

# B 2 Quantentechnologien



[Download der  
Abbildung](#)





# B 2 Quantentechnologien

Viele Spitzentechnologien wie Computerprozessoren, Laser oder Satellitennavigation basieren auf dem Verständnis quantenphysikalischer Phänomene. Neue Entwicklungen in der Physik ermöglichen mittlerweile die gezielte Kontrolle von Quantensystemen, um Quanteneffekte für innovative Lösungen in bestehenden Anwendungsfeldern zu nutzen, bisher unlösbare technische Probleme anzugehen sowie neue Anwendungsfelder zu erschließen.

Neue Quantentechnologien bergen enorme Innovationspotenziale. So verspricht Quantencomputing eine deutliche Steigerung der Rechenleistung. Die Quantensensorik verbessert die Empfindlichkeit und Präzision von Messtechniken und bildgebenden Verfahren erheblich. Zugleich sind diese Technologien mit sicherheitspolitischen Herausforderungen verbunden, da sie die IT- und Datensicherheit gefährden. Der Schutz vor Cyberangriffen erfordert daher die Entwicklung neuer, langfristig sicherer Verschlüsselungstechnologien. Die Quantenkommunikation bietet hier vielversprechende Möglichkeiten.

Viele dieser neuen Technologien stehen noch am Anfang der Entwicklung, was deutschen Akteuren in Forschung und Innovation (F&I) die Möglichkeit bietet, sowohl an dieser Entwicklung als auch an der Gestaltung zukünftiger Anwendungsfelder aktiv mitzuwirken. Deutschland befindet sich hierbei in einer starken Ausgangsposition, die es im Verbund mit den EU-Partnern zu sichern gilt, um insbesondere gegenüber den USA und China wettbewerbsfähig zu bleiben. Die Bundesregierung spielt hierbei eine zentrale Rolle, indem sie Forschung und Entwicklung (FuE) gezielt fördert, geeignete Rahmenbedingungen für eine langfristig angelegte Zusam-

menarbeit zwischen Wissenschaft und Wirtschaft ermöglicht und perspektivisch – mittels innovationsorientierter Beschaffung – staatliche Nachfrage nach dem Output aus dieser Zusammenarbeit schafft. Der Aufbau eines F&I-Ökosystems sollte dabei konsequent europäisch gedacht werden. Auf nationaler Ebene sollten die bestehenden regionalen Cluster ausgebaut und miteinander vernetzt sowie in eine nationale Strategie integriert werden.

## B2-1 Von der Quantenmechanik zu Quantentechnologien

Vor 125 Jahren legten u. a. deutsche Wissenschaftler den Grundstein für ein neues Verständnis physikalischer Phänomene, indem sie die theoretische Basis für die Quantenphysik schufen.<sup>241</sup> Deutsche Forschungseinrichtungen spielen weiterhin eine starke Rolle in der globalen Quantenforschung – sowohl in der Grundlagenphysik als auch in der anwendungsorientierten FuE.<sup>242</sup>

Die Quantenphysik untersucht die Eigenschaften und Verhaltensweisen von Materie und betrachtet dabei auch Phänomene auf der kleinsten physikalischen Ebene, dem sogenannten „Nanokosmos“.<sup>243</sup> Eine zentrale Theorie in der Quantenphysik ist die Quantenmechanik, die durch zahlreiche präzise Messungen bestätigt wurde (vgl. Box B 2-1).

### Innovationspotenzial neuer Quantentechnologien hoch

Viele der neuen Quantentechnologien befinden sich in einer frühen Entwicklungsphase und sind weit von der Marktreife und einer breiteren Nut-

### Box B 2-1 Besonderheiten der Quantenmechanik

Die Quantenmechanik basiert darauf, dass bei sogenannten **Quantensystemen** (z.B. einem Atom) maßgebliche Veränderungen dadurch ausgelöst werden, dass **Quantenobjekte** (einzelne Bestandteile des Systems wie etwa ein Elektron) durch die Einwirkung eines von außen zugefügten Teilchens (z.B. eines Photons, eines „Lichtteilchens“) ihren Zustand ändern.

Die Quantenmechanik beruht auf den folgenden Prinzipien, die auch für die Funktionsweise von Quantentechnologien zentral sind:<sup>244</sup>

- **Superposition:** In der Quantenphysik bezeichnet Superposition die Überlagerung mehrerer Quantenzustände. Das bedeutet, dass ein Quantensystem sich ohne Fremdeinwirkung zunächst nicht in einem klar definierten Zustand befindet, sondern mehrere mögliche

Zustände gleichzeitig einnimmt und Ergebnisse von physikalischen Vorgängen immer nur in Form einer Wahrscheinlichkeit prognostiziert werden können.<sup>245</sup>

- **Dekohärenz:** Überlagerungszustände eines Quantenobjekts existieren nur bei vollständiger Isolation von der Umgebung. Bereits kleinste Umwelteinflüsse führen zur Auflösung der Überlagerung und damit zur Realisierung eines bestimmten Zustandes. Umwelteinflüsse sind jedoch bei jeder Art von Messung unvermeidbar.
- **Verschränkung:** Die Verschränkung erzeugt sogenannte „Quantenkorrelationen“ zwischen Teilchen. Sobald der Zustand eines von zwei verschränkten Quantenobjekten in geeigneter Weise gemessen und damit bestimmt ist, ist auch der Zustand des anderen bestimmt, selbst wenn sie weit voneinander entfernt sind.

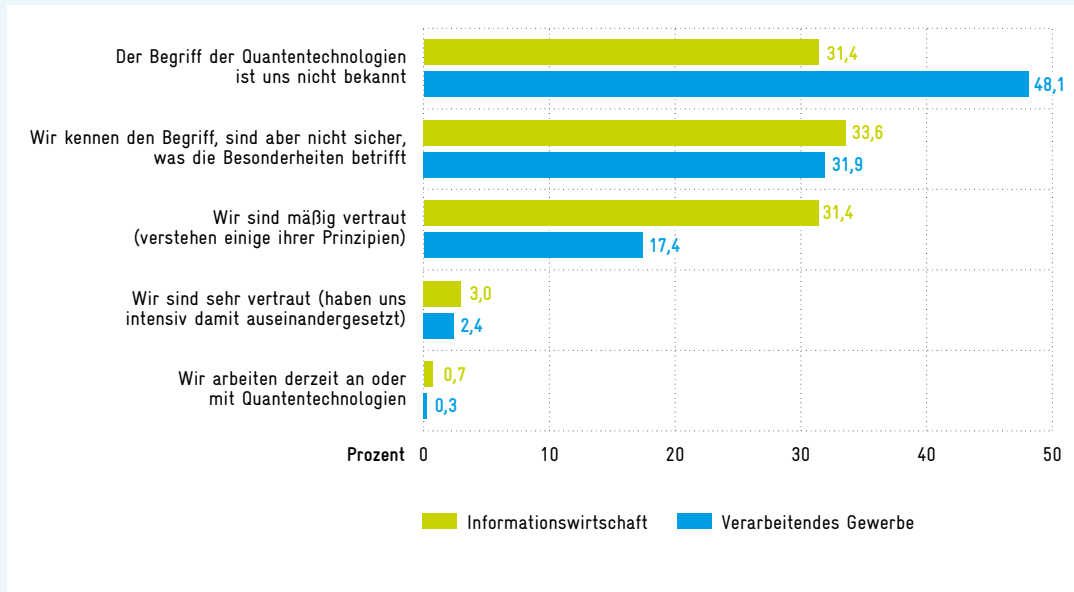
zung entfernt. Diese Einschätzung wird von einer im Auftrag der Expertenkommission durchgeführten repräsentativen Umfrage unterstützt. So geben lediglich etwa 4 Prozent der Unternehmen in der Informationswirtschaft und 3 Prozent im Verarbeitenden Gewerbe an, sich intensiv mit Quantentechnologien auseinandergesetzt zu haben oder derzeit an oder mit ihnen zu arbeiten (vgl. Abbildung B 2-2). Ähnlich gering ist der Anteil der Unternehmen, die in den nächsten fünf Jahren in diesen Bereich investieren wollen. In einer weiteren Frage an die Unternehmensvertreterinnen und -vertreter, denen Quantentechnologien bereits bekannt sind, gaben rund 6 Prozent in der Informationswirtschaft und 4 Prozent im Verarbeitenden Gewerbe an, derzeit oder in den nächsten fünf Jahren in Quantentechnologien investieren zu wollen.

Quantentechnologien zeichnen sich durch ein hohes Potenzial für Leistungssteigerungen aus. Zudem ist davon auszugehen, dass sie in vielen Branchen und im Verbund mit anderen Technologien zur Anwendung kommen und dadurch neue Innovationspotenziale eröffnen. Überschlagsrechnungen zufolge könnten Quantentechnologien bis 2035 allein in den Bereichen Chemie, Biowissenschaften, Finanz-

wesen und Automobilindustrie bis zu zwei Billionen US-Dollar an Wertschöpfung generieren.<sup>246</sup> Da diese Potenziale erst noch realisiert werden müssen, zählen Quantentechnologien zu den sogenannten zukünftigen Schlüsseltechnologien.<sup>247</sup>

Grundsätzlich lassen sich innerhalb der Quantentechnologien drei Technologiefelder unterscheiden, die im Folgenden näher vorgestellt werden: das Quantencomputing, die Quantenkommunikation und die Quantensensorik. Als Indikator der künftigen Relevanz dieser Technologiefelder für die Anwendung in der Wirtschaft lassen sich die transnationalen Patentanmeldungen heranziehen, die als messbare Ergebnisse von FuE-Prozessen gelten. Bei allen drei Technologiefeldern zeigen die transnationalen Patentanmeldungen eine hohe Dynamik. So hat sich im Quantencomputing die Zahl der Patente zwischen 2012 und 2021 bei niedrigen Ausgangswerten fast vervierzigfacht (vgl. Abbildung B 2-3). Auch in den Technologiefeldern Quantenkommunikation sowie Quantensensorik ist im vergangenen Jahrzehnt ein deutliches Wachstum der Zahl transnationaler Patentanmeldungen zu verzeichnen.<sup>248</sup>

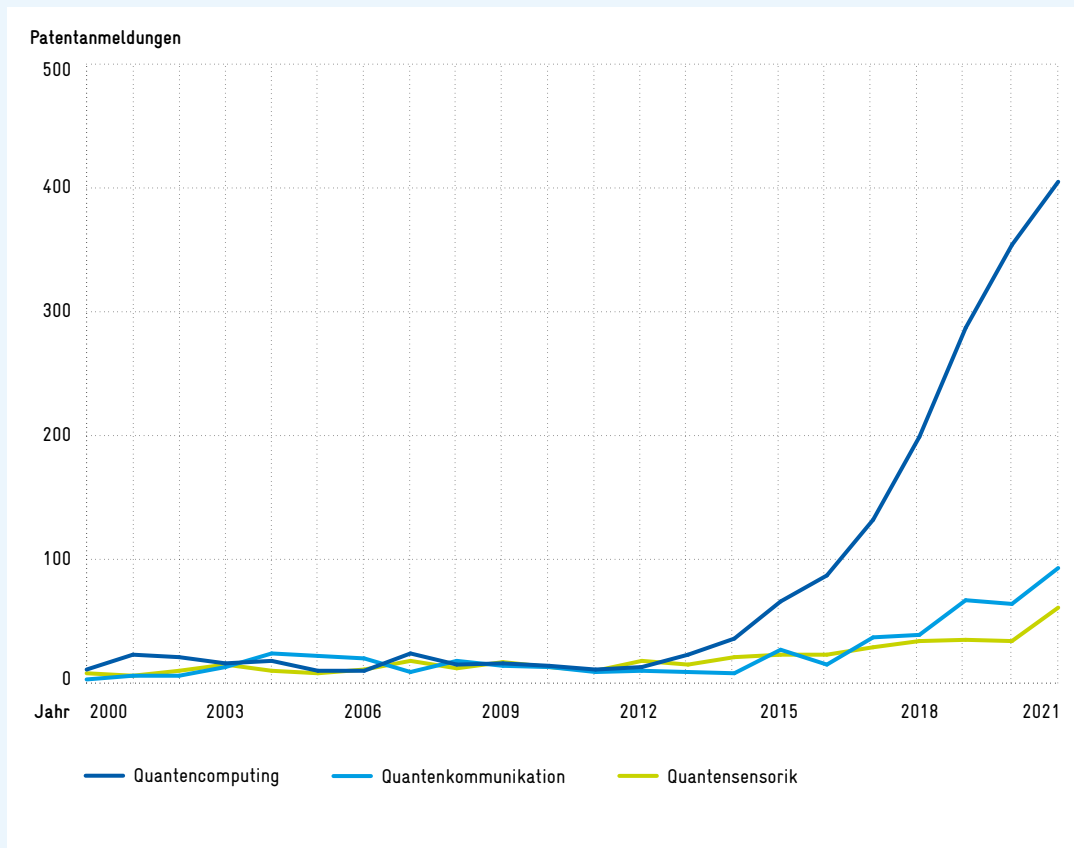
**Abb. B2-2 Bekanntheit von Quantentechnologien in Unternehmen in Deutschland 2024 in Prozent**



Lesebeispiel: In der Informationswirtschaft gaben 0,7 Prozent der Unternehmen an, dass sie derzeit an oder mit Quantentechnologien arbeiten.  
Quelle: ZEW Konjunkturumfrage Informationswirtschaft 3. Quartal 2024.  
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

[Download der Abbildung und Daten](#)

**Abb. B2-3 Transnationale Patentanmeldungen nach Technologiefeld weltweit 2000–2021**



Lesebeispiel: Im Jahr 2021 wurden weltweit 405 Patente im Bereich Quantencomputing angemeldet.  
Quelle: PATSTAT, eigene Berechnungen.  
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

[Download der Abbildung und Daten](#)

## B2-2 Quantencomputing

Klassische Computer haben in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte in Miniaturisierung und Rechenleistung erzielt, stoßen jedoch zunehmend an physikalische Grenzen. Das Quantencomputing macht sich nun Quantenphänomene aktiv zunutze. Dies könnte die Lösung für hochkomplexe Optimierungsprobleme in Bereichen wie Logistik, Pharmazie, Kapitalmärkte, Umwelt, Gesundheit, Ernährung, neue Materialien und Energie erheblich beschleunigen oder erstmals überhaupt ermöglichen.<sup>249</sup> Zudem könnten Quantencomputer durch die effiziente Verarbeitung großer Datenmengen Schlüsseltechnologien wie etwa die künstliche Intelligenz voranbringen.<sup>250</sup>

### Quantencomputer und hybride Systeme: Leistungspotenzial immens

Quantencomputer können dank ihrer speziellen Eigenschaften viele Rechenoperationen gleichzeitig durchführen (vgl. Box B2-4). Dadurch sind sie potenziell in der Lage, komplexe Berechnungen, die für klassische Computer unlösbar oder extrem zeitaufwändig wären, in kurzer Zeit zu bewältigen.<sup>251</sup> Beispiele hierfür sind die Faktorisierung großer Zahlen, die Simulation komplexer Systeme oder die Optimierung von Prozessen. Ein messbarer Zeitvorteil gegenüber klassischen Hochleistungscomputern wird als „Quantenvorteil“ bezeichnet und konnte bereits im Kontext sehr spezieller Berechnungen nachgewiesen werden.<sup>252</sup> Perspektivisch können Quantencomputer auch in hybrider Form mit klassischen Computern zusammenarbeiten. Dabei wird bei der Lösung eines Problems zwischen den für die jeweilige Phase und das konkrete Problem am besten geeigneten Methoden gewechselt.

Die Grundlage von Quantencomputern sind Quantenbits (Qubits, vgl. Box B2-4), die auf verschiedenen sogenannten Hardware-Plattformen basieren.<sup>253</sup> Ziel dieser Hardware-Plattformen ist es, möglichst viele Qubits präzise zu kontrollieren und für Berechnungen einzusetzen. Derzeit haben die Plattformen allerdings unterschiedliche Entwicklungsstände und eine dominante technologische Lösung hat sich noch nicht etabliert – ein typisches Merkmal neuer Technologien.<sup>254</sup> Abhängig vom Anwendungsbereich könnten sich zukünftig unterschiedliche Plattformen als besonders geeignet erweisen. Zu den größten Herausforderungen gehören die begrenzte Anzahl realisierbarer Qubits

und ihre hohe Empfindlichkeit gegenüber Störungen, die Berechnungen verfälschen können. So sind beispielsweise aktuelle NISQ-Quantencomputer (Noise Intermediate-Scale Quantum) zwar in der Lage, viele Qubits zu realisieren, allerdings ist die Fehleranfälligkeit noch nicht hinreichend gering, um Berechnungen zuverlässig durchführen zu können.<sup>255</sup>

Derzeit laufen verschiedene Forschungsaktivitäten im Bereich des Quantencomputing parallel, mit unterschiedlichen Schwerpunkten und hohem Wertschöpfungspotenzial. Sie verfolgen das Ziel, besonders leistungsfähige, kompakte oder mit existierenden Systemen kompatible Quantencomputer zu entwickeln. Hierzu zählen Projekte zur Maximierung der Rechenleistung für Anwendungen in verschiedenen Branchen<sup>256</sup>, zur mobilen Nutzung von Quantencomputern<sup>257</sup> oder zur Integration in bestehende Rechenzentren und Supercomputer.<sup>258</sup>

Angesichts der hohen technischen Anforderungen an Bau und Betrieb wird Quantencomputing derzeit als Rechenzentrumstechnologie oder Hochleistungsrechnen kategorisiert.<sup>259</sup> Bereits heute werden lokale oder cloudbasierte Zugangsmöglichkeiten als Dienstleistung angeboten, um prototypische Anwendungen zu testen. Derzeit sind diese Anwendungen jedoch auf die Lösung spezifischer Optimierungsprobleme beschränkt.<sup>260</sup> Ein universeller Quantencomputer, der eine Vielzahl unterschiedlicher Probleme löst, bleibt laut Expertinnen und Experten ein langfristiges Ziel.<sup>261</sup> Ob Quantencomputer perspektivisch nur in Rechenzentren eingesetzt werden oder ob sich, ähnlich wie in der klassischen Computerindustrie, eine Entwicklung hin zu einem breiten Angebot an Geräten für den Einsatz in Unternehmen und Privathaushalten vollziehen wird, ist derzeit noch nicht absehbar.

Ein Risiko des Quantencomputing besteht darin, dass es voraussichtlich erhebliche Auswirkungen auf die Datensicherheit haben wird. Während klassische Verschlüsselungsverfahren derzeit als sicher gelten, könnten Quantencomputer diese in Zukunft brechen und damit neue Herausforderungen für die sichere Kommunikation schaffen (vgl. Unterkapitel B2-3).

### USA von China beim Quantencomputing eingeholt

Die Ergebnisse einer von der Expertenkommission beauftragten Studie zeigen, dass chinesische

## Box B 2-4 Verarbeitung von Informationen in klassischen Computern und Quantencomputern

### Klassische Computer

Klassische Computer speichern und verarbeiten Informationen in Form von Nullen und Einsen, den sogenannten Bits. Vereinfacht ausgedrückt entspricht ein Bit den Zuständen „Strom aus“ (0) oder „Strom an“ (1). Zur Darstellung komplexer Informationen werden mehrere Bits zusammengefasst, z.B. zu einem Byte (8 Bits), das 256 Zustände nacheinander darstellen kann. Die Verarbeitung erfolgt durch Transistoren, die in der zentralen Prozesseinheit (Central Processing Unit – CPU) – dem „Gehirn“ des Systems – angeordnet sind. Moderne CPUs mit Milliarden von Transistoren arbeiten in der Regel mit 32- oder 64-Bit-Systemen und führen Milliarden von

Rechenoperationen pro Sekunde durch. Doch selbst Supercomputer stoßen bei hochkomplexen Berechnungen an ihre Grenzen.

### Quantencomputer

Quantencomputer speichern Informationen in Quantenbits (Qubits), die die Zustände 0 und 1 gleichzeitig annehmen können (sogenannte Superposition, vgl. Box B 2-1). Die Qubits können ein gemeinsames System bilden und ermöglichen dadurch parallele Rechenoperationen. Mit jedem zusätzlichen Qubit verdoppelt sich die Anzahl der möglichen Zustände des Gesamtsystems, sodass die Anzahl der darstellbaren Zustände exponentiell mit der Anzahl der Qubits wächst. Allerdings sind Quantencomputer derzeit noch sehr stör anfällig. Für jedes Qubit, das die Rechenleistung erbringt, werden zahlreiche weitere Qubits zur Fehlerkorrektur benötigt.

Einrichtungen seit Beginn der 2000er Jahre eine zunehmend bedeutende Rolle in der Forschung zu Quantencomputing einnehmen.<sup>262</sup> Während zu Beginn der 2000er Jahre etwa 85 Prozent der globalen Publikationen unter US-amerikanischer oder europäischer Beteiligung entstanden sind, hat China diese beiden Spitzenreiter mittlerweile überholt (vgl. Abbildung B 2-5).<sup>263</sup> Der Anteil von Publikationen mit deutscher Beteiligung ist im Zeitverlauf mit 11 bis 16 Prozent relativ konstant geblieben. Trotz der vorderen Positionierung Deutschlands findet sich keine Forschungseinrichtung aus Deutschland unter den Forschungseinrichtungen mit den weltweit meisten Publikationen im Bereich Quantencomputing. Unter den Top 10 befinden sich ausschließlich Institutionen in China, dem Vereinigten Königreich, den USA, Kanada und der Schweiz. Das Max-Planck-Institut für Quantenoptik belegt als beste deutsche Forschungseinrichtung Rang 17. Diese relativ schlechte Platzierung ist möglicherweise eine Folge davon, dass Forschung in Deutschland dezentraler organisiert ist als in anderen Ländern.

Bei den Patentanmeldungen der vergangenen zwei Jahrzehnte nehmen US-amerikanische Organisationen eine dominante Position ein.<sup>264</sup> Von den weltweit insgesamt 1.791 registrierten transnationalen Patentanmeldungen im Bereich Quantencomputing entfällt knapp die Hälfte auf die USA (870), gefolgt

von der Europäischen Union (EU) (282, darunter Deutschland mit 71), China (159), Kanada (118) und Japan (104) (vgl. Abbildung B 2-5). Führend bei den transnationalen Patentanmeldungen sind die Unternehmen IBM, Microsoft und Google mit Hauptsitz in den USA und D-Wave Systems mit Hauptsitz in Kanada.

Über eine ergänzende Analyse von Unternehmensdatenbanken konnten weltweit 473 Unternehmen identifiziert werden, die beabsichtigen, Quantencomputing zu kommerzialisieren.<sup>265</sup> Sie verteilen sich folgendermaßen auf die verschiedenen Regionen und Länder: Wie bei der Patentanalyse sind Unternehmen aus den USA mit 36 Prozent stark vertreten. Aus China und Deutschland stammen jeweils 7 Prozent und aus der EU insgesamt 19 Prozent der Unternehmen (vgl. Abbildung B 2-5). Unter den identifizierten Unternehmen befinden sich 131 Start-ups.<sup>266</sup> Auch in dieser Gruppe bilden Unternehmen aus den USA den größten Anteil (29 Prozent).

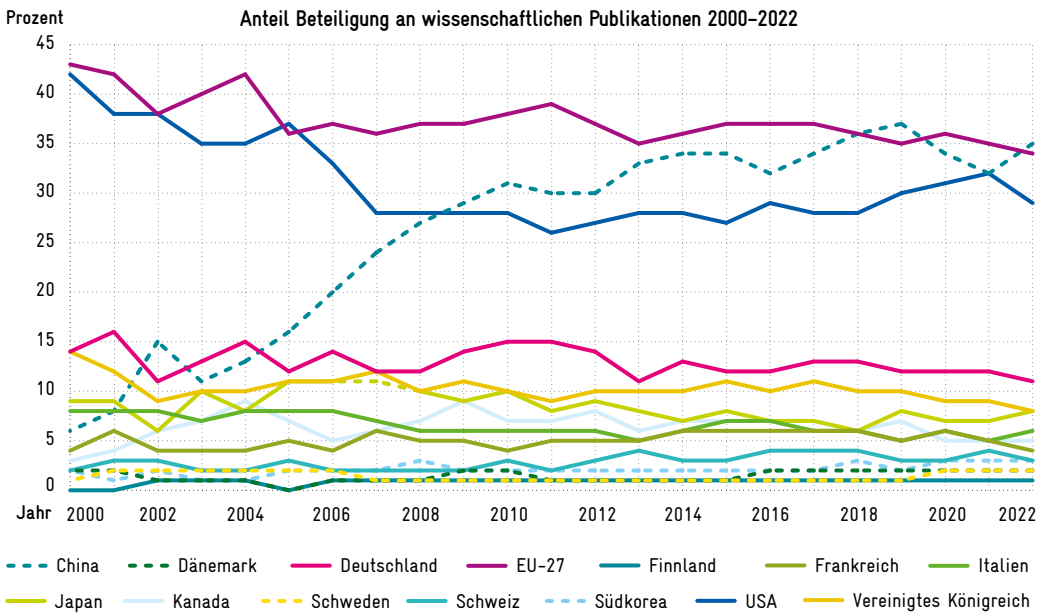
## B 2-3 Quantenkommunikation

Sensible Daten können durch Verschlüsselung abhörsicher übertragen und gespeichert werden. Aktuelle Verschlüsselungstechniken basieren auf mathematischen Algorithmen, deren Entschlüsselung für leistungsstarke Computer zeitaufwändig,

**Abb. B 2-5 Wissenschaftliche Publikationen, transnationale Patentanmeldungen und aktive Unternehmen im Bereich Quantencomputing**

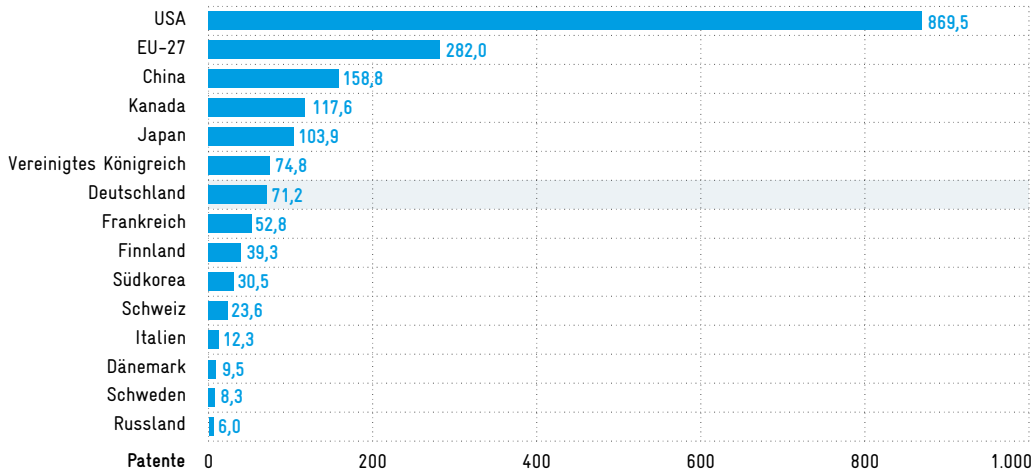


[Download der Abbildung und Daten](#)



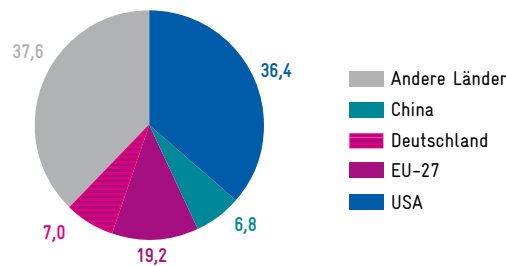
Lesebeispiel: Etwa 12 Prozent der im Jahr 2020 veröffentlichten wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Quantencomputing entstanden unter Beteiligung von Autorinnen und Autoren mit einer deutschen Organisationszugehörigkeit.  
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025).

**Anzahl transnationaler Patentanmeldungen 2000-2021**



Lesebeispiel: Im Zeitraum 2000-2021 entfielen 71 transnationale Patentanmeldungen im Bereich Quantencomputing auf Erfinderrinnen und Erfinder aus Deutschland.  
Quelle: PATSTAT, eigene Berechnungen. Fraktionierte Zählweise.

**Anteil aktiver Unternehmen mit ausgewiesenem Fokus auf Quantencomputing im Jahr 2024**



Lesebeispiel: Im Jahr 2024 waren 19,2 Prozent der identifizierten Unternehmen mit ausgewiesenem Fokus auf Quantencomputing in der EU ansässig.  
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025).  
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.



aber prinzipiell möglich ist. Mit der Entwicklung von Quantencomputern könnte sich die Dynamik im Wettrennen zwischen modernen Methoden zur Verschlüsselung und Abhörtechnik ändern, da Quantencomputer herkömmliche Verschlüsselungsmethoden in kurzer Zeit brechen können.<sup>267</sup>

Aus diesem Grund wird daran gearbeitet, klassische kryptografische Verfahren „quantensicher“ zu machen, indem mathematische Probleme zur Verschlüsselung verwendet werden, die selbst für Quantencomputer schwer zu lösen sind.<sup>268</sup> Die Sicherheit solcher Verfahren hängt allerdings davon ab, dass auch zukünftige Algorithmen oder mathematische Durchbrüche diese Probleme nicht effizient lösen können. Die Quantenkommunikation nutzt für die Verschlüsselung quantenmechanische Prinzipien, sodass die Sicherheit als unabhängig von zukünftigen technologischen Entwicklungen gilt. Sie ermöglicht dadurch die abhörsichere Übertragung von Nachrichten mithilfe der sogenannten Quantenschlüsselverteilung (vgl. Box B2-6).

**Quantenkommunikation für künftige Sicherheitsarchitekturen hochrelevant**

Die potenzielle Fähigkeit von Quantencomputern, klassische kryptografische Verfahren zu entschlüsseln, kann Quantenkommunikation zu einem unverzichtbaren Element moderner Sicherheitsarchitekturen machen. Die Sicherheitsmerkmale

der Quantenkommunikation bieten langfristigen Schutz für Daten und Nachrichtenübermittlung, insbesondere in sicherheitskritischen Bereichen wie politischer und militärischer Kommunikation sowie der Absicherung kritischer Infrastrukturen. Derzeit wird die Nachfrage daher vor allem von staatlichen Akteuren geprägt. Langfristig kann die Quantenkommunikation den Aufbau eines „Quantennetzwerks“ aus Quantencomputern und -sensoren ermöglichen.<sup>269</sup>

Obwohl erste Verfahren der Quantenkommunikation bereits kommerziell verfügbar sind, bestehen noch große Herausforderungen. So ist die Informationsübertragung<sup>270</sup> empfindlich gegenüber Umwelteinflüssen, wodurch die Reichweite in bestehenden Glasfasernetzen derzeit lokal begrenzt ist.<sup>271</sup> Zudem erfordern der Ausbau der Infrastruktur und die Miniaturisierung von Hardware erhebliche Investitionen.

**China und USA in der Quantenkommunikation führend**

China und die USA haben bereits in den 1990er Jahren große Summen in FuE im Bereich der Quantenkommunikation investiert und wichtige Pionierarbeit geleistet. In der Folge hat die Beteiligung chinesischer Forschungseinrichtungen an wissenschaftlichen Publikationen seit den frühen 2000er Jahren erheblich zugenommen. Am aktuel-

**Box B2-6 Quantenmechanik in der Kommunikation: Quantentechnologien nutzen, um vor Quantentechnologien zu schützen**

Die Quantenschlüsselverteilung (Quantum Key Distribution – QKD) ist eine Methode zur Sicherung von Kommunikationskanälen. Dabei wird der Schlüssel zum Ver- und Entschlüsseln der Nachricht in Quantenzuständen kodiert und über eigens dafür eingerichtete Kommunikationskanäle ausgetauscht. Die eigentliche Nachricht kann über klassische Kommunikationswege übertragen werden. Eine anschauliche Metapher für QKD ist der Austausch eines Aktenkoffers mit sensiblen Informationen zwischen zwei Diplomatinen, dessen Inhalt zerstört würde, falls eine unautorisierte

Person versucht, auf die Dokumente zuzugreifen. Im Gegensatz zu traditionellen kryptografischen Verfahren, die mathematische Algorithmen zur Schlüsselgenerierung nutzen, beruht QKD auf Prinzipien der Quantenmechanik (vgl. Box B2-1). Ein zentrales Konzept hierbei ist die Superposition zwischen zwei Zuständen. Sie ändert sich messbar, sobald versucht wird, die Information über den Zustand des Quantensystems während der Übertragung zwischen Sender und Empfänger abzufangen. Dieses Prinzip macht QKD zu einer physikalisch sicheren Methode für den Informationsaustausch. Die tatsächliche Sicherheit hängt jedoch immer von der konkreten Hardware-Implementierung ab. Daher wird an der Entwicklung von Standardtests zur Bewertung von QKD-Hardware gearbeitet.

len Rand sind Autorinnen und Autoren mit chinesischer Organisationszugehörigkeit an einem deutlich größeren Anteil neuer Publikationen beteiligt als ihre Kolleginnen und Kollegen mit EU- oder US-amerikanischer Organisationszugehörigkeit (vgl. Abbildung B 2-7). Der Anteil von Publikationen mit deutscher Beteiligung ist im Zeitverlauf mit 7 bis 13 Prozent relativ konstant geblieben. Die Rolle Chinas im Bereich Quantenkommunikation wird bei der Betrachtung der Forschungseinrichtungen mit der weltweit höchsten Anzahl an Publikationen unterstrichen. Von den Top-10-Forschungseinrichtungen stammen sieben aus China, die übrigen aus den USA, der Schweiz und Kanada.<sup>272</sup>

Bei den transnationalen Patentanmeldungen der letzten zwei Jahrzehnte nehmen US-amerikanische Organisationen eine führende Position ein. Von den weltweit insgesamt 526 transnationalen Patentanmeldungen zwischen 2000 und 2021 entfallen 135 auf die USA. Darauf folgen China (98), die EU (94, davon 40 aus Deutschland), Vereinigtes Königreich (45) und Japan (38).<sup>273</sup> Eine Analyse von Unternehmensdatenbanken identifizierte weltweit 86 Unternehmen, die beabsichtigen, Quantenkommunikation zu kommerzialisieren, darunter 17 Start-ups. Über die Hälfte dieser Unternehmen stammt aus China (43 Prozent) und den USA (16 Prozent). Der Anteil der EU liegt hingegen bei nur 11 Prozent, davon 2 Prozentpunkte aus Deutschland.

## B 2-4 Quantensensorik

Technologien im Bereich Quantensensorik nutzen zur Messung physikalischer Größen die hohe Empfindlichkeit von Quantensystemen gegenüber Einflüssen aus ihrer direkten Umgebung (vgl. Box B 2-1).<sup>274</sup> So können Umgebungsvariablen wie elektrische und magnetische Felder, Temperatur, Druck oder Beschleunigung in einer bisher unerreichbaren Präzision bestimmt werden. Während einige auf Quanteneffekten beruhende Sensortechnologien bereits fest in verschiedenen Märkten etabliert und aus dem Alltag kaum noch wegzudenken sind, befinden sich neue Quantentechnologien, die eine nochmals höhere Messpräzision ermöglichen, häufig noch in einer frühen Entwicklungsphase.

Unter den heute etablierten Technologien der Quantensensorik sind Magnetfeldsensoren, gemessen am Marktvolumen, besonders relevant. Sie spielen eine wichtige Rolle in der medizinischen Diag-

nostik, etwa bei der Messung feiner magnetischer Felder des Herzens oder Gehirns durch Magnetresonanztomografen (MRT). In Form von Atomuhren, die präzise Zeitsignale zur Positionsbestimmung senden, liefert die Quantensensorik darüber hinaus den Grundstein für die heutige satellitengestützte Navigation (z. B. GPS). Zudem kommen quantenbasierte Technologien in der Halbleiterproduktion zum Einsatz.

### Messen mit hoher Präzision durch neuartige Quantensensoren möglich

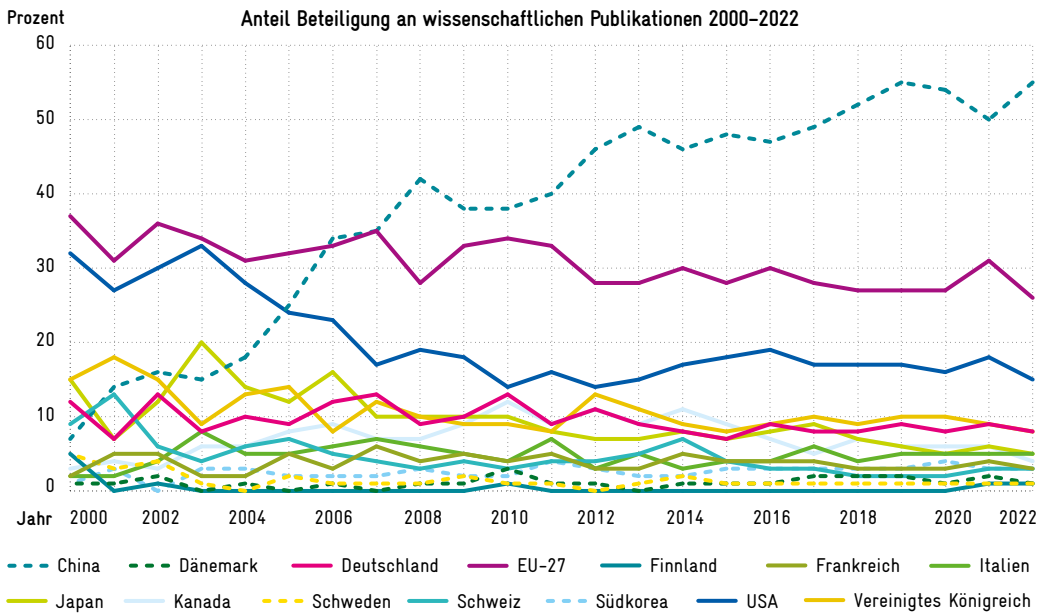
Insbesondere in Anwendungsfeldern mit sehr hohen Präzisionsanforderungen können neuartige Quantensensoren eine zunehmend bedeutende Rolle einnehmen. So lassen sich beispielsweise die Einsatzmöglichkeiten bestehender Technologien durch neuartige Magnetfeldsensoren deutlich erweitern, da sie genauere Messungen ermöglichen oder keine aufwändige Kühlung mehr benötigen. Zudem kann die Entwicklung optischer Atomuhren, die eine 100-fach höhere Genauigkeit als etablierte Atomuhren bieten, die satellitengestützte Standortbestimmung künftig bis auf wenige Zentimeter oder gar Millimeter präzisieren. Darüber hinaus kann die Störanfälligkeit satellitengestützter Systeme durch neuartige Magnetfeldsensoren umgangen und damit die vollautonome Navigation ermöglicht werden. Quantenverfahren mit verschränkten Photonen versprechen Fortschritte in der medizinischen Diagnostik, z. B. bei der Früherkennung von Krebs (vgl. Box B 2-1). So ermöglichen Verfahren wie das Ghost Imaging hochauflösende Bilder bei schwacher Beleuchtung, etwa für die Bildgebung auf zellulärer Ebene. Diese Methoden minimieren die Strahlenbelastung und erlauben detaillierte, lang andauernde Messungen lichtempfindlicher Zellen, ohne diese zu beschädigen.<sup>275</sup>

Quantensensoren sind in der Regel Investitionsgüter, die auf B2B-Märkten gehandelt werden und große Wertschöpfungspotenziale für Anwendungen in den nachgelagerten Märkten versprechen. Die Entwicklung neuer Technologien muss sich deshalb eng an den jeweiligen Anwenderbedarfen ausrichten. Es wird erwartet, dass Fortschritte in der Quantensensorik eher durch kontinuierliche Verbesserungen als durch radikale Technologiesprünge erfolgen werden. Besondere Herausforderungen bestehen derzeit darin, die Anwenderfreundlichkeit, Miniaturisierung und Robustheit zu verbessern.

**Abb. B 2-7 Wissenschaftliche Publikationen, transnationale Patentanmeldungen und aktive Unternehmen im Bereich Quantenkommunikation**

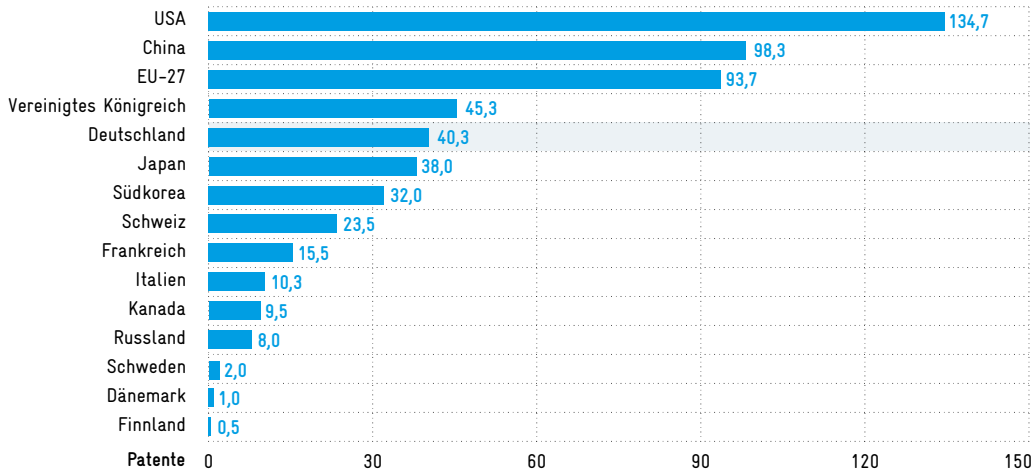


[Download der Abbildung und Daten](#)



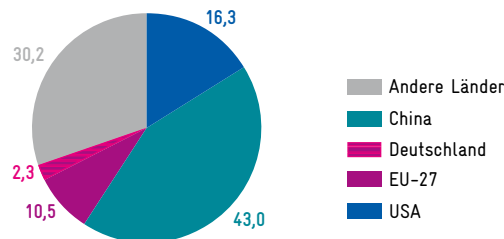
Lesebeispiel: Etwa 8 Prozent der im Jahr 2020 veröffentlichten wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Quantenkommunikation entstanden unter Beteiligung von Autorinnen und Autoren mit einer deutschen Organisationszugehörigkeit.  
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025).

**Anzahl transnationaler Patentanmeldungen 2000-2021**



Lesebeispiel: Im Zeitraum 2000-2021 entfielen 40 transnationale Patentanmeldungen im Bereich Quantenkommunikation auf Erfinderrinnen und Erfinder aus Deutschland.  
Quelle: PATSTAT, eigene Berechnungen. Fraktionierte Zählweise.

**Anteil aktiver Unternehmen mit ausgewiesenem Fokus auf Quantenkommunikation im Jahr 2024**



Lesebeispiel: Im Jahr 2024 waren 10,5 Prozent der identifizierten Unternehmen mit ausgewiesenem Fokus auf Quantenkommunikation in der EU ansässig.  
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025).  
© EFI - Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

## USA und China bei Publikationen und Patenten dominant

Bei wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Quantensensorik haben chinesische Institutionen im Zeitraum von 2000 bis 2022 an Bedeutung gewonnen und waren im Jahr 2022 an 42 Prozent der veröffentlichten Publikationen beteiligt (vgl. Abbildung B 2-8). Deutschland belegt recht kontinuierlich Rang drei hinter China und den USA. In der Liste der Top-10-Forschungseinrichtungen mit der weltweit höchsten Anzahl an Publikationen stammen fünf aus China, zwei aus den USA und eine aus Deutschland.<sup>276</sup>

Zwischen 2000 und 2021 wurden 431 transnationale Patente in der Quantensensorik angemeldet, wobei die USA, China, Japan und Südkorea führend waren (vgl. Abbildung B 2-8). Mit deutlichem Abstand folgen Deutschland und Frankreich. Die weitaus größte Anzahl der Patentanmeldungen sowie die drei patentaktivsten Organisationen stammen aus den USA. Auf Basis von Unternehmensdatenbanken können weltweit nur 22 Unternehmen identifiziert werden, die einen expliziten Fokus auf Quantensensorik haben.<sup>277</sup> Die Anteile der USA (36 Prozent) und Chinas (32 Prozent) fallen hierbei höher aus als die der EU (18 Prozent) (vgl. Abbildung B 2-8).<sup>278</sup> Es ist davon auszugehen, dass eine weitaus größere Zahl von Unternehmen, darunter auch Großunternehmen, Quantensensorik in ihre Anwendungen integrieren.

### B 2-5 EU, USA und China: Quantenstrategien im Vergleich

Die Analysen zu Publikationen und Patenten zeigen, dass der Wettlauf um die Führungsrolle in der Quantenforschung insbesondere zwischen den USA, China und der EU stattfindet. Alle drei Regionen setzen strategische Konzepte und gezielte Förderprogramme zur Weiterentwicklung von Quantentechnologien ein, die darauf abzielen, Quanten-Ökosysteme zu schaffen, in denen F&I-Aktivitäten im Bereich der Quantentechnologien koordiniert, eine leistungsfähige Infrastruktur aufgebaut und finanzielle Mittel bereitgestellt werden.

Die Förderung von FuE stellt ein gemeinsames Element dar. Gleichzeitig unterscheiden sich die Strategien in ihrer institutionellen Ausgestaltung und im Umgang mit zentralen Fragen der F&I-Politik.

In den USA wird F&I stark von der DARPA und den großen Technologiekonzernen vorangetrieben. In China wird überwiegend staatlich gesteuert. In der EU stehen die Koordination der nationalen Programme und die Vernetzung zentraler F&I-Akteure im Vordergrund.<sup>279</sup>

### Institutioneller Rahmen unterschiedlich ausgestaltet

In den USA ist F&I-Politik traditionell missions- und themenorientiert aufgestellt und es gibt kein eigenständiges Forschungsministerium. Schlüsselakteure der Ende 2018 gestarteten und von der National Quantum Initiative (NQI) koordinierten Strategie sind das Energieministerium, das Verteidigungsministerium sowie ihm zugehörige Behörden wie die DARPA.<sup>280</sup> Außerdem spielen in den USA große Technologiekonzerne und private Investoren bei der Weiterentwicklung des Quantencomputing eine wichtige Rolle.

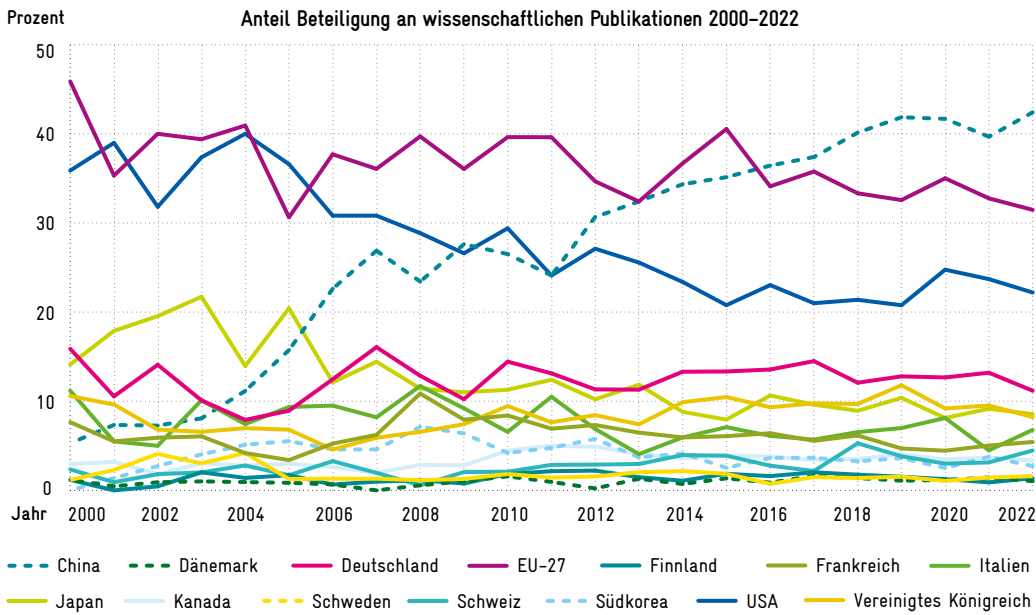
China verfolgt mit der „Vision 2035“ eine umfassende Industriestrategie, die durch Fünfjahrespläne und Programme wie „Made in China 2025“ unterstützt wird. Quantentechnologien, insbesondere das Quantencomputing und die Quantenkommunikation, sind seit 15 Jahren ein zentraler Bestandteil dieser Strategie, die das Ziel verfolgt, bis 2035 eine Führungsrolle in wichtigen Technologien zu erreichen. Die zentralstaatliche Planung ist strukturell verankert, wobei neben dem Ministerium für Industrie und Informationstechnik (MIIT) und dem Ministerium für Wissenschaft und Technologie (MoST) auch die Chinesische Akademie der Wissenschaften (CAS) als höchstes Beratungsgremium für Wissenschaft und Technologie eine Schlüsselrolle einnimmt. Als größte Forschungsorganisation der Welt, direkt dem Staatsrat unterstellt, koordiniert die CAS bedeutende Initiativen wie Satellitenprojekte und den Aufbau von Quantenkommunikations-Infrastrukturen. Im Jahr 2017 wurde außerdem ein „Nationales Labor für Quanteninformation“ eingerichtet, das Expertenberichten zufolge mit großen finanziellen Mitteln ausgestattet wurde.<sup>281</sup>

Die EU hat 2018 die Quantum-Flagship-Initiative gestartet, einen Zehnjahresplan zur Förderung von Quantentechnologien unter der Leitung der Europäischen Kommission. Der Fokus liegt auf der Koordination nationaler Programme, der Vernetzung zentraler Akteure und der Förderung strategischer Partnerschaften.<sup>282</sup> Innerhalb der Europäischen

**Abb. B 2-8 Wissenschaftliche Publikationen, transnationale Patentanmeldungen und aktive Unternehmen im Bereich Quantensensorik**

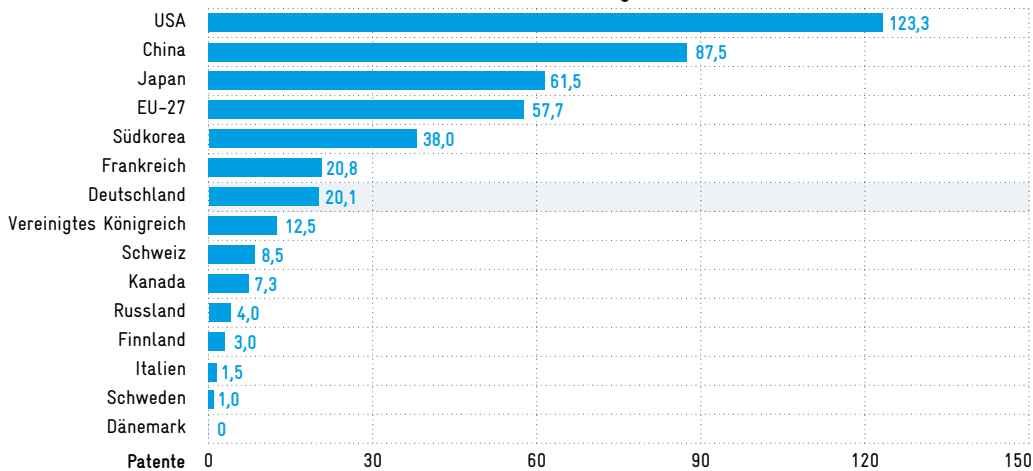


[Download der Abbildung und Daten](#)



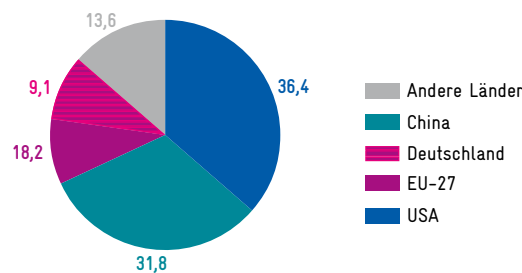
Lesebeispiel: Etwa 13 Prozent der im Jahr 2020 veröffentlichten wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Quantensensorik entstanden unter Beteiligung von Autorinnen und Autoren mit einer deutschen Organisationszugehörigkeit.  
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025).

**Anzahl transnationaler Patentanmeldungen 2000-2021**



Lesebeispiel: Im Zeitraum 2000-2021 entfielen 20 transnationale Patentanmeldungen im Bereich Quantensensorik auf Erfinderinnen und Erfinder aus Deutschland.  
Quelle: PATSTAT, eigene Berechnungen. Fraktionierte Zählweise.

**Anteil aktiver Unternehmen mit ausgewiesenem Fokus auf Quantensensorik im Jahr 2024**



Lesebeispiel: Im Jahr 2024 waren 18,2 Prozent der identifizierten Unternehmen mit ausgewiesenem Fokus auf Quantensensorik in der EU ansässig.  
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025)  
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

Kommission waren bisher insbesondere die Generaldirektion Kommunikationsnetze, Inhalte und Technologien (DG CONNECT) für digitale Strategien und die Generaldirektion Forschung und Innovation (DG RTD) für die Förderung von Projekten über Horizon Europe zuständig. Der Europäische Forschungsrat (ERC) unterstützt zudem die Grundlagenforschung im Bereich Quantentechnologien.

### Technologietransfer in allen Strategien berücksichtigt

Der Technologietransfer, d. h. die Überführung wissenschaftlicher Erkenntnisse in die ökonomische Anwendung, wird in den USA durch öffentlich-private Kooperationen beschleunigt. Das Energieministerium arbeitet mit Forschungseinrichtungen und der Industrie zusammen, um fünf Forschungszentren für Quanteninformationswissenschaften (QIS-Zentren) einzurichten, die Forschung, Prototypentwicklung und Kommerzialisierung fördern.

In China wird der Technologietransfer staatlich gefördert, indem Forschungseinrichtungen und Unternehmen mit staatlicher Unterstützung vernetzt werden, um beispielsweise das Quantencomputing zur Marktreife zu bringen. Über die Provinzregierungen werden lokale Industriecluster aufgebaut, um Investitionen und Fachkräfte anzuziehen.<sup>283</sup>

In der EU unterstützt der Europäische Innovationsrat (EIC) Innovationen und Start-ups im Bereich der Quantentechnologien durch Förderprogramme und Finanzierung. Die Generaldirektion Binnenmarkt, Industrie, Unternehmertum und KMU (DG GROW) fördert die industrielle Basis und Wettbewerbsfähigkeit der EU, einschließlich der Unterstützung von KMU und der Förderung von Innovationen im Bereich der Quantentechnologien. Die Europäische Investitionsbank (EIB) stellt zudem Kapital für Start-ups und KMU bereit, um Projekte im Bereich der Quantentechnologien zu finanzieren.

### EU bei zivil-militärischer FuE-Zusammenarbeit zurückhaltend

Das Zusammenwirken von ziviler und militärischer FuE kann Effizienzsteigerungen bewirken, indem militärische FuE-Aufträge an Unternehmen weitere privatwirtschaftliche FuE-Aufwendungen auslösen, Wissen und Erkenntnisse aus dem militärischen Sektor im zivilen Sektor übernommen wer-

den (Spillover) oder Technologien sowohl zivil als auch militärisch angewendet werden können (Dual Use).<sup>284</sup> Quantentechnologien sind aufgrund ihrer potenziellen Anwendungsbreite und ihrer sicherheitspolitischen Bedeutung, beispielsweise in der Quantenkommunikation, für zivile und militärische Bereiche relevant. In der Quantenforschung können deshalb Effizienzsteigerungen durch Größen- und Verbundeffekte in FuE-Projekten besonders zum Tragen kommen.

In den Strategien und Förderinitiativen der USA und Chinas ist dieser Ansatz klar verankert. In den USA wird die NQI regelmäßig durch den National Defense Authorization Act ergänzt, der u. a. Finanzierungsschwerpunkte für die Quantenforschung mit Blick auf militärische Interessen festlegt und die Koordination relevanter Einrichtungen und Programme sicherstellt.<sup>285</sup> China hat das Zusammenwirken militärischer und ziviler FuE, auch bei der Quantenforschung, explizit in den 13. und 14. Fünfjahresplan aufgenommen, mit dem Ziel, nationale Sicherheit und wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit gleichermaßen zu stärken. Dies soll durch gemeinsame Nutzung von Ressourcen, den Austausch von Forschungsergebnissen und deren Anwendung in beiden Bereichen erreicht werden.<sup>286</sup>

Die EU zeigt sich diesbezüglich bisher zurückhaltend. Militärische und zivile FuE sind in den Förderprogrammen strikt getrennt und ein Zusammenwirken dieser Bereiche ist weder in der Quantum-Flagship-Initiative noch im breiter ausgerichteten Horizon-Europe-Programm beschrieben.<sup>287</sup> Allerdings werden auch auf europäischer Ebene der strategische Nutzen sowie mögliche Szenarien zur Förderung von Technologien mit Dual-Use-Potenzial, darunter Quantentechnologien, diskutiert.<sup>288</sup>

### Standardisierungsinitiativen für Fortschritt zentral

Standardisierung ist auch in Quantentechnologien eine zentrale Voraussetzung für den Fortschritt. Standardisierte Leistungstests und Benchmarking-Methoden ermöglichen den systematischen Vergleich von FuE-Ergebnissen.<sup>289</sup> Zudem fördern Normen die Austauschbarkeit und Interoperabilität technischer Komponenten wie Quantenmodule sowie die flexible Zusammenarbeit entlang der Wertschöpfungskette durch einheitliche Entwicklungsumgebungen und Software.<sup>290</sup>

In den USA arbeitet das nationale Standardisierungsinstitut (NIST) an neuen Standards für Kryptografie. Kürzlich veröffentlichte es neue Verschlüsselungsstandards unter Beteiligung deutscher Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler.<sup>291</sup> In China zielt der im April 2024 vorgestellte Aktionsplan 2024–2027 darauf ab, die Entwicklung von Standards im Bereich Quantentechnologien zu beschleunigen. In der EU koordiniert ein technisches Komitee unter deutschem Sekretariat und Ko-Vorsitz die Entwicklung relevanter Standards für Quantentechnologien und deren Abstimmung mit internationalen Organisationen.<sup>292</sup>

### B 2-6 Deutschland: nationales Handlungskonzept und bestehende Herausforderungen

Mit ihrem Handlungskonzept Quantentechnologien hat die Bundesregierung einen Förderrahmen für den Zeitraum 2023 bis 2026 geschaffen und eine Vision bis 2036 formuliert.<sup>293</sup> Dafür stehen über vier Jahre drei Milliarden Euro zur Verfügung.<sup>294</sup> Tabelle B 2-9 zeigt, dass das deutsche Konzept im internationalen Vergleich finanziell sehr gut ausgestattet ist.<sup>295</sup>

Das Handlungskonzept Quantentechnologien der Bundesregierung ist technologieoffen ausgerichtet, d. h. innerhalb der Quantentechnologien gelten konkurrierende Lösungen für konkrete Probleme als grundsätzlich förderwürdig. Der Förderansatz setzt auf Verbundprojekte und staatliche Ko-Finanzierung, wobei öffentliche Aufträge private Investitionen stimulieren sollen. Ergänzend dazu haben Bundesländer eigene Förderprogramme entwickelt, aus denen sich regionale F&I-Cluster mit internationalem Renommee herausgebildet haben, darunter das Munich Quantum Valley (80 Millionen Euro, Bayern) und QuantumBW (115 Millionen Euro, Baden-Württemberg). Weitere Programme sind die Berlin Quantum Alliance, Hamburg Quantum Innovation Capital und Quantum Valley Lower Saxony.

Zukünftige Innovationen in Quantentechnologien erfordern erhebliche Anfangsinvestitionen in Grundlagenforschung und die dafür notwendige Infrastruktur, während die technologischen Unsicherheiten hoch sind und viele Anwendungen erst in einigen Jahren realisierbar sein werden.<sup>296</sup> Dies kann zu Unterinvestition der privatwirtschaftlichen Akteure führen, obwohl Quantentechnologien erhebliche gesellschaftliche und gesamtwirtschaftliche Vorteile bieten. Der Planungshorizont der

Tab. B 2-9 Eckdaten ausgewählter Quantenstrategien

Land	Strategie	Zentrale Initiativen	Budget	Laufzeit
Deutschland	Handlungskonzept Quantentechnologie	Fachprogramm Quantensysteme; Fachprogramm IT-Sicherheit; Quantencomputing Initiative	3 Mrd. Euro	2023–2026
EU	Quantum Flagship	EuroHPC; EuroQCI	1 Mrd. Euro	2018–2028
Frankreich	Quantum Plan – France National Quantum Strategy	–	1,8 Mrd. Euro	2021–2025
Vereinigtes Königreich	National Quantum Strategy (NQS)	National Quantum; Technologies Programme (NQTP)	NQS: £2,5 Mrd. (ca. 2,97 Mrd. Euro); NQTP: £1 Mrd.	NQS: 2023–2033 NQTP: 2014–2024
China	Made in China 2025; 14th Five-year-Plan	National Key R&D Projects; National Laboratory of Quantum Information	Geschätzt 15 Mrd. Euro	Bis 2025 2021–2025
Japan	Quantum Technology Innovation Strategy; Vision of Quantum Future Society	Moonshot R&D Program; Quantum Innovation Hubs	259 Mrd. Yen (ca. 1,5 Mrd. Euro)	2018–2023
Südkorea	Korea's National Quantum Strategy	–	3 Mrd. Won (ca. 2 Mrd. Euro)	2023–2035
USA	National Quantum Initiative Act	–	1,2 Mrd. USD (ca. 1,1 Mrd. Euro)	2019–2023
Kanada	Canada's National Quantum Strategy	–	360 Mio. CAD (ca. 240,9 Mio. Euro)	2021–2028

Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Schmaltz et al. (2025)  
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.



[Download der Abbildung und Daten](#)

Bundesregierung bis 2026 ist aus Sicht der Akteure zu kurz, um langfristige Investitionen in FuE im Bereich der Quantentechnologien zu begründen. Angesichts der langen Entwicklungszyklen der Projekte bedarf es einer vorausschauenden, langfristigen Strategie.

### Bedarf an Vernetzung zwischen Akteuren hoch

Innerhalb der drei Technologiefelder werden verschiedene technologische Ansätze parallel erforscht und hinsichtlich ihrer Eignung für spezifische Anwendungen verglichen. Ein Beispiel ist die Herstellung von Qubits im Quantencomputing, die entweder auf atomischen oder auf festkörperbasierten Hardware-Plattformen erfolgen kann. Zugleich bestehen enge Abhängigkeiten und Wechselwirkungen zwischen Grundlagenforschung, angewandter Forschung und Anwendungsentwicklung. So ist beispielsweise ein fundiertes Verständnis der Nutzerbedarfe entscheidend, um die Weiterentwicklung von Hardware und Software gezielt voranzutreiben. Aufgrund dieser Interdependenzen ist eine Vernetzung der FuE-Aktivitäten und ein intensiver Austausch zwischen den Akteuren innerhalb eines Technologiefelds erforderlich.<sup>297</sup>

Neben der Vernetzung innerhalb eines Technologiefeldes ist auch die Vernetzung zwischen den verschiedenen Feldern entscheidend, da Fortschritte in einem Feld wie der Quantensensorik auch andere Felder wie das Quantencomputing vorantreiben können. Viele Forschungsinfrastrukturen basieren auf gemeinsamen Basistechnologien, etwa Lasertechnologie, rauscharmer Mikroelektronik oder Tieftemperaturtechnik. Eine gute Vernetzung ermöglicht es, Vorteile einzelner Technologien schneller zu identifizieren und zu nutzen. Langfristig kann durch die Integration der drei Technologiefelder Quantencomputing, Quantenkommunikation und Quantensensorik ein globales Quantennetzwerk (Quantenweb) entstehen, in dem Quantentechnologien abhörsicher miteinander vernetzt sind.<sup>298</sup> Dazu ist die frühzeitige Entwicklung von Normen und Standards erforderlich, die allerdings eine enge Zusammenarbeit zwischen Akteuren in allen Technologiefeldern voraussetzt.

Um ineffiziente Parallelstrukturen zu vermeiden und Anwendungsoptionen frühzeitig in die Forschung zu integrieren, sind ein intensiver Austausch zwischen den Akteuren innerhalb eines Techno-

logiefelds sowie eine starke Vernetzung zwischen Technologiefeldern unerlässlich. Regionale F&I-Cluster fördern durch geografische Konzentration die Vernetzung von Akteuren, erleichtern Wissens-Spillover und stärken damit die FuE-Aktivitäten.<sup>299</sup>

### Technologische Souveränität bei Quantentechnologien gefährdet

Technologische Abhängigkeiten von Drittstaaten sind vor dem Hintergrund unsicherer geopolitischer Entwicklungen für Deutschland ein Risiko. Als Reaktion darauf hat die deutsche F&I-Politik verstärkt das Ziel der technologischen Souveränität in den Fokus gerückt. Langfristige technologische Souveränität erfordert vorausschauende strategische Konzepte, die darauf abzielen, die technologische Entwicklung und Standardisierung selbst voranzutreiben oder sicherzustellen, dass Technologien auch langfristig ohne einseitige Abhängigkeiten von anderen Wirtschaftsräumen bezogen werden können.<sup>300</sup>

Quantentechnologien gehören zweifellos zu den Zukunftstechnologien, bei denen die Sicherstellung technologischer Souveränität von zentraler Bedeutung ist. Dazu zählt auch, die Nutzung von Quantentechnologien zu beherrschen, indem die notwendige Wissensbasis sowie die erforderlichen Kompetenzen in Deutschland ausgebaut und gehalten werden. Gleichzeitig muss gewährleistet werden, dass Quantentechnologien langfristig verfügbar bleiben – entweder durch eine eigenständige Produktion innerhalb der EU oder durch eine diversifizierte Beschaffungsstrategie im internationalen Handel.<sup>301</sup> Ein weiterer Ansatz zur Vermeidung einseitiger Abhängigkeiten ist der strategische Aufbau von Alleinstellungsmerkmalen. Diese könnten perspektivisch von anderen Akteuren benötigt werden und Deutschland bei internationalen Verhandlungen in eine stärkere Verhandlungsposition bringen („Bargaining Chips“).

### Quantencomputing mit Sicherheitsrisiken verbunden

Die Prognosen, wann ein universell einsetzbarer Quantencomputer für praktische Anwendungen verfügbar sein wird, variieren erheblich.<sup>302</sup> Dennoch herrscht unter Expertinnen und Experten Einigkeit, dass zukünftige Quantencomputer eine Rechenleistung erreichen werden, die das Brechen aktueller Verschlüsselungsstandards in der Kommunikation und Datensicherheit ermöglicht. Dies stellt eine



erhebliche Gefahr für die Sicherheitsarchitekturen in militärischer, politischer und ziviler Kommunikation dar. Anpassungen der Sicherheitsstandards sind daher unverzichtbar, um Daten- und Kommunikationssicherheit langfristig zu gewährleisten, insbesondere bei kritischen Infrastrukturen. Dem Staat kommt dabei eine zentrale Rolle zu.

Besonders kritisch ist die Gefahr von sogenannten „Harvest now, decrypt later“-Attacken. Dabei werden sensible Daten abgefangen, über Jahre oder Jahrzehnte gespeichert und später mit ausreichender Rechenleistung entschlüsselt. Angesichts der langen Übergangszeit bis zur vollständigen Einführung neuer Verschlüsselungsmethoden sowie der Tatsache, dass diese Angriffe bereits heute ein erhebliches Sicherheitsrisiko darstellen, ist der Handlungsbedarf hier zeitkritisch.

Neben sicherheitspolitischen Gefahren, die sich aus der perspektivischen Rechenleistung von Quantencomputern ergeben, sind Risiken absehbar, die sich aus einseitigen Abhängigkeiten bei der Bereitstellung von Hardware ergeben können. So schafft beispielsweise ein Quantencomputer, der von einem außereuropäischen Unternehmen geliefert und betrieben wird, nicht nur Abhängigkeiten hinsichtlich der Verfügbarkeit der Infrastruktur, sondern ist auch für militärische Anwendungen mit sensiblen Daten und Fragen des geistigen Eigentums an Software und Daten problematisch.<sup>303</sup>

### Anwendung durch Kompetenz- und Fachkräftemangel limitiert

Im Bereich der Quantentechnologien besteht die Gefahr, dass FuE-Aktivitäten perspektivisch durch einen Mangel an hochqualifizierten Absolventinnen und Absolventen aus den MINT-Disziplinen gebremst werden. Laut Expertinnen und Experten könnte zudem das begrenzte Fachwissen der derzeitigen Arbeitskräfte die Einführung und Verbreitung anwendungsreifer Quantentechnologien erheblich verzögern.<sup>304</sup> Deutschlands (Weiter-)Bildungsangebot im Bereich Quantentechnologien ist im internationalen Vergleich aktuell gut ausgebaut. Im Jahr 2021 haben sechs deutsche Universitäten einen Masterstudiengang mit spezifischem Fokus auf Quantentechnologien angeboten – mehr gab es nur im Vereinigten Königreich (8) und in den USA (16).<sup>305</sup>

Inhalte zu Quantenphysik und Quantentechnologien sind in Deutschland weitgehend in die Lehrangebote

von Schulen und Hochschulen integriert.<sup>306</sup> Ergänzend wurden gezielte Fördermaßnahmen gestartet<sup>307</sup>, um im Bereich Quantentechnologien Fachwissen zu entwickeln und Nachwuchskräfte auszubilden, beispielsweise durch das Nachwuchsförderprogramm Quantum Futur<sup>308</sup> oder die Einführung berufs begleitender Studiengänge.<sup>309</sup> Allerdings bleibt ungewiss, ob diese Maßnahmen ausreichend sind, um den spezifischen Personalbedarf langfristig zu decken.<sup>310</sup>

### Kommerzielle Vermarktung von Quantencomputing herausfordernd

Ein leistungsfähiges Innovationsökosystem zeichnet sich u. a. dadurch aus, dass es Erkenntnisse aus Grundlagen- und anwendungsorientierter Forschung in innovative marktfähige Produkte überführt.<sup>311</sup> Abbildung B 2-10 zeigt, dass Forschende aus der EU mit 12.121 Publikationen in den vergangenen zwei Jahrzehnten an einem großen Teil der weltweiten Publikationen zu Quantencomputing beteiligt waren (grüne Balken).<sup>312</sup> Allerdings werden nur knapp 10 Prozent der Publikationen mit EU-Beteiligung bereits in Patenten zitiert, die bis Ende 2023 erteilt wurden, während dieser Wert bei Publikationen mit US-Beteiligung mit fast 20 Prozent doppelt so hoch ist (blaue Balken). In China liegt der Anteil mit 5,5 Prozent weitaus niedriger.<sup>313</sup>

Bei der Erklärung der höheren Patentrelevanz von US-Publikationen gegenüber EU-Publikationen könnten schwächere Netzwerke zwischen Forschung und Anwendung in der EU, Unterschiede in der Art der Forschung, eine geringere Karriere durchlässigkeit sowie höhere bürokratische Hürden oder geringere Anreize für Patentanmeldungen eine Rolle spielen.

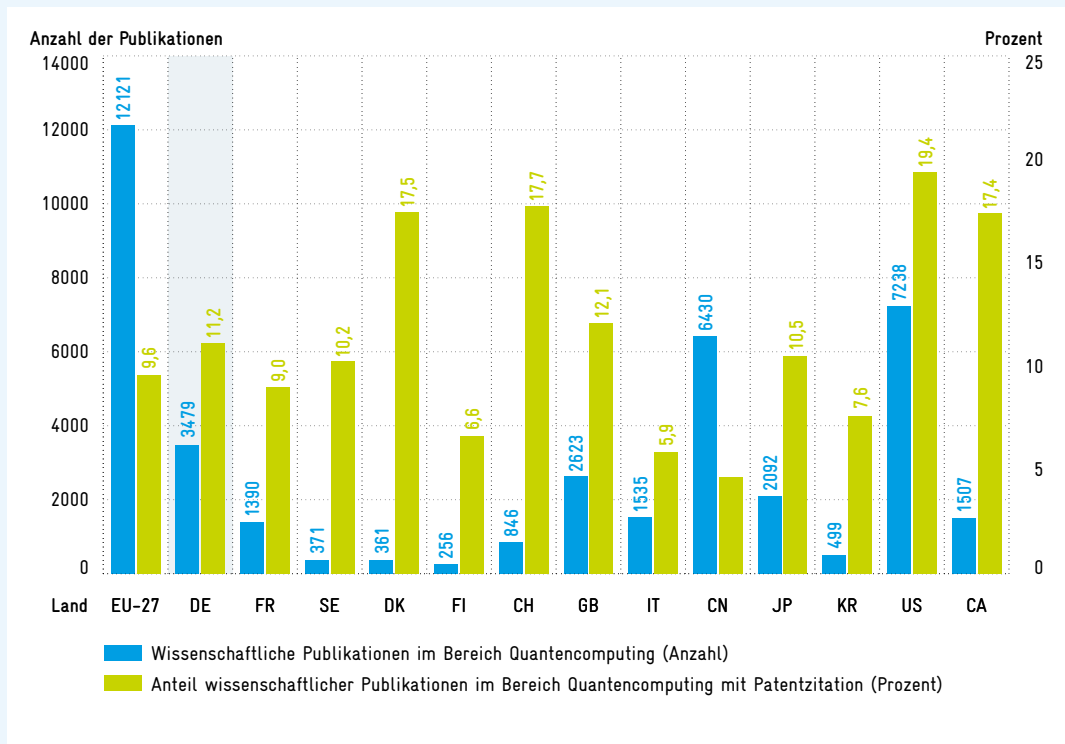
Als Systemintegratoren vereinen große Technologieunternehmen den gesamten Prozess von FuE bis hin zur Kommerzialisierung unter einem Dach. Dies erleichtert ihnen den Transfer neuer Ideen in die Anwendung. In den USA investieren beispielsweise Google und IBM über ihre internen Strukturen nicht nur große Summen in die Grundlagenforschung, sondern erforschen auch systematisch Anwendungspotenziale und lassen Innovationen patentieren. In Deutschland hingegen werden die verschiedenen Schritte im F&I-Prozess von unterschiedlichen Akteuren durchgeführt.

Um sicherzustellen, dass in Deutschland und der EU hervorragende Forschung zukünftig nicht ohne

**Abb. B2-10** Anzahl Beteiligung an wissenschaftlichen Publikationen im Bereich Quantencomputing 2000–2022 und Anteil zitiert in Patenten bis einschließlich 2023



[Download der Abbildung und Daten](#)



Lesebeispiel: Autorinnen und Autoren mit einer deutschen Organisationszugehörigkeit waren zwischen 2000 und 2022 an 3.479 Publikationen im Bereich Quantencomputing beteiligt. Bis Ende 2023 wurden 11,2 Prozent dieser Publikationen in mindestens einem Patent zitiert.  
Quelle: RelianceOnScience/Scopus/OpenAlex, eigene Berechnungen.  
© EFI – Expertenkommission Forschung und Innovation 2025.

konkreten Beitrag zur Problemlösung und kommerziellen Vermarktung erfolgt, sollten Start-ups im Quantencomputing eine Schlüsselrolle spielen. Start-ups entwickeln innovative Anwendungen und bringen sie auf den Markt. Häufig entstehen sie als Ausgründungen aus Forschungsinstitutionen und fungieren durch ihre Nähe zu Forschungseinrichtungen sowie ihr spezialisiertes Wissen als wichtiges Bindeglied zwischen Forschung und Anwendung. Start-ups stehen in Deutschland allerdings sowohl in der Gründungs- als auch in der Wachstumsphase vor strukturellen Herausforderungen. Insbesondere der im Vergleich zu den USA begrenzte Zugang zu Risikokapital stellt ein großes Problem für Start-ups dar, weil sie sowohl einen hohen Kapitalbedarf als auch ein hohes Risiko des Scheiterns aufweisen. Zudem ist der Kreis möglicher Investoren begrenzt, da sie spezifisches Fachwissen benötigen, um das Potenzial von Quantenprojekten einschätzen zu können. Bislang fallen private Investitionen in deutsche Quantencomputing-Start-ups im Vergleich zu den staatlichen Fördersummen sehr gering aus.<sup>314</sup> Fehlende Anschlussfinanzierungen, insbesondere

zwischen der frühen Seed-Phase (z. B. durch Gründungskapital, Förderprogramme oder Angel-Investoren) und späteren Wachstumsphasen, verhindern häufig, dass sich Start-ups in Deutschland gut entwickeln können.

### B2-7 Handlungsempfehlungen

Quantentechnologien sind potenzielle zukünftige Schlüsseltechnologien, deren Erforschung und Entwicklung hohe Kosten und Unsicherheiten mit sich bringen. Damit deutsche Unternehmen im globalen Wettbewerb mit China und den USA konkurrenzfähig bleiben und Deutschland langfristig technologisch souverän und auf sicherheitspolitische Bedrohungen gut vorbereitet ist, sollte die Bundesregierung zeitnah eine umfassende Quantenstrategie auf den Weg bringen und dabei eine bedeutende Rolle beim Aufbau eines leistungsfähigen europäischen Quanten-Ökosystems einnehmen. Hierzu empfiehlt die Expertenkommission:

## Quantenstrategie national aufsetzen und europäisch verankern

- Die Expertenkommission ist der Ansicht, dass für die Entwicklung eines kohärenten Strategierahmens für aktuelle und zukünftige Schlüsseltechnologien wie etwa Quantentechnologien eine geeignete Governance dringend erforderlich ist. Demnach sollten die übergreifende Koordination und strategische Steuerung zentral im Bundeskanzleramt angesiedelt sein.<sup>315</sup>
- Angesichts begrenzter Ressourcen und der internationalen Konkurrenz durch die USA und China ist eine isolierte nationale Strategie ineffizient. Stattdessen sollten nationale Strategien innerhalb der EU stärker abgestimmt, Synergien genutzt und gemeinsame Ressourcen mobilisiert werden, um eine wettbewerbsfähige Position der Unternehmen der EU im globalen F&I-Wettbewerb zu sichern. Das Ziel sollte ein leistungsfähiges europäisches Quanten-Ökosystem sein.
- Deutschland und die EU sollten sich frühzeitig in die Entwicklung einheitlicher Standards zur Sicherheitsbewertung und Zertifizierung einbringen und eine führende Rolle in den entsprechenden Gremien übernehmen. Es sollte auf international und weltweit gültige Standards hingearbeitet werden, die eine Repräsentation der deutschen und europäischen Interessen sicherstellen. Eine Kooperation mit Institutionen wie dem US-amerikanischen NIST könnte ebenfalls in Betracht gezogen werden.
- Deutsche und europäische Quantenstrategien sollten darauf abzielen, gute Voraussetzungen für ein Quantenweb zu schaffen, das Quantentechnologien miteinander verbindet. Um dies zu erreichen, müssen die verschiedenen Quantentechnologien von Anfang an integriert gedacht und ihre Kompatibilität, z. B. auf Software- und Sprachebene, sichergestellt werden.
- Da es weder sinnvoll noch realistisch ist, dass langfristig alle Rohstoffe und Komponenten für das Quantencomputing aus Deutschland oder der EU kommen, sollten frühzeitig Maßnahmen ergriffen werden, um einseitige Abhängigkeiten von einzelnen außereuropäi-

schen Unternehmen oder Regionen zu vermeiden. Während Unternehmen hierfür in erster Linie ihre Lieferketten analysieren, Lieferanten diversifizieren und strategische „Bargaining Chips“ entwickeln sollten, liegt es in der Verantwortung der politischen Entscheidungsträger in Deutschland und der EU, eine strategische Außenwirtschaftspolitik zu betreiben.

## Handlungskonzept aktualisieren und an die Technologiefelder anpassen

- Der Förderrahmen des aktuellen Handlungskonzepts Quantentechnologien der Bundesregierung endet 2026. Um langfristige Investitionen in laufende und zukunftsweisende Projekte zu begründen, sollte die Bundesregierung dringend ein ambitioniertes Folgekonzept entwickeln und zügig in die Umsetzung bringen. Die verschiedenen Technologiefelder der Quantentechnologien unterscheiden sich in ihren potenziellen Anwendungsbereichen und den Anforderungen an die F&I-Politik. Das Nachfolgekonzept sollte daher auch spezifische Maßnahmen für jedes Technologiefeld beinhalten und im Rahmen einer Roadmap klar definierte Meilensteine setzen.
- Europa ist derzeit im Bereich des klassischen Computing weitgehend von außereuropäischen Unternehmen abhängig. Im Quantencomputing hat Europa jedoch die Chance, global wettbewerbsfähige Technologien und Unternehmen zu entwickeln und zu etablieren. Nationale Kompetenzen und Anstrengungen müssen daher europaweit gebündelt werden, um ein Quantencomputing „Made in Europe“ zu ermöglichen und Abhängigkeiten von außereuropäischen Großunternehmen mittel- und langfristig zu vermeiden. Hierfür braucht es eine langfristig angelegte Technologie-Roadmap, die bei neuen Erkenntnissen dynamisch anpassbar ist.<sup>316</sup>
- In der Quantenkommunikation ist rasches und entschlossenes Handeln notwendig, um neue Technologien zum Schutz vor Abhörangriffen und zur Sicherung der Datenintegrität zu entwickeln und zu implementieren. Dazu sollten Aktivitäten deutschlandweit koordiniert und gebündelt sowie bereits erfolgreiche Aktivitäten langfristig gesichert werden.

- In der Quantensensorik hat Deutschland dank exzellenter Grundlagenforschung und einer breiten Unternehmens- und Anwenderbasis bereits eine hervorragende Ausgangsposition, die im Unterschied zu anderen Technologiefeldern trotz neuer technologischer Entwicklungen bislang gehalten werden konnte. Um eine internationale Spitzenposition langfristig zu sichern, sollte sich die Bundesregierung einer langfristigen Förderung der Grundlagenforschung auf diesem Gebiet verpflichtet sehen.

### Regionale F&I-Cluster ausbauen und überregionale Vernetzung fördern

- Bestehende regionale F&I-Cluster für Quantentechnologien sollten in die Lage versetzt werden, sich mit jeweils klaren Schwerpunkten und Zielen weiterzuentwickeln und dabei Forschungseinrichtungen, Unternehmen und Investoren einzubinden.
- Um Synergiepotenziale in der Forschung zu identifizieren, den Wissensaustausch zwischen Clustern und die Offenheit gegenüber alternativen technologischen Ansätzen zu fördern, sollte die Vernetzung der F&I-Cluster untereinander aktiv unterstützt werden. Dabei ist darauf zu achten, dass einem breiten Kreis an Akteuren überregional ein niedrigschwelliger Zugang zur Forschungs- und Recheninfrastruktur der jeweiligen Cluster ermöglicht wird.

### Transfer in die Anwendung sicherstellen und Synergiepotenziale nutzen

- Die Bundesregierung sollte verstärkt den Abschluss von Ankerkundenverträgen mit Unternehmen im Bereich der Quantentechnologien für spezifizierte, aber technologieoffene Aufträge mit klaren Abbruchkriterien prüfen. Einem Ankerkundenvertrag sollte ein wettbewerbles Verfahren vorgeschaltet werden, bei dem Anbieter in mehreren Stufen im Wettbewerb neue Produkte entwickeln.
- Zur Förderung des Technologietransfers und zur Optimierung von Feedbackschleifen zwischen FuE und Anwendungen sollte eine gemeinsame Quanten-Benchmarking-Plattform aufgebaut werden. Sie sollte es ermöglichen, spezifische Vorteile einzelner Quanten-

technologien und technologischer Lösungen anhand umfassender, klar definierter und allgemein akzeptierter Kriterien zu bewerten.<sup>317</sup> Dabei ist ein starker Fokus auf den Anwendungsnutzen der Technologien zu legen.

- Synergien zwischen militärischer und ziviler Nutzung von Quantentechnologien hinsichtlich potenzieller Größen- und Verbundeffekte sowie Spillover-Effekte, z. B. zur Verschlüsselung oder Navigation, sollten stärker berücksichtigt werden.
- Start-ups sind zentral für den Transfer quantenwissenschaftlicher Erkenntnisse in die Anwendungen und sind oft Ausgründungen aus der Forschung. Es sollte ein unterstützendes Umfeld mit niedrigen bürokratischen Hürden geschaffen werden, um Forschende zu motivieren, ihre Erkenntnisse in Anwendungen zu überführen. Außerdem sollten Maßnahmen wie die Vereinfachung des IP-Transfers und die Schaffung durchlässiger Karrierewege umgesetzt werden, um Gründungsaktivitäten zu fördern.
- Für die Wachstumsphase junger Unternehmen bedarf es ausreichenden Kapitals. Dieser Bedarf ist im Bereich der Quantentechnologien besonders ausgeprägt. Daher sollte die Bundesregierung weitere Maßnahmen zur Stärkung des Risikokapitalmarktes ergreifen, z. B. durch Steuererleichterungen und die Einrichtung von Investitionsfonds. Diese Ansätze könnten privates Kapital mobilisieren, die Skalierung von Quantenunternehmen erleichtern und zu einem attraktiven Standort für unternehmerisches Handeln beitragen.

### Kompetenzen aufbauen und Standortattraktivität für Fachkräfte steigern

- Die Expertenkommission begrüßt die auf Bundes- und Länderebene bestehenden Programme zur Fachkräftesicherung im Bereich der Quantentechnologien. Diese Programme sollten durch zusätzliche Maßnahmen ergänzt werden, wie z. B. durch die Einführung spezialisierter Studiengänge, spezifischer Studienmodule sowie praxisorientierter Weiterbildungsprogramme.

- Die Bundesregierung sollte gezielte Maßnahmen ergreifen, um ein attraktives Umfeld für international mobile MINT-Akademikerinnen und -Akademiker sowie Quantenexpertinnen und -experten zu schaffen. Dies umfasst nicht zuletzt die zügige Bearbeitung von Visumanträgen und Erstellung von Arbeits- und Aufenthaltserlaubnissen.<sup>318</sup>

