonstrieren. Als Baugruppe sollen ein miniaturisiertes und industriell einsetzbares Amperemeter und Magnetfeldsensor für die Anwendung als hochgenauer Wegmesser hergestellt werden. Das Amperemeter kann im Weiteren zu einem Strom-Sollwertgeber verbaut werden. Beide Applikationen nutzen dabei absolute Magnetfeldmessungen mit Hilfe der NV-Zentren im Diamant und unterscheiden sich lediglich in den physikalischen Eingangsgrößen. Im ersten Fall ist das Eingangssignal der zu bestimmende Strom der das Magnetfeld erzeugt. Im zweiten Fall ist es die variierende Magnetfeldstärke (z. B. auf einem magnetkodierte Präzisionsmaßstab). Beide Applikationen unterscheiden sich zwar in der Anwendung, sind aber im Aufbau nahezu identisch. Auf Basis von NV-Farbzentren in synthetischem Diamant werden ein industriell einsetzbarer hochempfindlicher Magnetfeldsensor und ein kalibrationsfreies Amperemeter entwickelt. Die Applikationen sind Beispiele für eine Reihe von Messgeräten oder Quantenstandards, deren Empfindlichkeit auf den Quanteneigenschaften der Defektzentren basieren (Spinkohärenzzeit) und deren Messgröße sich auf fundamentale Größen zurückführen lässt. Die Forschung in diesem Projekt wird sich sowohl auf Diamantsynthese und Eigenschaften der hergestellten NV-Zentren als auch auf die praktische Implementierung dieses Sensorelementes in eine Sensorplattform konzentrieren. Das System wird als vollständiger Demonstrator aufgebaut und getestet.</p>
BALLUFF GmbH	15.05. 2019	14.05. 2022	137.684	<p>Verbundprojekt: Standardisierungen in der Herstellung und Verarbeitung von Quantenmaterialien am Beispiel von NV-Farbzentren in Diamant zur Realisierung eines hochpräzisen auf Quanteneffekten beruhenden Amperemeters (DiaQuantFab) - Teilvorhaben: Untersuchungen zu einem Quantensensor-basierten Magnetfeldsensor</p>	<p>Für viele unterschiedliche Anwendungen in der Automatisierung ist eine hochpräzise Magnetfeldmessung unabdingbar. Dabei kommen heute häufig Hall- oder AMR-Sensoren zum Einsatz. Aufgrund der limitierten Sensitivität dieser Magnetfeldsensoren kommt es dabei aber zu Einschränkungen für ihre Anwendungen. Das Ziel dieses Vorhabens ist es, die Eignung von deutlich sensitiveren Magnetfeldsensoren auf Basis von Quantensensoren für den Einsatz in Automatisierung anhand eines spezifischen Anwendungsfall zu untersuchen. Hierzu soll auch ein entsprechender Demonstrator umgesetzt werden.</p>

<p>Universität Ulm</p>	<p>15.05. 2019</p>	<p>14.05. 2022</p>	<p>179.994</p>	<p>Verbundprojekt: Standardisierungen in der Herstellung und Verarbeitung von Quantenmaterialien am Beispiel von NV- Farbzentren in Diamant zur Realisierung eines hochpräzisen auf Quanteneffekten beruhenden Amperemeters (DiaQuantFab) - Teilvorhaben: Ansteuerung von Diamantquantensensoren</p>	<p>Auf Basis von NV-Farbzentren in synthetischem Diamant wird ein kalibrationsfreies Amperemeter entwickelt. Möglich wird dies durch die Quanteneigenschaften dieser Defektzentren (Spinkohärenzzeit), deren Messgröße sich auf fundamentale Größen (g-Faktor, Bohrsches Magnetron) zurückführen lässt. Von Vorteil ist, dass diese Quanteneigenschaften unter vergleichsweise einfachen äußeren Bedingungen zugänglich und selbst bei Raumtemperatur erzeugbar sind. Die Baugruppe soll mit kostengünstigen Komponenten in einem weitgehend industrialisierten Verfahren aufgebaut werden. Wichtig ist für sämtliche Herstellungsschritte ausgehend von der Diamantsynthese, über die Diamantbearbeitung und den Aufbau der optischen Komponenten bis hin zur Systemmontage immer die Skalierfähigkeit der Technologien hin zu einem Massenprodukt. Dabei werden für die verwendeten Diamanttechnologien erstmalig Vorgehensweisen zur Qualitätssicherung und Standardisierung vorgeschlagen, die auch auf benachbarte Applikationsfelder übertragbar sein sollen. Denn das Amperemeter ist dabei lediglich ein Beispiel für eine Reihe von Messgeräten und Quantenstandards, wie bsp. Quanten-Spannungsstandards oder – Mikrowellenstandards. Diese sollen in dem Vorhaben zwar nicht entwickelt werden, lassen sich aber als weitere Produkte aus den Projektzielen ableiten, da die entwickelten Diamantmaterialien und die Integrationstechnologie für die gesamte Produktpalette übernommen werden können.</p>
<p>CiS Forschungsinstitut für Mikrosensorik GmbH</p>	<p>15.05. 2019</p>	<p>14.05. 2022</p>	<p>439.491</p>	<p>Verbundprojekt: Standardisierungen in der Herstellung und Verarbeitung von Quantenmaterialien am Beispiel von NV- Farbzentren in Diamant zur Realisierung eines hochpräzisen auf Quanteneffekten beruhenden Amperemeters (DiaQuantFab) - Teilvorhaben: Erforschung einer Aufbau- und Verbindungstechnologie für den Sensor</p>	<p>CiS wird mit etablierten Verfahren der Aufbau- und Verbindungstechnologie die Mikromontage der Sensorelemente vornehmen sowie bei der Sensorsystemherstellung (Demonstratoren) mitwirken. Hierzu zählt der höchstpräzise Aufbau der optischen Komponenten für die Sensorsystemmontage. Wichtig ist für sämtliche Herstellungsschritte immer die Skalierfähigkeit der Technologien hin zu einem Massenprodukt. Als industrienahes Forschungsinstitut im Bereich hochqualitativer Sensorlösungen kann CiS diese Rolle genau ausfüllen. Darüber hinaus wird CiS mit den Vorhabenspartnern gemeinsam für das Quantenmaterial Diamanten ein einheitliches Verständnis von Messgrößen definieren, aus denen momentan noch fehlende Qualitätsstandards ableitbar sind.</p>

Ecodiamond GmbH	15.05.2019	14.05.2022	218.892	Verbundprojekt: Standardisierungen in der Herstellung und Verarbeitung von Quantenmaterialien am Beispiel von NV-Farbzentren in Diamant zur Realisierung eines hochpräzisen auf Quanteneffekten beruhenden Amperemeters (DiaQuantFab) - Teilvorhaben: Erforschung der Herstellung des Quantenmaterials	Standardisierung in der Herstellung und Verarbeitung von Quantenmaterialien am Beispiel von NV-Farbzentren in Diamant zur Realisierung eines hochpräzisen auf Quanteneffekten beruhenden Amperemeters
Forschungsbund Berlin e.V.	01.11.2018	31.10.2021	1.826.620	Verbundprojekt: Kompaktes, hochstabiles Lasersystem für Quanten- Informationsverarbeitung mit Calcium-Ionen (CaLas) - Teilvorhaben: Erforschung von Lasermodulen für ein kompaktes, hochstabiles Lasersystem für die Quanten- Informationsverarbeitung mit Calcium-Ionen	Ziel des Verbundvorhabens ist die Entwicklung eines kompakten, autonomen Lasersystems für die Ca-Ionen-basierte Quantennetzwerktechnologie. Das Lasersystem besteht aus einem Frequenzkamm, aus einem hochstabilen, ultra-schmalbandigen Resonator-basierten optische Frequenzreferenz und Diodenlaser-basierten Lasermodulen. Das Lasersystem wird am Ende des Vorhabens in einer Quantennetzwerkanwendung getestet. Im Teilvorhaben werden Laserchips für den Einsatz in extended cavity Diodenlasern und als optischer Verstärker für die 5 benötigten Wellenlängen entwickelt. Parallel wird eine Modulplattform erforscht, die eine hybride Mikrointegration von ECDL und Verstärker in einem kompakten, robusten und hermetischen Gehäuse ermöglicht. Für die Realisierung der Lasermodule werden miniaturisierte Isolatoren benötigt. Der Antragsteller trägt zur Entwicklung solcher Isolatoren bei. Er unterstützt die Partner bei der Lasersystemauslegung, bei der Integration der Module in das Lasersystem sowie beim Test der Lasermodule im Einsatz.

TOPTICA Photonics AG	01.12.2018	30.11.2021	385.200	<p>Verbundprojekt: Robuste, skalierbar hochverschränkte Photonenquellen und -detektoren als Plug&amp;Play-Schlüsselkomponenten für die Quantenkommunikation (QSource) - Teilvorhaben: Erforschung eines robusten Pumpasersansatzes für eine OAM-Photonenquelle</p>	<p>Ziel des Teilprojektes der TOPTICA Photonics AG ist die Erforschung und Entwicklung eines kompakten und stabilen Lasers bei 405nm als Pumpmodul für eine OAM-Quelle. Durch die Entwicklung des Lasers in enger Abstimmung mit dem Gesamtprojektverbund kann eine Anpassung der Laserparameter auf die sich aus dem Projektziel ergebenden technischen Anforderungen erfolgen. Für das Projekt ist die Entwicklung des Pumpasers im blauen Spektralbereich essentiell, da es bisher keinen kommerziell erhältlichen Laser mit den in dem Projekt angestrebten Eigenschaften gibt. TOPTICA wird in dem Projekt daher neue Laserkonzepte erarbeiten, die eine solche kompakte und stabile Laserquelle ermöglichen. Die angestrebte Stabilität von 0,01nm ist im heutigen Stand der Technik, auf Grund potentiell auftretender Modensprünge, nur mit externen Stabilisierungen des Lasers erreichbar.</p>
Jena-Optronik Gesellschaft mit beschränkter Haftung	01.12.2018	30.11.2021	349.900	<p>Verbundprojekt: Robuste, skalierbar hochverschränkte Photonenquellen und -detektoren als Plug&amp;Play-Schlüsselkomponenten für die Quantenkommunikation (QSource) - Teilvorhaben: Design und Aufbau einer robusten Zähl elektronik für OAM-Photonen</p>	<p>Ziel von QSource ist es, stabile und hochverschränkte Photonenquellen und entsprechende Detektoren zu entwickeln und deren Verlinkung für Wissenschaft, Forschung und Anwender der Quantenkommunikation zu demonstrieren. Dabei nutzt QSource ultrastabile Montage- und Packaging-Technologien für kompakte, hybrid-optische Lasersysteme mit Spontaneous-Parametric-Down-Conversion (SPDC) als elementarem Prozess der Erzeugung verschränkter Photonen und für interferometrische Einzelphotonen-Detektoren, sowie schnelle Einzelphotonen-Zähl- und Synchronisationselektronik. Entgegen bestehender Lösungen, setzt QSource dabei auf das neuartige "Entanglement by Path Identity (EPI)"-Konzept und erreicht damit erstmals Steuer- und Skalierbarkeit in Bezug auf Verschränkungsgrad und Modenzahl. Anhand einer hochverschränkten Orbital Angular Momentum (OAM) Quelle sowie einem Detektor für OAM-verschränkte Photonen soll gezeigt werden, dass der Transfer vom Laboraufbau über die Abschätzung und Optimierung prinzipieller Parameter bis hin zu einer kompakten, feldtauglichen und für die gewünschte Einsatzumgebung getesteten Baugruppe gelingt, die als Demonstrator geeignet ist für einen Technologietransfer zu interessierten industriellen Verwertern u. a. aus dem Konsortium. Dazu werden moderne Fertigungs- und Integrationsverfahren für hybrid-optische Systeme angewandt, so dass mechanisch und thermisch stabile laseroptische Systeme für Quelle und Detektor entstehen. Die Demonstration von Quelle und Detektor in einem laseroptischen Breadboard-Link zur Quantum Key Distribution (QKD) runden das Anwendungsszenario für die verschränkte Photonenquelle ab. Gezeigt wird also ein im Labor vollständiger QKD-Link mit plug&amp;play-fähigen, hochverschränkten OAM-Photonenquelle und -Detektoren auf TRL 5.</p>

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein	01.12.2018	30.11.2021	1.012.000	Verbundprojekt: Robuste, skalierbar hochverschränkte Photonenquellen und -detektoren als Plug&Play-Schlüsselkomponenten für die Quantenkommunikation (QSource) - Teilvorhaben: Design und Aufbau einer robusten, hochverschränkten Photonenquelle	Ziel des Teilvorhabens im Verbund QSource ist es, stabile und hochverschränkte Photonenquellen und entsprechende Detektoren zu entwickeln, aufzubauen und zu testen. Schwerpunkt der Arbeiten sind der Einsatz ultrastabiler Montage- und Packaging-Technologien zur Realisierung kompakter, hybrid-optischer Lasersysteme für die Umsetzung einer Spontaneous Down Conversion (SPDC) in einem interferometrischen Quellen-Setup zur Erzeugung verschränkter Photonen und die Integration einer chiralen Phasenplatte zum Aufprägen orbitaler angular Momentums (OAM) auf die verschränkten Photonen. Stabile Packaging-Technologien kommen auch zum Aufbau interferometrische Einzelphotonen-Detektoren für die verschränkten Photonen zum Einsatz. Basierend auf den beiden Schlüsselkomponenten Quelle und Detektor wird im Labor ein Link zwischen Quelle und Detektor demonstriert, um die grundsätzliche Eignung von OAM-Photonen für die Datenübertragung nachzuweisen.
Qioptiq Photonics GmbH & Co. KG	01.12.2018	30.11.2021	383.300	Verbundprojekt: Robuste, skalierbar hochverschränkte Photonenquellen und -detektoren als Plug&Play-Schlüsselkomponenten für die Quantenkommunikation (QSource) - Teilvorhaben: Robuster Detektor für hochverschränkte OAM-Photonen	Die meisten gegenwärtigen Konzepte der optischen Quanten-Informationstechnologie nutzen die Polarisation zur Verschränkung der Photonen. Diese einfache Herangehensweise ermöglicht konzeptuell einfache Komponenten für Quelle, Kanal und Detektoren. Die Polarisation bietet jedoch nur zwei orthogonale Quantenzustände mit entsprechend begrenzter Verschränkung und Leistungsfähigkeit. Generell steigt die Leistungsfähigkeit von Quanten-Informationssysteme mit der Anzahl der verschränkten Freiheitsgrade exponentiell an. Im QSource Projekt soll daher das Orbital Angular Momentum (OAM) der Photonen zur Verschränkung verwendet werden. Im Fokus des vorliegenden Teilprojektes steht mit der Entwicklung eines robusten, plug&play-fähigen OAM Detektors eine der zentralen Komponenten für die Quanten-(De)kodierung. Das System zeichnet sich aus durch die Sortierung der Photonen nach OAM Zustand und die simultane Detektion aller Photonen im abgedeckten Verschränkungsbereich. Im Vergleich zur bisher schon (im akademischen Bereich) verwendeten Detektion von einzelnen, vordefinierten OAM Zuständen, bei der nur die Photonen im entsprechenden Zustand detektiert werden und die restlichen Photonen ungenutzt bleiben, ermöglicht der neue Detektor eine sehr viel effizientere Nutzung der Quanteninformation. Zur Entwicklung des OAM Detektors sollen moderne Fertigungs- und Integrationsverfahren für kompakte optische Systeme erprobt und angewandt und ultrastabile Montage- und Packaging-Technologien genutzt werden. Ziel ist, nach dem Erstellen eines flexiblen Laboraufbaus zur Charakterisierung der wesentlichen Performance Parameter, das Erreichen des Technologietransfers zu einem kompakten, feldtauglichen und für die gewünschte Einsatzumgebung getesteten Demonstrator. Durch das kompakte und modulare Design des Detektors wird es möglich, mehrere Module zu kaskadieren und den Verschränkungsgrad des Systems sukzessive zu Erhöhen.

Universität Stuttgart	01.11. 2018	31.10. 2021	134.880	Verbundprojekt: Scaling Up quantum computation with Molecular spins (SUMO) - Teilvorhaben: Einzelmolekül- Integration und - Charakterisierung	Das SUMO Vorhaben wird die Basis für eine neue Architektur zur Quantenrechnung und –simulation schaffen, in der Information in molekularen Qubits kodiert ist und über supraleitende Resonatoren gelesen, geschrieben und kommuniziert wird. Das SUMO Vorhaben baut auf der europäischen Führungsposition im Bereich Molekularmagnetismus auf und vereint Chemie, Physik und Elektrotechnik, um neuartige Moleküle zu synthetisieren, ihre Spinlebensdauern und Kohärenzzeiten mittels Elektronenresonanzspektroskopie und ultraschneller Rastertunnelmikroskopie zu messen und sie in supraleitende Resonatoren zu integrieren. Das Teilprojekt "Einzelmolekül-Integration und Synthese" konzentriert sich auf die Schlüsselfrage, wie magnetische Moleküle mit einer supraleitenden Umgebung interagieren. Das Teilprojekt liefert spezifische Designansätze, wie die Schnittstelle zwischen Molekülen und supraleitender Elektronik auf atomarer Ebene optimiert werden kann.
Albert- Ludwigs- Universität Freiburg	01.11. 2018	31.10. 2021	812.958	Verbundprojekt: Kompaktes, hochstabiles Lasersystem für Quanten- Informationsverarbeitung mit Calcium-Ionen (CaLas) - Teilvorhaben: Kristallzüchtung und Charakterisierung von CdMnTe Kristallen für die Anwendung als Isolatoren	Das Ziel dieses Teilprojekts ist die Entwicklung von Mikroisolatoren auf der Basis von CdMnTe Kristallen als Bestandteil eines kompakten, hochstabilen Lasersystems zur Quanten-Informationsverarbeitung mit Calcium-Ionen im Verbundprojekt CaLas. Diese Entwicklung erfordert die Kristallzüchtung und die Materialpräparation von einkristallinen CdMnTe Kristallen. Die Herausforderung liegt auf dem Gebiet der Kristallzüchtung, um einkristalline, defektarme Kristalle mit einem sehr hohen spezifischen Widerstand herzustellen. CdMnTe besitzt spezifische elektrooptische Eigenschaften, die es für den Einsatz als Mikroisolator prädestiniert. Jedoch beeinflusst die reduzierte Qualität der Kristalle die Verfügbarkeit und damit die erfolgreiche Kommerzialisierung negativ. Die Ursache ist der hohe ionische Bindungsanteil, der typisch für eine II-VI Verbindung ist. Dieser führt während der Kristallzüchtung zur Bildung von Zwillingen und strukturellen Defekten wie Einschlüssen und Präzipitaten.

Technische Universität München	01.05.2019	30.04.2022	513.300	Verbundprojekt: Modulare Quantendetektoren (MARQUAND) - Teilvorhaben: hochempfindliche, fasergekoppelte, kryogenfreie Einzelphotonendetektoren für Quantenkommunikation	Das Wissenschaftliche Ziel dieses Vorhabens ist die Bereitstellung von Einzelnen mit einer SDE von 95 % für fasergekoppelte Photonen bei 1550 nm (Telekom) Wellenlänge für den vorrangigen Einsatz in Kommunikationsanwendungen mit einer Option zur Mehrkanal-Detektion ( $n \geq 16$ ). Im Zuge der Entwicklungsarbeit sollen dazu amorphe Wolfram-Silizid (WSi) Dünnschichten hergestellt, optimiert und mit optischen Resonatoren und Fasern gekoppelt werden. Für den universellen Einsatz, z. B. in der Forschung, sollen neben den hocheffizienten, schmalbandigen WSi-SSPDs auch breitbandige SSPDs auf Basis der konventionellen Materialien NbN/NbTiN hergestellt werden. Wissenschaftlich-technisches Arbeitsziel von Projektpartner 2 (Kiutra GmbH) ist die Bereitstellung eines kompakten, vollständig kryogenfreien Kryokühlers zur dauerhaften Erzeugung von milli-Kelvin Temperaturen für den Betrieb von WSi-SSPDs und mit minimalen Infrastrukturanforderungen (z. B. im Hinblick auf Abmessungen, Leistungsaufnahme, Kühlungsanforderungen). Im Zuge der Entwicklungsarbeit soll dazu ein CADR-Kryokühler gemäß projektspezifischer Anforderungen (z. B. Minimaltemperatur, Kühlleistung, optische und elektrische Durchführungen, Integration von Hochfrequenz-Elektronik) aufgebaut werden. Dies beinhaltet insbesondere die Herstellung, Erprobung und Optimierung neuer, metallischer ADR-Kühlmedien, die eine höhere Effizienz der CADR-Methode und damit die Realisierbarkeit eines noch kompakteren Gesamtsystems versprechen. Speziell für die Kühlung empfindlicher Quantensysteme, z. B. SSPDs, soll eine elektromagnetisch abgeschirmte und vibrationsarme Umgebung entwickelt werden. Die Integration von Photonendetektor- und Kühltechnologie zu einer vollständig automatisierten und marktfähigen Stand-Alone-Anlage mit den in 3 genannten Spezifikationen erfolgt gemeinschaftlich durch die beiden Projektpartner.
kiutra GmbH	01.05.2019	30.04.2022	272.000	Verbundprojekt: Modulare Quantendetektoren (MARQUAND) - Teilvorhaben: Magnetische Dauerkühlung für Quantendetektoren	Ziel des Verbundvorhabens MARQUAND ist die Erforschung eines Photonendetektors auf Basis hocheffizienter supraleitender Einzelphotonendetektoren (SNSPDs). Ziel des beantragten Teilvorhabens ist die Entwicklung eines kompakten Kryokühlers, der durch eine magnetischen Kühlmethode ("kontinuierliche adiabatische Entmagnetisierungskühlung", engl. "continuous adiabatic demagnetization refrigeration", kurz CADR) die für den Betrieb von Quantendetektoren benötigten tiefen Temperaturen dauerhaft und kryogenfrei bereitstellen kann und insbesondere alle Voraussetzungen für den Betrieb von fasergekoppelten SNSPDs erfüllt.

Johannes Gutenberg- Universität Mainz	01.02. 2019	31.01. 2022	620.640	Verbundprojekt: Miniaturisierte Lichtquellen für den industriellen Einsatz in Quantensensoren und Quanten-Imaging- Systemen (MiLiQuant) - Teilvorhaben: Diamant- und Dampfzellen-NMR- Gyroskope	Im Rahmen dieses Teilvorhabens wird ein Alkali-Gas Drehraten Sensors basierend auf Kernspinresonanz in einem dreiachsigen Rotationsteststand konstruiert und im Helmholtz-Institut Mainz aufgebaut. Dieser Drehraten- Sensor weist größte Flexibilität bezüglich des systematischen Studierens von Fehlerquellen auf und dient somit dem Qualifizieren und Quantifizieren von Fehlerquellen, die einen miniaturisierten Sensor limitieren könnten, der Im Rahmen dieses Projekts bei Bosch unter Bezugnahme der speziell entwickelten Lichtquelle, entwickelt wird. Die gewonnenen Erkenntnisse werden ständig in einem Lastenheft aktualisiert, das der Fa. Bosch als Entwicklungsgrundlage dient. De Flexibilität des wissenschaftlichen Sensors und die Möglichkeit, beide Sensoren gleichzeitig auf dem Teststand zu prüfen, erlaubt eine effiziente Identifizierung und Adressierung der limitierenden technischen Fehlerquellen, so dass die Performance des miniaturisierten Sensors optimiert werden kann. In einem zweiten Arbeitspaket wird der Prototyp eines Diamant-basierten Gyroskops entwickelt, deren Grundlagen in einer Publikation der Mainzer Arbeitsgruppe beschrieben werden.
--	----------------	----------------	---------	---	---

Carl Zeiss AG	01.02.2019	31.01.2022	663.900	<p>Verbundprojekt:          Miniaturisierte Lichtquellen für den industriellen Einsatz in Quantensensoren und Quanten-Imaging-Systemen (MiLiQuant)          - Teilvorhaben:          Quantensensor zum intraoperativen Neuromonitoring und Strahlenreduzierte Mikroskopie für die Entwicklungsbiologie</p>	<p>Als Projektpartner vertritt ZEISS in diesem Rahmen dieses Verbundantrages die Anwendungen • Intraoperatives Neuromonitoring durch diamantbasierte Quantensensoren, • Strahlenreduzierte Mikroskopie für die Entwicklungsbiologie. In beiden Anwendungen ist für ZEISS das angestrebte Ziel, aus dem Verbundprojekt Lichtquellen zu erhalten, die neben den benötigten grundlegenden physikalischen Spezifikationen auch bereits mit geeigneten Schnittstellen versehen sind, um eine Integration in ZEISS-Anwendungen hürdenlos zu erlauben. Gleichzeitig treibt ZEISS die Entwicklung praxistauglicher Applikationen der Quantentechnologien in dem Verbundprojekt voran, um sie mittel- bis langfristig zur Marktreife zu führen und somit auch einen Markt für die entsprechenden Lichtquellen zu schaffen. Bei der Anwendung Intraoperatives Neuromonitoring durch diamantbasierte Quantensensoren, wird ein Quantensensor entwickelt, der sehr empfindlich gegenüber schwachen Magnetfeldern ist. Dieser Sensor soll durch Integration in ein Endoskop dem Neurochirurgen während der Operation eine völlig neue Informationsquelle zur Verfügung stellen, die es ihm ermöglicht Hirnströme hochaufgelöst und live während eines Eingriffs zu beobachten. Im Rahmen der Anwendung Strahlenreduzierte Mikroskopie für die Entwicklungsbiologie, soll ein neuartiges Bildgebungsverfahren im mittleren infraroten Bereich entwickelt werden. Bildgebung im mittleren infraroten Bereich ist von besonderer Interesse, da sich in diesem Bereich viele biochemische Vorgänge beobachten lassen. Aktuelle bildgebende Verfahren in diesem Bereich benötigen jedoch erhebliche Lichtdosen. Gleichzeitig sind biologische Proben aber sehr lichtempfindlich, was die Nutzung von Bildgebung im mittleren infraroten Bereich stark limitiert. Das hier entwickelte bildgebende Verfahren hat das Potential dieses Problem zu lösen und zu einem entscheidenden Fortschritt in der in situ Abbildung lichtempfindlicher biologischer Objekte zu führen.</p>
Nanoscribe GmbH	01.02.2019	31.01.2022	296.000	<p>Verbundprojekt:          Miniaturisierte Lichtquellen für den industriellen Einsatz in Quantensensoren und Quanten-Imaging-Systemen (MiLiQuant)          - Teilvorhaben: 3D Druck als Aufbau- und Verbindungstechnik für miniaturisierte Lichtquellen</p>	<p>Mit dem Teilvorhaben 3D Druck als Aufbau- und Verbindungstechnik für miniaturisierte Lichtquellen verfolgt die Nanoscribe GmbH das Ziel ihre additive Mikrofertigung basierend auf Multiphotonen Absorption als Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) für miniaturisierte Lichtquellen zu etablieren und an die Bedingungen quanten-optischer Bauelemente anzupassen. Diese AVT ist für die reproduzierbare Herstellung und die spätere Verwertung von industriellen quantentechnologischen Modulen zwingend notwendig, um sowohl die benötigte Qualität, den geforderten Bauraum als auch den Kostenpunkt zu erreichen.</p>

Universität Paderborn	01.02.2019	31.01.2022	687.300	<p>Verbundprojekt: Miniaturisierte Lichtquellen für den industriellen Einsatz in Quantensensoren und Quanten-Imaging-Systemen (MiLiQuant)</p> <p>- Teilvorhaben: Technologie und Theorie für MIR Quanten-Imaging Systeme</p>	<p>Dieses Teilvorhaben setzt es sich zum Ziel, neuartige Quantenbildgebungsprotokolle und Quantenlichtquellen für Mikroskopie bei Wellenlängen im mittleren Infrarotbereich (MIR) zu entwickeln. Der innovative Ansatz dieses Teilvorhabens sieht es vor, Quantenbildgebungsprotokolle zu entwickeln, die sich die Farbverschränkung von Quantenlicht zu Nutze machen, um auf eine Detektion des MIR Lichts vollständig verzichten zu können. In diesem Teilvorhaben werden sowohl die technologischen, als auch die theoretischen Grundlagen des Gesamtsystems erarbeitet, die die Umsetzung quantenoptischer Konzepte in der Praxis ermöglichen werden.</p>
Robert Bosch Gesellschaft mit beschränkter Haftung	01.02.2019	31.01.2022	603.600	<p>Verbundprojekt: Miniaturisierte Lichtquellen für den industriellen Einsatz in Quantensensoren und Quanten-Imaging-Systemen (MiLiQuant)</p> <p>- Teilvorhaben: Miniaturisierte Diamant-Magnetometer und Dampfzellen-NMR-Gyroskope</p>	<p>Das Projekt Miliquant widmet sich der Entwicklung von miniaturisierten und kostengünstigen Laserquellen für die Nutzung quantenoptischer Sensorprinzipien welches das Ziel hat, erste Demonstratorsysteme in den Bereichen Diamant-Magnetometrie und Kernspinresonanz-Drehratensensoren aufzubauen. Mit diesem Verbundprojekt schließt Bosch eine strategische Lücke im Bereich der Lichtquellen die für die angestrebten Produktentwicklungen im Bereich Quantensensoren eine entscheidende Rolle bezüglich realisierbarer Baugrößen, Leistungsverbrauch, Kosten und Sensorperformance im späteren Produkt spielen werden. Dabei werden in diesem Teilvorhaben Lichtquellen sowie weitere notwendige Teilsysteme und Technologien für miniaturisierte Quantensensoren für zwei unterschiedliche Anwendungen untersucht: miniaturisierte Diamant-Magnetometer zur Erfassung neuronaler und muskulärer Magnetfelder sowie Kernspin-basierte Drehratensensoren basierend auf Kernspinpräzessionsmessung Dampfzellen gefüllt mit Rb Dampf und Xe Isotopen die als Backupsystem für die GNSS-basierte Positionierung autonom fahrender Fahrzeuge benötigt werden. Konkrete Aufgabenstellungen sind die Entwicklung eines Glasfaser-basierten Ansatzes zur optischen Anregung und für das optische Auslesen eines Diamant-Magnetometers sowie die Entwicklung von Konzepten für ein Mehrkanal-Magnetsensorsystem. Den Hauptteil der Arbeiten im Rahmen dieses Teilvorhabens wird die Entwicklung von NMR-Drehratensensoren basierend auf MEMS-basierten Dampfzellen einnehmen. Hierbei stellt die Herstellung und Befüllung von miniaturisierten Dampfzellen sowie die Entwicklung der Systemkomponenten und Funktionen wie magnetische Abschirmung, Magnetfeldkompensation, Magnetfeldanregung und Dampfzellen-Temperaturregelung im Vordergrund.</p>

Q.ant GmbH	01.02. 2019	31.01. 2022	2.490.200	Verbundprojekt: Miniaturisierte Lichtquellen für den industriellen Einsatz in Quantensensoren und Quanten-Imaging- Systemen (MiLiQuant) - Teilvorhaben: Miniaturisierte Lichtquellen für die Quantentechnologien	Dieses Teilvorhaben strebt im Rahmen des Verbundes MiLiQuant die Erforschung und Demonstration von Lichtquellen für den skalierbaren Alltagsinsatz von Quantensensoren und Quanten-Imaging Systemen an. Im engen Zusammenspiel mit den anderen Verbundpartnern und nach den gemeinsam definierten Anforderungen werden Strahlquellen gefertigt, die - miniaturisierbar, - intensitäts- und frequenzstabil, - rauscharm, - wartungsfrei und - (teil-)automatisiert herstellbar sind. Durch eine enge Abstimmung mit den Verbundpartnern wird eine breite technologische Erforschung und Entwicklung optischer Quantentechnologien als "Enabling Technologies" für relevante Anwendungen sichergestellt. Als übergreifender und für alle Anwendungen relevanter Baustein des Vorhabens wird die automatisierte Aufbau- und Verbindungstechnologie (AVT) für zentrale Komponenten der Quantentechnologie erarbeitet. Hierzu werden kommerziell erhältliche Automaten an die Bedingungen quantenoptischer Bauelemente angepasst und ermöglichen so die reproduzierbare Herstellung und die spätere Verwertung von industriellen quantentechnologischen Modulen.
Fraunhofer- Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein	01.04. 2019	31.03. 2021	6.426.679	Einzelvorhaben: Quantum Photonics Labs (QPL)	Der hier vorliegende Antrag "Quantum Photonics Labs" (QPL) zielt darauf ab, die bestehende Expertise des Antragstellers in der klassischen und Quantenphotonik so zu erweitern, dass vollständige wissenschaftlich-technische quantenphotonische Prozessketten entstehen, welche einen schnellstmöglichen Transfer von quantenphysikalischer Wissenschaft zu anwendungsbereiten Devices für Forschung und Industrie ermöglichen. Dazu wird das wissenschaftlich-technische Ökosystem des Antragstellers in den Bereichen Mikrostrukturierung, Fasertechnologie, Systemintegration, Charakterisierung sowie Freiformtechnologie strategisch komplettiert. Damit wird quantenphotonische Forschung und Entwicklung auf höchstem Niveau ermöglicht.

<p>Julius-Maximilians-Universität Würzburg</p>	<p>01.04.2019</p>	<p>31.03.2021</p>	<p>349.080</p>	<p>Einzelvorhaben: Photonenzahlauflösende und Totzeitfreie RTD-Einzelphotonendetektion (Photon-N)</p>	<p>Ziel des Vorhabens ist die Erforschung und Entwicklung von neuartigen Resonanztunneldioden-(RTD)-Einzelphotonendetektoren für Anwendungen in den optischen Quantentechnologien und den Lebens- und Materialwissenschaften. Einzelphotonendetektoren wie Lawinendurchbruch-Photodioden (engl. avalanche photodiodes, APDs), oder supraleitende Nanodraht-Einzelphotonendetektoren sind sogenannte "Klick"-Detektoren. Hierbei wird beispielsweise ausgenutzt, dass die Absorption eines Photons den Supraleiter lokal über die Sprungtemperatur erwärmt und es zu einem Zusammenbruch der Supraleitung kommt. Die genaue Photonenzahl lässt sich mit ihnen jedoch nicht, beziehungsweise nur indirekt über Umwege abbilden. Zudem leiden diese unter einer Totzeit von (typ. <math>\approx 50</math> ns), da der Detektor nach erfolgreicher Detektion zunächst wieder in den Ausgangszustand zurückgesetzt werden muss. Alternative Ansätze mit der Möglichkeit die genaue Photonenzahl eines Pulses aufzulösen, sind z. B. räumliches Multiplexing oder supraleitende Transition-Edge-Sensoren (TES). Nachteile hierbei sind jedoch nichtkonstante Quanteneffizienzen und Betriebstemperaturen im sub-200 mK Regime. Der im Vorhaben vorgeschlagene Ansatz erlaubt eine Photonenzahlauflösende und Totzeitfreie Photonendetektion und in Kombination mit einer Wellenleiterführung hocheffiziente Detektion durch Ausnutzung des Resonanztunneldioden- (RTD-) Detektorprinzips. Das RTD-Detektorprinzip zeichnet sich durch die Fähigkeit aus, dass der Detektor-Ausgang direkt proportional zur Anzahl bzw. der Änderung der Anzahl der Photonen pro Puls ist und damit Photonenzahlauflösende Einzelphotonendetektion im Hochfrequenzbetrieb realisierbar sind. Des Weiteren erfolgt das Ausgangs-Signal nahezu instantan und ohne zeitliche Unsicherheit. Mit einer Wellenleitergeometrie zur Lichteinkopplung und -führung, können zudem einfallende Lichtpulse mit nahezu 100 %-Effizienz detektiert werden.</p>
--	-------------------	-------------------	----------------	---	---

Diamond Materials GmbH	15.05.2019	14.05.2022	151.260	<p>Verbundprojekt: Standardisierungen in der Herstellung und Verarbeitung von Quantenmaterialien am Beispiel von NV-Farbzentren in Diamant zur Realisierung eines hochpräzisen auf Quanteneffekten beruhenden Amperemeters (DiaQuantFab) - Teilvorhaben: Erforschung von Diamantmaterialien für den Sensor</p>	<p>Diamant-basierte mikrooptische-Sensoren Beispiel eines Amperemeters und eines Magnetfeldsensors Auf Basis von NV-Farbzentren in synthetischem Diamant wird ein kalibrationsfreies Amperemeter entwickelt. Möglich wird dies durch die Quanteneigenschaften dieser Defektzentren (Spinkohärenzzeit), deren Messgröße sich auf fundamentale Größen (g-Faktor, Bohrsches Magnetron) zurückführen lässt. Von Vorteil ist, dass diese Quanteneigenschaften unter vergleichsweise einfachen äußeren Bedingungen zugänglich und selbst bei Raumtemperatur erzeugbar sind. Die Baugruppe soll mit kostengünstigen Komponenten in einem weitgehend industrialisierten Verfahren aufgebaut werden. Wichtig ist für sämtliche Herstellungsschritte ausgehend von der Diamantsynthese, über die Diamantbearbeitung und den Aufbau der optischen Komponenten bis hin zur Systemmontage immer die Skalierfähigkeit der Technologien hin zu einem Massenprodukt. Dabei werden für die verwendeten Diamanttechnologien erstmalig Vorgehensweisen zur Qualitätssicherung und Standardisierung vorgeschlagen, die auch auf benachbarte Applikationsfelder übertragbar sein sollen. Denn das Amperemeter ist dabei lediglich ein Beispiel für eine Reihe von Messgeräten und Quantenstandards, wie bsp. Quanten-Spannungsstandards oder – Mikrowellenstandards. Diese sollen in dem Vorhaben zwar nicht entwickelt werden, lassen sich aber als weitere Produkte aus den Projektzielen ableiten, da die entwickelten Diamantmaterialien und die Integrationstechnologie für die gesamte Produktpalette übernommen werden können.</p>
nano analytik GmbH	15.05.2019	14.05.2022	229.379	<p>Verbundprojekt: Standardisierungen in der Herstellung und Verarbeitung von Quantenmaterialien am Beispiel von NV-Farbzentren in Diamant zur Realisierung eines hochpräzisen auf Quanteneffekten beruhenden Amperemeters (DiaQuantFab) - Teilvorhaben: Erforschung von Rasterkraftsonden als Magnetometer</p>	<p>Das Ziel dieses Teilvorhabens besteht darin, Quantendefekte in Diamant für die Herstellung von vermarktbar, kalibrationsfreien Applikationen in Raster-Sonden Magnetometrie zu demonstrieren. 1. Entwicklung vereinheitlichter Rastersondenmagnetometer-Sensoren für ein Anwendungsfeld mit zu definierenden Aktuations- und Sensorsignalbereichen mit einer Diamantspitze mit platzierten NV-Zentren. 2. Entwicklung von "Quasi Monolith"- Integrationstechnologie Diamant-Spitze –Si-Cantilever. 3. Entwicklung einer miniaturisierten Elektronik mit digitaler Standard-Schnittstelle zur Kommunikation mit Mikrocontroller bzw. Computer oder AFM-Controller für die Arbeit mit allen gängigen kommerziellen AFN's</p>

TransMIT Gesellschaft für Technologietransfer mbH	01.02.2020	31.01.2023	506.424	<p>Verbundprojekt: Plattform für Tieftemperatur Qubit Experimente (PtQUBE) - Teilvorhaben: Pulsrohrkaltkopf mit nachgeschalteten Subkelvin-Stufen zur Kühlung skalierbarer Experimentierplattformen für variable Eingangsleistungen im Bereich von 2 bis 8 kW</p>	<p>Das Gesamtziel des Verbundvorhabens ist es, eine neuartige, für viele potentielle Anwender attraktive Experimentierplattform für kryogene Quantum-Computing Anwendungen zu schaffen. Diese Plattform soll kostengünstig, leicht bedienbar, wartungsarm und kommerzialisierbar sein. Sie wird zudem weitgehend ohne die sonst für kryogene Anwendungen häufig notwendige spezielle Infrastruktur auskommen. Zu diesem Zweck wird im TransMIT-Teilvorhaben ein neuartiger Pulsrohrkühler für variable Kompressor-Leistungen realisiert und dieser in einem speziell auszulegenden Kryostaten in Kombination mit magnetischen Subkelvin-Stufen zur Kühlung der Qubit-Experimentierplattform eingesetzt.</p>
Universität Regensburg	01.04.2020	31.03.2023	293.500	<p>Verbundprojekt: Superinductor-based Quantum Technologies with Ultrastrong Couplings (SiUCs) - Teilvorhaben: Theoretische Untersuchung von Supraleiter-basierten Qubits und Schaltkreisen mit ultrastarker Licht-Materie Kopplung</p>	<p>Supraleitende Quantenschaltungen stellen eine der aussichtsreichsten Plattformen der Festkörperphysik für Quantencomputing dar. Dieser Erfolg begründet sich in der naturgemäß großen Wechselwirkung zwischen Licht (repräsentiert durch Mikrowellensignale) und Materie (verkörpert durch supraleitende Qubits). Mikrowellen Photonen werden auf jeder Stufe von Quanten- Informations-Protokollen, Qubit Manipulationen, der Qubit Auslesung und Qubit-Kopplungen verwendet. SiUCs verwendet das Potential der sehr großen Licht-Materiekopplung, oft auch ultra-starke Kopplung genannt. Im Besonderen wird sich SiUCs auf die Effizienzoptimierung der Qubit Operationen konzentrieren, welche Licht-Materie Wechselwirkungen beinhalten. Dies geschieht mittels der Entwicklung von Architekturen, welche auf Superinduktoren basieren. Letztere werden dazu verwendet, ein fehlendes Instrument der supraleitenden Quantenschaltungs-Toolbox zu entwickeln, nämlich den Mikrowellen-Einzelphotonendetektor. Abschließend wird diese einzigartige Vielteilchenphysik in Verbindung mit ultrastarken Kopplungen mittels extra hierfür entworfener Quantensimulatoren untersucht werden.</p>

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	01.04.2020	31.03.2023	321.600	Verbundprojekt: Superinductor-based Quantum Technologies with Ultrastrong Couplings (SiUCs) - Teilvorhaben: Quantenschaltungselemente mit hoher Impedanz	Supraleitende Quantenschaltkreise bieten eine der vielversprechendsten Plattformen für Quantencomputer. Der Erfolg beruht auf der großen Wechselwirkung zwischen Licht und Materie, die von den supraleitenden Qubits im Mikrowellenbereich natürlicherweise bereitgestellt wird. Die Mikrowellen-Photonen werden für die gesamte Quanteninformationsverarbeitung verwendet, beispielsweise für das Manipulieren und Auslesen der Qubits sowie für die Qubit-Qubit Wechselwirkung. Für die Beschreibung der Licht-Materie Wechselwirkung wird die Quantenoptik herangezogen. Diese wurde ursprünglich hauptsächlich für die mit Licht schwach wechselwirkenden Atome entwickelt und angewandt. Dabei kommt aufgrund der schwachen Wechselwirkung oft die Rotating-Wave-Approximation (RWA, dt. Drehwellenäherung) zur Geltung, die die gemittelte langsame Zustandsänderung der Atome beschreibt. Bei supraleitenden Schaltkreisen kann dieses Regime ohne weiteres verlassen werden, da Qubits buchstäblich direkt miteinander verdrahtet werden können. Die Grenzen der RWA wurden bereits beim Auslesen der Qubits und bei dissipativen getriebenen Systemen aufgezeigt. Die SiUCs werden einen radikal neuen Ansatz verfolgen: Wir werden die Möglichkeiten der sehr großen Licht-Materie-Kopplung - oft als ultra-starke Kopplung bezeichnet - nutzen, anstatt ihr aus dem Weg zu gehen. Mit diesem Ansatz werden sich Qubits wesentlich schneller kontrollieren lassen, wodurch sich die Rechentiefe eines Quantumcomputers deutlich erhöhen lässt. Um diesen anspruchsvollen Ansatz kontrolliert anzugehen, werden wir eine Architektur auf Basis von sogenannten Superinduktivitäten entwickeln. Resonatoren und Koppler, die aus solchen Komponenten aufgebaut sind, weisen im Mikrowellenbereich Impedanzen nahe dem Quantenwiderstand ( $RQ \sim 6,5k\Omega$ ) auf, was eine Verstärkung der Licht-Materie-Wechselwirkung und gleichzeitig weniger Verluste ermöglicht. Das KIT wird die hochohmige Schaltung entwerfen, produzieren und testen.
---	------------	------------	---------	---	---

Universität Stuttgart	01.02. 2020	31.01. 2023	185.700	Verbundprojekt: Magnetic Atom Quantum Simulator - Teilvorhaben: Superauflösende Quantengas- Mikroskopie an Ultrakalten Dysprosium Atomen (MAQS)	In diesem Verbundprojekt entwickeln mehrere experimentell bzw. theoretisch arbeitenden Forschungsgruppen gemeinsam einen neuartigen Quantensimulator mit langreichweitigen Wechselwirkungen. Dazu sollen magnetische Atome in optischen Gittern zum Einsatz kommen. Diese Plattform zeichnet sich dadurch aus, dass sie aktuell als einziges Quantensystem mit langreichweitiger Wechselwirkung zu großen Teilchenzahlen skalierbar ist, sowie die notwendige Stabilität zum Studium dynamischer Prozesse aufweist. Davon ausgehend sollen fundamentale Fragestellungen aus der Vielteilchenphysik, wie beispielsweise neue Aggregatzustände und deren Dynamik untersucht werden. Im Rahmen des Teilprojekts ist dazu der Aufbau eines neuen Experiments zur Produktion, Manipulation und Untersuchung von dipolaren Dysprosium Atomen geplant. Um damit die gesuchten Materiezustände herstellen und untersuchen zu können, sollen erstmals Gitter mit besonders kleiner Periode, sowie neuartige Mikroskopietechniken mit einer Auflösung jenseits des Beugungslimits zum Einsatz kommen. Basierend auf diesen technologischen Entwicklungen sollen anschließend die oben besprochenen fundamentalen Fragestellungen auf dem Gebiet der Vielteilchenphysik untersucht werden.
--------------------------	----------------	----------------	---------	---	---

Universität Paderborn	01.03. 2020	28.02. 2023	234.144	Verbundprojekt: Anwendungsnahe Superauflösung in Raum und Frequenz (ApresSF) - Teilvorhaben: Zeit und Frequenz	Dieses Teilvorhaben setzt es sich zum Ziel, innovative Technologien für kohärente Quantenmessungen im Zeit- und Frequenzbereich zu entwickeln. Dabei ermöglichen Ansätze aus der Quantenmetrologie und Quanteninformationsverarbeitung die Implementierung von maßgeschneiderten Messungen, die eine Präzision jenseits derer von klassischen Intensitätsmessungen erreichen. Unsere Messungen basieren auf dem Zählen einzelner Photonen und sind damit speziell für Anwendungen bei geringen Lichtleistungen geeignet, zum Beispiel im Bereich der stellaren Spektroskopie, bei der klassische Messungen aufgrund des niedrigen Signallevels nicht mehr einsetzbar sind. Die Frage nach der Auflösung eines Messapparates ist altbekannt. So stellt beispielsweise die Beugungsbegrenzung – auch Rayleighs Fluch genannt – eine harte Grenze für das Auflösungsvermögen von direkter Bildgebung dar. Neuerdings wird diese Limitierung seitens der Quanteninformationstheorie allerdings in Frage gestellt. So konnte zum Beispiel gezeigt werden, dass eine optimierte, phasensensitive Messung in der Lage ist, Rayleighs Fluch auszuhebeln und eine Auflösung zu erreichen, die nur noch durch die fundamentale Quantenunschärfe begrenzt ist. In unserer Arbeitsgruppe wurde dieser Ansatz erstmals für Zeit- und Frequenzmessungen realisiert. Diese Vorarbeiten sollen im Rahmen dieses Teilvorhabens zu einer funktionellen Quantentechnologie erweitert werden, in deren Rahmen Bauelemente entwickelt werden, die die ultimativen Limitierungen für Zeit- und Frequenzmessungen ausreizen. Im Gesamtverbund werden die Grenzen der quanteninspirierten Superauflösung ausgelotet. Die Theoriewerke widmen sich der Frage nach idealen Messungen bei Multiparameterproblemen und der Rolle von Kohärenzen im Signalfeld. Die experimentellen Arbeiten setzen die gefundenen Messprotokolle in komplementären Systemen um.
--------------------------	----------------	----------------	---------	--	---

<p>Forschungszentrum Jülich GmbH</p>	<p>01.03.2020</p>	<p>28.02.2025</p>	<p>4.990.000</p>	<p>Topologische Quantum-Bit-Schaltkreise basierend auf Majorana-Moden</p>	<p>Gesamtziel des Vorhabens ist es aus topologischen Isolator (TI) – Supraleiter (S) Hybridnetzwerken ein topologisches Quantum Bit (Qubit) zu bauen, das in einem ersten Schritt die nicht-abelsche Vertauschungsrelation demonstrieren soll. Im zweiten Schritt soll es als skalierbare Einheit den Weg für marktreife, kleine topologische Quanten-Prozessoren ebnen. Dafür ist eine enge Zusammenarbeit von Nano-Ingenieuren, (theoretischen) Physikern und der Industrie geplant. Motiviert ist das Vorhaben durch einen zum Patent angemeldeten Prozess, der es auf innovative Art und Weise ermöglicht komplexe S-TI Hybride mit lokalisierten Majorana-Moden in-situ herzustellen. Die Möglichkeit diesen "Majorana-Chip" unkompliziert mit kommerziell erhältlicher Steuer- und Auslese-Elektronik zu koppeln, stellt in Aussicht skalierbare topologische Qubits innerhalb von fünf Jahren zu fertigen. Für die Umsetzung des Projekts ist der Umbau einer vorhandenen Molekularstrahlepitaxie (MBE) Anlage geplant. Zudem wird ein Mischkryostat inkl. Zubehör für die Charakterisierung der hergestellten Bauteile bei sehr tiefen Temperaturen beantragt. Ingesamt sollen auf dem Projekt fünf Leute (+ HiWis) arbeiten. Neben der Gruppenleiterstelle werden beantragt: Ein PostDoc für die SQUID Integration und Qubit Charakterisierung, zwei Ph.D. Stellen für MBE Wachstum von S-TI Hybridstrukturen, Nanofabrikation im Reinraum und anschließenden Tieftemperaturemessungen. Für Routineaufgaben werden die Doktoranden von einer wissenschaftlichen Hilfskraft (HiWi) unterstützt. Außerdem soll ein Techniker für die Instandsetzung und Optimierung des Kryostaten und des erforderlichen Messaufbaus eingestellt werden. In den ersten 12 Monaten wird anstatt des Ph.D. Studenten für die Tieftemperaturemessungen von Hybridbauteilen ein theoretischer Physiker (PostDoc) in der Gruppe arbeiten, um verschiedene (in Jülich verfügbare) Materialien und Bauteile zu simulieren und um "Braiding"-Layouts auf die TI Plattform zu übertragen.</p>
<p>Fachhochschule Münster</p>	<p>01.08.2020</p>	<p>31.01.2022</p>	<p>238.800</p>	<p>Open3 Quantum (O3Q)</p>	<p>Das Grundwissen zu Quantum Computing und Quantensensorik soll über den Einsatz von Low-Cost High-Tech Experimenten in Kombination mit digitalen Lehrmedien vermittelt werden. Insbesondere sollen durch Kostenreduktion und Adaption erstmals Einzelphoton-Experimente mit NV-Zentren in Diamant direkt für den Schulunterricht, für Forscher-AGs, für Schülerlabore, sowie Wettbewerbsformate wie z. B. Jugend forscht einsetzbar werden. Die Experimente werden durch digitale Lehrformate zum Rechnen mit Qubits ergänzt. Gerade die konkrete, individuelle, experimentelle und forschende Auseinandersetzung ermöglicht ein tiefergehendes und intuitives Verständnis der Quantenphysik, die nicht nur für das Studium von Physik, sondern auch für zukünftige Berufsfelder im Bereich der Ingenieurausbildung an Bedeutung gewinnen werden.</p>

Technische Universität München	01.08. 2011	31.07. 2015	209.264	CHIST-ERA Verbundprojekt CQC (Composing Quantum Channels) - Teilprojekt: Elementare Eigenschaften von Quanten-Kanälen	Den Rahmen für das Forschungsvorhaben bildet die Quanten-Informationstheorie. Elementare Bausteine dieser Theorie sind "Quanten-Kanäle", d.h. mathematische Input-Output Relationen für Informationsübertragung und -verarbeitung, beschrieben im Rahmen der Quantentheorie. Die Verknüpfung solcher Kanäle, sowohl sequentiell als auch parallel, ist eine immer wiederkehrende Operation, sei es bei der Beschreibung von physikalischen Zeitentwicklungen, der Kodierung, Speicherung und Verarbeitung von Information oder bei der Analyse kryptographischer oder spieltheoretischer Protokolle. Ziel des Vorhabens ist eine systematische Analyse elementarer Eigenschaften von Quanten-Kanälen und deren Verhalten unter Verknüpfungsoperationen. Ein besseres Verständnis auf dieser grundlegenden Ebene ist für viele Fortschritte in den oben genannten Gebieten von entscheidender Bedeutung. Das Vorhaben ist Teil des interdisziplinären Europäischen Verbundprojekts CQC (Composing Quantum Channels), in Kooperation mit der ETH Zürich und der UC Madrid. An der TU München sollen v.a. elementare Eigenschaften untersucht werden, deren Verständnis die Grundlage für die im Verbund untersuchten komplexeren Themen bildet. Letztere beziehen sich u. a. auf Anwendungen in der statistischen Physik, der Komplexitätstheorie, und in informationstheoretischen Protokollen.
--------------------------------------	----------------	----------------	---------	---	--

Universität des Saarlandes	01.09.2011	31.03.2015	318.076	<p>CHIST-ERA          Verbundprojekt QScale (Quantum technologies for extending the range of quantum communications) -          Teilprojekt:          Schnittstelle zwischen Quantenkommunikation und Quantenrechnen mit einzelnen Ionen</p>	<p>Das Verbundvorhaben QScale hat zum Ziel, auf der Basis quantenoptischer Systeme Werkzeuge für eine zukünftige langreichweitige Quantenkommunikation zu entwickeln, welche eine inhärent sichere Datenübertragung ermöglichen soll. In diesem Kontext wird in diesem Einzelvorhaben die Integration von Operationen zur Quantenkommunikation mit Operationen zur lokalen quantenlogischen Informationsverarbeitung untersucht. Die physikalische Plattform besteht dabei aus in Ionenfallen gespeicherten Einzelatomen und von diesen Atomen emittierten Einzelphotonen. Die Prozesse werden mit Laserlicht kontrolliert. Der erste Arbeitsschritt ist die kontrollierte Erzeugung einzelner Photonen aus einzelnen Atomen unter Erhaltung ihrer quantenmechanischen Korrelation, der Atom-Photon-Verschränkung. Dieses soll synchron in zwei räumlich getrennten Ionenfallen erzielt werden. Darauf aufbauend soll die quantenlogische Verarbeitung der durch Atom-Photon-Verschränkung erzeugten Quanteninformation im einzelnen Atom untersucht werden. Als erste konkrete Anwendung der Integration von Atom-Photon-Verschränkung und quantenlogischen Operationen ist die Teleportation eines atomaren Quantenzustandes aus einer Ionenfalle in eine andere geplant.</p>
Technische Universität München	01.05.2014	30.04.2018	372.090	<p>Verbundprojekt:          Informationstheorie des Quanten-Repeater -          Q.com-          Nachrichtentechnik -;          Teilvorhaben:          Abhörsichere Kommunikation, Attacken und Systemdesign</p>	<p>In dem Teilprojekt wird der Einfluss von Attacken auf die jeweils erreichbaren optimalen Raten für eine sichere Kommunikation für den Quanten-Repeater charakterisiert. Dazu werden Seitenkanalmodelle entwickelt. Es wird untersucht, mit welchen Ressourcen Attacken kompensiert werden können. Die Ressourcenresultate werden genutzt, um robuste Protokolle für die sichere Kommunikation und die Schlüsselerzeugung zur Kompensation von Systemunkenntnis und Mehrteilnehmereinflüssen zu entwickeln. Es sollen Grundprinzipien des Systemdesigns für Quanten-Repeater Netze entwickelt werden. Insbesondere sollen unterschiedliche Ressourcen, wie zum Beispiel Verschränkung oder Korrelation, hinsichtlich des Störpotentials von aktiven Abhörern charakterisiert werden. 2. Arbeitsplanung Ausgehend von einer genauen Modellierung von unterschiedlichen Attackenklassen werden Sicherheitskonzepte entwickelt. Die Sicherheitskonzepte hängen von den physikalischen Eigenschaften der Kommunikationskanäle ab. Die Sicherheitskonzepte erlauben eine vollständige Charakterisierung der Raten für eine sichere Kommunikation. Anschließend werden Ressourcenmodelle und Systemkonzepte entwickelt.</p>

Universität Bielefeld	01.05. 2014	30.04. 2018	324.424	Verbundprojekt: Informationstheorie des Quanten-Repeater - Q.com- Nachrichtentechnik -; Teilvorhaben: Abhörsichere Kommunikation über Quanten-Repeater bei der Verwendung unterschiedlicher Ressourcen	Das Ziel dieses Teilprojektes ist die Bestimmung der optimalen Raten für störungsresistente sowie abhörsichere Kommunikation über Quanten-Repeater mit Zustandsräumen endlicher Dimension bei der Verwendung von unterschiedlichen Ressourcen. In dem Teilprojekt soll insbesondere die Rückkopplung als Ressource betrachtet werden. Gleichzeitig sollen unterschiedliche Ziele des Angreifers (Wiretappers) und des Empfängers analysiert werden und die Ahlswede Identifikationstheorie angewendet werden. Zur Ergebnissicherung werden wir Workshops zu den Informationstheoretischen Modellen zur Kommunikation über einen Quanten-Repeater durchführen und anschließend gemeinsam mit den Teilnehmern Erweiterungen der bisher betrachteten Modelle diskutieren. Der Schwerpunkt wird dabei auf der Sicherheit gegen Attacks mit Seitenkanälen liegen. 2. Arbeitsplanung Zunächst geht es um die Behandlung aller Fragen im Zusammenhang mit Robustheit (das heißt praktischer Sicherheit) so dann um Sicherheit gegen Datendiebstahl und Missbrauch, und schließlich (und stets gleichzeitig) um alle im Verbund auftretende, aus praktischen Problemen.
Technische Universität Darmstadt	01.05. 2014	30.04. 2017	160.182	Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattform mit Methoden der Quantenoptik - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Quantenkommunikation mit resonanter Qubit- Photon Kopplung	Ziel dieses Projekts ist es, die Quantenelektrodynamik der Wechselwirkung gefangener materieller (atomarer oder ionischer) Qubits mit dem elektromagnetischen Feld in hybriden Quanten-Repeater-Modellen im Hinblick auf eine Optimierung der Präparation materieller Bell-Zustände räumlich weit entfernter materieller Qubits und im Hinblick auf die Realisierung von optimierten Bell-Messungen mit Hilfe photonischer Postselektion theoretisch zu untersuchen. Insbesondere konzentrieren sich diese Forschungsaktivitäten auf den Fall resonanter Wechselwirkung zwischen dem quantisierten elektromagnetischen Strahlungsfeld und den materiellen Qubits. Diese geplanten theoretischen Untersuchungen bilden wichtige Bausteine für die praktische Realisierung eines Quanten-Repeater auf quantenoptischer Basis und sind in enger Zusammenarbeit mit der Arbeitsgruppe von Prof. Gerd Leuchs in Erlangen geplant. 2. Arbeitsplanung Der Arbeitsplan konzentriert sich auf folgende theoretische Untersuchungen in hybriden Quanten-Repeater-Modellen: Photon-unterstützte Teleportation und Verschränkungstausch, Verschränkungserzeugung in parabolischen Kavitäten, Unterdrückung von Dekohärenz mit Hilfe Markovscher Feedback-Kontrolle.

<p>Universität Siegen</p>	<p>01.05. 2014</p>	<p>30.04. 2018</p>	<p>441.924</p>	<p>Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattform mit Methoden der Quantenoptik - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Mikrowellen- Quantenlogik mit gespeicherten Ionen</p>	<p>Das Gesamtziel dieses Teilprojektes ist es, einen N-Qubit (<math>3=N=8</math>) Quantenspeicher basierend auf gespeicherten atomaren Ionen zu realisieren, die über Magnetic Gradient Induced Coupling (MAGIC) miteinander wechselwirken. Mit diesem Quantenspeicher werden die grundlegenden quantenlogischen Operationen ausgeführt, die für die Anwendung des Quantenspeichers als Teil eines Quantenrepeaters notwendig sind. Darüber hinaus sollen erste Schritte hin zur Anbindung dieses Quantenspeichers an ein photonisches Netzwerk ausgeführt werden. 2. Arbeitsplanung Es sollen bedingte Quantengatter mit M Qubits (<math>2=M=N</math>) erstmalig realisiert und charakterisiert werden. Solche Multi-Qubit-Gatter sollen dann genutzt werden, um für den Betrieb eines Quantenrepeaters erforderliche Protokolle zur Verschränkungsreinigung innerhalb des Quantenspeichers zu implementieren. Darüber hinaus soll die Adressierung einzelner Qubits mit geringem Übersprechen demonstriert werden. Der Austausch von Quanten-Information zwischen magnetfeld-empfindlichen und –unempfindlichen Zuständen innerhalb des Quantenspeichers soll ebenfalls demonstriert werden. Sämtliche kohärenten quantenlogischen Operationen in diesem Quantenspeicher werden mit Hilfe von Mikrowellenstrahlung ausgeführt. Für die Anbindung dieses Quantenspeichers an ein photonisches Netzwerk sollen planare Ionenfallen entwickelt und charakterisiert werden, die neben Strukturen zur Erzeugung von elektrischen und magnetischen Gleich- und Wechselfeldern zusätzlich mit Faserkavitäten ausgestattet sind.</p>
-------------------------------	------------------------	------------------------	----------------	--	--

Johannes Gutenberg-Universität Mainz	01.05.2014	30.04.2018	578.226	<p>Verbundprojekt: Quanten-Repeater-Plattform mit Methoden der Quantenoptik - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Kalte Ionen als Quantenspeicher, Licht-Ion Schnittstelle und Höherdimensionale Quantenrepeater</p>	<p>Ziel ist die starke Kopplung eines Ions an eine Lichtmode in einem Faserresonator und damit die Realisierung einer Ion-Licht-Schnittstelle. Ionen werden dazu mit Transport-Operationen in einem aus Glasfaserenden geformten Mikro-Resonator platziert. Nach der Kopplung wird das Ion zurück in eine Prozessregion der segmentierten Ionenfalle bewegt. In der Prozessregion werden unter Verwendung von quantenlogischen Operationen hoher Fidelität Bell-Messungen durchgeführt. Operationen in Dekohärenz-freien Unterräumen sollen zu einer Verbesserung der Kohärenzzeit und Fidelität dienen. Elementare quantenlogische Algorithmen werden ausgeführt wie das Umschreiben eines photonischen Qubits auf ein Qubit, welches in einem Ion gespeichert wird. Quantenteleportation und Entanglement-Swapping werden demonstriert. Theorie: Das Speichern und die Konversion von höherdimensionaler Quanteninformation werden theoretisch untersucht. Insbesondere werden dabei Viel-Photonen-Zustände für die optische Kommunikation sowie atomare/ionische Ensemble und Viel-Niveau-Zustände für die lokalen Quantenspeicher in Betracht gezogen. Des Weiteren sollen die praktikabelsten Wege zur Manipulation dieser höherdimensionalen Zustände gefunden werden. Ein Schwerpunkt dabei sind Bell-Messungen mit linearer Optik auf kodierte Quantenzustände für die Quantenfehlerkorrektur. Experiment+Theorie: Analyse eines Quantenrepeater-Protokolls unter Verwendung der experimentellen Ionenfallen-Parameter. 2. Arbeitsplanung Die Arbeiten sind geplant in zwei ausgerüsteten Fallenaufbauten: eine ist mit einer optischen Schnittstelle versehen, die andere für Gatteroperationen und als Quantenspeicher optimiert. Technologieaustausch zu Faserresonatoren mit Partnern im Verbund ist auch für diese Projektperiode vorgesehen. In der Theorie werden die Einzelkomponenten wie Speicher, Bell-Messungen und Quantenkodierungen untersucht, die in komplette Quantenrepeater-Protokolle einverleibt werden.</p>
--------------------------------------	------------	------------	---------	--	--

Rheinische Friedrich- Wilhelms- Universität Bonn	01.05. 2014	30.04. 2018	1.914.180	Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattform mit Methoden der Quantenoptik - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Faser- integrierter Ensemble- Quantenspeicher und Anschluss an eine Halbleiter- Photonenquelle	Der Q.com-Quantenoptik Verbund erforscht die technologischen Grundlagen quantenoptischer Systeme, die als robuste Quantenrepeater für die Quantenkommunikation über große Entfernungen notwendig sind. In diesem Teilvorhaben werden ein oder mehrere fliegende Qubits (Einzelphotonen) in einem kleinen Ensemble kalter Rubidium-Atome gespeichert. Ein optischer Resonator hoher Finesse verstärkt die Licht-Materie-Wechselwirkung, um eine hohe Konversionseffizienz (Photon-> Speicher und Speicher->Photon) und eine angemessene Bandbreite zu erzielen. Die gespeicherten Qubits können mit Mikrowellen-Pulsen manipuliert und vor Dekohärenz teilweise geschützt werden. Zeitlich asynchron einlaufende Photonen lassen sich im Ensemble kalter Atome speichern. 2. Arbeitsplanung Die eigene Herstellung der Faserendspiegel erlaubt eine kontinuierliche Weiterentwicklung der Faserresonatoren (Doppelbrechung, effiziente optische Kopplung). Zur Konversion der fliegenden in stationäre Qubits dient ein miniaturisiertes Atom-Resonator-System auf der Basis von optischen Faserresonatoren mit integriertem Mikrowellennahfeldresonator. Als echte Einzelphotonquelle dient in Kooperation mit Projektpartner Q.com-Halbleiter/IFW Dresden auch eine Quantenpunkt-Quelle. Damit soll die wechselseitige Anpassung eines quantenoptischen und eines halbleiterbasierten Netzwerkknotens aneinander erprobt und ein erstes Quanten-Hybrid-Netzwerk demonstriert werden.
Leibniz Universität Hannover	01.05. 2014	30.04. 2018	206.040	Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattform mit Methoden der Quantenoptik - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Quantitative Beschreibung von Quantenrepeater- Protokollen	Die Arbeitsgruppe "Quanteninformation" der Leibniz Universität Hannover leistet Beiträge zur theoretischen Entwicklung von Quantenrepeatern. Dabei sollen analytische und numerische Modelle den Vergleich unterschiedlicher Realisierungen von Quantenrepeatern ermöglichen. Außerdem sollen Kontrollstrukturen entwickelt werden, die auch ohne die volle Information über das Gesamtsystem effizient arbeiten können. Weiterhin sollen Protokolle für Quantenrepeater ohne heraldierende Quellen entwickelt werden. 2. Arbeitsplanung Im ersten Jahr sollen Protokolle für Quantenrepeater ohne heraldierende Quellen untersucht werden. Darauf aufbauend sollen im zweiten und dritten Jahr neue Kontrollstrukturen entwickelt werden, die für die Implementation solcher Quantenrepeater unerlässlich sind. Die analytische und numerische Modellbildung soll während der gesamten Laufzeit des Projektes angepasst und erweitert werden.

Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf	01.05.2014	31.08.2018	252.272	Verbundprojekt: Quanten-Repeater-Plattform mit Methoden der Quantenoptik - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Sichere Kommunikation in verallgemeinerten Quantenrepeater-Netzwerken	In diesem theoretischen Teilprojekt sollen neue Quantenrepeater-Protokolle und verallgemeinerte Quantenrepeaternetzwerke für die Anwendung in der sicheren Quantenkommunikation untersucht werden. Im Hinblick auf neue Quantenrepeaterprotokolle sollen messapparateunabhängige und apparateunabhängige Szenarien analysiert werden. Ferner sollen Quantenrepeater mit Fehlerkorrektur mit bisherigen Methoden verglichen werden. Im Hinblick auf verallgemeinerte Quantenrepeaternetzwerke werden wir realistische zweidimensionale Netzwerkstrukturen und ihre Ressourcen analysieren. Ein wichtiges Gütemaß für die Sicherheitsanalysen wird die sichere Schlüsselrate sein, die in Abhängigkeit von den Systemkomponenten und dem Gesamtprotokoll zu berechnen und zu optimieren ist. 2. Arbeitsplanung: In den 36 Monaten des Projekts sollen drei Themen bearbeitet werden. Die Themen "Quantenrepeater und Fehlerkorrektur", "Quantenrepeater und sichere Kommunikation im apparateunabhängigen Szenario" und "Verallgemeinerte Quantenrepeater-Netzwerke" sind in jeweils zeitlich überlappende Unterthemen strukturiert, die dem Balkenplan im beigefügten Teilprojektvorhaben entnommen werden können.
---------------------------------------	------------	------------	---------	--	--

<p>Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.</p>	<p>01.05.2014</p>	<p>30.04.2018</p>	<p>254.216</p>	<p>Verbundprojekt: Quanten-Repeater-Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Atom-Resonator-Systeme für Quantenrepeater</p>	<p>Im Rahmen des Q.com Gesamtverbundes widmet sich dieses Teilprojekt der Optimierung und Effizienzsteigerung von Einzelatom-Quantenspeichern mit optischen Resonatoren. Auf Basis von physikalischen Modellen des Einzelatom-Resonator-Systems, die von einem Projektpartner entwickelt werden, sollen 1. Vorhabenziel Strategien zur Optimierung und besseren Kontrollierbarkeit generiert und erprobt werden. Ergänzend wird ein neues Speicherkonzept auf Grundlage der Resonator-Quantenelektrodynamik implementiert, bei dem der Erfolg des Protokolls durch Photonendetektion angezeigt wird. Um die Effizienz und Skalierbarkeit weiter zu erhöhen, wird einer neuen Generation von optischen Resonatoren sehr hoher Güte entwickelt, die unter Repeater-Aspekten optimiert sind. Diese Resonatoren auf Basis von Lichtwellenleitern können auf kleinstem Raum integriert werden. Ziel ist die Kombination von minimalen Streu- und Absorptionsverlusten, geringer Doppelbrechung und optimaler Koppel-effizienz in einem System. 2. Arbeitsplanung In enger Zusammenarbeit mit dem theoretisch arbeitenden Projektpartner werden unterschiedliche Optimierungsstrategien entwickelt und dabei auf ihre Realisierbarkeit hin überprüfen. Alternative Speicherkonzepte werden evaluiert, experimentell erprobt und dann mit dem etablierten Verfahren verglichen. Die physikalischen Ursachen für Doppelbrechung sowie Streu- und Absorptionsverluste werden erforscht. Daraufhin wird der Fabrikationsprozess für Faserresonatoren optimiert, für den Bau neuer Resonatoren eingesetzt und diese anschließend charakterisiert.</p>
--	-------------------	-------------------	----------------	--	--

Universität Ulm	01.05. 2014	30.04. 2018	505.085	Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattform mit Methoden der Quantenoptik - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Theorie und Anwendung des Quantenrepeaters: Kontinuierliche Beschreibung, Quantenspeicher und Quantenkontrolle	Der Q.com-Verbund erforscht die technologischen Grundlagen quantenoptischer Systeme, die als robuste Quantenrepeater für die Quantenkommunikation über große Entfernungen notwendig sind. Dieses Ulmer Teilprojekt untergliedert sich in mehrere Teilbereiche. Zu diesen gehören die kontinuierliche theoretische Beschreibung des Quantenrepeaters und der in ihm auftretenden Zustände insbesondere mit Hilfe von Phasenraummethode. Algorithmisch soll das Einsatzspektrum des bereits in der ersten Förderperiode bewährten CRAB-Algorithmus erweitert werden, so dass Vielteilchen-Quantensystemen behandelt werden können. Ferner soll die Quanteninformationsübertragung von Photonen auf Farbzentren in Diamant ermöglicht und gegen Dekohärenz geschützt werden. 2. Arbeitsplanung Die oben diskutierten Themenkomplexe werden an den Instituten für Quantenphysik, Quanteninformationsverarbeitung, Theoretische Physik und Quantenoptik bearbeitet. Dazu werden auf die einzelnen Institute entsprechende Teilaufgaben verteilt, um die jeweiligen Kompetenzen in den einzelnen Teilgebieten bestmöglich zu nutzen. Für die in Ulm zu entwickelnden Methoden in diesen Gebieten sind enge Kooperationen mit den experimentellen Gruppen des Verbunds vorgesehen, so dass die theoretischen Vorschläge einen direkten Anwendungsbezug erhalten.
--------------------	----------------	----------------	---------	---	---

<p>Universität Stuttgart</p>	<p>01.05. 2014</p>	<p>30.04. 2018</p>	<p>730.083</p>	<p>Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattform mit Methoden der Quantenoptik - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Künstliche Atome in Diamant und Rydberg- blockierte Ensembles für Quantenrepeater- Anwendungen</p>	<p>Der Q.com-Quantenoptik-Verbund erforscht die technologischen Grundlagen von Quantenrepeatern, die für die robuste Quantenkommunikation über grosse Entfernungen notwendig sind. Dieses Teilprojekt implementiert Diamantquantenrepeater (basierend auf einzelnen NV-Defekten in Diamant samt 13C Kernspinregistern mit bis zu 5 Speicher- und Ancillaqubits). Ziel ist die Implementierung von Verschränkungsreinigung (robuste Korrektur von bit-flip und sign-flip-Fehlern) zwischen zwei Diamantquantenrepeatern. Da die Erzeugung einzelner Photonen auf tiefe Temperaturen angewiesen ist, wird in diesem Projekt auch untersucht, wie sich Alkaligase bei Raumtemperatur als Einzelphotonenquelle eignen. Dazu wird ein gepulstes Vierwellenmischsystem mit der optischen Nichtlinearität hochangeregter Rydbergzustände so kombiniert, dass in einem mikroskopischen Anregungsvolumen nur eine einzige Anregung erlaubt ist, die sich dann in ein einzelnes Photon umwandeln lässt. 2. Arbeitsplanung Die robuste Kopplung zweier Diamantquantenrepeater erfordert zwei grundlegende Entwicklungsschritte, nämlich einerseits die Entwicklung driftfreier Mikroskopie bei tiefen Temperaturen (&lt;10K) und andererseits die Mikrofertigung von Festkörperimmersionslinsen (~ 2-5 Mikrometer) in Diamant. Die Implementierung von Verschränkungsreinigung beinhaltet drei Schritte: 1. Verlängerung der Kernspinspeicherzeit durch dynamische Entkopplung bei tiefen Temperaturen. 2. Hochskalierung der Kernspinregister auf bis zu 5 Qubits. 3. Implementierung der Mikrowellen- und RF-Protokolle zur Verschränkungsreinigung. Bei den thermischen Gasen ist es zuerst notwendig, das mikroskopische Anregungsvolumen optisch zu isolieren. Dazu wird ein neues Lasersystem installiert. Weitere Verbesserung der Abbildungsoptik soll durch die Integration von Festkörperimmersionslinsen in die Spektroskopiezellen erreicht werden. Schließlich werden die erzeugten Lichtfelder mit Korrelationsmessungen untersucht.</p>
----------------------------------	------------------------	------------------------	----------------	---	---

Ludwig- Maximilians- Universität München	01.05. 2014	30.04. 2018	494.376	Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattform mit Methoden der Quantenoptik - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Elementare Quantenrepeaterverbind ung über große Entfernungen	Erzeugung von quantenmechanischer Verschränkung über große Distanzen ist Grundvoraussetzung für zukünftige Quantennetzwerke. In diesem Projekt nutzt man einzelne, in optischen Fallen gespeicherte Rubidium (Rb-87) Atome als lokale Quantenspeicher. Ziel dieses Teilprojekts ist es, zwei derartige Speicher über eine Entfernung von 400 m zu verschränken. Zusätzlich wird die Effizienz und Zustandsgüte optimiert mit dem Ziel, erstmals geräteunabhängige Erzeugung von Zufallszahlen und von sicheren Schlüsseln für die Kryptographie durchzuführen. Die Verschränkung über lange Entfernung soll mithilfe des Entanglement-Swapping-Protokolls erreicht werden. Dabei werden die Atome zunächst mit jeweils einem Photon verschränkt, eine projektive Messung an den beiden Photonen ermöglicht dann die Übertragung der Verschränkung auf die Atome. Dies konnte im ersten Verbundprojekt an einer Teststrecke über 20 m Entfernung innerhalb eines Gebäudes gezeigt werden. 2. Arbeitsplanung Die weiteren Arbeiten sollen sich auf drei wesentliche Schwerpunkte konzentrieren: • In-Betriebnahme der atomaren Fallen und Erzielung der Atom-Photon-Verschränkung an den neuen 400 m voneinander entfernten Positionen • Erweiterung auf neue Detektorsysteme (zustandsabhängige Ionisation und Detektion von Ionisationsfragmenten) auf schnell schaltbare Wahl der Messbasis sowie Entwicklung neuer Synchronisation und Prozesskontrolle der Anlagen mit dem Ziel, Verschränkung zwischen den 400 m voneinander gefangenen Atomen zu erzeugen. • Steigerung der Effizienz und Verschränkungsgüte durch verbesserte Optik und weiter optimierte Anregungszyklen mit dem Ziel, geräteunabhängige Protokolle der Quantenkommunikation zu demonstrieren. Darüber hinaus ist das Ziel, an Methoden zur zustandsneutralen Konversion der emittierten Photonen und Interkonversion von photonischen auf atomare Zustände mitzuarbeiten und Spezifikationen für mögliche Implementierungen am vorliegenden Aufbau zu entwickeln.
---	----------------	----------------	---------	--	---

<p>Universität Paderborn</p>	<p>01.05. 2014</p>	<p>30.04. 2018</p>	<p>476.640</p>	<p>Verbundprojekt: Quanten-Repeater-Plattform mit Methoden der Quantenoptik - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Entwicklung monolithischer KTP-Wellenleiter-Bauelemente zur Überbrückung der Wellenlängendifferenzen zwischen stationären und propagierenden QuBits</p>	<p>Aufbauend auf den wissenschaftlichen Fortschritten des Verbundprojektes QuOReP (1. Förderphase) sollen im Verbundprojekt Q.com-Quantenoptik (2. Förderphase, 2014-2017) Teilsysteme von Quantenrepeaterstrecken (Punkt-zu-Punkt-Verschränkungsverteilung, Konversion stationärer QuBit-Zustände im nahen UV auf "flying QuBits" bei Telekomwellenlängen) realisiert werden. In diesem Teilprojekt werden integriert optische Wellenlängenkonverter und Verschränkungslichtquellen entwickelt. Dies soll es ermöglichen, einerseits für die Konversion mit Mitteln der integrierten Optik Benchmarks hinsichtlich Effizienz und Fidelität der konvertierten Quantenzustände zu setzen, andererseits durch monolithische Integration mehrerer Komponenten erste Schritte hin zu einer skalierbaren quantenoptischen "on-chip" Technologie zu demonstrieren. 2. Arbeitsplanung Die in Paderborn implementierte Technologie ionenausgetauschter, periodisch gepolter KTP- (PPKTP-)Wellenleiter soll angewandt werden, um einerseits hocheffiziente Wellenlängenkonverter zu entwickeln, die auf den Prozessen der optischen Summen (SFG)- und Differenzfrequenzerzeugung (DFG) basieren. Andererseits soll eine monolithisch integrierte Zwei-Farben-Verschränkungsquelle demonstriert werden, die "on-chip" eine PDC-Quelle, einen wellenlängenselektiven Koppler, eine zeitinvertierende SFG-Konverterstufe sowie Taperstrukturen für eine modenselektive Pumpkopplung enthält. Der Erhalt der Quanteneigenschaften der konvertierten Zustände soll sowohl via Photonen-zählung als auch durch (Selbst-) Homodyn-Detektion nachgewiesen werden.</p>
------------------------------	--------------------	--------------------	----------------	---	--

Universität des Saarlandes	01.05.2014	30.04.2018	2.041.848	<p>Verbundprojekt: Quanten-Repeater-Plattform mit Methoden der Quantenoptik - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Kontrollierte Emission, Konversion und Absorption einzelner Photonen als Baustein für Quantenschnittstellen</p>	<p>Der Q.com-Quantenoptik-Verbund erforscht die technologischen Grundlagen quantenoptischer Systeme, die als robuste Quantenrepeater für die Quantenkommunikation über große Entfernungen notwendig sind. Das Teilvorhaben hat zum Ziel, Technologien für Schnittstellen zwischen Photonen und einzelnen Quantensystemen (Atome und Festkörper) zu entwickeln. SB-B: Entwicklung von Frequenzkonvertern zur Verschiebung der Wellenlänge photonischer Polarisations-Qubits in die Telekom-Bänder; Demonstration der Erhaltung der Atom-Photon-Verschränkung über große räumliche Distanz; Entwicklung einer Einzelphotonenquelle im Telekomband durch Frequenzkonversion von Einzelphotonen aus Halbleiter-Quantenpunkten; Entwicklung von festkörperbasierten Quantenspeichern für einzelne Photonen aus Halbleiter-Quantenpunkten und Kopplung von hybriden Quantensystemen (Atom / Festkörper). 2. Arbeitsplan SB-E: Effizienter Photon-zu-Atom-Quantenzustandstransfer (QZT) zwischen Einzelphotonenquelle und einzelner Ion; Atom-Photon-QZT zum Auslesen gespeicherter Quanteninformation; Quantenlogische Verarbeitung in Zeeman-Quantenbits von photonischer Information nach vorausgehender Atom-Photon-Verschränkung oder Photon-zu-Atom-QZT; Einzelphotonenemission und -absorption aus einzelner gespeicherten Ion kombiniert mit Quantenfrequenzkonversion; Fourier-begrenzte Photonen bei 854 nm, Multiplexing: Konzepte für Vielkanal-Einzelphotonenerzeugung. SB-M: Modellierung der Kopplung zwischen einzelner Photon aus optischer Faser und Atom in Hochfinesse-Resonator; Optimierung der Absorptionseffizienz durch externe Felder mithilfe optimaler Kontrolle; Berücksichtigung der experimentellen Bedingungen. Anwendung auf kontrollierte Absorption und Emission einzelner Photonen durch einzelne Atome und kontrollierten Quantenzustandstransfer zwischen Atomen und Photonen. Anwendung auf andere Emittoren (NV Zentren, Quantenpunkte).</p>
----------------------------	------------	------------	-----------	---	---

Freie Universität Berlin	01.05. 2014	31.08. 2018	190.563	Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattform mit Methoden der Quantenoptik - Q.com-Quantenoptik -; Teilvorhaben: Theorie und Analyse realisierbarer Repeaterprotokolle	Dieses Teilprojekt setzt zwei zentrale Ziele, die jedoch in engem Zusammenhang miteinander stehen: 1. Welche optimalen Repeaterprotokolle gibt es und welche Ressourcen sind für deren Realisierung nötig? 2. Wie kann man die korrekte Funktionsweise von zentralen Komponenten von Repeatern ökonomisch und praktisch zertifizieren? Diese beiden Fragen stehen offensichtlich im Zentrum der grundsätzlichen Fragestellung dieses Verbundprojektes, sind miteinander verknüpft und befinden sich auch in engem Zusammenhang mit vielen anderen Teilprojekten in diesem und anderen Teilverbänden. 2. Arbeitsplanung Konkret werden die folgenden Fragen angegangen: Korrelationen in Quantenspeichern werden üblicherweise als eine Fehlerquelle angesehen. Unter Zuhilfenahme von neuen über Renormierung von Tensornetzwerken wird ausgelotet, wie Speichereffekte - wie sie in experimentellen Situationen, etwa in Ionenfallen, auftreten - bei der Verschränkungsreinigung geschickt ausgenutzt werden können. Neue Protokolle werden entwickelt, um in asynchronen Situationen oder bei Verwendung nicht- heraldierter Quellen gute Raten zu erhalten. Multi-partite Netzwerke werden untersucht. Ein wichtiger Teil des Projektes betrifft die Weiterentwicklung und vor allem Anwendung von Methoden, die es erlauben, das korrekte Funktionieren von Komponenten zu tomographieren oder auf effizientere Weise direkt zu verifizieren. Fragen von geräteunabhängiger Sicherheit und Quanten-Kanaltheorie geben dem Vorhaben weitere Perspektive.
--------------------------------	----------------	----------------	---------	---	--

Universität Konstanz	01.05. 2014	31.12. 2017	145.073	Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: Theorie der Spin-Photon Schnittstelle	Das Vorhaben bezweckt (1) die Optimierung der Erzeugung von verschränkten Photonen in Halbleiter-Quantenpunkten, (2) die Integration von Verschränkungsreinigung im Quantenrepeater in eine Halbleiterarchitektur mit stationären Spinqubits, sowie (3) die Umwandlung von Spinqubits in Photonqubits für Halbleiterstrukturen mit realistischen g-Faktoren. Das Vorhaben ist in 4 Arbeitspakete aufgeteilt: AP UKON1 – Kernspineffekte in der Biexziton-Kaskade zur Erzeugung verschränkter Photonenpaare AP UKON2 – Kontrolle der Exziton-Feinstruktur mit senkrechten elektrischen Feldern, sowie Mischung von Leicht- und Schwerlöchern AP UKON3 – Protokoll für die Verschränkungsreinigung mit realen physikalischen Wechselwirkungen AP UKON4 – Spin-photon Schnittstelle in realen Halbleiter-Nanostrukturen Folgende Meilensteine wurden definiert: Meilensteine zu AP Ukon1: Kernspineffekte in der Biexziton-Kaskade zur Erzeugung verschränkter Photonenpaare 1.1 Verschränkungsgüte bei unpolarisierten Kernspins als Funktion der einstellbaren Parameter 1.2 Optimierte Kernspinkonfiguration zur Maximierung der Verschränkungsgüte Meilensteine zu AP Ukon2: Kontrolle der Exziton Feinstruktur mit senkrechten elektrischen Feldern, Mischung von schweren (hh) und leichten (lh) Löchern 2.1 Exziton-Feinstrukturaufspaltung in Abhängigkeit der senkrechten Feldstärke 2.2 Exziton-Feinstrukturaufspaltung unter Berücksichtigung der hh-lh Kopplung Meilensteine zu AP Ukon3: Protokoll für Verschränkungsreinigung mit realen physikalischen Wechselwirkungen 3.1 Protokoll für Verschränkungsreinigung mit der Austauschwechselwirkung 3.2 Optimiertes Protokoll 3.3 Verschränkungsreinigung mit Zwei- und/oder Dreispinqubits Meilensteine zu AP Ukon4: Spin-photon Schnittstelle in realen Halbleiter-Nanostrukturen 4.1 Berechnung von Güte und Übertragungsrate bei Spin-Photon-Umwandlung 4.2 Güte und Übertragungsrate bei Spin-Photon-Umwandlung mit optischer Kavität 4.3 Spin-Photon-Umwandlung mit Zwei- und/oder Dreispinqubits
-------------------------	----------------	----------------	---------	--	---

Universität Paderborn	01.05. 2014	31.10. 2018	465.170	Verbundprojekt: Quanten-Repeater-Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: Funktionelle Quantenstrukturen auf Halbleiterbasis: Quantenlogische Gatter, Emittter und Detektoren	Im Rahmen des Projekts werden funktionelle Strukturen auf Halbleiterbasis für Quantenrepeater hergestellt und untersucht. Als aktive Halbleitermaterialien kommen hierbei InAs/GaAs und InAs/InP Quantenpunktstrukturen zum Einsatz, in denen sowohl Exziton- wie auch Spin-Qubits genutzt werden. Die geplanten Arbeiten konzentrieren sich auf die Realisierung einer deterministischen Einzelphotonemission mit Polarisations- und Frequenzkontrolle, auf quantenlogische Gatter und Detektorstrukturen in integriert optischen Wellenleiterstrukturen, auf die kohärente Zustandskontrolle und das elektrische Beladen von Telekom-Qubits sowie auf die Realisierung elektrisch steuerbarer Diodenstrukturen zur Manipulation von Spin-Qubits. 2. Arbeitsplanung Die Arbeitsplanung sieht die technologische Herstellung von photonischen Halbleiterstrukturen mit integrierten Quantenpunkten für Zielwellenlängen von 950 nm und 1500 nm in Kooperation mit den Projektpartnern vor. Spezielle Halbleiterschichten oder Strukturen, die für die Arbeitspakete an der Uni Paderborn erforderlich sind, werden von der Uni Kassel, der RU Bochum, der Uni Würzburg und direkt von der Uni Paderborn zur Verfügung gestellt. Die bereitgestellten Schichten werden dann an der Uni Paderborn zu funktionellen photonischen Strukturen prozessiert. Darauf aufbauend erfolgt die Verifizierung der spektroskopischen und elektrischen Eigenschaften der Strukturen in Hinblick auf die gewünschte Funktionalität für den Quantenrepeater in maßgeschneiderten Experimenten. Getestete Strukturen für die elektrische Manipulation von Spin-Qubits werden an den Projektpartner an der TU Dortmund geliefert.
-----------------------	-------------	-------------	---------	--	--

Technische Universität Dortmund	01.05. 2014	30.04. 2018	446.089	Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: Speicherung und Manipulation von Quanteninformation mit Spins in Halbleiterquantenpunkt en	In der neuen Förderperiode sollen die Arbeiten zu Speicherung photonischer Quanteninformation durch Spinanregungen in Halbleiterquantenpunkten und ihre nachfolgende kohärente Manipulation vorangetrieben werden. Diese Arbeiten betreffen Arbeitspaket 2 des Gesamtvorhabens und stellen Kernproblematiken bei der Realisierung eines Quantenrepeaters dar. Dabei soll die Verschränkung von Spinanregungen bezüglich Kohärenz und Manipulation untersucht werden. Zudem sollen die Speicherzeiten von Quanteninformation optimiert sowie ihr gezielter Abruf über stimulierte Photonechos erreicht werden. Ausgangsbasis ist die Verwendung von ps-Laserpulsen, um alle Operationen möglichst schnell durchzuführen und in den Bereich von Wiederholraten etablierter Kommunikationstechnologien zu gelangen. Für die Optimierung in Richtung Anwendungen sollen Quantenpunktsysteme für Wellenlängen in den Telekombändern, Proben mit elektrischer Kontaktierung etc betrachtet werden. 2 Die geplanten Arbeiten gliedern sich in drei Pakete, die parallel zueinander durch die beiden Projektbeschäftigten angegangen würden. In Arbeitspaket TUDo-AP1 geht es um wechselwirkende und verschränkte Spinzustände in Quantenpunkten. Untersucht werden soll die Erzeugung komplexerer Spintexturen, die Ausdehnung der Spinkohärenz über dynamische Entkopplung sowie die Entwicklung robuster Manipulationsverfahren. In Arbeitspaket TUDo-AP2 geht es um die Speicherung optischer Quanteninformation in Halbleiterspins. Die Verwendung von Spinensembles garantiert eine hohe Oszillatorstärke. Inhomogenitäten im Ensemble können über Photonechos kompensiert werden, die stimuliert werden sollen, so dass die Information gezielt abrufbar ist. Zudem soll die mögliche Abrufzeit ausgedehnt werden. Voruntersuchungen sagen hierfür Zeiten bis in den ms-Bereich vorher. In einem weiteren Arbeitspaket TUDo-AP3 soll die im Verbund verfügbare Hardware auf ihre Tauglichkeit für Anwendungen in einem Quantenrepeater optimiert werden.
---------------------------------------	----------------	----------------	---------	---	---

Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e.V.	01.05.2014	30.04.2018	342.886	Verbundprojekt: Quanten-Repeater-Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: Abstimmbare nichtklassische Photonenquellen für Quantenrepeateranwendungen	Photonen sind ideale Informationsträger für Langstrecken-Quantenkommunikation. Daher befasst sich dieses Projekt mit der Entwicklung elektro-elastisch gesteuerter nicht-klassischer Einzelphotonenquellen, basierend auf Halbleiterquantenpunkten, mit dem Ziel, zentrale Fragestellungen bei der Entwicklung von Quantenrepeatern zu klären. Dafür werden hochqualitative Quantenpunkte hergestellt, deren Emissionswellenlänge auf die optischen Übergänge von Cs und Rb Atomen abgestimmt werden. Verschränkte Photonenpaare im Telekommunikationsfrequenzbereich werden durch Beseitigung der Feinstrukturaufspaltung erzeugt. Schließlich werden ununterscheidbare Photonen von deterministisch geladenen Quantenpunkten interferiert, die aus zwei separaten Mikroresonatoren stammen. 2. Arbeitsplanung Um die Projektanforderungen zu erfüllen, werden Quantenpunktproben mit sorgfältig eingestellter Emissionswellenlänge mittels Molekularstahlepitaxie am IFW Dresden hergestellt und den Verbundpartnern für Experimente zur Kopplung von Einzelphotonen an atomare Gase zur Verfügung gestellt. Unsere elektro-elastischen Verfahren werden an Proben für Telekommunikationsanwendungen und an Mikroresonatoren, die uns von Verbundpartnern bereitgestellt werden, getestet. Die optische Charakterisierung der Quantenpunkte, die Herstellung elektro-elastisch abstimmbarer Bauelemente, sowie die Zwei-Photonen-Interferenz-Experimente werden am IFW Dresden durchgeführt.
--	------------	------------	---------	--	--

Universität Kassel	01.05. 2014	30.04. 2018	687.990	<p>Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: Material- Plattformen für Quanten-Repeater auf der Basis von InP- basierte QP-Strukturen und NV-Zentren in nanokristallinen Diamantstrukturen</p>	<p>In diesen Teilvorhaben soll es speziell um material- und strukturspezifische Fragestellungen gehen, z. B., geeignete elektronische Quantensysteme in Festkörpern darzustellen (z. B. Quantenpunkte in Halbleiter, bzw. NV-Zentren in Diamant) und strukturell so zu isolieren bzw. abzustimmen, damit für Quantenrepeaterfunktionen anwendbare Eigenschaften generiert werden können. Beispiele dazu sind lange Kohärenzzeiten, die notwendig sind für die Darstellung von QuBits, bzw. die Abstimmung von Energiezuständen für die Verschränkung von Quantenzuständen. Wichtige Voraussetzung dazu sind Strukturen mit kleiner, bzw. für die Anwendung angepasste homogene Linienbreiten und die Möglichkeit einzelne Quantenzustände gezielt zu adressieren, entweder optisch oder elektronisch. Beide Aspekte werden hier berücksichtigt. Die Arbeiten werden im Rahmen von zwei separaten Teilvorhaben durchgeführt - UK-QP und UK-NCD. 2. Arbeitsplanung Im Teilprojekt UK-QP (InP-basierte Quantenpunktstrukturen) soll die optische Qualität von 1,55 µm emittierenden InP-basierten Einzelquantenpunkten im Hinblick auf sowohl Effizienz als auch Linienbreite erheblich verbessert werden. Ein weiterer Fokus der Arbeiten wird auf der Minimierung der Feinstrukturaufspaltung, z. B. über die Kontrolle der Punktgeometrie liegen. Im Teilprojekt UK-NCD (NV-Zentren in nanokristallinen Diamantstrukturen) ist geplant die Kontrolle des Einbaus von NV-Zentren (Konzentration und räumliche Verteilung) in Diamant-Nanokristalliten und -Nanostrukturen sowie die Sammeleffizienz für Photonen drastisch zu erhöhen, z. B. durch integrierte Mikrokavitäten. Diese Strukturen sollen in Zusammenarbeit mit Verbundpartnern optisch charakterisiert und die kontrollierte Verschränkung individueller Spins anhand selektierter Strukturen erzielt werden.</p>
-----------------------	----------------	----------------	---------	--	--

Universität Stuttgart	01.05. 2014	30.04. 2018	515.274	<p>Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: Herstellung und Charakterisierung von individuell abstimmbaren Halbleiter- Quantenpunktstrukturen als Quellen für verschränkte und ununterscheidbare Photonen im Telekom- Wellenbereich bei 1.3 <math>\mu\text{m}</math> und 1.55</p>	<p>Das zentrale Ziel der zur Förderung beantragten zweiten Periode unseres Teilprojekts an der Universität Stuttgart (US) besteht in der Umsetzung von weiterentwickelten, nichtklassischen Emittlern in Form hochintegrierter Strukturen. Diese Quellen sollen speziell auf die strikten Anforderungen eines Quantenrepeaters hinsichtlich kontrollierbarer Quellen verschränkter Photonenpaare für "Entanglement Swapping" (Verschränkungsverteilung an einem Netzwerk-Knoten) und paarweise ununterscheidbarer Photonen zugeschnitten werden. Im Sinne unseres Kernziels, maßgeschneiderte Lichtemitter mit der Möglichkeit zur individuellen Abstimmung einzelner Quantenpunkte sowohl für den Spektralbereich um 1.3 <math>\mu\text{m}</math> (Telekom-O-Band) als auch für 1.55 <math>\mu\text{m}</math> (C- Band) mit signifikant erweiterten Optionen der Emissionskontrolle zu verwirklichen, sind hierbei intensive Kooperationen sowohl verbundintern von experimenteller Seite (Q.com-H: US mit UK, IFW, UW) sowie theoretischer Seite (Q.com-H: US mit UB) geplant. Darüber hinaus sind aber auch verbundübergreifende Kooperationen (Q.com-H: US mit Q.com-Q: US, Univ. Saarbrücken) zum Thema "Interkonversion von Photonen" bzw. (Q.com-H: US mit Q.com-Q: ST-P, Univ. Stuttgart) zum Thema "Photonische Hybridsysteme" vorgesehen. Die Ziele und Innovationen des vorliegenden Teilprojekts US im Rahmen des Teilverbundes Q.com-H lassen sich wie folgt gliedern und zusammenfassen: (1) Epitaktische Herstellung hocheffizienter InGaAs/GaAs-Quantenpunkt-Emitter- Strukturen optimiert für 1.3 <math>\mu\text{m}</math> (Telekom-O-Band) und Maßgeschneiderte Quellen polarisationsverschränkter und hochgradig ununterscheidbarer Photonen; (2) Erzeugung von Photonen im Telekom-Spektralbereich des C-Bandes über effiziente Frequenzmischung (Down-Conversion) von InGaAs/GaAs-Emission in PP-LN (periodisch gepoltem Lithiumniobat-Kristall); (3) Erzeugung von spektral schmalbandigen Photonen aus der Emission von In-GaAs/GaAs-Quantenpunkten und deren kontrollierte Wechselwirkung mit Alkali-Gasen.</p>
--------------------------	----------------	----------------	---------	--	---

Universität Hamburg	01.05. 2014	30.04. 2018	161.543	<p>Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: Atomistische Theorie der Interkonversion, Speicherung, und Manipulation von Qubits unter dem Einfluss äußerer Felder</p>	<p>Das Kernziel des gemeinsamen Vorhabens liegt in der Entwicklung und Realisierung von grundlegenden Bausteinen zur Umsetzung eines halbleiter-basierten Quanten-Repeater. Das vorliegende Teilprojekt, unter der Leitung von Dr. Gabriel Bester, soll zu den zwei folgenden Aufgabenbereichen des Gesamtverbundes Q.com-H beitragen: AP 1: Elemente von Quantennetzwerken: Photonenquellen und -detektoren für den Telekommunikationsbereich. AP 2: Knotenoperationen in Quantennetzwerken: Interkonversion, Speicherung, und Manipulation. Die Wissenschaftliche und technische Arbeitsziele des vorliegenden Teilprojektes sind in drei Arbeitspakete aufgeteilt (ausführliche Beschreibung in der Anlage): MPI_AP1 Berechnungen der Feinstrukturaufspaltung und dessen Abhängigkeit von Spannungsfeldern und elektrischen Feldern in InAs/InGaAlAs/InP-Quantenpunkten als Quellen ununterscheidbarer bzw. verschränkter Photonen bei 1.55 µm MPI_AP2 Berechnungen der Spinflipprozesse von Elektronen und Löchern sowie exzitonischen Komplexen unter dem Einfluss von äußeren Verspannungen und elektrischen Feldern sowie der Einfluss von fluktuierenden Ladungen ("charge noise") auf die Spinrelaxationszeit. MPI_AP3 Die Eigenschaften des Leichtlochs sowie des Leichtloch-Exzitons, das aus einem Elektron und einem leichten Loch besteht, sollen untersucht werden. Dabei werden besonders die Spineigenschaften im Hinblick auf die Spinmanipulation (AP2 des gemeinsamen Vorhabens) studiert. 2. Arbeitsplanung Für die Zielstellung der drei Arbeitspakete wird eine Doktorandenstelle beantragt. Das spezielle Aufgabenfeld des Mitarbeiters umfasst die Berechnung von elektronischen und optischen Eigenschaften von Quantenpunkten mittels empirischer Pseudopotentiale und der Methode der Interaktion der Konfigurationen. Die drei Arbeitspakete sind im Detail geplant und auf eine Dauer von drei Jahren begrenzt; beinhalten vier Meilensteine und vier Übergabepunkte mit Partnern innerhalb des Q.com-H Verbundes.</p>
------------------------	----------------	----------------	---------	---	--

<p>Ruhr-Universität Bochum</p>	<p>01.05.2014</p>	<p>30.04.2018</p>	<p>245.300</p>	<p>Verbundprojekt: Quanten-Repeater-Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: Epitaktische Gates zur Steuerung von Quantenpunkten in dephasierungsminimierten Heterostrukturen</p>	<p>1 Epi-Gates Die erfolgreiche Anwendung epitaktisch gewachsener Gates und die Etablierung inner- und außerhalb des Verbundprojektes wird fortgesetzt. 2 Invertierte QD-Strukturen QDs nahe der Oberfläche erlauben einen verbesserten optischen Zugang im Fern- und Nahfeld und verbesserte Transportzugänge für QD-Ensembles und einzelne QDs. 3 Optische Resonatoren Gate-steuerbaren Strukturen in optischen Resonatoren ermöglichen eine effizientere Kopplung der QDs an das Lichtfeld, spektrale Selektivität und die Auswahl zwischen schwacher und starker Kopplung. 4 Ultrageringe QD-Dichten Eine Verfeinerung der Methode des QD-Gradientenwachstums ermöglicht ultrageringe QD-Dichten und die optische Adressierung einzelner Quantenpunkte. 5 Transform-limitiertes QD-Spektrum Wachstum und Optimierung von QDs in ultrareiner GaAs-Matrix zur Minimierung der Dekohärenz -und Dephasierungsprozesse. 1 Epi-Gates C(V)-Spektroskopie an QD-Ensembles mit Epi-Gates unter Beleuchtung (2014) Messungen an QD-Ensembles mit Epi-Gates nach thermischem Ausheilen (2014) Kombination mit optischen Messungen (2015) 2 Invertierte QD-Strukturen Design, Wachstum und C(V)-Messungen der Strukturen (2015) Messungen im Nahfeld bei Stark-Verschiebung und tunnelspektroskopische Untersuchungen (2016) 3 Optische Resonatoren Erhöhung der Lichtausbeute durch Bragg-Spiegel (2014) Herstellung und Charakterisierung von optischen Resonatoren (2015) Optimierung der optischen Resonatoren und Kombination mit Epi-Gates (2016) 4 Ultrageringe QD-Dichten Wachstum von QD-Gradientenproben mit ultrageringen Flächendichten (2014) Aufbau und Optimierung einer hochauflösenden C(V)-Messung (2015) Nachweis von QD-Ensembles mit wenigen bis einzelnen QDs (2016) 5 Transform-limitiertes QD-Spektrum Untersuchung von Dephasierungsmechanismen in ultrareinen Systemen (2014) Entwicklung und Herstellung neuartiger Probenstrukturen zur Verringerung der optischen Linienbreite (2015) Herstellung von QDs mit rein transformlimitierter Linienbreite (2016)</p>
--------------------------------	-------------------	-------------------	----------------	--	--

Leibniz Universität Hannover	01.05. 2014	30.04. 2018	237.726	Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: Verschränkung und Manipulation von Halbleiterspinsystemen	Quantenrepeater auf Halbleiterbasis versprechen eine höchst effiziente Implementation der Quanteninformationsverarbeitung, da weit entwickelte Halbleitertechnologien zur Herstellung der skalierbaren Einheiten in hoher Stückzahl zur Verfügung stehen. Die aktuellen, glasfaserbasierten aktiven Komponenten der Netzwerktechnologie basieren bereits heute auf Halbleiterbauelementen, was eine Integration von Quanteninformationstechnologie auf Halbleiterbasis vorrausichtlich erleichtert. Die guten Aussichten auf einer erfolgreichen Realisierung von Komponenten innerhalb des Q.com Verbundes für Quantenrepeaternetzwerkes erhöhen die Chancen auf eine quantenmechanisch garantierte Integrität, Vertraulichkeit und Authentizität schon auf der Übertragungsschichtebene. In diesem Teilvorhaben werden wir gezielt den Einsatz von Halbleiterbasierten Komponenten zur Verteilung von Verschränkung durch Licht erforschen. Dazu werden parallel zwei grundsätzliche Ansätze zum Zuge kommen. Zum einen ist es die Verschränkung des makroskopischen Spinfreiheitsgrades in hochreinen Volumenhalbleitermaterialien. Diese Vorgehensweise ist analog aufgestellt zu der bereits erfolgreich gezeigten Verschränkungsverteilung in warmen atomaren Gasen. Zum anderen verfolgen wir die Ausnutzung von kohärenten Lochspins in optisch effektiv adressierbaren Halbleiterquantenpunkten. 2. Arbeitsplanung In vier Arbeitspaketen planen wir die Verteilung von Verschränkung mittels zweier räumlich getrennten makroskopischen Elektronenspinensembles im hochreinen Halbleitermaterial Galliumarsenid, die Speicherung von Informationen über optische Ankopplung (Photonen) in den kohärenten Lochspinzuständen von einzelnen Halbleiterquantenpunkten, die gezielte Manipulation von Spinzuständen in Quantenpunkten durch elektrische Kontaktierung und die Anvisierung der Erhöhung der Arbeitstemperatur durch Ausweitung der erprobten Ergebnisse auf andere Halbleitermaterialien.
------------------------------------	----------------	----------------	---------	---	---

Universität Bremen	01.05. 2014	30.04. 2018	239.879	Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: Theoretische Beschreibung von Quantenpunkten für den Einsatz als Photonenquellen und Qubit-Interfaces	Das Gesamtziel des Vorhabens ist die Entwicklung und Umsetzung von Komponenten für den Quantenrepeater. Dieses Teilvorhaben hat theoretische Fragestellungen zur Analyse und Modellierung von Experimenten zum Gegenstand, die zum Teilverbund Q.com-H gehören und hauptsächlich im AP 1 (Elemente von Quantennetzwerken: Photonenquellen und -detektoren für den Telekombereich) angesiedelt sind. Für die Entwicklung von Quellen verschränkter Photonen im Telekom-Wellenlängenbereich unter Verwendung von Quantenpunkt-Emittern sollen mikroskopische Modelle zur Analyse und Optimierung aktueller Experimente von Verbundpartnern entwickelt und ausgewertet werden. Neben der Biexzitonen-Exzitonen-Kaskade wird als alternativer Prozess mit verbesserten Eigenschaften der direkte Zweiphotonenzerfall untersucht. 2. Arbeitsplanung (1) Analyse des Zusammenhangs von strukturellen Eigenschaften der Quantenpunkte und Emissionswellenlänge zur Anwendung für das Design von Photonenquellen mit Emission bei 1.3 und 1.5 µm (UB_AP1), (2) Optimierung von Photonenquellen durch Beeinflussung der Feinstrukturaufspaltung über gezielte Verspannung der Strukturen (UB_AP2) sowie durch Auswahl geeigneter Pumpprozesse und Minimierung detrimenteller Dephasierungsprozesse (UB_AP3), (3) Untersuchung alternativer Prozesse zur Erzeugung verschränkter Photonen (UB_AP4) sowie von neuen Prozessen zur Generation nichtklassischer Lichtzustände (UB_AP5).
Julius- Maximilians- Universität Würzburg	01.05. 2014	31.10. 2018	2.790.330	Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: Quantenrepeater- Bausteine auf Basis elektrisch adressierbarer Quantenpunkt- Mikroresonatoren	Gemäß der Verbundbeschreibung ist das Gesamtziel des Vorhabens die Entwicklung und Umsetzung von Komponenten für einen Quantenrepeater auf Halbleiterbasis. In diesem Teilvorhaben sollen vor diesem Hintergrund wichtige Komponenten eines Quantenrepeaters auf Basis von elektrisch adressierbaren, weit abstimmbaren und deterministisch gekoppelten Quantenpunkt-Mikroresonatoren realisiert werden. 2. Arbeitsplanung Die Arbeiten werden sich auf folgende Aspekte des Quantenrepeaters fokussieren: 1) Verschränkungsverteilung von ununterscheidbaren Photonen aus geordneten und adressierbaren Quantenpunktsystemen über Quanteninterferenz 2) Deterministische Erzeugung ununterscheidbarer Photonen im Regime der starken Licht-Materie Wechselwirkung 3) Realisierung hocheffizienter, weit abstimmbarer Einzelphotonenquellen und Quantenspeicher auf Basis von einzelnen Elektronenspins.

Humboldt-Universität zu Berlin	01.05.2014	31.10.2018	306.852	<p>Verbundprojekt: Quanten-Repeater-Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: hybride Quantenschnittstellen / elektronische stationäre Quantenzustände zwischen Halbleiterquantenpunkten und Atomen durch Photonen</p>	<p>Das Teilprojekt ist in den größeren Verbund des BMBF Schwerpunkts Quantenkommunikation eingebunden. Ein Teilverbund ist das Konsortium Q.com-H. Dieser beschäftigt mit Elementen von Quantennetzwerken basierend auf Halbleitern. In diesem Teilprojekt stehen hybride Quantenschnittstellen im Vordergrund. Ziel ist es, elektronische stationäre Quantenzustände zwischen Halbleiterquantenpunkten und Atomen durch Photonen zu übertragen. Zu diesem Zweck müssen zunächst die variierenden exzitonischen Übergangsenergien in Quantenpunkten aktiv auf spezifische elektronische Übergänge in den Atomen stabilisiert werden. Es wird die D1-Linie von Cs als ein Standard gewählt. Ein erster Schritt zu einer allgemeinen Quantenschnittstelle ist die Zweiphoton-Interferenzen von Photonen aus Atomen und Quantenpunkten. Essentiell für die Übertragung von Quanteninformation über größere Distanzen durch optische Fasern ist die Konversion von Photonen aus Quantenpunkten in Telekombanden durch Frequenzmischen in nichtlinearen Kristallen. Die Konversion ist zudem erweiterbar auf Wellenlängen, die auf andere stationäre Quantensysteme abgestimmt sind. Das Frequenzmischen erlaubt zudem eine schnelle Modulation der konvertierten Photonen im Telekombereich. Dadurch sind eine Kompensation von Frequenz-Jitter und auch die Phasenkodierung von Quanteninformation möglich. Zusammengefasst sind also die Ziele dieses Projektes: 1) Aktive Stabilisierung der Exziton-Übergänge in Quantenpunkten auf einen elektronischen Übergang (D1-Linie) in Cäsium, 2) Demonstration von Zweiphoton-Interferenz von Photonen aus Atomen und Quantenpunkten, 3) Kohärente Wellenlängenkonversion und Modulation einzelner Photonen aus Quantenpunkten im Telekombereich. 2. A Das Teilprojekt ist in 3 Arbeitspakete unterteilt: 1) Stabilisierung der Emission von Quantenpunkten auf atomare Übergänge 2) Quanteninterferenz von Quantenpunkten und Atomen 3) Kohärente Wellenlängenkonversion einzelner Photonen aus Quantenpunkten</p>
--------------------------------	------------	------------	---------	--	---

Technische Universität München	01.05. 2014	31.12. 2018	2.042.244	<p>Verbundprojekt: Quanten-Repeater- Plattformen auf der Basis von Halbleitern - Q.com-Halbleiter -; Teilvorhaben: Erzeugung und Detektion von nicht- klassischen N- Photonenzuständen in photonischen Halbleiter-Supraleiter- Hybridschaltkreisen</p>	<p>Die allgemeinen Ziele dieses Teilvorhabens beziehen sich auf die Realisierung von hoch-integrierten quanten-photonischen Schaltkreisen, in denen photonische Quantenzustände auf einem einzigen Halbleiter-Chip effizient erzeugt, verteilt und detektiert werden können. Um nicht-klassische Lichtzustände direkt auf dem Halbleiter-Chip zu erzeugen werden optisch aktive Halbleiter-Quantenpunkte in photonische Kristall Kavitäten hoher Güte eingebettet und mittels cavity-QED Effekten kohärent von statische in propagierende photonische Moden umgewandelt. Der hier vorgeschlagene Ansatz soll einerseits die effiziente Erzeugung von einzelnen und maximal verschränkten N-Photonen-Zuständen im Telekom Frequenzband vereinfachen und andererseits zu Fortschritten hinsichtlich der vollständigen Kontrolle der Wechselwirkung zwischen propagierenden und statischen Quantenbits in integrierten Halbleiter-Chips führen. Die Aufmerksamkeit konzentriert sich vor allem auf "modulare" Design-Konzepte, in welchen z. B. elektrisch verstimmbare c-QED-Systeme an Wellenleiter gekoppelt werden, die ihrerseits mit wellenleiter-integrierten, supraleitenden Einzelphotonen-Detektoren verbunden sind. Die hierzu entwickelten Detektoren versprechen eine Quanteneffizienz nahe 100 % für Wellenlängen zwischen sichtbaren und infraroten Licht, eine Zeitauflösung im Pikosekunden-Bereich und sogar photonenzahl-auflösende Eigenschaften. 2. Arbeitsplanung Das Vorhaben unterteilt sich in drei, eng miteinander verzahnte Arbeitspakete, die sich dabei auf die Entwicklung von Einzelphotonen-Detektoren (AP-1), photonischen Schnittstellen (AP-2) und der "on-Chip"-Erzeugung von verschränkten Photonen (AP-3) konzentrieren.</p>
--------------------------------------	----------------	----------------	-----------	--	--

Ludwig- Maximilians- Universität München	01.01. 2017	31.12. 2019	497.010	Verbundprojekt: Hardwarebasierte Quantensicherheit - HQS -; Teilvorhaben: Sichere Kommunikation und Analyse von PUFs mittels miniaturisierter IR-Freiraumsysteme - HQS-SIKAP	Die private und wirtschaftliche Nutzung der Informations- und Kommunikationstechnologien erfordert den Schutz der Daten durch mächtige Kryptographie-Methoden. Die Quantenschlüsselverteilung ist eine auf physikalischen Prinzipien aufbauende, hardwarebasierte Methode, die vom Prinzip her gegen alle Angriffe, auch eines Quantencomputers, gewappnet ist. Der Verbund HQS nimmt sich zum Ziel, durch neuentwickelte Hardware, übergreifende Schnittstellenentwicklungen und intensive Sicherheitsanalysen den hohen Standard der von den Verbundpartnern entwickelten Kommunikationssysteme in neuen, sicheren und markttauglichen Systemen zu vereinen, sowie quantenmechanische Prinzipien auch zur Sicherung von PUFs anzuwenden. Ziel dieses Teilprojektes ist es, leistungsfähige, auf Mikrooptik basierende Sender- und Empfängermodule zu entwickeln und sowohl die Optik als auch die Elektronik auf Festigkeit gegen Seitenkanalangriffe zu prüfen. Darüber hinaus sollen diese Komponenten, sowie verwandte optische Methoden auf ihre Verwendbarkeit als PUF getestet werden um so auch hier die durch quantenmechanische Methoden ermöglichte hohe Sicherheit in Informations- und Kommunikationstechnologien zu gewährleisten.
Heinrich- Heine- Universität Düsseldorf	01.01. 2017	31.12. 2019	243.882	Verbundprojekt: Hardwarebasierte Quantensicherheit - HQS -; Teilvorhaben: Sicherheitsanalysen für Quantenkommunikation , -Identifikation und Authentifizierung	Vorhabenziel: Das Ziel des Gesamtvorhabens ist es, Quantenschlüsselverteilung (QKD) als hardwarebasierte Sicherheitstechnologie weiterzuentwickeln und Optikmodule für QKD bereitzustellen, Schnittstellen zwischen QKD-Modulen und weiteren Plattformen/Netzwerken zu definieren und zu implementieren, sowie die Sicherheit der Verfahren zu analysieren. In diesem theoretischen Teilprojekt sollen Sicherheitsanalysen für hardwarebasierte Quantenkommunikationssysteme erstellt werden. Insbesondere sollen Schlüsselraten für gegebene Fehlermodelle berechnet werden, und semi-apparatunabhängige Szenarien berücksichtigt werden. Ferner sollen allgemeine Sicherheitsanalysen von sogenannten physikalisch nicht kopierbaren Funktionen erstellt werden.

Technische Universität München	01.01.2017	31.12.2019	315.054	Verbundprojekt: Hardwarebasierte Quantensicherheit - HQS -; Teilvorhaben: Entwicklung von Gegenmaßnahmen gegen Seitenkanalanalyse auf klassischen und quanten Seitenkanälen	Die private und wirtschaftliche Nutzung der Informations- und Kommunikationstechnologien erfordert den Schutz der Daten durch mächtige Kryptographie-Methoden. Die Quantenschlüsselverteilung ist eine auf physikalischen Prinzipien aufbauende, hardwarebasierte Methode, die vom Prinzip her gegen alle Angriffe, auch eines Quantencomputers, gewappnet ist. Der Verbund HQS nimmt sich zum Ziel, durch neuentwickelte Hardware, übergreifende Schnittstellenentwicklungen und intensive Sicherheitsanalysen den hohen Standard der von den Verbundpartnern entwickelten Kommunikationssysteme in neuen, sicheren und marktauglichen Systemen zu vereinen, sowie quantenmechanische Prinzipien auch zur Sicherung von PUFs anzuwenden.
Rohde & Schwarz Cybersecurity GmbH	01.01.2017	31.12.2019	156.422	Verbundprojekt: Hardwarebasierte Quantensicherheit - HQS -; Teilvorhaben: Kryptogeräteschnittstelle	Die private und wirtschaftliche Nutzung der Informations- und Kommunikationstechnologien erfordert den Schutz der Daten durch mächtige kryptographische Methoden. Mit der Entwicklung des Quantencomputers wird ein umfassender Wechsel auf neue Kryptoverfahren unumgänglich. Die Quantenschlüsselverteilung (QKD) ist eine auf physikalischen Prinzipien aufbauende, hardwarebasierte Methode, die bereits heute gegen alle Angriffe eines Quantencomputers gewappnet ist. Unser Verbund nimmt sich daher zum Ziel, durch neuentwickelte Hardware übergreifende Schnittstellenentwicklungen und intensive Sicherheitsanalysen, den hohen Standard der von den Verbundpartnern entwickelten Kommunikationssysteme in neuen, sicheren und marktauglichen Systemen zu vereinen. Dies soll eine rasche Integration in zukunftssichere Verschlüsselungsplattformen und hochsichere IT- und TK-Infrastrukturen gewährleisten. In diesem Teilvorhaben wird der Übergang zwischen den in anderen Teilvorhaben entwickelten QKD-Modulen, die auf sicherem Weg einen Schlüssel austauschen, und der Benutzung dieses Schlüssels zur sicheren Übertragung von Nutzdaten, was das eigentliche Ziel ist, geschaffen. Dazu soll ein existierendes Kryptogerät der Rohde & Schwarz Cybersecurity GmbH (RSCS) derart modifiziert werden, dass es zur Nutzdatenverschlüsselung die Schlüssel der QKD-Module verwendet. Hierfür ist insb. die Schnittstelle zwischen dem QKD-Modul und dem Kryptogerät zu definieren, sowie einer sorgfältigen Sicherheitsbetrachtung zu unterziehen. Dadurch soll der anvisierte hohe Sicherheitslevel sichergestellt werden. Anschließend soll die im Projekt entwickelte Schnittstelle prototypisch realisiert und demonstriert werden. Schon von Beginn an soll durch die Betrachtung des klassischen Kryptogeräteanteils besonderer Wert auf die problemlose Einbindung in reale Nutzerszenarien gelegt werden. Durch geschickte Kombination der QKD- und klassischen Geräteeigenschaften sollen viele erweiterte Nutzerszenarien ermöglicht werden.

Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. (MPG)	01.01.2017	31.12.2019	316.504	Verbundprojekt: Hardwarebasierte Quantensicherheit - HQS -; Teilvorhaben: Integration von Quanten-Kryptographie in existierende Kommunikation-Infrastruktur für zukunftssicheren Schutz von vertraulichen Daten	Die private und wirtschaftliche Nutzung der Informations- und Kommunikationstechnologien erfordert den Schutz der Daten durch mächtige Kryptographie-Methoden. Die Quantenschlüsselverteilung ist eine auf physikalischen Prinzipien aufbauende, hardwarebasierte Methode, die vom Prinzip her gegen alle Angriffe, auch eines Quantencomputers, gewappnet ist. Der Verbund HQS nimmt sich zum Ziel, durch neuentwickelte Hardware, übergreifende Schnittstellenentwicklungen und intensive Sicherheitsanalysen den hohen Standard der von den Verbundpartnern entwickelten Kommunikationssysteme in neuen, sicheren und markttauglichen Systemen zu vereinen, sowie quantenmechanische Prinzipien auch zur Sicherung von PUFs anzuwenden. Im Rahmen des Teilvorhabens wird ein QKD-Optikmodul entwickelt und in einem Glasfasernetz eingesetzt, das durch sichere Schnittstellen in bestehende Verschlüsselungstechnologie integriert und auch für QKD-basierte Authentifikationsschemata benutzt werden kann.
noris network AG	01.01.2017	31.12.2019	36.110	Verbundprojekt: Hardwarebasierte Quantensicherheit - HQS -; Teilvorhaben: Hardwarebasierte Quantensicherheit in innerstädtischen Glasfasernetzwerken	Der Verbund HQS nimmt sich zum Ziel, durch neuentwickelte Hardware, übergreifende Schnittstellenentwicklungen und intensive Sicherheitsanalysen den hohen Standard der von den Verbundpartnern entwickelten Kommunikationssysteme in neuen, sicheren und markttauglichen Systemen zu vereinen, sowie quantenmechanische Prinzipien auch zur Sicherung von PUFs anzuwenden. Im Verbund von Forschung und Industrie soll eine Möglichkeit geschaffen werden, um die nötige Sicherheit unserer Kunden zu gewährleisten. Im Teilvorhaben sollen dies Tests der entwickelten Quantenkryptographie-Technologien in einem innerstädtischen Glasfasernetz in realen Umgebungen belegen. Die noris network AG bringt ihre Kenntnisse im Bereich Glasfasernetze, Kundenanforderungen und Administration von IT Diensten in das Projekt mit ein.
Ludwig-Maximilians-Universität München	01.08.2017	31.07.2020	744.642	Verbundprojekt: Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sat - QUBE -; Teilvorhaben: Quantennutzlast BB84	Der Verbund QUBE nimmt sich zum Ziel, Technologien für die Quantenschlüsselverteilung mittels Kleinstsatelliten zu entwickeln und zu testen. In diesem Teilvorhaben werden die Komponenten für die Sendermodule der Nutzlast entwickelt, gebaut und im Satelliten integriert. Eine weitere wichtige Aufgabe des Teilvorhabens ist die Erweiterung der Bodenstation zur Detektion von Quantensignalen für die Quantenschlüsselverteilung sowie eingehende Tests und deren Auswertung aller Komponenten, sowohl noch am Flat-Sat am Boden als auch am Satelliten im Orbit.

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.	01.08.2017	31.07.2020	570.000	Verbundprojekt: Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sat – QUBE -; Teilvorhaben: Demonstration von Technologien für Quantenschlüsselverteilung von Cubesats	Quantenschlüsselverteilung brachte einen Paradigmenwechsel für sichere Kommunikation – erstmals kann nun die Information des Abhörers und damit die Sicherheit der Nachrichtenübermittlung gemessen werden. Kleinsatelliten, sog. Cube-Sats, brachten einen ebenso großen Entwicklungsschritt für die Raumfahrttechnik. Der Verbund QUBE nimmt sich zum Ziel, diese Technologien zu verbinden und globale, sichere Kommunikation mit geringem Ressourcenbedarf zu realisieren. In zwei Stufen sollen zuerst die technologischen Grundlagen entwickelt und in einem ersten Cube-Sat getestet werden. In einer Fortsetzung des hier beschriebenen Projekts soll dann ein zweiter, voll funktionsfähiger Cube-Sat sicheren Schlüsselaustausch zwischen weit voneinander entfernten Bodenstationen demonstrieren. In einer engen Zusammenarbeit zwischen Universitäten, Forschungsinstitutionen und Industrie will der Verbund QUBE die Grundlage für leistungsfähige aber ökonomische Satellitensysteme zur sicheren globalen Kommunikation schaffen.
Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. (MPG)	01.08.2017	31.07.2020	493.697	Verbundprojekt: Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sat - QUBE -; Teilvorhaben: Quantenzufallzahlenerzeugung und Quantenkryptographie basierend auf photonisch-integrierten Schaltkreisen zum Einsatz in Satelliten	Quantenschlüsselverteilung brachte einen Paradigmenwechsel für sichere Kommunikation – erstmals kann nun die Information des Abhörers und damit die Sicherheit der Nachrichtenübermittlung gemessen werden. Kleinsatelliten, sog. Cube-Sats, brachten einen ebenso großen Entwicklungsschritt für die Raumfahrttechnik. Der Verbund QUBE nimmt sich zum Ziel, diese Technologien zu verbinden und globale, sichere Kommunikation mit geringem Ressourcenbedarf zu realisieren. In diesem Vorhaben soll ein miniaturisiertes Modul basierend auf einem photonisch-integrierten Schaltkreis ("photonic integrated circuit" - PIC) für die Erzeugung von Quantenzufallszahlen und quantenmechanischen Zuständen von Licht für Quantenschlüsselverteilung entwickelt und dessen Verwendbarkeit in der Raumfahrt, insbesondere der Einsatz in Cube-Sats, demonstriert werden. Die Arbeiten beinhalten einen Payload-Rechner, der Komponenten steuert und die notwendige digitale Nachbearbeitung der Zufallszahlen sicherstellt.

OHB System AG	01.08.2017	31.07.2020	87.677	Verbundprojekt: Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sat – QUBE -; Teilvorhaben: Platinen für photonische integrierte Schaltkreise	Der Verbund QUBE nimmt sich zum Ziel, Technologien für die Quantenschlüsselverteilung mittels Kleinstsatelliten zu entwickeln und zu testen. Das technische Arbeitsziel in diesem Teilvorhaben ist die Herstellung einer Demonstrator-Einheit, welche QRNG und QKD Fähigkeit basierend auf einem PIC (Photonic Integrated Circuit) bietet. Die Entwicklung dieser PIC Platine ist Bestandteil dieses Vorhabens. Die PIC Platine beinhaltet alle notwendigen Hardwarebausteine um den PIC zu testen und später im Laufe der Mission zu betreiben. Des Weiteren wird eine Payload-Rechner-Karte entwickelt, welche die PIC Karte (MPL/OHB) sowie die 850nm QKD Nutzlast (LMU) steuert.
Zentrum für Telematik e.V.	01.08.2017	31.07.2020	1.134.424	Verbundprojekt: Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sat – QUBE -; Teilvorhaben: Kleinstsatellitenentwurf, -bau und -start für QK-Experimente	Der Verbund QUBE nimmt sich zum Ziel, Technologien für die Quantenschlüsselverteilung mittels Kleinstsatelliten zu entwickeln und zu testen. Das ZfT wird im Rahmen von QUBE die Cubesat-Plattform liefern, die Systemintegration übernehmen, die Bodenstation betreiben (beschränkt auf grundlegenden Betrieb ohne optische Verbindungen), sowie Beiträge zum Industrialisierungskonzept und der nächsten Projektphase liefern.
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.	01.08.2017	31.07.2021	570.000	Verbundprojekt: Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sat – QUBE -; Teilvorhaben: Demonstration von Technologien für Quantenschlüsselverteilung von Cubesats	Quantenschlüsselverteilung brachte einen Paradigmenwechsel für sichere Kommunikation – erstmals kann nun die Information des Abhörers und damit die Sicherheit der Nachrichtenübermittlung gemessen werden. Kleinstsatelliten, sog. Cube-Sats, brachten einen ebenso großen Entwicklungsschritt für die Raumfahrttechnik. Der Verbund QUBE nimmt sich zum Ziel, diese Technologien zu verbinden und globale, sichere Kommunikation mit geringem Ressourcenbedarf zu realisieren. In zwei Stufen sollen zuerst die technologischen Grundlagen entwickelt und in einem ersten Cube-Sat getestet werden. In einer Fortsetzung des hier beschriebenen Projekts soll dann ein zweiter, voll funktionsfähiger Cube-Sat sicheren Schlüsselaustausch zwischen weit voneinander entfernten Bodenstationen demonstrieren. In einer engen Zusammenarbeit zwischen Universitäten, Forschungsinstitutionen und Industrie will der Verbund QUBE die Grundlage für leistungsfähige aber ökonomische Satellitensysteme zur sicheren globalen Kommunikation schaffen.
Zentrum für Telematik e.V.	01.08.2017	31.07.2021	1.134.424	Verbundprojekt: Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sat – QUBE -; Teilvorhaben: Kleinstsatellitenentwurf, -bau und -start für QK-Experimente	Der Verbund QUBE nimmt sich zum Ziel, Technologien für die Quantenschlüsselverteilung mittels Kleinstsatelliten zu entwickeln und zu testen. Das ZfT wird im Rahmen von QUBE die Cubesat-Plattform liefern, die Systemintegration übernehmen, die Bodenstation betreiben (beschränkt auf grundlegenden Betrieb ohne optische Verbindungen), sowie Beiträge zum Industrialisierungskonzept und der nächsten Projektphase liefern.

Ludwig-Maximilians-Universität München	01.08.2017	31.07.2021	744.642	Verbundprojekt: Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sat - QUBE -; Teilvorhaben: Quantennutzlast BB84	Der Verbund QUBE nimmt sich zum Ziel, Technologien für die Quantenschlüsselverteilung mittels Kleinstsatelliten zu entwickeln und zu testen. In diesem Teilvorhaben werden die Komponenten für die Sendermodule der Nutzlast entwickelt, gebaut und im Satelliten integriert. Eine weitere wichtige Aufgabe des Teilvorhabens ist die Erweiterung der Bodenstation zur Detektion von Quantensignalen für die Quantenschlüsselverteilung sowie eingehende Tests und deren Auswertung aller Komponenten, sowohl noch am Flat-Sat am Boden als auch am Satelliten im Orbit.
OHB System AG	01.08.2017	31.07.2021	87.677	Verbundprojekt: Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sat – QUBE -; Teilvorhaben: Platinen für photonische integrierte Schaltkreise	Der Verbund QUBE nimmt sich zum Ziel, Technologien für die Quantenschlüsselverteilung mittels Kleinstsatelliten zu entwickeln und zu testen. Das technische Arbeitsziel in diesem Teilvorhaben ist die Herstellung einer Demonstrator-Einheit, welche QRNG und QKD Fähigkeit basierend auf einem PIC (Photonic Integrated Circuit) bietet. Die Entwicklung dieser PIC Platine ist Bestandteil dieses Vorhabens. Die PIC Platine beinhaltet alle notwendigen Hardwarebausteine um den PIC zu testen und später im Laufe der Mission zu betreiben. Des Weiteren wird eine Payload-Rechner-Karte entwickelt, welche die PIC Karte (MPL/OHB) sowie die 850nm QKD Nutzlast (LMU) steuert.
Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.	01.08.2017	31.07.2021	493.697	Verbundprojekt: Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sat - QUBE -; Teilvorhaben: Quantenzufallzahlenerzeugung und Quantenkryptographie basierend auf photonisch-integrierten Schaltkreisen zum Einsatz in Satelliten	Quantenschlüsselverteilung brachte einen Paradigmenwechsel für sichere Kommunikation – erstmals kann nun die Information des Abhörers und damit die Sicherheit der Nachrichtenübermittlung gemessen werden. Kleinstsatelliten, sog. Cube-Sats, brachten einen ebenso großen Entwicklungsschritt für die Raumfahrttechnik. Der Verbund QUBE nimmt sich zum Ziel, diese Technologien zu verbinden und globale, sichere Kommunikation mit geringem Ressourcenbedarf zu realisieren. In diesem Vorhaben soll ein miniaturisiertes Modul basierend auf einem photonisch-integrierten Schaltkreis ("photonic integrated circuit" - PIC) für die Erzeugung von Quantenzufallszahlen und quantenmechanischen Zuständen von Licht für Quantenschlüsselverteilung entwickelt und dessen Verwendbarkeit in der Raumfahrt, insbesondere der Einsatz in Cube-Sats, demonstriert werden. Die Arbeiten beinhalten einen Payload-Rechner, der Komponenten steuert und die notwendige digitale Nachbearbeitung der Zufallszahlen sicherstellt.

Julius-Maximilians-Universität Würzburg	01.04.2018	31.03.2021	360.096	Verbundprojekt: Hyperentanglement from ultra-bright photon pair sources - HYPER-U-P-S -; Teilvorhaben: Herstellung einer Hyper-Verschränkten Photonenpaarquelle	Die Entwicklung von Quantennetzwerken für die Realisierung einer langreichweitigen, abhörsicheren Kommunikation mittels Quantenschlüsselübertragung ist eine der der zentralen Herausforderungen im Feld der Quanten- und Informationstechnologie. Eine zentrale Herausforderung ist der Entwurf und die Implementierung einer kompatiblen Lichtquelle für die Quanteninformationsübertragung: In der Quanteninformationsübertragung muss die Information in ein einzelnes Licht-quant, übertragen werden. Jedoch ist für die Implementierung eines Quantennetzwerkes, welches aus einer Vielzahl von Sender- und Speicherstationen besteht, eine weitere Ressource unerlässlich: Die Quantenverschränkung. Ein attraktiver Ansatz hierbei beruht auf der Implementierung von Photonenpaarquellen, welche quantenmechanisch verschränkte Photonen versenden. Mittels Quanteninterferenz und Teleportation kann die Verschränkung langreichweitig aufrechterhalten werden und ein Quantennetzwerk etabliert werden. Das Projekt HYPER U-P-S adressiert die Grundherausforderung, eine halbleiterbasierte Quelle einzelner Photonen-Paare zur Verfügung zu stellen, deren Emission deterministisch, hochgradig verschränkt, ununterscheidbar und hocheffizient ist.
Technische Universität München	01.04.2018	31.03.2021	179.988	Verbundprojekt: Mikrowellen-Quantensensorik mit Diamant-Farbzentren - MICROSENS -; Teilvorhaben: Mikrowellen-Photonendetektor	Das Projekt hat zum Ziel, empfindliche Detektoren und Spektrumanalysatoren für hochfrequente Signale (>1GHz) zu entwickeln. Die Geräte sollen auf Farbzentren in Diamant basieren. Das Potenzial dieser Zentren für die anvisierte Anwendung wurde kürzlich von den Projektpartnern demonstriert. Spins in Festkörpern sind prinzipiell attraktive Sensoren für diese Signale, da sich ihre Übergangsfrequenz über einen Bereich von ca 1GHz-100GHz verstimmen lässt, und sie durch neu entwickelte Quantenprotokolle selbst schwache Signale empfindlich detektieren können. Technisch vereint das Projekt die Arbeiten aus zwei traditionell unterschiedlichen Forschungsfeldern, Sensorik mit Festkörperspins einerseits und Mikrowellen-Cavity-QED andererseits. Anwendungen könnte es in mehreren Bereichen finden. In der Quantenkommunikation könnten Einzelphotonendetektoren Quantennetzwerke im Mikrowellenbereich ermöglichen. In der Sensorik könnten empfindliche Detektoren klassische Kommunikation, Satellitennavigation und Magnetresonanz an mikroskopisch kleinen Proben verbessern. Aus fundamentaler Sicht wird das Projekt bei der Analyse der fundamentalen Grenzen Einsichten in Quantenthermodynamik ermöglichen.

Universität Leipzig	01.04. 2018	31.03. 2021	190.662	Verbundprojekt: Mikrowellen- Quantensensorik mit Diamant-Farbzentren - MICROSENS -; Teilvorhaben: Herstellung und Optimierung von Quantenobjekten für die Mikrowellen-Sensorik	Die Detektion und Spektroskopie schwacher Mikrowellensignale (>GHz) ist von zentraler Bedeutung für Schlüsselbereiche der modernen Technologie, einschließlich drahtloser Kommunikation, Radar, Navigation und medizinischer Bildgebung. Festkörper Spins könnten attraktive Sensoren für beide Anwendungen sein, da sie Übergangsfrequenzen haben, die im Bereich von 1-100 GHz abstimbar sind. Allerdings ist die Hochfrequenzsensorik durch Festkörperspins bisher noch wenig erforscht, und die meisten Demonstrationen der Spinsensorik haben sich auf niederfrequente (<10MHz) Signale konzentriert. Der Hauptgrund dafür ist, dass etablierte Quantensensorik-Protokolle unter einer niedrigen Empfindlichkeit im Hochfrequenzbereich leiden. Zudem ist die Implementierung von Spin-Quantensensoren im Vergleich zur hochintegrierten Mikrowellenelektronik noch nicht ausgereift. Ziel des MICROSENS-Vorschlags ist es, das bekannte Nitrogen-Vacancy (NV) Diamant-Farbzentrum als Werkzeug zur Lösung dieser Probleme zu nutzen. Wir werden zwei verschiedene Demonstratoren von Mikrowellensensoren bauen, die auf den NV-Spin-Eigenschaften basieren: ein einzelner Mikrowellen-Photonendetektor und ein Breitbandquantenspektromanalysator. Die Universität Leipzig (ULEI) wird zusammen mit dem Projektpartner Thales Research & Technology (THALES) die Entwicklung des Breitbandspektrometers durchführen und die Erzeugung von geeigneten Detektoren als Diamant mittels Ionenimplantation für die anderen Gruppen bereitstellen. Aufgabe ist es die Verfahren zu optimieren um NV Zentren mit ausreichend hoher Güte der quantenmechanischen Eigenschaften herzustellen.
------------------------	----------------	----------------	---------	---	--

Universität Ulm	01.04. 2018	31.03. 2021	180.600	Verbundprojekt: Mikrowellen- Quantensensorik mit Diamant-Farbzentren - MICROSENS -; Teilvorhaben: Rauschgrenzen für hochfrequente Spin- Sensoren	Die Detektion und Spektroskopie schwacher Mikrowellensignale (>GHz) ist von zentraler Bedeutung für Schlüsselbereiche der modernen Technologie, einschließlich drahtloser Kommunikation, Radar, Navigation und medizinischer Bildgebung. Solid State Spins könnten attraktive Sensoren für beide Anwendungen sein, da sie Übergangsfrequenzen haben, die im Bereich von 1-100 GHz abgestimmt werden können. Allerdings ist die Hochfrequenzsensorik durch Festkörperspins bisher noch wenig erforscht, und die meisten Demonstrationen der Spinsensorik haben sich auf niederfrequente (<10MHz) Signale konzentriert. Der Hauptgrund dafür ist, dass etablierte Quantensensorik-Protokolle unter einer niedrigen Empfindlichkeit im Hochfrequenzbereich leiden. Zudem ist die Implementierung von Spin-Quantensensoren im Vergleich zur hochintegrierten Mikrowellenelektronik noch nicht ausgereift. Ziel des MICROSENS-Projektes ist es, das bekannte Nitrogen-Vacancy (NV) Diamant-Farbzentrum als Werkzeug zur Lösung dieser Probleme zu nutzen. Wir werden zwei verschiedene Demonstratoren von Mikrowellensensoren bauen, die auf den NV-Spin-Eigenschaften basieren: ein einzelner Mikrowellen-Photonendetektor und ein Breitbandquantenspektrumanalysator. Die Universität Ulm (UULM) wird das WP3 leiten, mit dem Ziel, neue Protokolle für die Quantensensorik zu entwickeln, mit besonderem Schwerpunkt auf der hochauflösenden Erfassung hochfrequenter Felder. Besonderer Schwerpunkt liegt auf Minimierung des Rauschens für die hochfrequente Spin-Sensorik und auf einem besseren Verständnis der Hochfrequenz-Sensorik und ihrer fundamentalen Grenzen.
--------------------	----------------	----------------	---------	--	--

Rheinische Friedrich- Wilhelms- Universität Bonn	01.08. 2018	31.07. 2021	1.140.456	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Quantenspeicher mit Atomen und Ionen in Faserresonatoren	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll ("Lütkenhaus-Protokoll") der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Das Teilprojekt "Quantenspeicher mit Atomen und Ionen in Faserresonatoren" erforscht effiziente Photon-Qubit-Schnittstellen für die Atom- und Ionen-Plattform, um insbesondere die Funktionalität von Quantenspeichern zu steigern. Eine zentrale Rolle in diesem Teilprojekt spielen optische Faserresonatoren, die die Licht-Materie-Wechselwirkung verstärken und eine effiziente Konversion von photonischen Qubits in atomare oder andere materielle Qubits zum Zweck der Speicherung ermöglichen. Die Resonatorspiegel werden durch Strukturierung der Endflächen optischer Fasern realisiert. Das Teilprojekt gliedert sich in drei Unterprojekte (UPs): UP1 und UP2 erforschen Schnittstellen für Neutralatome bzw. für gespeicherte Ionen in Zusammenarbeit mit dem Teilprojekt von Prof. Eschner. In UP3 werden Elektroden direkt auf den Fasern integriert, um resonator-integrierte Ionenfallen zu realisieren.
--	----------------	----------------	-----------	---	---

Technische Universität München	01.08.2018	31.07.2021	265.194	<p>Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -;</p> <p>Teilvorhaben: Quanteninformati onstheorie und Kommunikationstheorie für Quantenrepeater jenseits des Shannon Ansatzes</p>	<p>Der Q.Link.X-Verbund plant, faserbasierte Strecken für die Quantenschlüsselverteilung zu realisieren und deren Reichweite mit Quantenrepeatern zu erweitern. Mit elementaren funktionalen Systemen soll gezeigt werden, dass sich mit Verschränkungsverteilung und Gatteroperationen die Schranke für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen quantitativ überwinden lässt ("Quantenrepeater-Vorteil"). Dieses Teilprojekt trägt dazu bei die physikalischen und informationstechnischen Eigenschaften der QR-Zellen zu modellieren und analysieren und Konzepte zu entwickeln, die Quantenkommunikation in zukünftige IKT-Strukturen einbettet. Die Quantenkommunikation soll später über öffentliche Netze erfolgen. Daher soll die Entwicklung der theoretischen Grundlagen für eine allgemeine Quanten-IKT als Basis für das Netzdesign, die Standardisierung und die Zertifizierung von Quanten-Kommunikationssystemen vorangetrieben werden. Es soll eine vielseitig einsetzbare Simulationsumgebung geschaffen werden, um für die experimentellen Realisierungen klare Schnittstellen zu definieren und kritische Parameter zu identifizieren. Am Ende der Antragsperiode sollen informationstheoretische Resultate jenseits des Shannon Ansatzes zur Verfügung stehen, die die Grenzen, d. h. optimale Raten, für den Entwurf von robusten und abhörsicheren Protokollen für Quanten-Repeater liefern. Es sollen andere Attacken über Nebenkanäle und neue Ziele des Empfängers und Abhörers betrachtet werden. Gleichzeitig soll hierbei der Einfluss von neuen Ressourcen betrachtet werden. Es soll die wissenschaftliche und personelle Basis für das Engineering von Quantenkommunikation durch direkte Überführung der Resultate des Forschungsvorhabens in das Lehr- und Doktorandenprogramm der Fakultät für Computerengineering und Informationstechnik an der TUM gelegt werden.</p>
Technische Universität Dortmund	01.08.2018	31.07.2021	279.300	<p>Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -;</p> <p>Teilvorhaben: Spins in einzelnen und gekoppelten Telekom-Quantenpunkten</p>	<p>Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Dieses Teilvorhaben plant, die kohärenten Eigenschaften von Ladungsträgerspins in Halbleiterquantenstrukturen im Telekom-Bereich zu untersuchen. Diese könnten bei hinreichender Kohärenz als Speicher für Quanteninformation dienen.</p>

Technische Universität München	01.08.2018	31.07.2021	191.994	<p>Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Systemdesign für sichere Quantenrepeater Systeme: Basisprotokolle und sichere Implementierung</p>	<p>Der Q.Link.X-Verbund plant, faserbasierte Strecken für die Quantenschlüsselverteilung zu realisieren und deren Reichweite mit Quantenrepeatern zu erweitern. Mit elementaren funktionalen Systemen soll gezeigt werden, dass sich mit Verschränkungsverteilung und Gatteroperationen die Schranke für Punkt-zu-Punkt-Verbindungen quantitativ überwinden lässt ("Quantenrepeater-Vorteil"). Dieses Teilprojekt trägt dazu bei die physikalischen und informationstechnischen Eigenschaften der QR-Zellen zu modellieren und analysieren und Konzepte zu entwickeln, die Quantenkommunikation in zukünftige IKT-Strukturen einbettet. Die Quantenkommunikation soll später über öffentliche Netze erfolgen. Daher soll die Entwicklung der theoretischen Grundlagen für eine allgemeine Quanten-IKT als Basis für das Netzdesign, die Standardisierung und die Zertifizierung von Quantenkommunikationssystemen vorangetrieben werden. Es soll eine vielseitig einsetzbare Simulationsumgebung geschaffen werden, um für die experimentellen Realisierungen klare Schnittstellen zu definieren und kritische Parameter zu identifizieren. Am Ende der Antragsperiode sollen informationstheoretische Resultate jenseits des Shannon Ansatzes zur Verfügung stehen, die die Grenzen, d. h. optimale Raten, für den Entwurf von robusten und abhörsicheren Protokollen für Quanten-Repeater liefern. Es sollen andere Attacken über Nebenkanäle und neue Ziele des Empfängers und Abhörers betrachtet werden. Gleichzeitig soll hierbei der Einfluss von neuen Ressourcen betrachtet werden. Es soll die wissenschaftliche und personelle Basis für das Engineering von Quantenkommunikation durch direkte Überführung der Resultate des Forschungsvorhabens in das Lehr- und Doktorandenprogramm der Fakultät für Computerengineering und Informationstechnik an der TUM gelegt werden.</p>
HighFinesse Laser and Electronic Systems GmbH	01.08.2018	31.07.2021	249.986	<p>Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Laserfrequenzregler für Quantenrepeater</p>	<p>Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Ziel dieses Teilprojekts ist die Entwicklung von interferometrischen Laserfrequenz-Mess- und Regelsystemen für Quantenrepeater und Demonstration dieser Systeme (TRL 5) an den Projektplattformen. Hierbei sollen durch interferometrische Techniken die Laserfrequenzen in Quantenrepeatern beobachtet und geregelt werden, wobei die absolute Genauigkeit durch neu entwickelte, absolute Kalibrationsprotokolle erzielt werden soll. Die Interferogramme sollen mit hoher zeitlicher Auflösung (kHz-Bereich) über Sensoren aufgezeichnet, digitalisiert und per Algorithmus in einem Prozessrechner ausgewertet werden. Dieses Verfahren erlaubt die Generierung eines Fehlersignals für die Regelung der Laserfrequenzen, welche mit einer Steuereinheit realisiert werden soll.</p>

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V.	01.08.2018	31.07.2021	569.462	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Photonische Verschränkungsverteilung über Glasfasern im Telekom-Wellenlängenbereich	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Ziel dieses Teilvorhabens ist die Bereitstellung einer anwendungsnahen Testumgebung aus verlegten Glasfasern um QR-Komponenten, QR-Zellen und QR-Segmente zu testen, die im Verbund entwickelt werden.
Technische Universität Berlin	01.08.2018	31.07.2021	318.006	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Hocheffiziente fasergekoppelte Halbleiter-Quantenlichtquellen sowohl im $< 1 \mu\text{m}$ als auch im $1.55 \mu\text{m}$ Wellenlängenbereich	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann.
Universität Stuttgart	01.08.2018	31.07.2021	1.632.318	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Komponenten und Aufbau einer Demonstratorstrecke zur speicher-assistierten Quantenschlüsselübertragung	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von drei verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Für die Halbleiter basierten QR-Zellen ist es für die Anwendung im Feld essentiell Kernelemente wie Quellen und Speicher auf die Wellenlänge der Telekommunikationsfasern abzustimmen. In diesem Teilvorhaben werden die entsprechenden Vorarbeiten geleistet um die im nahen infraroten entwickelten QR-Zellen mittelfristig zu ersetzen. Auf Basis von Stickstofffehlstellen im Diamant wird ein Quantenrepeater aufgebaut. Die im Protokoll genutzte Quanteninformation kann auf diesen Elektronenspin optisch übertragen werden. Auch können diese Fehlstellen ein Photon aussenden, welches dann mit einem Spin in der Fehlstelle verschränkt ist. Da diese Spins nicht so lange Speicherzeiten aufweisen, kann danach diese Information auf einen benachbarten Kernspin übertragen werden. Dieser Prozess wird für das eingesetzte Lütkenhaus Protokoll gleich zwei Mal vollzogen. Danach wird an beiden Kernspins eine Messung durchgeführt, sodass die beiden ursprünglich ausgesandten Photonen einen gemeinsamen Quantenzustand einnehmen. Damit wird dann die Quantenübertragung ermöglicht.

Universität Paderborn	01.08.2018	31.07.2021	742.572	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Festkörperbasierte Schlüsselbauelemente für die Quantenkommunikation	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Das Paderborner Teilvorhaben trägt zum Gesamtziel des Verbunds mit der Entwicklung und Bereitstellung festkörperbasierter Funktionseinheiten bei. So werden integriert optische Wellenlängenkonverter auf der Basis von periodisch gepolten Lithiumniobat Wellenleitern entwickelt, die die Anbindung von Quantenspeichern an den Telekom-Bereich ermöglichen sollen. Mittels Molekularstrahlepitaxie werden feldsteuerbare Halbleiterheterostrukturen mit eingebetteten Quantenpunktmolekülen hergestellt, die als Quantenrepeater-Zellen dienen. Zur Implementierung eines Laser-synchronen elektrischen Protokolls für den Betrieb dieser Zellen werden ultraschnelle Elektronikchips für den Einsatz bei He-Temperaturen entwickelt. Ein weiteres Ziel der Arbeiten ist die Optimierung der Linien-Stabilität und Kohärenzeigenschaften von Telekom-Quantenemittern für 1.5 µm.
Universität des Saarlandes	01.08.2018	31.07.2021	1.271.694	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Schnittstellen zwischen materiellen und photonischen Quantenbits	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Das Teilprojekt TP-UDS-E: Quanten-Repeater-Elemente mit einzelnen Ionen und Photonen zielt auf die Entwicklung und Implementierung von experimentellen Protokollen für den effizienten Zustandstransfer zwischen gefangenen Ca-Ionen und Photonen. Die Effizienz wird mithilfe der Ankopplung der Ionen an optische Resonatoren optimiert. Es werden Protokolle für die QR-Zelle basierend auf Photonenemission und -absorption auf die erreichbare Effizienz hin verglichen und das erfolgversprechendste Protokoll realisiert. Das Teilprojekt TP-UDS-B: Anbindung von Quanten-Repeater-Elementen an den Telekom-Wellenlängenbereich unterstützt die Entwicklung von Spin-Photon-Schnittstellen mit Silizium-basierten Farbzentren (SiV) in Diamant in optischen Resonatoren und realisiert effiziente Module zur Quantenfrequenzkonversion einzelner Photonen von den Systemwellenlängen verschiedener Quantenbits in den verlustarmen Wellenlängenbereich der Faserkommunikation (Telekom C-Band um 1.55 µm).

Freie Universität Berlin	01.08.2018	31.07.2021	148.794	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Quanten-Netzwerke und Charakterisierung von Kommunikationskanälen	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Das vorliegende Vorhaben stellt sich wichtigen theoretischen und konzeptuellen Fragen. Es stehen vier Fragen im Fokus. Eine zentrale Voraussetzung der Simulation und der theoretischen Analyse von Quantenkommunikationssystemen und Repeatern ist die genaue Charakterisierung von Kommunikationskanälen. Hier werden realistische quantenoptische Kanäle rekonstruiert mit Methoden der Signalverarbeitung. Die Theorie-Gruppen werden gemeinsam die Analyse der Systeme betreiben. Hier soll der Anspruch des gesamten Verbundes eingelöst werden, beweisbare Sicherheit zu demonstrieren. Ein nicht unwesentlicher Teil der Design-Beschreibung ist die Definition der Schnittstellen zwischen Komponenten. Quanten-Netzwerke sind bisher nur wenig verstanden. Dieses Arbeitspaket schlägt hierzu ein konzertiertes Programm vor.
Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e.V.	01.08.2018	31.07.2021	411.925	Verbundprojekt: Q.Link.Extension - Q.Link.X -; Teilvorhaben: Erzeugung und Verarbeitung polarisationsverschränkter Photonenpaare	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Ein wichtiger Kandidat für das Realisieren eines skalierbaren Quantenrepeaters sind Halbleiter-Quantenpunkte. Diese können hochgradig verschränkte Photonenpaare emittieren, welche ideale Informationsträger für die Langstrecken-Quantenkommunikation sind. Dieses Projekt befasst sich mit der Entwicklung eines faserbasierten Demonstrators polarisations-verschränkter Photonenpaare und deren Kopplung zu atomaren Rubidium-Systemen. Dafür werden hochqualitative Halbleiter-Quantenpunkte hergestellt, deren Emissionswellenlänge exakt auf optische Übergänge in Rubidium-Atomen abgestimmt werden können. In Zusammenarbeit mit anderen Verbundpartnern werden diese Quantenpunkte in photonische Mikrostrukturen eingebettet, um zentrale für einen Quantenrepeater nötige Kennzahlen zu erreichen. Diese Strukturen werden schlussendlich in dem faserbasierten Demonstrator Anwendung finden. Zusätzlich werden Quantenpunkte mit Emission im Telekom-Wellenlängenbereich mit Piezo-Technologie kombiniert. Somit sollen wesentliche Fragestellungen in Bezug auf die Entwicklung eines skalierbaren Halbleiter-basierten Quantenrepeaters geklärt werden.

Ruhr-Universität Bochum	01.08.2018	31.07.2021	213.600	<p>Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Gekoppelte Halbleiterquantenpunkte für einen modularen Quantenrepeater: MATERIALIEN</p>	<p>Quantenpunkt-moleküle (QDM) werden zur Speicherung von löcherbasierten Singlet-Triplet-Qubits per molekularstrahlepitaktischem Wachstum hergestellt. In diesen wird Quanteninformati on gespeichert, die dann auf verschränkte Photonenpaare übertragen wird. Sie sind Funktionsblöcke für Quantenrepeater für sichere Datenübertragung über große Entfernungen. Es sind quantenmechanische Relaisstationen, die Signale nach Dämpfung in hunderte km Glasfasern auffrischen. Dazu wird die Emissionswellenlänge zunächst auf halbleiterbedingte 940nm eingestellt, langfristig bei geringster Dämpfung auf 1,55µm. Beim Wachstum der QDM entsteht eine Benetzungsschicht, die unerwünschte spektral benachbarte Lichtintensität abstrahlt, die drei Größenordnungen stärker als die der QDM ist. Die Innovation dieses Teilprojektes liegt nicht nur in der besonders hohen Qualität der QDM, sondern auch in der Unterdrückung dieser störenden Intensität der Benetzungsschicht. Die Auskopplung wird durch µ-Linsen, photonische Bandgapmaterialien und Bragg-Spiegel, die auch mit metallorganischer Dampfphasenabscheidung hergestellt werden, optimiert.</p>
Swabian Instruments GmbH	01.08.2018	31.07.2021	262.377	<p>Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Entwicklung von Elektronik zur korrelierten Detektion einzelner Photonen an entfernten Netzwerkknoten</p>	<p>Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Dieses erfordert die hochgenaue zeitliche Korrelation von Photonen, die an entfernten Knoten einer Repeaterstrecke mit hohen Datenraten gemessen werden. Dies erfordert neuartige, hochgenaue Time-to-Digital Konverter mit Samplingraten bis mindestens 100 GHz und Transferraten bis mindestens 100 MHz. Darüber hinaus ist eine hochgenaue Zeitreferenz und Synchronisierung der Elektronik über eine Repeaterstrecke erforderlich. In diesem Teilprojekt, TP-SYNC, wird eine dedizierte Technologie entwickelt, die diese Anforderungen erfüllt.</p>

Leibniz Universität Hannover	01.08. 2018	31.07. 2021	397.194	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Quanten- Relais auf Basis verschränkter Photonenpaare	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Das Teilvorhaben aus der Leibniz Universität Hannover wird in zwei Unterprojekten realisiert. Im Unterprojekt "Zeitabhängige Simulation und lohnende Nahziele" sollen die vorkommenden Prozesse als zeitkontinuierliche Kanäle mit Gedächtnis beschrieben werden. Der dazu notwendige Formalismus wird aus einer Erweiterung der Theorie fortlaufender Messungen gewonnen. Dies eröffnet die Möglichkeit, auch Angriffe zu erfassen, die das Timing der Signale betreffen, die in den üblichen Ansätzen nicht als Quantenvariable mitgeführt werden. Ferner soll untersucht werden, wie weit sich die Anforderungen an Komponenten reduzieren lassen, wenn für mögliche Angreifer eine Begrenzung ihres Quantenspeichers angenommen wird. Parallel zu den Arbeiten im Q.Link.X-Verbund zur Entwicklung von Quantenrepeatern befasst sich das Unterprojekt "Faserbasiertes Quanten-Relais mittels Halbleiter-Quantenpunkten" mit der Entwicklung eines Quanten-Relais-Demonstrators. Ein Quanten-Relais arbeitet ähnlich wie ein Quantenrepeater, aber ohne die Notwendigkeit eines Quantenspeichers. Das Quanten-Relais ist ein wichtiger Bestandteil beim Aufbau eines sicheren Langstrecken-Quantennetzwerkes, da es Qubits von einem Sender zu einem Empfänger teleportieren kann, ohne "vertrauenswürdige Knoten" zu verwenden. Obwohl ein Quanten-Relais den exponentiellen Signalverlust mit der Entfernung nicht überwindet (aufgrund des Fehlens eines Quantenspeichers), es erhöht die maximale Reichweite eines Quantenkryptographiesystems, indem es das Rauschen aufgrund von Dunkelzählern des Detektors unterdrückt.
Max-Planck- Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V. (MPG)	01.08. 2018	31.07. 2021	399.855	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Quanten- Link- Erweiterung/Elementare Quanten-Repeater-Zelle mit Atomen in optischen Resonatoren	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quanten-Repeaters realisiert werden kann. Dazu werden in diesem Teilvorhaben einzeln adressierbare Neutral-Atome in optischen Resonatoren gespeichert und zu einer Quanten-Repeater-Zelle zusammenschaltet. Mehrere Protokolle basierend auf unterschiedlichen Resonator-Architekturen und verschiedenen atomaren Zuständen werden untersucht. Außerdem werden neu entwickelte Faserresonatoren mit Atomen bestückt und diese als photonische Quantenspeicher getestet.

Julius- Maximilians- Universität Würzburg	01.08. 2018	31.07. 2021	1.226.232	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Halbleiterquantenpunkt e für einen modularen Quantenrepeater: Materialien, Bauteile und Demonstrator	Der Q.Link.X-Verbund plant auf der Basis von 3 physikalisch unterschiedlichen Systemen ein einfaches generisches Protokoll zur Demonstration des "Quantenrepeater-Vorteils" zu realisieren. Konkret werden Halbleiter-Quantenpunkte, Farbzentren in Diamant, und Atom/Ionen-Fallen erforscht. Das Teilvorhaben der Universität Würzburg hat als zentralen Bestandteil die Demonstration eines QR-Segments basierend auf Halbleiterquantenpunkten in Mikrotürmchen zum Ziel. Die Arbeiten erstrecken sich über den Entwurf der Strukturen über das epitaktische Wachstum hinweg zur Prozessierung und spektroskopischen Implementierung in die Demonstratorstrecke. Als wichtige Innovation zur Erhöhung der Zählraten sollen die einzelnen Quantenpunktspins deterministisch an die Moden von Mikrotürmchen gekoppelt werden und durch Quanteninterferenz die Spin-Spin Verschränkung durch Quantenpunkte durch Koinzidenzmessung realisiert werden.
Universität Bremen	01.08. 2018	31.07. 2021	173.994	Verbundprojekt: Q.Link.Extension - Q.Link.X -; Teilvorhaben: Modellierung von halbleiterbasierten Photonenquellen und Quantenspeichern sowie deren Zusammenspiel in Quantenrepeatern	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. TP-UHB fungiert als Bindeglied zwischen den experimentellen Partnern in QR-H und der Repeatermodellierung in QR-T und nimmt somit eine wichtige Schlüsselposition ein. Die Abschätzung des Repeatervorteils und die Abwägung unterschiedlicher Repeaterprotokolle benötigen Vorhersagen erreichbarer Raten und Fidelitäten sowohl der Quellen als auch der Spin-Photon-Schnittstelle. Diese sollen durch UHB bereitgestellt werden. Die Kombination von auf die experimentellen Teilprojekte zugeschnittenen Beschreibung halbleiterbasierter Repeaterelemente und der Protokollmodellierung sind so noch nicht umgesetzt worden und werden ein Alleinstellungsmerkmal des Q.Link.X-Verbundes sein.

Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf	01.08.2018	31.07.2021	128.874	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Analyse der Quantensicherheit	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. In diesem theoretischen Teilvorhaben soll die Quantensicherheit einfacher Quantenrepeaterprotokolle analysiert werden. Dazu soll zum einen die Propagation der Quantenfehler mit einer allgemeinen Methode beschrieben werden. Zum anderen soll ein Verfahren entwickelt werden, das die Analyse der Daten zum Zweck der Bestimmung von sicheren Schlüsselraten erlaubt. Diese Methoden sollen auf die konkreten experimentellen Plattformen angewendet werden, um quantitative Aussagen über den Quantenvorteil zu liefern.
Technische Universität München	01.08.2018	31.07.2021	427.200	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Gekoppelte Halbleiter-Quantenpunkte für einen modularen Quantenrepeater: elektrische Kontrolle, Kohärenz und Spektroskopie	Die Aufgabe dieses Teilprojektes ist die Fabrikation und spektroskopische Charakterisierung von Nanostrukturen die auf gekoppelten Quantenpunkten (QP-Molekülen) basieren sowie ihre Verwendung als zentrales Element des auf Halbleitern (HL) basierenden Demonstrators der in der Q.Link.X Verbundbeschreibung im Detail beschrieben wird. Eine effiziente Einkopplung optischer Kontrollsignale sowie Auskopplung von Quantenlicht wird ermöglicht durch Bragg Spiegel unter der aktiven QP-Molekül Schicht kombiniert mit breitbandigen Mikrolinsen auf der Probenoberfläche. Die Orbitalstruktur der QP-Moleküle wird mittels fortschrittlicher optischer Spektroskopie untersucht werden. Dabei werden z. B. die Zeeman Energien und Polarisationsauswahlregeln durch magneto-optische Messungen bestimmt. Die Stärke der Tunnelkopplung zwischen den QP sowie elektro-optische Kontrollsequenzen werden iterativ mit den Projektpartnern welche die Proben wachsen optimiert. Die in der Q.Link.X Verbundbeschreibung definierten Schritte zur elektro-optischen Erzeugung von Ladungsträgern, Spin-Spin Verschränkung, Trennung der Spins und Spin-Photon Verschränkung werden entwickelt und optimiert werden. Die Spin-Dephasierung und Rate der Spin-Photon Verschränkung wird vermessen und optimiert werden und den theoretischen Partnern zur Verfügung gestellt zur Berechnung der zu erwartenden Metrik des Q.Link.X Quantenrepeater. Methoden zur dynamischen Entkopplung um hochfrequente Spin-Dephasierung zu unterdrücken sollen in der QP-Molekül Hardware implementiert werden. Die Leistungsfähigkeit des Bauelementes wird für eine zentrale Wellenlänge von ~930nm optimiert bevor es für die Umsetzung des auf Halbleitern basierenden Q.Link.X Demonstrators an die UWÜ übergeben wird. Alle Bauelemente werden optimiert für eine effiziente Kopplung an Fasern um modulare Quantenbausteine zu ermöglichen. Zum Schluss wird die Möglichkeit untersucht den Arbeitsbereich der QP-Molekül Hardware auf das Telekommunikationsband zu erweitern.

Universität Ulm	01.08. 2018	31.07. 2021	1.065.486	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Realisierung und Prüfung der Elemente für einen Quantenrepeaterknoten über 100 km basierend auf Defektzentren in Diamant	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Ein Quantenrepeater basiert auf einem Protokoll in dem zunächst ein stationäres Quantenbit, üblicherweise der Spin eines Elektrons oder eines Atomkerns mit einem fliegenden Quantenbit, üblicherweise ein Photon, verschränkt wird und anschließend solcherart verschränkte Photonen von verschiedenen Repeaterknoten auf einem Strahlteiler zur Interferenz gebracht werden um über Verschränkungsaustausch die stationären Quantenbits zu verschränken. Essentiell für die Realisierung dieses Protokolls über lange Distanzen sind (i) die Möglichkeit Quanteninformation hinreichend lange zu speichern (für eine 30km Photononflugstrecke werden Speicherzeiten über 0.1ms benötigt) und daher mittels robusten und effizienten Entkopplungsmethoden den Quantenspeicher vor Umwelteinflüssen zu schützen (idealerweise Kohärenzzeiten von ca. 1s) und (ii) Quantengatter mit hoher Fidelität (über 95 %) zwischen Elektronenspins eines Farbzentrons und den dieses umgebenden Kernspins, da letztere eine deutlich höhere Kohärenzzeit als Elektronenspins aufweisen. Zudem erfordert die Aufskalierung eines Quantenrepeaternetzwerkes die Implementierung von Verschränkungsdistillationsprotokollen und Quantenfehlerkorrekturmethode, die es wiederum notwendig machen, Sequenzen von Quantengattern und Messungen (deutlich über 95 % Fidelität in jedem Schritt), auf Kernspins durchzuführen. Für die skalierbare Realisierung der Protokolle sind zudem hohe Erfolgsraten bei der Informationsübertragung nötig die durch hohe Photon Auslese- und Sammeleffizienzen realisiert werden können.
Humboldt- Universität zu Berlin	01.08. 2018	31.07. 2021	685.506	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Transfer von Spin-Photon- Verschränkung über eine faseroptische Übertragungsstrecke	Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Die Ziele der beiden Unterprojekte dieses Teilvorhabens sind: (1) Design, Herstellung und Test von photonischen Strukturen in Diamant und MW-Antennen für optimale Lichtauskopplung und Spinmanipulation. (2) Realisierung von elementaren Quantennetzwerkbausteinen, d.h. fasergekoppelten Einheiten, die ein Diamant-Defektzentrum enthalten, das mit seinem Elektronenspin verschränkte Photonen emittiert und anschließender rauscharmer Quanten-Frequenzkonversion zu einer Wellenlänge im Telekommunikationsband um 1550 nm. (3) Transfer von konvertierten Photonen aus Quantennetzwerkbausteinen über 50km optische Faser im Labor und in einer Faserteststrecke am HHI, Berlin.

Universität Kassel	01.08. 2018	31.07. 2021	623.286	<p>Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Telekom- C-Band (1.55 µm) InP- basierte Quantenpunktstrukturen und Diamant-basierte photonische Strukturen mit gekoppelten Farbzentren</p>	<p>Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. UP1 (UKS_Ben) zielt auf die epitaktische Herstellung (MBE) sowie die umfangreiche optische Charakterisierung von Halbleiter-QPkten und Quantenpunktmolekülen auf Basis von InAs/ InP speziell für den Wellenlängenbereich um 1.55 µm (Telekom-C-Band). Auch diese Quantenpunkte sollen hierbei als nichtklassische Quellen einzelner sowie insbesondere paarweise verschränkter Photonen als Grundlage der Funktion eines Quanten-Repeaters dienen. Das Teilprojekt 1.55 µm-Photonenquellen fokussiert insbesondere auf die strukturelle Optimierung der Emissionseigenschaften über das epitaktische Wachstum sowie eine Integration von Quantenemittern in komplexere Emitterstrukturen (Dioden und Mikrokavitäten). Das Ziel des UP2 (UKS_Pop) ist die Realisierung von diamantbasierten photonischen Strukturen (photonische Kristalle, Wellenleiter, usw.) mit integrierten NV und SiV Farbzentren zur effizienten Auskopplung von Photonenemission aus den Farbzentren und für effiziente Resonatorkopplung. Die Strukturen werden als Spin-Photon-Schnittstellen in Quantumrepeater-Komponenten (QR-Zelle und QR-Segment) dienen.</p>
-----------------------	----------------	----------------	---------	--	---

Johannes Gutenberg-Universität Mainz	01.08.2018	31.07.2021	766.698	<p>Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Theoretische Modellierung und Simulation kompletter Quantenrepeater-Systeme und experimentelle Demonstration spezieller Quantenrepeater-Bausteine</p>	<p>Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Das Mainzer Teilprojekt teilt sich auf in einen experimentellen und einen theoretischen Teil. Experiment: Silizium-Farbzentren (SiV) in Diamant zeichnen sich durch eine schmalbandige Lichtemission aus, die für Verschränkungserzeugung über Einzelphotonen-Emission und –Detektion genutzt werden soll. Das erste Ziel ist bei <math>T &lt; 100\text{mK}</math> lange Qubit-Kohärenzzeiten an SiV- sowie auch GeV-Zentren zu erreichen. Raman-Lichtfelder erlauben die lokale Manipulation des SiV Spin-Qubits. In Zusammenarbeit mit Q.Link.X-Partnern werden SiVs in photonischen Strukturen eingebettet hergestellt, um eine hocheffiziente (Faser-)Kopplung an Lichtfelder bei 737nm zu erreichen. Solche Module sollen bei <math>T &lt; 100\text{mK}</math> getestet und über photonische Kopplungen verschränkt werden. Lokale Gatteroperationen in den SiV-Modulen erlauben Bell-Messungen und Verschränkungsreinigung. Im Hinblick auf Quantenkommunikation sollen in Zusammenarbeit mit den Partnern SiV-Module von der Wellenlänge 737nm auf die Telekom- Wellenlänge gebracht werden. Theorie: Ziel ist die theoretische Beschreibung, Simulation und Bewertung von idealen und realen kleinskaligen Repeatern und Demonstratoren bis hin zu großskaligen Repeater-Systemen. Zunächst werden kleinskalige Quantenrepeater analysiert wie sie in den drei Demonstratorplattformen vorkommen. Hierbei werden schrittweise die entsprechenden realen physikalischen Effekte zum anfänglich idealen Modell (nur Kanalverluste) hinzugefügt. Perspektivisch und ultimativ sollen reale großskalige Repeater-Systeme simuliert werden. Das Theorie-Unterprojekt leistet einen entscheidenden Beitrag, um nach dreijähriger Projektphase einen perspektivischen Performance-Vergleich der drei Plattformen anstellen und eine Roadmap zur Realisierung skalierbarer Repeater vorlegen zu können.</p>
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	01.08.2018	31.07.2021	423.594	<p>Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: Entwicklung einer Tieftemperatur Faserresonator Plattform und Implementierung einer effizienten Spin-Photon Schnittstelle für NV Zentren in Diamant</p>	<p>Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von 3 verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Die Realisierung des Protokolls mit Farbzentren in Diamant erfordert deren effiziente Ankopplung an Photonen mit durchstimmbaren optischen Mikroresonatoren. Das Teilprojekt qlinkx-FRP umfasst die Entwicklung, Funktionsdemonstration und Bereitstellung einer kryokompatiblen voll durchstimmbaren Faserresonator Plattform (FRP) mit integrierten Diamantmembranen. Damit soll eine effiziente Spin-Photon Schnittstelle mit NV Zentren realisiert und in einen Demonstrator integriert werden.</p>

Ludwig- Maximilians- Universität München	01.08. 2018	31.07. 2021	899.982	Verbundprojekt: Q.Link.Extension – Q.Link.X -; Teilvorhaben: QR- Segment über lange Faserstrecken	Die Quantenkommunikation ermöglicht neue Methoden der Kommunikation. Sie verbessern herkömmliche, indem sie zum Beispiel erstmals Angriffe bei der Schlüsselverteilung erkennbar machen, oder eröffnen neue Möglichkeiten, wie zum Beispiel die Quantenteleportation zur Übertragung von Quanteneigenschaften. Notwendig für die neuen Anwendungen ist die effiziente Verteilung von Verschränkung über große Entfernungen. Der Q.Link.X-Verbund plant anhand von drei verschiedenen technischen Plattformen zu zeigen, dass mit einem ausgewählten Protokoll (Lütkenhaus-Protokoll) der Quantenvorteil des Quantenrepeaters realisiert werden kann. Innerhalb dieses Teilprojekts ist geplant, die Effizienz und Kopplung atomarer Quantenspeicher deutlich zu steigern und die Dämpfung entlang einer Faserstrecke durch zustandsabhängige Konversion in den Telekom-Wellenlängenbereich wesentlich zu reduzieren. Diese Schritte bilden die Basis, die Machbarkeit eines QR-Segments mit atomaren Quantenspeichern über eine mehrere Kilometer lange Faserstrecke zu demonstrieren.
QuantiCor Security GmbH	01.11. 2018	30.04. 2019	49.980	KMU-innovativ: Einstiegsmodul KTN - Quantencomputer- resistente Public Key Infrastrukturen	Quantencomputer in Kombination mit dem bahnbrechenden Quantenalgorithmus können alle derzeit eingesetzten Public Key Kryptoverfahren brechen. Die Folgen sind katastrophal, wenn keine sicheren Alternativen früh genug zur Verfügung gestellt werden. Denn Public Key Verfahren bilden die fundamentalsten Bausteine moderner IT-Sicherheitsinfrastrukturen. Aufgrund dieser Tatsachen hat QuantiCor Security – ein Spinoff der TU Darmstadt - verschiedene Post-Quanten-Sicherheitstechnologien entwickelt, die den Schutz der IT-Sicherheitsinfrastruktur weiterhin garantieren können, weil sie nachweislich Quantencomputer-resistent sind. Einige Technologien wurden kürzlich standardisiert oder befinden sich in der ersten Runde des NIST-Standardisierungsprozesses wie KINDI Encryption & KEM (QuantiCor Security), LARA Encryption & KEM (QuantiCor Security), HERO-Signaturverfahren (in Entwicklung durch QuantiCor Security) basierend auf dem GPV-Signaturverfahren (TU-Darmstadt), XMSS und XMSS-MT (TU-Darmstadt und Genua mbH, Kirchheim) akzeptiert als IETF Standard seit 2018 und qTESLA (TU Darmstadt). Mit der Entwicklung dieser sehr effizienten Verfahren ist ein wichtiger erster Meilenstein erfolgt. Für den Einsatz in die Praxis sind jedoch noch weitere Etappen erforderlich. Die Integration dieser Verfahren in eine geeignete Public Key Infrastruktur ist dringend notwendig, um Unternehmen und Organisationen mit einer neuen IT-Sicherheitsinfrastruktur auszustatten. In diesem Vorhaben sollen zunächst verschiedene (Open Source-) Implementierungen von Public Key Infrastrukturprojekten genauer analysiert werden. Es soll eine Machbarkeitsstudie erarbeitet werden, bei der evaluiert werden soll, ob und inwiefern die entwickelten und angebotenen Sicherheitstechnologien in bestehende PKI-Implementierungen integriert werden können.

<p>Technische Universität München</p>	<p>01.12.2018</p>	<p>30.11.2021</p>	<p>1.721.694</p>	<p>Fehlertolerante Quantenkommunikation mittels Diamant Quantenphotonik</p>	<p>Eines der größten Hindernisse bei der Entwicklung eines vollständigen Quantennetzwerkes sind unvermeidbare photonische Verluste in optischen Fasern aufgrund derer die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Übertragung mit wachsender Entfernung exponentiell abnimmt, unabhängig vom verwendeten Protokoll. Eine Möglichkeit dieses Skalierungsverhalten zu überwinden sind Quantenrepeater die auf Quantenspeichern beruhen, wobei zur Erzeugung von Verschränkung zwischen entfernten Knoten zunächst Verschränkung mit einem lokalen Quantenspeicher mittels Photonen und Bell-Zustands-Messungen erfolgt. Dieser Ansatz verspricht ein besseres polynomisches Skalierungsverhalten, zumindest wenn es gelingt Quantenspeicher mit langen Kohärenzzeiten, starker Kopplung an Photonen und Integrierbarkeit in modulare Bauelemente zu entwickeln. Vor kurzem wurden gänzlich neue Ansätze vorgeschlagen welche ohne Quantenspeicher auskommen. Diese basieren auf sogenannten messungsbasierten Quantenspeichern und verwenden spezielle hochverschränkte Multiphotonenzustände, sogenannte photonische Clusterzustände. Diese Zustände können verteilt und durch Bell-Zustands-Messungen miteinander verbunden werden, sind unempfindlicher gegen Rauschen und ermöglichen Quantennetzwerke über größere Entfernungen. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Realisierung einer völlig neuartigen Plattform welche mittels effizienter Spin-Photon Schnittstellen die Erzeugung der benötigten photonischen Clusterzustände mit hohen Raten ermöglicht. Außerdem sollen effiziente Protokolle entwickelt werden und es soll erforscht werden wie die Clusterzustände am besten maßgeschneidert werden müssen um unter realen Bedingungen besonders robuste Quantennetzwerke zu realisieren.</p>
---------------------------------------	-------------------	-------------------	------------------	---	---

Technische Universität München	01.12.2018	30.11.2021	1.721.694	Fehlertolerante Quantenkommunikation mittels Diamant Quantenphotonik	Eines der größten Hindernisse bei der Entwicklung eines vollständigen Quantennetzwerkes sind unvermeidbare photonische Verluste in optischen Fasern aufgrund derer die Wahrscheinlichkeit für eine erfolgreiche Übertragung mit wachsender Entfernung exponentiell abnimmt, unabhängig vom verwendeten Protokoll. Eine Möglichkeit dieses Skalierungsverhalten zu überwinden sind Quantenrepeater die auf Quantenspeichern beruhen, wobei zur Erzeugung von Verschränkung zwischen entfernten Knoten zunächst Verschränkung mit einem lokalen Quantenspeicher mittels Photonen und Bell-Zustands-Messungen erfolgt. Dieser Ansatz verspricht ein besseres polynomisches Skalierungsverhalten, zumindest wenn es gelingt Quantenspeicher mit langen Kohärenzzeiten, starker Kopplung an Photonen und Integrierbarkeit in modulare Bauelemente zu entwickeln. Vor kurzem wurden gänzlich neue Ansätze vorgeschlagen welche ohne Quantenspeicher auskommen. Diese basieren auf sogenannten messungsbasierten Quantenspeichern und verwenden spezielle hochverschränkte Multiphotonenzustände, sogenannte photonische Clusterzustände. Diese Zustände können verteilt und durch Bell-Zustands-Messungen miteinander verbunden werden, sind unempfindlicher gegen Rauschen und ermöglichen Quantennetzwerke über größere Entfernungen. Das Ziel dieses Forschungsvorhabens ist die Realisierung einer völlig neuartigen Plattform welche mittels effizienter Spin-Photon Schnittstellen die Erzeugung der benötigten photonischen Clusterzustände mit hohen Raten ermöglicht. Außerdem sollen effiziente Protokolle entwickelt werden und es soll erforscht werden wie die Clusterzustände am besten maßgeschneidert werden müssen um unter realen Bedingungen besonders robuste Quantennetzwerke zu realisieren.
QuantiCor Security GmbH	01.07.2019	31.03.2021	784.298	Start-up Secure: Quantencomputerresistente Sicherheitslösungen für das Internet der Dinge	Nahezu alle in der Praxis eingesetzten asymmetrischen Kryptosysteme können aufgrund der Anfälligkeit für Quantencomputer-Angriffe gebrochen werden. Demnach ist die Sicherheit der gegenwärtigen Verschlüsselungstechnologien nach den derzeitigen wissenschaftlichen Erkenntnissen nicht mehr gegeben. Erfolgreiche Attacken hätten desaströse Folgen für die Wirtschaft und Gesellschaft. Dies betrifft insbesondere das Internet der Dinge (IoT), dem intelligente IoT-Geräte zugrunde liegen, die sicherheitskritische Informationen miteinander austauschen. In diesem Vorhaben werden Quantencomputer-resistente Sicherheitstechnologien auf Grundlage der aktuellsten Forschungsergebnisse weiterentwickelt und für das Internet der Dinge verfügbar gemacht. Auf diese Weise soll ein hoher Schutz auch in Zeiten mächtiger Quantencomputer gewährleistet werden. Darüber hinaus weisen die entwickelten Systeme gewisse Effizienzvorteile gegenüber Altsystemen auf, sodass die globale Vernetzung damit sicher voranschreiten kann.

<p>Technische Universität München</p>	<p>01.09.2019</p>	<p>31.08.2022</p>	<p>789.150</p>	<p>Verbundprojekt: Anwendbarkeit quantencomputerresistenter kryptografischer Verfahren - Aquorypt -; Teilvorhaben: Entwicklung eines Post-Quanten SoC mit RISC-V CPU und HW-Beschleunigern</p>	<p>Quantencomputer mit großer Rechenleistung werden in der Lage sein, alle gängigen kryptografischen Verfahren für digitale Signaturen und zum Schlüsselaustausch zu brechen. Es existieren bereits erste quantencomputerresistente kryptografische Verfahren, die aber noch in die relevanten Anwendungen integriert werden müssen, bevor derartige Quantencomputer zur Verfügung stehen und zur Gefahr für die IT-Sicherheit werden. Das Projekt Aquorypt untersucht daher die Anwendung und praktische Umsetzung von quantencomputerresistenten kryptografischen Verfahren in zwei wichtigen Bereichen, die besonders auf langfristige Sicherheit angewiesen sind: Eingebettete Systeme in der industriellen Automatisierung und Chipkarten-basierte Sicherheitsanwendungen. Parallel zur laufenden Standardisierung werden im Projekt für den Kontext der genannten Anwendungen geeignete Algorithmen ausgewählt und angepasst. Das Projekt spannt den Bogen von hochsicheren Chipkarten mit extremen Kostenanforderungen und geringstem Stromverbrauch hin zu eingebetteten Systemen im Industriebereich mit hohen Echtzeitanforderungen und extremen Lebensdauern, die Migrationskonzepte bis in die Hardware erfordern. Dafür werden die Algorithmen und das Hardware- und Software-Design optimal aufeinander abgestimmt, wozu die Projektpartner mit ihren unterschiedlichen und sich ergänzenden Kompetenzen beitragen. Die Implementierungen für diese Anwendungen werden gegen Seitenkanalangriffe, auch mittels maschinellen Lernens, und gegen Fehlerattacken gehärtet. Ergänzend werden in den betrachteten Anwendungen Migrationspfade erarbeitet, über welche herkömmliche Algorithmen und Protokolle durch quantencomputerresistente Verfahren ersetzt werden können. Die Entwicklungsergebnisse werden schließlich zu einem Demonstrator kombiniert; auf diese Weise wird der erfolgreiche Einsatz quantencomputerresistenter kryptografischer Verfahren in Chipkarten und in Industriesteuerungen gezeigt.</p>
---------------------------------------	-------------------	-------------------	----------------	--	--

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein	01.09.2019	31.08.2022	488.015	Verbundprojekt: Anwendbarkeit quantencomputerresistenter kryptografischer Verfahren - Aquorypt -; Teilvorhaben: Härtung von quantencomputerresistenter Kryptographie gegen KI Angriffe	Das Ziel des Gesamtvorhabens ist die effiziente Implementierung von Quantencomputer-resistenten kryptographischen Algorithmen für wichtige Anwendungen wie Industrie 4.0 und Chipkarten. Ein weiteres Ziel ist, sicherzustellen, dass Implementierungen gleichzeitig auch eine fortschrittliche und zukunftsfähige Implementierungssicherheit aufweisen. Das Ziel des Teilvorhabens von Fraunhofer AISEC ist, die Implementierungssicherheit dieser zukunfts-trächtigen Algorithmen in einer Art herzustellen, die ähnlich zukunftsfähig ist; trotz der aktuell absehbaren Entwicklungen. Aktuell wird nämlich erwartet - und erste Ergebnisse liegen vor, dass Implementierungsangriffe, insbesondere Seitenkanalangriffe, auf der Basis von maschinellen Lernverfahren deutlich Fortschritte in Bezug auf deren Effizienz und der Reduktion von notwendiger Kompetenz und Erfahrung bringen könnten. Das Ziel des Vorhabens ist daher, zu untersuchen, inwiefern sich solche maschinellen Lernverfahren bei Angriffen auf Implementierungen von Quantencomputer-resistenten kryptographischen Algorithmen auswirken. Das Ziel ist dann hauptsächlich, Erkenntnisse zu gewinnen, wie solche Angriffe bzw. die erzielten Effizienzverbesserungen durch solche maschinellen Lernverfahren verhindert werden können.
--	------------	------------	---------	--	--

<p>Giesecke+Devrient Mobile Security GmbH</p>	<p>01.09.2019</p>	<p>31.08.2022</p>	<p>422.878</p>	<p>Verbundprojekt: Anwendbarkeit quantencomputerresistenter kryptografischer Verfahren - Aquorypt -; Teilvorhaben: Sichere Implementierung in eingebettete Systeme und Sicherheitsuntersuchungen</p>	<p>Quantencomputer stellen eine große Gefahr für die Sicherheit heutiger IT-Systeme dar. Sobald es Quantencomputer mit ausreichender Leistung gibt, werden sie viele etablierte Verschlüsselungsmethoden und digitale Signaturverfahren effizient brechen können. Um auch in Zukunft Datensicherheit und Privatsphäre zu gewährleisten, muss bereits heute mit den Vorbereitungen für die Post-Quantencomputer-Ära begonnen werden. Ziel des Projekts "Aquorypt" ist es daher, quantencomputerresistente Verfahren auf ihre Einsetzbarkeit zu prüfen und zu optimieren. Dabei liegt der Schwerpunkt auf einer optimalen Abstimmung zwischen Hardware und Software und auf sicheren angriffsresistenten Implementierungen in Soft- und Hardware. Im Teilvorhaben "Sichere Implementierung in eingebettete Systeme und Sicherheitsuntersuchungen" des Projektes Aquorypt erarbeitet die Giesecke+Devrient Mobile Security GmbH vor allem Konzepte für Implementierungen auf eingebetteten Systemen, so dass diese Implementierungen resistent gegen Seitenkanal- und Störangriffe sind. Die Konzepte werden in konkreten Implementierungen umgesetzt, die Implementierungen dann mit Seitenkanal- und Störangriffen auf ihre Widerstandsfähigkeit gegen solche Angriffe getestet, und so die Konzepte geprüft und gegebenenfalls verbessert.</p>
---	-------------------	-------------------	----------------	--	--

Infineon Technologies AG	01.09.2019	31.08.2022	488.250	Verbundprojekt: Anwendbarkeit quantencomputerresistenter kryptografischer Verfahren - Aquorypt -; Teilvorhaben: Quantencomputerresistente Kryptografie-Demonstration in Industriesteuerungen und Chipkarten	<p>Das Projekt Aquorypt legt das Hauptaugenmerk auf die Einsetzbarkeit quantencomputerresistenter Kryptografie, auf optimale Abstimmung zwischen Hardware und Software, auf sichere angriffsresistente Implementierung in Soft- und Hardware und somit auf die praktische Umsetzbarkeit, damit QCR-Verfahren auch effizient in die Anwendung gebracht werden können. Die Realisierbarkeit der Lösungen wird für zwei Anwendungen in einem Demonstrator nachgewiesen. Zum einen werden Methoden und Techniken entwickelt, wie quantencomputerresistente Verfahren in Chipkarten-Controllern (mit hohem Sicherheitsanspruch bei gleichzeitig geringem Speicherplatz und geringer Rechnerleistung) eingesetzt werden können. Zum anderen wird untersucht, wie Controller von eingebetteten Systemen in Industriesteuerungen, wie bspw. intelligente Geräte für Antriebssteuerungen, Energienetzmanagement oder Fertigungsautomatisierung, gegen Quantencomputerangriffe resistent gemacht werden können. Die Hauptziele von Aquorypt sind:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewährleistung der IT-Sicherheit bei Anwendungen, die längerfristig sicher sein müssen, wie Industriesteuerungen und Chipkarten, durch die Verwendung von quantencomputerresistenten (QCR) kryptografischen Verfahren,</li> <li>• anwendungsorientierte Optimierung von QCR-Verfahren (durch interdisziplinäre Ko-operation von Kryptologen und Ingenieuren für Sicherheitshardware und -software),</li> <li>• praktikable und effiziente Umsetzung von QCR-Verfahren in langlebigen Sicherheitsanwendungen (Industriesteuerungen und Chipkarten),</li> <li>• Sicherstellung der Resilienz gegen Seitenkanal- und Fehlerangriffe durch gehärtete Implementierung von quantencomputerresistenten kryptografischen Verfahren,</li> <li>• Aufzeigen von Migrationspfaden für bestehende Systeme von herkömmlichen zu quantencomputerresistenten Verfahren,</li> <li>• Darstellung der Projektergebnisse anhand eines Demonstrators für eine Industriesteuerung mit einem sicheren eingebetteten System sowie für eine quantencomputerresistente Authentisierung mit einer Chipkarte.</li> </ul>
--------------------------	------------	------------	---------	---	---

Siemens Aktiengesellschaft	01.09. 2019	31.08. 2022	459.591	Verbundprojekt: Anwendbarkeit quantencomputerresisten- ter kryptografischer Verfahren - Aquorypt -; Teilvorhaben: Quantencomputerresisten- te kryptografische FPGA-Systeme für industrielle Anwendungen	Das vorliegende Projekt legt das Hauptaugenmerk auf die Einsetzbarkeit der quantencomputerresistenten Verfahren, auf optimale Abstimmung zwischen Hardware und Software, auf sicherere Implementierung und damit auf die praktische Umsetzbarkeit. Es wird untersucht, wie eingebettete Systeme im Umfeld von Industrie 4.0 gegen Quantencomputerangriffe resistent gemacht werden können. Ausgewählte quantencomputerresistente Verfahren werden auf einer Zielhardware implementiert. Die notwendigen Architekturen für ein optimales Zusammenspiel zwischen HW und SW werden ermittelt. Dabei entstehen Konzepte, wie Implementierungen der ausgewählten Verfahren allgemein gegen derartige Angriffe abgesichert werden können. Schließlich werden Konzepte und Verfahren entwickelt, die eine Migration von Algorithmen, die nach heutigem Stand durch Quantencomputer gebrochen werden können hin zu quantencomputerresistenten Algorithmen ermöglichen.
Technische Universität Darmstadt	01.09. 2019	31.08. 2022	402.948	Verbundprojekt: Anwendbarkeit quantencomputerresisten- ter kryptografischer Verfahren - Aquorypt -; Teilvorhaben: Anwendungsorientierte Optimierung ausgewählter QCR- Verfahren hinsichtlich Sicherheit, Effizienz und physikalischer Sicherheit	Das Projekt "Aquorypt" legt das Hauptaugenmerk auf die Einsetzbarkeit von PQC-Verfahren, auf optimale Abstimmung zwischen Hardware (HW) und Software (SW), auf sichere angriffsresistente Implementierung in Soft- und Hardware und somit auf die praktische Umsetzbarkeit, damit diese PQC-Verfahren auch effizient in die Anwendung gebracht werden können. Die Realisierbarkeit der Lösungen wird für zwei Anwendungen in einem Demonstrator nachgewiesen. Zum einen werden Methoden und Techniken entwickelt, wie die quantencomputerresistenten Verfahren in Chipkarten-Controllern (mit sehr hohem Sicherheitsanspruch bei gleichzeitig geringem Speicherplatz und geringer Rechnerleistung) eingesetzt werden können. Zum anderen wird untersucht, wie Controller von eingebetteten Systemen in Industriesteuerungen, wie beispielsweise intelligente Geräte für Antriebssteuerungen, Energienetzmanagement oder Fertigungsautomatisierung, gegen Quantencomputerangriffe resistent gemacht werden können. Die Hauptziele des Projektes Aquorypt sind: - Gewährleistung der IT-Sicherheit bei Anwendungen, die längerfristig sicher sein müssen, wie Industriesteuerungen und Chipkarten, durch die Verwendung von PQC-Verfahren, - anwendungsorientierte Optimierung von PQC-Verfahren (durch interdisziplinäre Kooperation von Kryptologen und Ingenieuren für Sicherheitshardware und -software), - praktikable und effiziente Umsetzung von PQC-Verfahren in langlebigen Sicherheitsanwendungen (Industriesteuerungen und Chipkarten), - Sicherstellung der Resilienz gegen Seitenkanal- und Fehlerangriffe durch gehärtete Implementierung von quantencomputerresistenten kryptografischen Verfahren, - Aufzeigen von Migrationspfaden für bestehende Systeme von herkömmlichen zu quantencomputerresistenten Verfahren, - Darstellung der Projektergebnisse anhand eines Demonstrators für eine Industriesteuerung mit

					einem sicheren eingebetteten System sowie für eine quantencomputerresistente Authentisierung mit einer Chipkarte.
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein	01.09.2019	31.08.2022	1.084.931	Verbundprojekt: Kryptographie der nächsten Generation für eingebettete Systeme - QuantumRISC - : Teilvorhaben: Effizientes und gehärtetes Hardware-Software Co-Design von PQC-Verfahren	In diesem Projekt wird die Verwendung von PQC-Verfahren auf ressourcenbeschränkten eingebetteten Systemen erforscht. Die Herausforderungen hierbei sind die Auswahl geeigneter PQC-Verfahren sowie ihre sichere Implementierung in einem effizienten Software-Hardware (SW-HW) Co-Design auf einer kostengünstigen Hardware-Plattform. Als Proof-of-Concept zum Nachweis der Nutzbarkeit der Lösungen werden industrielle Anwendungsfälle mit den entwickelten Komponenten in Form eines Demonstrators umgesetzt. Fraunhofer SIT untersucht insbesondere gehärtete Hardware-Module und agile Schnittstellen zum SW-HW Co-Design.

Continental Teves AG & Co. OHG	01.09.2019	31.08.2022	144.190	Verbundprojekt: Kryptographie der nächsten Generation für eingebettete Systeme - QuantumRISC - : Teilvorhaben: Anwendungsfälle und Anforderungen aus der Automobilbranche	In diesem Projekt wird die Verwendung von PQC-Verfahren auf ressourcenbeschränkten eingebetteten Systemen erforscht. Die Herausforderung hierbei ist die Auswahl geeigneter PQC-Verfahren sowie ihre sichere Implementierung in einem effizienten Software-Hardware (SW-HW) Co-Design auf einer kostengünstigen Hardware-Plattform. Als Proof-of-Concept zum Nachweis der Nutzbarkeit der Lösungen werden industrielle Anwendungsfälle mit den entwickelten Komponenten in Form eines Demonstrators umgesetzt. Continental Teves untersucht insbesondere die Anwendbarkeit von Post-Quanten Algorithmen im Automobilbereich.
Elektrobit Automotive GmbH	01.09.2019	31.08.2022	158.272	Verbundprojekt: Kryptographie der nächsten Generation für eingebettete Systeme - QuantumRISC - : Teilvorhaben: Demonstration und Evaluation von PQC-Verfahren auf eingebetteten Systemen	In diesem Projekt wird die Verwendung von PQC-Verfahren auf ressourcenbeschränkten eingebetteten Systemen erforscht. Die Herausforderungen hierbei sind die Auswahl geeigneter PQC-Verfahren sowie ihre sichere Implementierung in einem effizienten Software-Hardware (SW-HW) Co-Design auf einer kostengünstigen Hardware-Plattform. Als Proof-of-Concept zum Nachweis der Nutzbarkeit der Lösungen werden industrielle Anwendungsfälle mit den entwickelten Komponenten in Form eines Demonstrators umgesetzt. Das Teilvorhaben fokussiert sich auf die Demonstration und Evaluation der erforschten und implementierten PQC-Verfahren auf eingebetteten Systemen.
Hochschule RheinMain University of Applied Sciences Wiesbaden Rüsselsheim	01.09.2019	31.08.2022	309.756	Verbundprojekt: Kryptographie der nächsten Generation für eingebettete Systeme - QuantumRISC - : Teilvorhaben: Effiziente und gehärtete Hardware-Implementierung von PQC-Verfahren	In diesem Projekt wird die Verwendung von PQC-Verfahren auf ressourcenbeschränkten eingebetteten Systemen erforscht. Die Herausforderungen hierbei sind die Auswahl geeigneter PQC-Verfahren sowie ihre sichere Implementierung in einem effizienten Software-Hardware (SW-HW) Co-Design auf einer kostengünstigen Hardware-Plattform. Als Proof-of-Concept zum Nachweis der Nutzbarkeit der Lösungen werden industrielle Anwendungsfälle mit den entwickelten Komponenten in Form eines Demonstrators umgesetzt. HSRM konzentriert sich auf die Implementierbarkeit in Hardwarestrukturen. Der Fokus liegt hierbei auf Hash- und Isogenie-basierten Verfahren.
MTG AG	01.09.2019	31.08.2022	307.911	Verbundprojekt: Kryptographie der nächsten Generation für eingebettete Systeme - QuantumRISC - : Teilvorhaben: Effizienter und sicherer Entwurf und Implementierung von PQC-Verfahren in Software	In diesem Projekt wird die Verwendung von PQC-Verfahren auf ressourcenbeschränkten eingebetteten Systemen erforscht. Die Herausforderungen hierbei sind die Auswahl geeigneter PQC-Verfahren sowie ihre sichere Implementierung in einem effizienten Software-Hardware (SW-HW) Co-Design auf einer kostengünstigen Hardware-Plattform. Als Proof-of-Concept zum Nachweis der Nutzbarkeit der Lösungen werden industrielle Anwendungsfälle mit den entwickelten Komponenten in Form eines Demonstrators umgesetzt. MTG erforscht Softwaremethoden für die sichere und effiziente Implementierung von PQC-Verfahren.

Ruhr-Universität Bochum	01.09.2019	31.08.2022	586.968	<p>Verbundprojekt: Kryptographie der nächsten Generation für eingebettete Systeme - QuantumRISC - :</p> <p>Teilvorhaben: Seitenkanalresistente Hardwareimplementierungen von PQC-Verfahren</p>	<p>Seit einigen Jahren werden alternative kryptographische Verfahren untersucht, von denen man annimmt, dass sie gegen Angriffe mit Unterstützung von Quanten-Computern sicher sind. Dieses Feld der Kryptologie wird Post-Quantum Kryptographie (PQC) genannt. Ein wesentlicher Nachteil von PQC-Verfahren gegenüber derzeit verwendeten Verfahren ist ihr generell höherer Ressourcenbedarf: Viele PQC-Verfahren benötigen beispielsweise mehr Rechenleistung für die Erstellung von Schlüsseln, Signaturen oder zur Entschlüsselung, oder sie benötigen mehr Speicherplatz und Netzwerk-Bandbreite zur Speicherung oder Übertragung von Schlüsseln oder Nachrichten. In diesem Forschungsprojekt wird dieser Ansatz aufgegriffen, für die Verwendung mit PQC-Verfahren verfeinert und auf Anwendungsfälle in der Automotive-Domäne angepasst. Insbesondere in dieser Domäne kann die Verwendung einer transparenten Prozessor-Architektur, die auf der RISC-V Architektur basiert, die europäische Chip-Produktion fördern und die bestehenden Abhängigkeiten von internationalen Chipherstellern verringern. Zusätzlich benötigt die Automobil-Industrie Langzeit-Sicherheitskonzepte, um sowohl die Komponenten eines Fahrzeugs als auch das Fahrzeug selbst über einen langen Lebenszyklus von 30 Jahren und mehr abzusichern. PQC ist dabei eine entscheidende Technologie, die als konstruktiver Baustein genutzt werden kann, um eine sichere und vertrauenswürdige Kommunikation und Interaktion zwischen einem Fahrzeug, dessen Umgebung und weiterer Infrastruktur zu ermöglichen.</p>
Technische Universität Darmstadt	01.09.2019	31.08.2022	392.460	<p>Verbundprojekt: Kryptographie der nächsten Generation für eingebettete Systeme - QuantumRISC - :</p> <p>Teilvorhaben: Erforschung von PQC-Verfahren für ressourcenbeschränkte eingebettete Systeme</p>	<p>In diesem Projekt wird die Verwendung von PQC-Verfahren auf ressourcenbeschränkten eingebetteten Systemen erforscht. Die Herausforderungen hierbei sind die Auswahl geeigneter PQC-Verfahren sowie ihre sichere Implementierung in einem effizienten Software-Hardware (SW-HW) Co-Design auf einer kostengünstigen Hardware-Plattform. Als Proof-of-Concept zum Nachweis der Nutzbarkeit der Lösungen werden industrielle Anwendungsfälle mit den entwickelten Komponenten in Form eines Demonstrators umgesetzt. Die TU Darmstadt untersucht insbesondere Möglichkeiten der Erhöhung der Effizienz und Sicherheit durch algorithmische Optimierungen.</p>

genua GmbH	01.09.2019	31.08.2022	152.922	<p>Verbundprojekt: Quanten-Sichere VPN-Module und -Operationsmodi - QuaSiModO - ; Teilvorhaben: Post-Quanten Internet Key Exchange Protocol für sichere VPN-Verbindungen</p>	<p>Mithilfe von QuaSiModO sollen die VPN-Protokolle MACsec (hier: die Schlüsselaustauschprotokolle MKA und PACE) sowie IPsec (hier: das Protokoll IKEv2) um eine quantenresistente Lösung erweitert werden. genua beschäftigt sich in QuaSiModO mit IPsec und arbeitet an einer Erweiterung des relevanten Schlüsselaustausch-Verfahrens. genua bedient den IT-Hochsicherheitsmarkt, etwa mit Produkten zur sicheren Fernwartung sowie Standortvernetzung mittels VPNs, Lösungen für mobiles Arbeiten oder Firewalls. Dazu setzt genua auf kryptografische Verfahren. Die Sicherheit dieser und deren Anwendungen ist jedoch gefährdet, sollte es in den kommenden Jahren bzw. Jahrzehnten gelingen, einen ausreichend starken Quantencomputer zu bauen. genua möchte im Interesse seiner Kunden auch auf zukünftige Gefahren und Herausforderungen vorbereitet sein. Derzeit wird weltweit an verschiedenen quantenresistenten Alternativen zu konventioneller Kryptografie gearbeitet. Doch trotz großer Fortschritte fehlt noch immer das Vertrauen sowie ausreichend intensive Untersuchungen und Wissen über die Anwendung dieser Verfahren. genua möchte deshalb anhand der VPN-Technologie IPsec bzw. IKEv2 entsprechende Erkenntnisse in diesem Bereich gewinnen und wieder in die Community zurückfließen lassen. So soll QuaSiModO mit signifikanten Beiträgen den Fortschritt im Bereich der Post-Quanten-Kryptografie unterstützen. Ziel ist die ausreichend intensive Untersuchung des Verhaltens quantenresistenter Verfahren unter Beachtung aller nötigen Aspekte wie gutem Protokolldesign, sicherer Implementierungen und praktikabler User Experience im gegebenen Kontext. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen umfangreich genug sein, um einschlägige (Open-Source-) Software anpassen und veröffentlichen zu können. Die veröffentlichten Erkenntnisse sollen genua, den Projektpartnern und der Community helfen, das gewonnene Wissen sinnvoll auf andere Protokolle und Anwendungen zu übertragen.</p>
------------	------------	------------	---------	--	--

ADVA Optical Networking SE	01.09.2019	31.08.2022	204.233	Verbundprojekt: Quanten-Sichere VPN-Module und -Operationsmodi - QuaSiModO - ; Teilvorhaben: Post-quantum Schlüsselaustausch für MACsec (Layer2) Verschlüsselung	Virtuelle private Netze (VPN) sind ein wichtiges Element zur sicheren Vernetzung und Anbindung von Unternehmensstandorten oder für den sicheren Fernzugriff auf sensible Daten. Angreifer können schon heute große Datenmengen speichern und nachträglich entschlüsseln sobald große Quantencomputer die aktuell eingesetzten VPN-Protokolle angreifen können. ADVA untersucht in QuaSiModO quantensichere VPN-Lösungen auf Schicht 2 und setzt zumindest eine Variante auf firmeneigener Hardware um. Insbesondere wird das im Kontext von MACsec spezifizierte Schlüsselaustauschprotokoll MKA sowie PACE angepasst. Wichtige Fragestellungen, die beantwortet werden sollen sind: 1. Welche Primitive und Verfahren sind für den Einsatz auf Schicht 2 des ISO/OSI-Referenzmodells geeignet? 2. Welche Besonderheiten der Protokolle müssen bei der Auswahl der Primitive beachtet werden? 3. Welche Anpassungen der Protokolle sind nötig, um dieser Auswahl gerecht zu werden? 4. Wie lässt sich kryptografische Agilität durch modulare oder hybride Schlüsselaustauschprotokolle verwirklichen? 5. Welche Parametersätze der Verfahren und mögliche Optimierungen eignen sich für die jeweiligen Protokolle? 6. Wie verhalten sich die gewählten Algorithmen und Parametersätze im Praxiseinsatz auf der vorgesehenen Hardware?
----------------------------	------------	------------	---------	--	--

Ludwig-Maximilians-Universität München	01.09.2019	31.08.2022	273.186	Verbundprojekt: Quanten-Sichere VPN-Module und -Operationsmodi - QuaSiModO - ; Teilvorhaben: Schichtenübergreifende Anforderungsanalyse, Protokollkonzeptionierung und Sicherheitsmodelle	Das Ziel von QuaSiModO ist die Erforschung quantenresistenter Kryptografie im Einsatz von Virtual Private Networks (VPN), insbesondere auf der Sicherungs- und Vermittlungsschicht des ISO-OSI-Referenzmodells. Im Vordergrund stehen dabei die Machbarkeit, Skalierbarkeit, Effizienz und Sicherheit der zu entwickelnden Lösungen. Die Lehr- und Forschungseinheit für Systemprogrammierung und Netzmanagement der LMU legt in jeder Phase des Projekts die notwendigen wissenschaftlichen Grundlagen: Aus dem Forschungsfeld der Post-Quanten-Kryptografie steht eine Reihe von kryptografischen Primitiven und konkreten Verfahren zu Verfügung, jedoch sind diese nicht ohne Weiteres für die Netzsicherheit nutzbar. Deshalb beschäftigt sich die LMU in der ersten Projekthälfte mit der Konzeption der für verschiedene Klassen bzw. Instanziierungen notwendigen Protokollanpassungen. Dazu ist eine sorgfältige Analyse der Primitive und Protokolle erforderlich. Die beiden Protokollfamilien MACsec und IPsec sind schon lange etabliert und damit konservativ gewählt, ihre Sicherheit wurde bisher allerdings nur teilweise mit modernen Techniken aus der Kryptografie untersucht. Deshalb bedürfen die Anpassungen besonderer Sorgfalt und müssen mit entsprechenden Sicherheitsmodellen untermauert werden. In der zweiten Projekthälfte beteiligt sich die LMU mit den gewonnenen Erkenntnissen und entwickelten Konzepten an der praktischen Untersuchung der entwickelten Lösungen. Auch hier liegt wieder der Fokus auf der Entwicklung von möglichst schichtenübergreifenden Abstraktionen der Angriffsmodelle, um (Teil-)Ergebnisse möglicherweise auf andere Protokollfamilien übertragen zu können.
Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein	01.09.2019	31.08.2022	452.800	Verbundprojekt: Quanten-Sichere VPN-Module und -Operationsmodi - QuaSiModO - ; Teilvorhaben: Kryptanalyse und Angriffe	QuaSiModO beschäftigt sich mit der Untersuchung und Umsetzung einer quantensicheren VPN-Lösung auf den OSI Schichten 2 und 3. Insbesondere wird das im Kontext von MACsec spezifizierte Schlüsselaustauschprotokoll MKA sowie PACE und das bei IPsec verwendete Protokoll IKEv2 im Post-Quanten Kontext betrachtet. Als Teil des Projekts werden verschiedene Angriffe auf die gewählten kryptographischen Primitive und Protokolle bzw. deren Implementierungen ausgeführt, um eine entwicklungsunabhängige Sicherheitsanalyse zu ermöglichen. Diese soll neben algorithmischen, also konzeptionellen Aspekten auch die Untersuchung der Verfahren in Hinblick auf die Sicherheit der Implementierung umfassen, da letztere eine große Bedeutung für den praktischen Einsatz haben, jedoch bezüglich Post-Quanten Verfahren bisher unzureichend erforscht wurden.

Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.	01.10.2019	31.12.2020	1.652.637	<p>Verbundprojekt: Quantentechnologien für sichere Netzwerke und Kommunikation - QuNET -; Teilvorhaben: Holistisches Systemdesign und QKD-Demonstratoren mit kontinuierlichen Variablen in heterogenen Netzwerken</p>	<p>Im Rahmen des vorliegenden Teilvorhabens beschäftigt sich das MPL erstens mit der Umsetzung des holistischen Systemansatzes für ein heterogenes System für Verschlüsselung mittels Quantenschlüsselaustausch. Dabei werden sicherheitskritische Eigenschaften des gesamten Systems, bestehend aus mehreren Systemen verschiedener Partner, bereits zu Beginn des Gesamtvorhabens mit Hilfe von Zuarbeiten der Projektpartner identifiziert, fortlaufend überwacht und Teilaspekte praktisch untersucht. Diese Untersuchungen sollen unterstützt werden durch offene Diskussionen in Workshops, an denen neben den Projektpartnern weitere Experten aus Wissenschaft, Industrie und Behörden teilnehmen, und der Einbringung von neuesten Entwicklungen bezüglich Standardisierung und Zertifizierung von Systemen für Quantenschlüsselaustausch. Außerdem wird hier eine mittels Quantenschlüssel abgesicherte Kommunikationssequenz (z. B. Videokonferenz) praktisch implementiert. Des Weiteren werden in diesem Teilvorhaben zwei Systeme für die Demonstration von Quantenschlüsselaustausch unter realistischen Bedingungen implementiert. Dabei liegt ein Augenmerk auf der Heterogenität der Systeme, sodass wahlweise unterschiedliche optische Übertragungskanäle, wie Freistrahverbindungen oder Glasfaserverbindungen, mit verschiedenen optischen Wellenlängen genutzt werden können. Das erste System setzt den Quantenschlüsselaustausch mittels Phasenraumkodierung und Detektion von kontinuierlichen Variablen um, während das zweite System auf Polarisationskodierung und der Detektion von kontinuierlichen Variablen basiert. Das Teilvorhaben wird unter dem Aspekt durchgeführt, dass eine große Anschlussfähigkeit für folgende Projektphasen gewährleistet ist. Während die beiden QKD-Demonstratoren als Knotenpunkte für ein Mehrbenutzer Quantenkommunikationsnetz dienen können, ist der holistische Systemansatz richtungsweisend für die Systemarchitektur und –struktur eines aufzubauenden sicheren Quantenkommunikationsnetzes.</p>
---	------------	------------	-----------	---	--

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein	01.10.2019	31.12.2020	8.829.276	Verbundprojekt: Quantentechnologien für sichere Netzwerke und Kommunikation - QuNET-; Teilvorhaben: Infrastruktur, Technologie und Demonstration von freistrahl- und faserbasierter Quantenschlüsselverteilung mit Fokus auf Fasernetze und mobiler Open Science Plattformen	Als Teil der Demonstration einer Kommunikation durch Quantentechnologien im Gesamtvorhaben soll in den beiden Teilvorhaben des HHI und des IOF je ein Quantenkanal und die skalierbare Demonstration eines in Zukunft heterogenen und hybriden Gesamtsystems erreicht werden. Im Teilvorhaben des HHI ist die Demonstration von QKD über eine verlegte Glasfaserverbindung, der Aufbau eines echtzeitfähigen QKD-Systems basierend auf diskreten Variablen (DV) und die übergreifende Bereitstellung der klassischen Kanäle geplant. Hierbei gehen insbesondere die angestrebte Koexistenz von mehreren unterschiedlich kodierten QKD-Signalen auf der Faser sowie der angestrebte Einsatz integriert-optischer Komponenten über den Stand der Technik hinaus. Im Teilvorhaben des IOF werden QKD-Verfahren auf Basis kontinuierlicher und diskreter Variablen in terrestrischen Freistrahlstrecken experimentell untersucht und demonstriert. Hierzu soll erstmalig eine vielfältig einsetzbare, offene, mobile Open-Science-Plattform (QuBus) entwickelt werden.
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.	01.10.2019	31.12.2020	2.309.048	Verbundprojekt: Quantentechnologien für sichere Netzwerke und Kommunikation - QuNET -; Teilvorhaben: QuSat I: Experimentelle Untersuchung der Quantenschlüsselverteilung mittels Satellitenkommunikationstechnik im Telekommunikationsband	In dem hier vorgeschlagenen Projekt sollen Verfahren der Quantenschlüsselverteilung auf Basis kontinuierlicher und diskreter Variablen in einer Freistrahlstrecke experimentell untersucht und demonstriert werden. Dazu ist das Senden der Quantenzustände, implementiert in photonischen Freiheitsgraden, notwendig. Eine hohe Koppel-effizienz zwischen Sender und Empfänger ist hier ebenso wichtig wie die Erhaltung des Quantenzustands in den verschiedenen Schnittstellen und Subsystemen. Hinsichtlich der Verwendung der Ergebnisse für die Entwicklung einer Satelliten-Boden-Quantenkommunikation wird dieses Experiment "Freistrahlbasierte Quantenschlüsselverteilung im Telekom-Band" Satellitensystemtechnik verwendet werden wo möglich. Die Ausgangsbasis für Sende- und Empfangseinheit sind das OSIRISv3-Terminal sowie die THRUST-Bodenstation des DLR. Durch Modifikation der Schnittstellen, Anpassung der Optik und der Strahlsteuerung werden diese beiden Systeme entsprechend der Anforderungen weiterentwickelt. Wichtigste übergeordnete Metrik ist hierbei die Koppel-effizienz zwischen Alice und Bob, um eine möglichst hohe Schlüsselrate zu erreichen. Die technischen und wissenschaftlichen Ziele sind die Folgenden: (1) Durchführung eines Freistrahlexperiments zur Untersuchung verschiedener Verfahren zur Quantenschlüsselverteilung im Telekom-Band. Das DLR übernimmt hierbei die Experimentleitung sowie die Entwicklung des Systemdesigns des Experiments und den Aufbau und Modifikation eines Empfangssegments als Schnittstelle zum Quantenempfänger. (2) Analyse des Kanalverhaltens und Einfluss des Kanals auf die Schlüsselrate einschließlich der statistischen Beschreibung des Kanalzustands und des Vergleichs mit Koppel-effizienz und Schlüsselrate und einer Verifikation des Linkbudget. (3) Ableitung von Designempfehlungen für ein Satellitensystem hinsichtlich Integration in ein

					heterogenes Quantennetzwerk und Kompatibilität zu aktuellen und zukünftigen QKD-Protokollen und QZ-Übertragungsverfahren.
--	--	--	--	--	---

Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung eingetragener Verein	01.11.2019	31.10.2022	451.900	Verbundprojekt: Kryptobibliothek Botan für langlebige Sicherheit - KBLS - ; Teilvorhaben: Benutzbarkeit, Konzeption und Standardisierung	Ziel dieses Vorhabens ist es, die Kryptobibliothek Botan so zu erweitern und zu verbessern, dass Entwicklerinnen und Entwickler auf Basis der von der Bibliothek zur Verfügung gestellten Funktionen Lösungen entwickeln können, die langlebige Sicherheit umsetzen. Hierzu gehören neben der Aufnahme quantencomputerresistenter Kryptoalgorithmen auch die Unterstützung des Schlüsselmanagements, die Beachtung des Themas Kryptoagilität und vor allem die einfache Benutzbarkeit der Bibliothek. Ziel des Teilvorhabens ist es, die erfolgreiche Umsetzung des Aspekts der Benutzbarkeit im Gesamtvorhaben sicher zu stellen. Dies bedeutet, dass sowohl vorhandene Verfahren als auch neu zu integrierende Post-Quanten-Verfahren derart in die Kryptobibliothek eingebunden sind (z. B. durch benutzbares Schnittstellendesign), dass auch Entwickler, die nicht aus dem Umfeld der IT-Sicherheit stammen, Kryptographie richtig und sicher einsetzen können. Zu einem korrekten Einsatz gehört ebenfalls ein sicheres Schlüsselmanagement. Des Weiteren sollen die implementierten Verfahren durch entsprechende Gegenmaßnahmen sicher gegenüber zeitbasierten Seitenkanalangriffen sein.
Technische Universität Berlin	01.11.2019	31.10.2022	316.470	Verbundprojekt: Kryptobibliothek Botan für langlebige Sicherheit - KBLS - ; Teilvorhaben: Kryptoagilität, Seitenkanal- und Fehlerangriffe, Tests und Standardisierung	Ziel dieses Vorhabens ist es, die Kryptobibliothek Botan so zu erweitern und zu verbessern, dass Entwicklerinnen und Entwickler auf Basis der von der Bibliothek zur Verfügung gestellten Funktionen Lösungen entwickeln können, die langlebige Sicherheit umsetzen. Hierzu gehören neben der Aufnahme quantencomputerresistenter Kryptoalgorithmen auch die Unterstützung des Schlüsselmanagements, die Beachtung des Themas Kryptoagilität und vor allem die einfache Benutzbarkeit der Bibliothek. Der Lehrstuhl Security in Telecommunications der TU Berlin übernimmt im Vorhaben die Aufgabe der wissenschaftlichen Begleitung der Implementierung von Post-Quantum-Algorithmen in der Botan Kryptobibliothek. Dazu zählen insbesondere die Auswahl von Algorithmen und Parametern, die Unterstützung bei der Entwicklung der Implementierung sowie die Qualitätssicherung.

neXenio GmbH	01.11.2019	31.10.2022	254.757	<p>Verbundprojekt: Kryptobibliothek Botan für langlebige Sicherheit - KBLs - ; Teilvorhaben: Kryptoagilität, Implementierung und quantencomputerresistente Updateverfahren</p>	<p>Ziel dieses Vorhabens ist es, die Kryptobibliothek Botan so zu erweitern und zu verbessern, dass Entwicklerinnen und Entwickler die in ihren Lösungen Botan nutzen, sich auf langlebige Sicherheit verlassen können. Hierzu gehören neben der Aufnahme quantencomputerresistenter Kryptoalgorithmen auch die Unterstützung des Schlüsselmanagements, die Beachtung des Themas Kryptoagilität und vor allem die einfache Benutzbarkeit der Bibliothek. Im Teilvorhaben sollen die Anforderungen an die Kryptobibliothek hinsichtlich Kryptoagilität aufgenommen und analysiert werden. Des Weiteren ist die Implementierung des Schlüsselmanagements für Postquantum-Verfahren und hybride Verfahren zu entwickeln, diese in die Bibliothek Botan zu integrieren und iterativ die Ergebnisse der sicherheitstechnischen Tests einzuarbeiten. Um die Anwendbarkeit der implementierten Verfahren nachzuweisen, wird die gemeinsame Entwicklung anhand eines Demonstrators evaluiert.</p>
WIBU-SYSTEMS Aktiengesellschaft	01.11.2019	31.10.2022	641.366	<p>Verbundprojekt: PQC Technologien für den Datenschutz in der medizinischen Versorgung in Deutschland - PQC4MED - ; Teilvorhaben: Zukunftssicherer IP-Schutz durch updatefähige Schutzinfrastruktur</p>	<p>Für eingebettete Systeme mit Anwendungen für kritische Infrastrukturen ist die langfristig verfügbare Informationssicherheit ein zentrales Entwicklungsziel. Die heute zu planende Langlebigkeit von Geräten in derartigen Infrastrukturen erfordert, dass möglichst früh bei der Entwicklung neuer Gerätegenerationen ein "langzeitsicheres Security-by-Design" vorzusehen ist. Dies ist die Antwort auf eine neue Bedrohungslage, die durch zukünftige Leistungsfähigkeit des Quantencomputing (QC) entstehen wird. In vielen Fällen bedeutet dies, eingebettete Systeme mit Hardware-Ressourcen auszustatten, die zur Integration neuer kryptografischer Verfahren vorbereitet sind. Ein updatefähiges Secure Element (SE) muss der integrale Bestandteil eines Embedded Systems sein und bildet die Grundlage für die langfristige Gewährleistung von Quantencomputer (QC)-resistenten Verfahren. Das SE ist somit ein Vertrauensanker, der "Kryptoagilität" ermöglicht. Die Medizintechnik ist ein Marktsegment, welches stark vom Einsatz von Embedded Systems geprägt ist und welches gleichzeitig hohe rechtliche Anforderungen an die Vertrauenswürdigkeit und Integrität von personenbezogenen Daten bezüglich Verarbeitung, Übertragung und Speicherung stellt. Primäres Ziel dieses Vorhabens ist somit die Entwicklung einer Update-Plattform und updatefähiger Secure Elements für Embedded Systems in der Medizintechnikbranche, um so die Grundlage für den Einsatz von zukünftigen QC-resistenten Algorithmen zu schaffen.</p>

<p>Infineon Technologies AG</p>	<p>01.11.2019</p>	<p>31.10.2022</p>	<p>634.368</p>	<p>Verbundprojekt: PQC Technologien für den Datenschutz in der medizinischen Versorgung in Deutschland - PQC4MED - ; Teilvorhaben: Entwicklung und Demonstration Quanten-Computer-residenter Verfahren</p>	<p>Für eingebettete Systeme mit Anwendungen für kritische Infrastrukturen wie die Gesundheitsversorgung in Deutschland ist die langfristig verfügbare Informationssicherheit ein zentrales Entwicklungsziel von Infineon für künftige Produktgenerationen. Die heute zu planende Langlebigkeit von Geräten in derartigen Infrastrukturen erfordert, dass möglichst früh bei der Entwicklung neuer Gerätegenerationen ein "langzeitsicheres Security-by-Design" vorzusehen ist. Infineon möchte mit PQC4MED die Antwort auf eine neue Bedrohungslage entwickeln, die durch zukünftige Leistungsfähigkeit von Quanten-Computer (QC) entstehen wird. In vielen Fällen bedeutet dies, eingebettete Systeme mit Hardware-Ressourcen auszustatten, die zur Integration neuer kryptografischer Verfahren vorbereitet sind. Ein updatefähiges Secure Element (SE) muss der integrale Bestandteil eines Embedded Systems sein und bildet die Grundlage für die langfristige Gewährleistung von QC resistenten Verfahren. Das SE ist somit ein Vertrauensanker der "Kryptoagilität" ermöglicht. Die Medizintechnik und die damit verbundenen mobilen und stationären Analyse- und Versorgungsgeräte ist ein Marktsegment, welches stark vom Einsatz von Embedded Systems geprägt ist und welches gleichzeitig hohe rechtliche Anforderungen an die Vertrauenswürdigkeit und Integrität von personenbezogenen Daten bezüglich Verarbeitung, Übertragung und Speicherung stellt. Primäres Ziel von Infineon in diesem Vorhaben ist somit die Entwicklung einer Update-Plattform, bestehend aus einem updatefähigen Secure Elements für Embedded Systems und die Bereitstellung von geeigneten PQC-Algorithmen in der Medizintechnikbranche, Nach Abschluss des Projektes wird Infineon SE mit PQC-Funktionalität zu marktfähigen Produkten weiterentwickeln, qualifizieren und ggfs. zertifizieren, um diese anschließend als "Plug &amp; Trust" Module am Markt für Gerätehersteller anzubieten.</p>
---------------------------------	-------------------	-------------------	----------------	--	---

MACIO GmbH	01.11.2019	31.10.2022	379.104	<p>Verbundprojekt: PQC Technologien für den Datenschutz in der medizinischen Versorgung in Deutschland - PQC4MED - : Teilvorhaben: Implementierung von Protectoren für PQC-Schutzanwendungen, automatisierte S/W-Updates und Demonstratoren</p>	<p>Für eingebettete Systeme mit Anwendungen für kritische Infrastrukturen ist die langfristig verfügbare Informationssicherheit ein zentrales Entwicklungsziel. Die heute zu planende Langlebigkeit von Geräten in derartigen Infrastrukturen erfordert, dass möglichst früh bei der Entwicklung neuer Gerätegenerationen ein "langzeitsicheres Security-by-Design" vorzusehen ist. Dies ist die Antwort auf eine neue Bedrohungslage, die durch zukünftige Leistungsfähigkeit des Quanten-Computing (QC) entstehen wird. In vielen Fällen bedeutet dies, eingebettete Systeme mit Hardware-Ressourcen auszustatten, die zur Integration neuer kryptografischer Verfahren vorbereitet sind. Ein updatefähiges Secure Element (SE) muss der integrale Bestandteil eines Embedded Systems sein und bildet die Grundlage für die langfristige Gewährleistung von QC-resistenten Verfahren. Das SE ist somit der Vertrauensanker, der "Krypto-Agilität" ermöglicht. Die Medizintechnik ist ein Marktsegment, welches stark von dem Einsatz von Embedded Systems geprägt ist und welches gleichzeitig hohe rechtliche Anforderungen gemäß Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) an die Vertrauenswürdigkeit, Langzeitsicherheit und Integrität von personenbezogenen Daten bezüglich Verarbeitung, Übertragung und Speicherung stellt. Primäres Ziel dieses Vorhabens ist somit die Entwicklung einer Update-Plattform und updatefähigen Secure Elements für Embedded Systems in der Medizintechnikbranche, um so die Grundlage für den Einsatz von zukünftigen QC-resistenten Algorithmen zu schaffen. Als Hersteller von modularen Software-Bibliotheken und innovativen, objektorientierten Bedieneroberflächen unterstützt MACIO das Projekt durch die Implementierung von Protectoren für PQC-Schutzanwendungen, automatisierte Software-Updates und Demonstratoren. MACIO bringt insbesondere die Expertise im Bereich User Experience Design mit ein, um nachhaltige, einfach nutzbare Bedienszenarien zu entwerfen.</p>
------------	------------	------------	---------	---	---

<p>Karlsruher Institut für Technologie (KIT)</p>	<p>01.11.2019</p>	<p>31.10.2022</p>	<p>273.216</p>	<p>Verbundprojekt: PQC Technologien für den Datenschutz in der medizinischen Versorgung in Deutschland - PQC4MED - ; Teilvorhaben: Sicherheitsmodelle und kryptographische Funktionalitäten für PQC Technologien</p>	<p>Für eingebettete Systeme mit Anwendungen für kritische Infrastrukturen ist die langfristig verfügbare Informationssicherheit ein zentrales Entwicklungsziel. Die heute zu planende Langlebigkeit von Geräten in derartigen Infrastrukturen erfordert, dass möglichst früh bei der Entwicklung neuer Geräte-Generationen ein "langzeitsicheres Security-by-Design" vorzusehen ist. Dies ist die Antwort auf eine neue Bedrohungslage, die durch zukünftige Leistungsfähigkeit des Quanten-Computing (QC) entstehen wird. In vielen Fällen bedeutet dies, eingebettete Systeme mit Hardware-Ressourcen auszustatten, die zur Integration neuer kryptografischer Verfahren vorbereitet sind. Ein updatefähiges Secure Element (SE) muss der integrale Bestandteil eines Embedded Systems sein und bildet die Grundlage für die langfristige Gewährleistung von QC-resistenten Verfahren. Das SE ist somit der Vertrauensanker, der "Krypto-Agilität" ermöglicht. Die Medizintechnik ist ein Marktsegment, welches stark von dem Einsatz von Embedded Systems geprägt ist und welches gleichzeitig hohe rechtliche Anforderungen gemäß Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) an die Vertrauenswürdigkeit, Langzeitsicherheit und Integrität von personenbezogenen Daten bezüglich Verarbeitung, Übertragung und Speicherung stellt. Primäres Ziel dieses Vorhabens ist somit die Entwicklung einer Update-Plattform und updatefähigen Secure Elements für Embedded Systems in der Medizintechnikbranche, um so die Grundlage für den Einsatz von zukünftigen QC-resistenten Algorithmen zu schaffen. Das KIT wird sich dabei im Bereich der beweisbaren Sicherheit einbringen. Ohne geeignete formale Modelle können keine wissenschaftlich fundierten Aussagen über die Sicherheit der erarbeiteten Lösung getätigt werden. Wird die Sicherheit nicht von Anfang an bei der Entwicklung systematisch mitbetrachtet, so führt dies häufig zu Sicherheitsproblemen, wie beispielsweise beim EMV-Framework für Bezahlprotokolle deutlich wurde.</p>
--	-------------------	-------------------	----------------	--	---

Deutsches Forschungszent rum für Künstliche Intelligenz GmbH	01.11. 2019	31.10. 2022	685.615	Verbundprojekt: PQC Technologien für den Datenschutz in der medizinischen Versorgung in Deutschland - PQC4MED - ; Teilvorhaben: Entwicklung und Evaluation kryptoagiler und seitenkanalresistenter Hardware-Module für PQC-Verfahren	Für eingebettete Systeme mit Anwendungen für kritische Infrastrukturen ist die langfristig verfügbare Informationssicherheit ein zentrales Entwicklungsziel. Die heute zu planende Langlebigkeit von Geräten in derartigen Infrastrukturen erfordert, dass möglichst früh bei der Entwicklung neuer Gerätegenerationen ein "langzeitsicheres Security-by-Design" vorzusehen ist. Dies ist die Antwort auf eine neue Bedrohungslage, die durch zukünftige Leistungsfähigkeit des Quanten- Computing (QC) entstehen wird. In vielen Fällen bedeutet dies, eingebettete Systeme mit Hardware-Ressourcen auszustatten, die zur Integration neuer kryptografischer Verfahren vorbereitet sind. Ein updatefähiges Secure Element (SE) muss der integrale Bestandteil eines Embedded Systems sein und bildet die Grundlage für die langfristige Gewährleistung von QC-resistenten Verfahren. Das SE ist somit der Vertrauensanker, der "Krypto-Agilität" ermöglicht. Die Medizintechnik ist ein Marktsegment, welches stark von dem Einsatz von Embedded Systems geprägt ist und welches gleichzeitig hohe rechtliche Anforderungen gemäß Datenschutzgrundverordnung (DSGVO) an die Vertrauenswürdigkeit, Langzeitsicherheit und Integrität von personenbezogenen Daten bezüglich Verarbeitung, Übertragung und Speicherung stellt. Primäres Ziel dieses Vorhabens ist somit die Entwicklung einer Update- Plattform und updatefähigen Secure Elements für Embedded Systems in der Medizintechnikbranche, um so die Grundlage für den Einsatz von zukünftigen QC- resistenten Algorithmen zu schaffen. Das DFKI entwickelt mit seinem Teilvorhaben Konzepte, Verfahren und Hardwaremodule sowie ergänzende Softwarebausteine, welche dabei helfen, die Updatefähigkeit von Secure Elements auch im Zeitalter von Quantencomputern langzeitsicher zu erhalten.
---	----------------	----------------	---------	---	--

Universität zu Lübeck	01.11.2019	31.10.2022	544.848	Verbundprojekt: PQC Technologien für den Datenschutz in der medizinischen Versorgung in Deutschland - PQC4MED - ; Teilvorhaben: Effiziente und sichere Umsetzung QC-resistenter Verfahren für eingebettete medizinorientierte Systeme	Die Universität zu Lübeck übernimmt im Projekt die Analyse und Verifikation der Post-Quantum-Verfahren von der Konzeptebene bis hin zur Implementierung. Die Arbeiten werden in enger Kooperation mit Industriepartnern und akademischen Partnern durchgeführt. Die Uni zu Lübeck fokussiert sich auf softwareorientierte Implementierung sowie die Seitenkanaleigenschaften in Software. Ziel ist die praktische Realisierung QC-resistenter Verfahren für Embedded Systeme in zwei Anwendungsszenarien: für High-End Secure Elements (SE) sowie für Low-End SEs mit begrenzten Hardware Ressourcen. Für beide Szenarien wird jeweils ein Demonstrator für medizinische Anwendungen erstellt. Die Untersuchung der QC-resistenten Verfahren beginnt bereits auf der Konzeptebene. Einige Verfahren haben vorteilhafte Eigenschaften aus Seitenkanalsicht, da ihre Struktur bereits eine Vielzahl von Angriffen erschwert oder unmöglich macht. In der nachfolgenden Implementierbarkeitsanalyse werden ausgewählte PQC-Verfahren in Software, mit und ohne domänenspezifische HW-Beschleuniger sicher umgesetzt und die Performance und Sicherheitseigenschaften in Bezug auf die Anwendung in updatefähigen SEs evaluiert. Für die Umsetzung der Migrationsfähigkeit und der Krypto-Agilität ist die Überprüfung von Software- und Firmware-Komponenten im Konzept der Gesamtlösung notwendig. Die Uni zu Lübeck setzt auf die Entwicklung von Tools, die zur automatisierten Sicherheitsanalyse eingesetzt werden können. Hierdurch kann auch später im Projekt auf die dynamische Weiterentwicklung der Verfahren in der PQC-Forschung reagiert werden. Die Verifikation der Seitenkanaleigenschaften wird unter anderem durch automatisierte Analyse von Quelltexten oder Binärimplementierungen der Software und Firmwarekomponenten durchgeführt. Hierbei werden die sich aus den zwei Anwendungsszenarien ergebenden Systemeigenschaften berücksichtigt, um auch den Schutz vor Angriffen auf Systemebene zu ermöglichen.
-----------------------	------------	------------	---------	---	---

SCHÖLLY FIBEROPTIC GMBH	01.11. 2019	31.10. 2022	310.476	Verbundprojekt: PQC Technologien für den Datenschutz in der medizinischen Versorgung in Deutschland - PQC4MED - ; Teilvorhaben: Entwicklung einer sicheren Kameraplattform für medizinische Visualisierungssysteme	1. Medizinische Visualisierungssysteme nehmen eine zentrale Stellung in medizinischen Anwendungen ein, da sie im Fokus der handelnden Personen stehen und ein direktes Interface zu den handelnden Personen besitzen. Darüber hinaus werden medizinische Visualisierungssysteme zunehmend mit weiteren Systemen vernetzt, die auch personenbezogene Daten liefern. Die zunehmende Vernetzung und die zunehmenden regulatorischen Anforderungen stellen somit hohe Ansprüche an die Vertrauenswürdigkeit, die Langzeitsicherheit und die Integrität von Daten und medizinischen Systemen. Ziel der Fa. SCHÖLLY ist es gemeinsam mit den Projektpartnern tragfähige und zukunftssichere Konzepte zu erarbeiten, die im Bereich der Medizintechnik angewendet werden können. 2. Zu Beginn der Arbeiten werden die Use-Cases zum Updaten der Kryptographie für medizinische Visualisierungssysteme definiert. Es werden Demonstratoren für medizinische Visualisierungssysteme aufgebaut. Die von den Projektpartnern zu erarbeitenden Konzepte zum Updaten der Kryptographie werden dann auf diesen Demonstratoren implementiert. Es werden Sicherheitskonzepte für medizinische Visualisierungssysteme erarbeitet und umgesetzt. Die umgesetzten Konzepte werden getestet.
-------------------------------	----------------	----------------	---------	--	--

<p>KSB SE &amp; Co. KGaA</p>	<p>01.11. 2019</p>	<p>31.10. 2022</p>	<p>441.046</p>	<p>Verbundprojekt: Sicherung von hydraulischen Anlagen in kritischen Infrastrukturen durch Quantencomputer- resistente kryptografische Verfahren - SIKRIN- KRYPTOV - ; Teilvorhaben: Hardware-Entwicklung, Implementierung und Test</p>	<p>Das Internet der Dinge (IoT) verändert disruptiv die Arbeitswelt. Vernetzung von Maschinen sowie die Verfügbarkeit von Sensordaten in Clouds erschließen neue Geschäftsmodelle und Optimierungsprozesse, z. B. bzgl. Auslastung und Verfügbarkeit. Neben diesen Vorteilen birgt die Kommunikation und Vernetzung auch große Gefahren, v.a. was sicherheitskritische Infrastrukturen angeht. Hydraulische Systeme (d.h. Pumpen inkl. ihrer elektrischen Antriebe und elektronischen Regelungssysteme) gehören in vielen Anwendungsgebieten zu diesen sicherheitskritischen Infrastrukturen. Für KSB als einer der weltweit größten Pumpenhersteller ist es deshalb von zentraler Bedeutung, ein entsprechendes Sicherheitskonzept für Pumpen in sicherheitskritischen Infrastrukturen zu haben. Zentraler Teil eines solchen Sicherheitskonzeptes stellt die Kryptografie dar. Es ist deshalb für KSB äußerst wichtig, sich im Rahmen von Sicherheitskonzepten intensiv mit dem Thema Kryptografie zu befassen und dazu proaktiv Maßnahmen zu ergreifen, insbesondere für den Fall, dass in der Zukunft leistungsfähige Quantencomputer für mögliche Angriffe zur Verfügung stehen. Ziel dieses Projekts ist es, Signatur- und Verschlüsselungsverfahren zu untersuchen, welche sowohl robust gegenüber Quantencomputern sind, als auch effizient in "Embedded Hardware" und damit in Pumpenregelungssystemen integriert werden können. In dem Vorhaben steht also nicht primär die Entwicklung neuer Post-Quantenkryptografischer Verfahren und Algorithmen im Vordergrund, sondern gemäß dem Themenpunkt "Effiziente sichere Soft- und Hardware für Quantencomputer-resistente Verfahren" des BMBF-Programms "Post-Quanten-Kryptografie" vielmehr deren anwendungsorientierte Hardware-Entwicklung, deren effiziente und sichere Implementierung sowie Tests bzgl. Angriffen von außen. Die Effizienz des entwickelten Systems soll von KSB an konkreten Use-Cases anhand von hydraulischen Systemen in verschiedenen sicherheitskritischen Infrastrukturen aufgezeigt werden.</p>
----------------------------------	------------------------	------------------------	----------------	---	--

Technische Universität Kaiserslautern	01.11. 2019	31.10. 2022	667.452	Verbundprojekt: Sicherung von hydraulischen Anlagen in kritischen Infrastrukturen durch Quantencomputer- resistente kryptographische Verfahren - SIKRIN- KRYPTOV - ; Teilvorhaben: Algorithmen Auswahl und Implementierung auf Zielplattformen	Das Internet der Dinge (IoT) verändert disruptiv unsere Arbeitswelt. Die Vernetzung von Maschinen sowie die Verfügbarkeit von Sensordaten in der Cloud erschließen neue Geschäftsmodelle und Optimierungsprozesse, z. B. bezüglich Auslastung und Verfügbarkeit. Neben all diesen Vorteilen birgt die Kommunikation und Vernetzung auch große Gefahren, insbesondere was sicherheitskritische Infrastrukturen angeht. Hydraulische Systeme (d.h. Pumpen inkl. ihrer elektrischen Antriebe und elektronischen Regelungssysteme) gehören in vielen Anwendungsgebieten zu diesen sicherheitskritischen Infrastrukturen, weshalb hier ein entsprechendes Sicherheitskonzept essentiell ist. Gerade für den Fall, dass in der Zukunft leistungsfähige Quantencomputer zur Verfügung stehen, ist es wichtig, post-quanten-sichere Signatur- und Verschlüsselungsverfahren zu nutzen um diese Infrastrukturen zu schützen. Die Rolle der TUK als Hardware- und Implementierungsspezialisten liegt in diesem Projekt vor allem in der Untersuchung und Auswahl geeigneter Verfahren für den konkreten Anwendungsfall, deren effizienter und sicherer Implementierung auf unterschiedlichen Zielplattformen und deren Härtung gegenüber Seitenkanal- und Fehlerattacken. Zusätzlich werden die Verfahren serverseitig integriert, wodurch schließlich eine vollständige post-quanten-sichere Ende-zu-Ende-Verschlüsselung gewährleistet werden kann.
---	----------------	----------------	---------	---	---

<p>Technische Universität München</p>	<p>01.11.2019</p>	<p>31.10.2022</p>	<p>358.968</p>	<p>Verbundprojekt: Sicherung von hydraulischen Anlagen in kritischen Infrastrukturen durch Quantencomputer-resistente kryptographische Verfahren - SIKRIN-KRYPTOV - ; Teilvorhaben: Seitenkanalsicherheit Quantencomputer-resistenter Verfahren</p>	<p>Das Internet der Dinge (IoT) verändert disruptiv unsere Arbeitswelt. Die Vernetzung von Maschinen sowie die Verfügbarkeit von Sensordaten in der Cloud erschließen neue Geschäftsmodelle und Optimierungsprozesse, z. B. bezüglich Auslastung und Verfügbarkeit. Neben all diesen Vorteilen birgt die Kommunikation und Vernetzung auch große Gefahren, insbesondere was sicherheitskritische Infrastrukturen angeht. Hydraulische Systeme (d. h. Pumpen inkl. ihrer elektrischen Antriebe und elektronischen Regelungssysteme) gehören in vielen Anwendungsgebieten zu diesen sicherheitskritischen Infrastrukturen. Für KSB als einer der weltweit größten Pumpenhersteller ist es deshalb von zentraler Bedeutung, ein entsprechendes Sicherheitskonzept für Pumpen in sicherheitskritischen Infrastrukturen zu haben. Zentraler Teil eines solchen Sicherheitskonzeptes stellt die Kryptografie dar. Ziel dieses Projekts ist es, Signatur- und Verschlüsselungsverfahren zu untersuchen, welche sowohl robust gegenüber Quantencomputern sind, als auch effizient in "Embedded Hardware" und damit in Pumpenregelungssystemen integriert werden können. Die Technische Universität München (TUM) unterstützt die Projektpartner bei der sicheren Implementierung dieser neuen Quantencomputer-resistenten Signatur- bzw. Verschlüsselungsverfahren. Dabei liegt der Fokus auf der Absicherung gegen Seitenkanal- und Fehlerattacken. Diese Angriffe erlauben es, durch die Beobachtung des Stromverbrauchs der ausführenden Hardware bzw. durch systematisches Herbeiführen von fehlerhaften Berechnungen, Informationen über verarbeitete Daten zu erhalten und erlauben somit eine Extraktion der verwendeten kryptografischen Schlüssel. Die Effektivität dieser Angriffe wird auf der Zielplattform evaluiert, um die Implementierung durch geeignete Gegenmaßnahmen abzusichern. Hierbei wird das jeweilige Verfahren sowie dessen Integration in das Gesamtsystem betrachtet.</p>
<p>operational services GmbH &amp; Co.KG</p>	<p>01.12.2019</p>	<p>30.11.2022</p>	<p>90.688</p>	<p>Verbundprojekt: Full Lifecycle Post-Quantum PKI - FLOQI - ; Teilvorhaben: Koordination &amp; Steuerung des Projektteams und inhaltliche Qualitätssicherung sowie Standardisierung</p>	<p>Ziel dieses Vorhabens ist es, eine abwärtskompatible, quantencomputerresistente PKI zu entwerfen. Dabei werden sowohl Lösungen betrachtet, die auf hybriden X.509 Zertifikaten basieren, als auch Lösungen, die den Parallelbetrieb von konventionellen und Post-Quantum PKIs ermöglichen. Die entworfenen Konzepte werden von führenden Industriepartnern aus den Bereichen Automotive, Industrie 4.0 und Finanzinfrastruktur in Demonstratoren umgesetzt. Ziel der operational services GmbH &amp; Co. KG ist es, Lösungen beratend im Markt zu etablieren bzw. entsprechende Migrationsprojekte voranzutreiben.</p>

TU Berlin	01.12. 2019	30.11. 2022	399.882	Verbundprojekt: Full Lifecycle Post-Quantum PKI - FLOQI - ; Teilvorhaben: Post-Quantum PKI in real life deployments	Ziel dieses Vorhabens ist es, eine abwärtskompatible, quantencomputerresistente PKI zu entwerfen. Dabei werden sowohl Lösungen betrachtet, die auf hybriden X.509 Zertifikaten basieren, als auch Lösungen, die den Parallelbetrieb von konventionellen und Post-Quantum PKIs ermöglichen. Die entworfenen Konzepte werden von führenden Industriepartnern aus den Bereichen Automotive, Industrie 4.0 und Finanzinfrastruktur in Demonstratoren umgesetzt. Der Lehrstuhl Security in Telecommunications der TU Berlin übernimmt im Vorhaben die Aufgabe der Auswahl von Post-Quantum-Signaturkandidaten, der wissenschaftlichen Evaluation von Sicherheitsaspekten aktueller Publikationen und der Entwicklung von Schlüsselaustausch und Schlüsseleinigungsverfahren welche klassische und quantencomputerresistente Verfahren kombinieren. Weiterhin wird sich die TUB bei der Spezifikation von hybriden X.509 Zertifikaten sowie der Bedrohungsanalyse der ausgewählten Verfahren einbringen und Gegenmaßnahmen für Angriffe auf die Implementierung der Verfahren entwickeln und implementieren.
FhG	01.12. 2019	30.11. 2022	637.006	Verbundprojekt: Full Lifecycle Post-Quantum PKI - FLOQI - ; Teilvorhaben: Hybride Zertifikate und kryptographische Verfahren für sichere Post-Quantum-PKIs	Ziel des Vorhabens ist ein abwärtskompatibles Konzept von digitalen Zertifikaten zu entwickeln, die klassische Kryptografie mit quantencomputerresistenter kombinieren. Dazu zählt auch das Einbeziehen von Anforderungen, die ein Parallelbetrieb von klassischen und PQ PKIs mit sich bringt. Zusätzlich zu hybriden Zertifikaten werden ebenfalls hybride Schlüsselaustauschverfahren entwickelt, um den gesamten Anwendungszyklus von Zertifikaten im Post-Quantum Umfeld abbilden zu können. Die konzeptionellen Ergebnisse sollen weitmöglichst in die Kryptobibliothek Botan integriert werden. Die Resultate sollen in einer präzisen technischen Spezifikation erfasst und möglichst im Rahmen eines RFC-Drafts diskutiert und standardisiert werden.

<p>Robert Bosch GmbH</p>	<p>01.12.2019</p>	<p>30.11.2022</p>	<p>236.472</p>	<p>Verbundprojekt: Full Lifecycle Post-Quantum PKI - FLOQI - ; Teilvorhaben: Entwicklung einer quantencomputerresistenten PKI für Industrie 4.0-Umgebungen</p>	<p>Ziel dieses Vorhabens ist es, eine abwärtskompatible, quantencomputerresistente PKI zu entwerfen. Dabei werden sowohl Lösungen betrachtet, die auf hybriden X.509 Zertifikaten basieren, als auch Lösungen, die den Parallelbetrieb von konventionellen und Post-Quantum PKIs (PQ-PKI) ermöglichen. Die entworfenen Konzepte werden von führenden Industriepartnern aus den Bereichen Automotive, Industrie 4.0 und Finanzinfrastruktur in Demonstratoren umgesetzt. In Abgrenzung zu bekannten Ergebnissen soll dieses Projekt den gesamten Lebenszyklus einer quantenresistenten PKI inklusive des produktiven Einsatzes der Zertifikate abdecken. Dabei sollen die oben genannten Anwendungsgebiete betrachtet und der Einsatz einer PQ-PKI in diesen untersucht werden. Zielsetzung der Robert Bosch GmbH bei diesem Vorhaben ist, die Anforderungen an die PQ-PKI aus dem Bereich Industrie 4.0 zu analysieren, die Ergebnisse der Analyse in die Entwicklung einer quantencomputerresistenten PKI einzubringen, sowie die entwickelten Konzepte an einem Demonstrator zu erproben. Da sich die Einsatzszenarien der PQ-PKI in Industrie 4.0 Anwendungen zum Teil stark unterscheiden und die Ressourcenbeschränkung bestimmter Geräte bei der Implementierung berücksichtigt werden muss, werden sowohl Lösungen basierend auf hybriden X.509 Zertifikaten betrachtet als auch Konzepte, die den Parallelbetrieb von konventionellen und PQ-PKIs ermöglichen. Die entworfene quantencomputerresistente PKI wird in einem Industrie 4.0 Demonstrator erprobt. In diesem Demonstrator werden mithilfe der PQ-PKI neben den notwendigen Erweiterungen standardisierter Protokolle auch eine quantenresistente Over-the-Air Update Methode konzipiert. Diese Konzepte werden unter anderem hinsichtlich ihrer Abwärtskompatibilität analysiert und evaluiert.</p>
<p>ESCRYPT GmbH</p>	<p>01.12.2019</p>	<p>30.11.2022</p>	<p>257.872</p>	<p>Verbundprojekt: Full Lifecycle Post-Quantum PKI - FLOQI - ; Teilvorhaben: Post-Quanten-Kryptografie, abwärtskompatible Post-Quantum-PKI</p>	<p>Ziel dieses Vorhabens ist es, eine abwärtskompatible, quantencomputerresistente PKI zu entwerfen. Dabei werden sowohl Lösungen betrachtet, die auf hybriden X.509 Zertifikaten basieren, als auch Lösungen, die den Parallelbetrieb von konventionellen und Post-Quantum-PKIs ermöglichen. In ihrem Teilvorhaben wird die ESCRYPT GmbH Arbeiten zu hybriden Verfahren mit Fokus auf ressourcenbeschränkte Embedded Systems durchführen. Hierzu werden klassische Verfahren bereitgestellt und hybride Verfahren konzeptuell entwickelt. ESCRYPT führt Risiko- und Sicherheitsanalysen durch, untersucht mögliche Seitenkanalangriffe und identifiziert Gegenmaßnahmen.</p>

Diebold Nixdorf Systems GmbH	01.12. 2019	30.11. 2022	223.656	Verbundprojekt: Full Lifecycle Post-Quantum PKI - FLOQI - ; Teilvorhaben: Anforderungsanalyse, Entwicklung und Erprobung der PQ-PKI in der Finanzinfrastruktur	Ziel dieses Vorhabens ist es, eine abwärtskompatible und Quantencomputer sichere Public-Key-Infrastruktur (PKI) zu entwerfen, bei der die kryptografischen Verfahren flexibel entsprechend der tatsächlichen und angenommenen Bedrohungen eingesetzt und ausgetauscht werden können. Dabei werden sowohl Lösungen betrachtet, die auf neuartigen, hybriden X.509 Zertifikaten basieren, bei denen kryptografische Algorithmen parallel in einer PKI verwendet werden, als auch Lösungen, bei denen mehrere PKIs - mit verschiedenen kryptografischen Algorithmen - parallel betrieben werden. Ziel dieses Vorhabens auf Seite des Anwendungspartners Diebold Nixdorf ist es, die Anforderungen an die Post-Quantum PKI (PQ-PKI) aus der Domäne der Finanzindustrie zu analysieren, die Ergebnisse der Analyse in die Entwicklung einer quantencomputerresistenten PKI und der entsprechenden Migrationskonzepte einzubringen, sowie die entwickelten Konzepte im Anwendungsbereich der Finanzinfrastruktur zu erproben. Weiterhin werden zusammen mit den Verbundpartnern die notwendigen quantencomputerresistenten kryptografischen Verfahren basierend auf den spezifizierten Anforderungen ausgewählt und gegebenenfalls erweitert. Da sich die Einsatzszenarien der PQ-PKI in der Finanzinfrastruktur zum Teil stark unterscheiden, werden sowohl Lösungen basierend auf hybriden X.509 Zertifikaten betrachtet als auch Konzepte, die den Parallelbetrieb von konventionellen und PQ-PKIs ermöglichen. Die entworfene PKI und die Migrationskonzepte werden in einem Finanzinfrastruktur-Demonstrator erprobt. In diesem Demonstrator werden die notwendigen Erweiterungen der standardisierten und der internen Protokolle auf verschiedenen Ebenen der Finanzinfrastruktur insbesondere im Hinblick auf die Abwärtskompatibilität analysiert und evaluiert.
BMW AG	01.12. 2019	30.11. 2022	108.457	Verbundprojekt: Full Lifecycle Post-Quantum PKI - FLOQI - ; Teilvorhaben: Integration and Evaluation of a Post- Quantum PKI into the BMW Ecosystem	Ziel des Teilvorhabens ist die Anforderungsspezifikation für eine abwärtskompatible, quantencomputerresistente Public Key Infrastruktur (PKI). Dabei werden sowohl Lösungen betrachtet, die auf hybriden X.509 Zertifikaten basieren als auch auf Lösungen, die den Parallelbetrieb von konventionellen und Post-Quantum PKIs ermöglichen. Bei der Auswahl der hierfür benötigten quantencomputersicheren kryptografischen Primitive spezifiziert BMW insbesondere die harten Einschränkungen der aktuellen und zukünftigen elektrischen-elektronischen (E/E) Architekturen und ihrer Use-Cases. Die von den Projektpartnern entworfenen und implementierten Konzepte werden von BMW in einem Demonstrator getestet und evaluiert. Basierend auf diesen Ergebnissen soll ein Migrationsplan für die BMW-interne Public Key Infrastruktur entwickelt werden.

D-Trust GmbH	01.12.2019	30.11.2022	381.293	Verbundprojekt: Full Lifecycle Post-Quantum PKI - FLOQI - ; Teilvorhaben: Nutzung agiler Kryptografie-Algorithmen bei einem Vertrauensdiensteanbieter nach eIDAS	Ziel dieses Vorhabens ist es, eine abwärtskompatible und Quantencomputer sichere PKI für die D-Trust zu entwerfen, bei der die kryptografischen Verfahren flexibel entsprechend der tatsächlichen und angenommenen Bedrohungen eingesetzt und ausgetauscht werden können. Dabei werden sowohl Lösungen betrachtet, die auf neuartigen, hybriden X.509 Zertifikaten basieren, bei denen kryptografische Algorithmen parallel in einer PKI verwendet werden, als auch Lösungen, bei denen mehrere PKIs - mit verschiedenen kryptografischen Algorithmen - parallel betrieben werden. Es wird untersucht, wie verschiedene quantenresistente kryptografische Algorithmen mit ihren besonderen Eigenschaften in die verschiedenen PKI-Lösungen passen. Weiter werden die spezifischen Anforderungen an die PKIs, die aus den verschiedenen Geschäftsfeldern der Verbundpartner erwachsen, wie Absicherung von Produktionsanlagen, Finanznetzwerken, Fahrzeug-Kommunikation und Hochsicherheitsanwendungen, berücksichtigt. Die entworfenen Konzepte werden von führenden Industriepartnern aus den Bereichen Automotive, Industrie 4.0 und Finanzinfrastruktur in Demonstratoren umgesetzt.
--------------	------------	------------	---------	--	---

Johannes Gutenberg-Universität Mainz	01.02.2020	31.01.2023	288.210	Verbundprojekt: Short-range optical Quantum Connections - ShoQC- ; Teilvorhaben: Optische Quantenverbindungen in lokalen Quantennetzwerken	Das Projekt untersucht Möglichkeiten heterogene quantentechnologische Geräte wie zum Beispiel und insbesondere Quantencomputer innerhalb eines lokalen Gebiets (eines Zimmers, eines Gebäudes, mehrerer Gebäude auf einem Campus, einer begrenzten Nachbarschaft) optisch zu verbinden. Die Quantenverbindungen müssen dabei ausreichend flexibel sein, um verschiedene physikalische Hardware-Plattformen zu verbinden und ein breites Spektrum von Quantenzuständen zuverlässig zu übertragen. Im Gegensatz zu den großen Distanzen (1000km und mehr), die mittels üblicher zukünftiger Quantenrepeater überbrückt werden, sind die relevanten Distanzen dieses Projekts eher kurz: ein paar Meter bis zu ein paar Dutzend Kilometer. Auch bei solch kurzen Distanzen kann sich die Qualität fragiler nicht-klassischer Zustände schnell verschlechtern. Insbesondere werden Fehler der Zustandsübertragung wichtig, die nicht primär von Transmissionsverlusten stammen, sondern durch Instabilitäten aufgrund thermischen Rauschens oder mechanischer Vibrationen in einem Gebäude verursacht werden. Die zuverlässige und effiziente Verbindung von Quantencomputern mittels eines breitbandigen lokalen Netzwerkes erfordert ein hohes Maß an Fehlertoleranz, sodass Methoden der Quantenfehlerkorrektur notwendig sein können. In diesem Teilvorhaben werden zunächst die fundamentalen Grenzen direkter Quantenverbindungen erforscht, die ohne aktive Quantenfehlerkorrektur mittels geeigneter quantenoptischer Modenkodierungen, Zustände und Kanäle erreichbar sind. Als zweiter Schritt wird die Möglichkeit verschränkungsbasierter Relays bzw. Repeater betrachtet. Drittens sollen kanaladaptierte Quantenfehlerkorrektur-Kodierungen einbezogen werden, die typische Fehler in realistischen kurzen Quantenverbindungen unterdrücken können. Das Projekt wird diese Ansätze vergleichen und versuchen den besten Kompromiss aus theoretischem Optimum und experimenteller Praxis zu finden.
--------------------------------------	------------	------------	---------	--	--

Max-Planck-Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften e.V.	01.02.2020	31.01.2023	207.637	Verbundprojekt: Short-range optical Quantum Connections – ShoQC- ; Teilvorhaben: Experimentelle Tests zu lokalen Quantennetzwerken	Das experimentelle Teilvorhaben untersucht Möglichkeiten heterogene quantentechnologische Geräte wie zum Beispiel und insbesondere Quantencomputer innerhalb eines lokalen Gebiets (eines Zimmers, eines Gebäudes, mehrerer Gebäude auf einem Campus, einer begrenzten Nachbarschaft) optisch zu verbinden. Die Quantenverbindungen müssen dabei ausreichend flexibel sein, um verschiedene physikalische Hardware-Plattformen zu verbinden und ein breites Spektrum von Quantenzuständen zuverlässig zu übertragen. Im Gegensatz zu den großen Distanzen (1000km und mehr), die mittels üblicher zukünftiger Quantenrepeater überbrückt werden, sind die relevanten Distanzen dieses Projekts eher kurz: ein paar Meter bis zu ein paar Dutzend Kilometer. Auch bei solch kurzen Distanzen kann sich die Qualität fragiler nicht-klassischer Zustände schnell verschlechtern. In dem experimentellen Teilvorhaben werden in enger Abstimmung mit den Partnern neuartige Quantenfehlerkorrekturverfahren und gegenüber Fehlern robuste Quantenzustände in solchen kurzen Strecken untersucht. Der Fokus liegt dabei auf möglichst realistischen Tests in Freiraumstrecken und Glasfaserverbindungen. Dabei werden zunächst verschiedene Kommunikationsstrecken bzgl. der Übertragung von Quantenzuständen charakterisiert. An einer Freiraumstrecke werden einfache Verfahren zur Nutzung von Quantenzuständen getestet, die gegenüber typisch auftretender Fehler weniger anfällig sind. In enger Abstimmung mit europäischen Partnern wird daran gearbeitet in einem zweiten Schritt Verfahren für verschränkungs-basierte Relays zu entwickeln. In einem dritten Schritt werden kanaladaptierte Quantenfehlerkorrektur-Kodierungen einbezogen, die typische Fehler in realistischen kurzen Quantenverbindungen unterdrücken können. Die verschiedenen Vorgehensweisen werden bzgl. ihrer Effizienz aber auch ihres technischen Aufwandes und der Umsetzbarkeit unter realistischen Bedingungen evaluiert.
---	------------	------------	---------	--	--

Universität Paderborn	01.03.2020	28.02.2023	226.548	<p>Verbundprojekt: Quanteninformation und Quantenkommunikation mit hochdimensionaler Informationskodierung – QuICHE -; Teilvorhaben: Hochdimensionalität durch Pulsmoden</p>	<p>Der QuICHE-Verbund plant, anhand von optischen Plattformen die Vorteile von neuartigen hochdimensionalen Quantenkodierungen zu zeigen. Im Gegensatz zu klassischen Anwendungen, die auf bits basieren welche entweder "0" oder "1" sind, basieren Quantenanwendungen auf sogenannten Qubits, die gleichzeitig "0" und "1" sein können. Dies führt zu einer signifikanten Leistungssteigerung. QuICHE geht hier noch einen Schritt weiter und untersucht Möglichkeiten, Informationen in hochdimensionalen Alphabeten (quasi "0", "1", "2", "3") zu kodieren. Im Kontext der Quantenkommunikation erhöht dies die Sicherheit echter Anwendungen und ermöglicht gleichzeitig höhere Datenraten. Als Buchstaben des Alphabets werden hier sogenannte Pulsmoden gewählt, welche durch die komplexe zeitliche Form von gepulsten Einzelphotonenzuständen definiert sind. Diese erlauben nicht nur eine hohe Packungsdichte im Zeit-Frequenz-Raum, sondern eignen sich auch ideal für eine Übertragung durch Glasfasern. In diesem Teilvorhaben sollen innovative Technologien für Multi-User Quantenkommunikation mit hochdimensionaler Informationskodierung entwickelt werden. Konkret handelt es sich dabei um neuartige Quellen für hochkomplexe, verschränkte Quantenzustände sowie Detektoren, welche die Information zuverlässig auslesen können. Zusammen mit den Theoriepartnern werden maßgeschneiderte Kommunikationsprotokolle erarbeitet, welche die oben erwähnten Vorteile optimal umsetzen. Letztlich soll die hochdimensionale Quantenkommunikation demonstriert werden, die größere Datenraten und eine höhere Sicherheit hat als binäre Ansätze.</p>
Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf	01.03.2020	28.02.2023	276.858	<p>Verbundprojekt: Quanteninformation und Quantenkommunikation mit hochdimensionaler Informationskodierung – QuICHE -; Teilvorhaben: Quantenprotokolle mit höherdimensionaler Kodierung</p>	<p>Der QuICHE-Verbund plant anhand von optischen Plattformen Vorteile von neuartigen hochdimensionalen Quantenkodierungen zu zeigen. In diesem theoretischen Teilvorhaben sollen Quanteninformationskonzepte für hochdimensionale Quantenzustände entwickelt werden. Insbesondere gehören dazu Methoden für den Verschränkungsnachweis, Verletzung von Bell-Ungleichungen, Zufallszahlenerzeugung, Eigenschaften von Steering und Sicherheitsanalysen von hochdimensionaler Quantenschlüsselverteilung. Es soll jeweils ein möglicher Vorteil von höheren Dimensionen gegenüber Qubits untersucht werden. Insbesondere sollen diese Methoden mit den konkreten experimentellen Plattformen koordiniert werden.</p>

Konsortium: StoneOne AG, TU Stuttgart, Accenture GmbH, Bundes- druckerei GmbH (BDr), DB Systel GmbH, d-fine GmbH, Frankfurt Consulting Engineers GmbH (FCE), Fraunhofer FOKUS, Freie Universität Berlin, QS Quantum Simulations GmbH, LMU München, Planerio GmbH, regio iT, Deutsche Telekom AG, TRUMPF GmbH + Co. KG	01.01. 2020	31.12. 2022	10.207.000	Projekt PlanQK – Plattform und Ökosystem für quantengestützte Künstlich Intelligenz	Ziel: Erschließung der Anwendungspotenziale von Quantencomputing insbesondere für die mittelständische Wirtschaft und Schaffung einfacher Zugangsmöglichkeiten zu Expertise, Algorithmen und Quantenrechnern. Grundlegend ist die Idee eines App- Stores für Quantencomputing. PlanQK ist derzeit das größte Community bildende Vorhaben in D, das die Software- und Anwenderseite beim Quantencomputing abbildet.
--	----------------	----------------	------------	---	--

Anmerkung: Alle Beträge in Euro.

