

Quantentechnologien – Ein internationaler Vergleich bei Zahlen zu Publikationen und Patentanmeldungen

Martin Brüchert, Beatrice Andres und Kristian Döbrich

Martin Brüchert, Beatrice Andres und Kristian Döbrich

Quantentechnologien – Ein internationaler Vergleich bei Zahlen zu Publikationen und Patentanmeldungen

1 Zentrale Ergebnisse

Die Entdeckung der Quantenphysik und der Transfer in Anwendungen haben im zwanzigsten Jahrhundert zu bahnbrechenden Entwicklungen wie dem Halbleitertransistor oder dem Laser geführt. Dabei werden kollektive Eigenschaften von Quantensystemen ausgenutzt. Heute wird es zunehmend möglich, auch einzelne Quantenobjekte zu kontrollieren und zu manipulieren. Es zeichnet sich ab, dass sich dadurch zahlreiche neue Anwendungsfelder ergeben werden. Entsprechend hoch sind die derzeitigen weltweiten Forschungsanstrengungen und Verwertungsaktivitäten.

Im Rahmen dieser Studie haben wir die Anzahl an Publikationen und Patentanmeldungen aus dem Themenbereich der Quantentechnologien ausgewertet und dabei auch nach den drei Säulen Quantenkommunikation, Quantensensorik und Quantencomputing aufgeschlüsselt. Im zeitlichen Verlauf zeigt sich, dass bei Publikationen ab etwa 1995 bei der Quantenkommunikation und dem Quantencomputing ein starker Anstieg zu verzeichnen ist. Einen vergleichbaren Anstieg zeigen die Publikationszahlen bei der Quantensensorik etwa zehn Jahre später. Ein Anstieg der Patentanmeldungen erfolgt bei allen drei Säulen etwa drei bis fünf Jahre nach dem Anstieg bei den Publikationszahlen.

Untersucht man die Verteilung von Publikationen und Patentanmeldungen auf die verschiedenen Länder, so erhält man folgende Ergebnisse: Deutschland gehört bei der Forschung zu den Quantentechnologien zu den weltweit führenden Nationen und steht insgesamt gesehen bei der Anzahl an Publikationen an dritter Stelle hinter den USA und China. Es liegt damit knapp vor dem Vereinigten Königreich und Japan. Bei den Patentanmeldungen liegt Deutschland jedoch lediglich an achter Stelle und gehört damit bei der Umsetzung der wissenschaftlichen Ergebnisse in Anwendungen und der wirtschaftlichen Verwertung nicht zu den Top 5 Nationen. Diese sind USA, China, Japan, Kanada und, als einziges europäisches Land, das Vereinigte Königreich.

Bei der Quantenkommunikation entfallen die meisten Publikationen und Patentanmeldungen auf China, gefolgt von den USA und dem Vereinigten Königreich. Deutschland liegt an fünfter bzw. elfter Stelle. Bei der Quantensensorik sind die USA bei Publikationen und mit nahezu der Hälfte aller Patentanmeldungen führend. Bei den Publikationen steht Deutschland an zweiter Stelle vor China, bei Patentanmeldungen an sechster Stelle.

Die Säule Quantencomputing wird von den USA dominiert, gefolgt von China bei den Publikationen und Kanada bei den Patentanmeldungen. Deutschland liegt bei den Publikationen an dritter Stelle, gefolgt von dem Vereinigten Königreich und Japan, und bei den Patentanmeldungen an siebter Stelle.

Als ein Maß für die Umsetzung der wissenschaftlichen Ergebnisse in Anwendungen und Innovationen haben wir einen Verwertungsindex definiert, der sich aus der Anzahl an Patentanmeldungen pro 100 Publikationen ergibt. Hierbei liegt Japan an der Spitze, gefolgt von Kanada, USA, dem Vereinigtem Königreich als führendem europäischem Land und China. Deutschland liegt weit zurück an 10. Stelle der in dieser Studie betrachteten Länder.

2 Quantentechnologien der zweiten Generation

Bedeutende technologische Errungenschaften wie Transistor oder Laser sind im zwanzigsten Jahrhundert mit dem Ausnutzen quantenmechanischer Effekte erzielt worden. Dabei handelt es sich um kollektive Eigenschaften von Quantensystemen, wie sie bei den Quantentechnologien der ersten Generation zum Tragen kommen. Sie stellen auch die Grundlage der Digitalisierung dar. Die fortschreitende Entwicklung bei der Messtechnik sowie die heute mögliche schnelle Verarbeitung von großen Datenmengen ermöglichen es seit wenigen Jahrzehnten zunehmend, auch einzelne quantenmechanische Objekte zu messen und zu kontrollieren und damit auch Informationen darin zu schreiben und auszulesen. So lassen sich heute, zumeist noch als Laboraufbauten und Demonstratoren, Systeme aus einzelnen oder

einigen wenigen quantenmechanischen Objekten ausnutzen, um Daten abhörsicher zu übertragen, physikalische Größen mit bislang unerreichter Genauigkeit zu messen oder erste Berechnungen durchführen, die mithilfe von klassischen Computern eine viel größere Rechenzeit benötigen. Eine umfassende Einführung in das Gebiet der Quantentechnologien findet sich in der im Juni 2015 veröffentlichten Stellungnahme „Perspektiven der Quantentechnologien“, die von der Nationalen Akademie der Wissenschaften Leopoldina, acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften und der Union der deutschen Akademie der Wissenschaften vorgelegt wurde¹.

Die neuen Möglichkeiten, die mit dem Beherrschen einzelner Quantenobjekte einhergehen, bezeichnet man als Quantentechnologien der zweiten Generation. Sie stehen heute an der Schwelle zur Anwendung und es ist zu erwarten, dass damit ähnlich tiefgreifende technologische und gesellschaftliche Veränderungen einhergehen werden wie im zwanzigsten Jahrhundert mit den Quantentechnologien der ersten Generation, die sich heute noch nicht vollumfänglich abschätzen lassen. Weltweit steigt das Bewusstsein für das enorme Potential, das mit den Quantentechnologien der zweiten Generation einhergeht. Es gibt daher starke Forschungsaktivitäten, an denen nicht mehr nur Forschungseinrichtungen sondern zunehmend auch Firmen als Innovationstreiber beteiligt sind.

Wir haben die aktuellen Entwicklungen zum Anlass genommen, die Anzahl an Publikationen und Patentanmeldungen auszuwerten und aufzuschlüsseln, in welchen Ländern Aktivitäten bei den Quantentechnologien zu verzeichnen sind. Analog zum im Jahr 2016 an die EU-Kommission übergebenem Quantenmanifest² unterscheiden wir verschiedene Themenbereiche innerhalb der Quantentechnologien, die im Allgemeinen auch als Säulen bezeichnet werden: Quantenkommunikation, Quantensensorik und Quantencomputing (wobei hier Quantencomputing auch die Quantensimulation mit einschließt, die im Quantenmanifest als getrennte Säulen betrachtet werden). Einen Teil der Ergebnisse dieser Studie zum Quantencomputing wurden bereits vorab in der Zeitschrift *Technology Review* veröffentlicht³.

2.1 Quantenkommunikation

Bei der Quantenkommunikation werden in einem ersten Schritt einzelne Quantenzustände zwischen Sender und Empfänger ausgetauscht, die in der Beschreibung kryptographischer Systeme üblicherweise als Alice und Bob bezeichnet werden. Aus

diesen Quantenzuständen generieren in einem zweiten Schritt Alice und Bob einen gemeinsamen Schlüssel, der dann zur abhörsicheren Übertragung von Daten verwendet werden kann.

Der Vorteil dabei ergibt sich aus der quantenmechanischen Natur der übertragenen Zustände. Fundamentale physikalische Prinzipien garantieren, dass Quantenzustände weder kopiert noch unbemerkt mitgelesen werden können, im Gegensatz zu den derzeit verwendeten klassischen Schlüsseln. Für eine Angreiferin, in der Kryptographie Eve genannt, ist es daher nach den Gesetzen der Quantenmechanik unmöglich, an den sicheren Schlüssel zu gelangen und jeder Abhörversuch wird von Alice und Bob bemerkt. Selbst vor künftig verfügbaren leistungsfähigen Quantencomputern stellt die Quantenkommunikation einen wirksamen Schutz dar.

Bislang sind Quantenkommunikationssysteme am Markt verfügbar, die es ermöglichen, quantenmechanische Zustände in Glasfasern über Distanzen von bis zu 100 km zwischen Alice und Bob zu übertragen. Die Größe der dabei pro Zeiteinheit erzielbaren sicheren Schlüssel ist allerdings noch sehr begrenzt und nimmt stark mit der Länge der Glasfaser ab. Technische Lösungen für die Vernetzung von mehr als zwei Teilnehmern sind ebenfalls noch nicht verfügbar.

Aktuelle Herausforderungen bei der Quantenkommunikation sind Steigerungen der Reichweite und Schlüsselraten bei der Übertragung in Glasfasern, terrestrischen Freistrahlstrecken sowie von Bodenstationen zu Satelliten. Für eine Ende-zu-Ende-Quantenverschlüsselung und ein künftiges weltumspannendes Quanteninternet benötigt es Quantenrepeater, die in der Lage sind, Quanteninformation weiter zu leiten, ohne sie dabei auszulesen (d. h. zu messen, wodurch der Austausch des Quantenschlüssels unterbunden würde). Sie können künftig anstelle der in den heute verfügbaren Übertragungsstrecken eingesetzten Trusted Nodes treten⁴. Gegenstand industrieller Forschung ist die geschickte Kombination von Quantenkommunikation mit klassischen Verschlüsselungsverfahren, um so die übertragbaren Datenraten zu steigern und trotzdem noch Sicherheit vor Angriffen mit Quantencomputern zu gewährleisten.

2.2 Quantensensorik

Eigenschaften von einzelnen Quantenobjekten können auch als Sensoren oder zur Bildgebung genutzt werden. Physikalische Messgrößen wie beispielsweise die Stärke eines Magnetfelds

1 www.leopoldina.org/publikationen/detailansicht/publication/perspektiven-der-quantentechnologien-2015/ (zuletzt geprüft am 30.11.2019)

2 qt.eu/app/uploads/2018/04/93056_Quantum-Manifesto_WEB.pdf (zuletzt geprüft am 30.11.2019)

3 *Technology Review*, Dezember 2019, S. 48.

4 In Trusted Nodes wird die Quanteninformation aus einem Teil der Übertragungsstrecke ausgelesen, klassisch weiter verarbeitet und erneut quantenverschlüsselt, bevor sie auf die nächste Teilstrecke zum nächsten Trusted Node geschickt wird.

oder die Beschleunigung werden auf Quanteneigenschaften zurückgeführt. Der Vorteil besteht darin, dass Quantensensoren im Betrieb nicht in regelmäßigen Abständen kalibriert werden müssen und robust gegen Umwelteinflüsse sind. Beim Quantenimaging kann die Auflösung und das Signal-zu-Rauschen-Verhältnis gegenüber klassischen bildgebenden Verfahren verbessert werden und sich so lichtempfindliche Objekte wie z. B. Zellgewebe untersuchen lassen.

Aktuelle Forschungsarbeiten beschäftigen sich beispielsweise mit der Integration von Quantensensoren in kostengünstige (Mikro-)Elektronische Systeme, mit der Verbesserung der bislang erzielten Messgenauigkeiten sowie mit der Entwicklung der aufwändigen bildgebenden Verfahren.

2.3 Quantencomputing

Klassische Datenverarbeitung basiert auf Bits, die entweder den Zustand ‚0‘ oder ‚1‘ annehmen können. Beim Quantencomputing wird die Eigenschaft von quantenmechanischen Bits, sogenannten Qubits ausgenutzt, die simultan den Zustand ‚0‘ und ‚1‘ annehmen können und jede Linearkombination von $|0\rangle$ und $|1\rangle$. Dadurch können manche Rechenschritte, die ein klassischer Computer nacheinander durchführen muss, von einem Quantencomputer gleichzeitig durchgeführt werden. Eine Reihe komplexer Probleme der Informatik, die selbst auf klassischen Supercomputern nicht in einer verfügbaren endlichen Rechenzeit lösbar sind, können auf Quantencomputern mit deutlich weniger Rechenaufwand gelöst werden. So gibt es Algorithmen, die mithilfe von künftigen leistungsfähigen Quantencomputern die heute eingesetzten gängigen kryptographischen Verfahren brechen könnten. Quantensimulatoren sind keine universell einsetzbaren Quantencomputer. Sie sind geeignet zur Berechnung spezieller Optimierungsprobleme, wie beispielsweise die Untersuchung von neuen pharmazeutischen Wirkstoffen, die Simulation von Eigenschaften von Bauteilen oder zur Untersuchung von Möglichkeiten zur Steigerung der Effizienz von chemischen Prozessen, wie sie in großindustriellen Anlagen beispielsweise bei der Düngemittelherstellung zum Einsatz kommen.

Bislang existierende Quantencomputer konnten noch keinen anwendungsrelevanten Vorteil gegenüber klassischen Computern erzielen. Kürzlich konnten Wissenschaftler in einem Oktober 2019 in der Fachzeitschrift Nature veröffentlichten Artikel⁵ für einen Spezialfall erstmals zeigen, dass der in den Google-Laboren verfügbare Quantencomputer mit 53 Qubits ein mathematisches Problem schneller lösen kann als jeder verfügbare klassische Supercomputer. Auch wenn das gewählte Szenario

keine Anwendungsrelevanz besitzt, so stellt der erstmalige experimentelle Nachweis der „Quantum Supremacy“, d. h. eines Geschwindigkeitsvorteils eines Quantencomputers gegenüber den leistungsstärksten klassischen Computern, einen wichtigen Meilenstein dar.

Heutige Quantencomputer bestehen aus weniger als einhundert Qubits, die in aufwendigen experimentellen Aufbauten im Ultrahochvakuum auf Temperaturen nahe dem absoluten Nullpunkt (-273,15 °C) gekühlt und von externen Einflüssen abgeschirmt werden müssen. Erst Quantencomputer mit eintausend oder mehr logischen Qubits wären in der Lage, die heute eingesetzten gängigen Verschlüsselungsverfahren zu brechen. Zudem reagieren Qubits extrem empfindlich auf Störungen von außen, weshalb zusätzlich zur Abschirmung eine leistungsfähige Fehlerkorrektur notwendig ist, die viele physikalische Qubits zu einem logischen Qubit verbindet. Eine solche Fehlerkorrektur muss allerdings noch entwickelt werden. Vorhandene Ansätze für Quantensimulatoren haben noch keine hinreichende Leistungsfähigkeit, um anwendungsrelevante Vorteile gegenüber klassischen Computern zu besitzen.

3 Methodik bei der vergleichenden Analyse der Publikationen und Patentanmeldungen

Die quantitative Analyse beruht auf Verfahren der Bibliometrie bzw. Patentometrie. Hierbei werden wissenschaftliche Publikationen und Patente quantitativ vermessen. In gepflegten Publikations- und Patentdatenbanken werden Metadaten zu den Patenten und Publikationen in einer strukturierten Datenbank hinterlegt, wie z. B. Titel, Abstract, Autor oder Keywords. Diese Datenbanken sind in der Regel Grundlage der genannten Verfahren, da sie einen automatischen Abgleich mit einer Suchphrase ermöglichen, die zu einer eingegrenzten Treffermenge führt. Auf diese Weise kann durch geeignete Suchbegriffe eine thematisch eingegrenzte Treffermenge erreicht werden, die anschließend analysiert werden kann.

Verwendet wurden die beiden Datenbanken Scopus von Elsevier für wissenschaftliche Publikationen und DOCDDB des European Patent Office (EPO) für Patente. Für die quantitative Analyse wurde in den thematisch eingegrenzten Treffermengen die Anzahl der Patente und Publikationen pro Land verglichen.

In einer iterativen Herangehensweise wurden zu Beginn auf Basis der Technologieabgrenzung in Kapitel 2 Suchphrasen aus relevanten Begriffen zu den drei Säulen definiert. Mit diesem Suchphrasenentwurf wurde eine erste Suchanfrage in beiden

⁵ Quantum supremacy using a programmable superconducting processor. Nature 574, 505–510 (2019). www.nature.com/articles/s41586-019-1666-5 (zuletzt geprüft am 30.11.2019)

Datenbanken durchgeführt. Dabei sind in der Patentdatenbank die Felder Titel, Abstract und Claims, und in der Publikationsdatenbank Titel, Abstract und Keywords durchsucht worden. Die Einträge der Treffermenge wurden gesichtet, um erscheinende, relevante Begriffe, die in der Suchphrase noch nicht enthalten sind, zu identifizieren und in der Suchphrase zu ergänzen.

Ebenso wurde auf Fehltreffer durchsucht, also Einträge, die Teil der Ergebnisliste sind, aber nicht der Technologieabgrenzung entsprechen. Solche Fehltreffer können dadurch entstehen, dass Begriffe mehrdeutig sind und auch in anderen Technologiefeldern verwendet werden. Mehrdeutige Begriffe wurden z. B. durch Boolesche Ergänzung (AND) präzisiert oder durch eine Schreibweise, die eindeutiger dem untersuchten Technologiefeld zugeordnet ist.

Gemessen und verglichen wurden die Anzahl der Patente und Publikationen pro Land. Die Anzahl der Publikationen wird als Kompetenz- und Aktivitätsindikator im Bereich wissenschaftlicher Auseinandersetzung mit Quantentechnologien herangezogen, während die Anzahl der Patentanmeldungen pro Land einen Indikator für die Transferaktivität des jeweiligen Landes darstellt. In den Patentdatenbanken wurde die Anzahl der Anmeldungen ermittelt, da hier nicht der Erfolg einer Patentanmeldung, sondern die Patentierungsaktivität untersucht werden sollte. Ein Patent ist ein erteiltes gewerbliches Schutzrecht, das eine technische Erfindung in Bezug zu einer (gewerblichen) Anwendung setzt (= Transfer). Sinnbildhaft dafür ist, dass, wenn man die aktivsten Akteure ermittelt (z. B. Top 100), darunter bei den Publikationen mit großer Mehrheit Forschungseinrichtungen und Universitäten erscheinen, bei den Patenten hingegen vorwiegend Unternehmen, also wirtschaftlich ausgerichtete Entitäten.

Die Analyse auf Basis von Metadaten aus sogenannten gepflegten Datenbanken hat Vor- wie auch Nachteile. Sie ermöglicht eine quantitative Analyse, die eine qualitativ ausgerichtete Analyse – z. B. mittels Experteninterviews oder auf Basis recherchierter Meinungen und Aussagen zu Trends aus unterschiedlichen Quellen – und deren Aussagen stützen und auch ergänzen kann. So können Expertenaussagen zu Trends durch ermittelte Indikatoren, wie z. B. Publikationen oder Patente pro Jahr, untermauert werden.

Nachteile liegen darin, dass nur die eingepflegten Daten Teil des analysierten Raums sind. Außerdem werden nur die Einträge untersucht, die mittels des Suchstrings der Treffermenge zugeordnet werden, in denen also die Suchbegriffe auftauchen. Patente oder Publikationen, die sich mit dem Untersuchungsgebiet befassen, aber in denen die Suchbegriffe nicht erscheinen, da andere Begriffe verwendet wurden, werden dadurch ausgeschlossen (sogenannte False Negatives: Abgleich des Eintrags

mit Suchphrase negativ, Eintrag aber relevant). Außerdem kann die analysierte Treffermenge sogenannte False Positives enthalten (Abgleich des Eintrags mit Suchphrase positiv, Eintrag aber nicht relevant). Damit werden falsche Treffer bezeichnet, die in der Treffermenge erscheinen, obwohl sie nicht Teil der thematischen Eingrenzung sind, da z. B. verwendete Suchbegriffe in anderen Technologiebereichen ebenfalls verwendet werden.

Diesen Nachteilen wurde durch den iterativen Ansatz der Suchphrasenerstellung entgegengewirkt. Durch das iterative Hinzufügen von relevanten Suchbegriffen wurde die Treffermenge bestmöglich erweitert und so False Negatives entgegengewirkt. Mehrdeutige Begriffe wurden iterativ präzisiert, um sie eindeutiger zu machen. War dies nicht erfolgreich, wurden Begriffe und Kombinationen von Begriffen verwendet, die zu ähnlichen Treffermengen führten. Auf den Einsatz des Booleschen Operators „NOT“, der zum Ausschluss von Suchbegriffen führt, wurde weitestgehend verzichtet, um nicht die Anzahl von False Positives auf Kosten von False Negatives zu erhöhen. Er wurde lediglich einmal eingesetzt.

Ein weiterer möglicher Nachteil der quantitativen Analyse auf Basis von Patenten und Publikationen kann außerdem sein, dass nicht alle Akteure und Aktivitäten erfasst werden, da sie nicht Teil der Datenbanken sind. Datenbanken sind weder immer vollständig noch auf dem aktuellen Stand. So erscheinen Patente erst dann in den Patentdatenbanken, wenn der Bearbeitungsstatus dies zulässt. Zwischen Patentanmeldung und der Veröffentlichung der Patentanmeldung bzw. der Erteilung des Patents liegen in der Regel 18 Monate. Die Erfassung von Publikationen in Publikationsdatenbanken dauert von der Einreichung über Prüfung bis hin zur Veröffentlichung und Erfassung in der Datenbank in der Regel ebenfalls mehrere Monate bis über ein Jahr. Die letzten ein bis zwei Jahre in der quantitativen Analyse sollte daher nicht berücksichtigt werden.

Hinzu kommt, dass nicht jede Aktivität sichtbar gemacht wird. So kann ein Akteur sich z. B. aus strategischen Gründen sowohl gegen eine Patentierung als auch eine Veröffentlichung und für die Geheimhaltung seiner Aktivität entscheiden, um sein Wissen nicht freizugeben. Aufgrund des gewählten vergleichenden Ansatzes, aggregiert auf Länderebene und der großen Datenmengen, sollten diese Einflüsse vernachlässigbar sein. Eine genaue Untersuchung des Einflusses wäre aufgrund der Geheimhaltung von Informationen zudem kaum zu untersuchen und festzustellen.

Thema	Publikationen	Patentanmeldungen	Patentanmeldungen pro 100 wiss. Publikationen
Quantenkommunikation	21.483	1.699	7,91
Quantensensorik	4.228	474	11,21
Quantencomputing	32.794	1.854	5,65

Tabelle 4.1: Anzahl an Publikationen und Patentanmeldungen in den verschiedenen Säulen der Quantentechnologien. Der Verwertungsindex gibt an, wie viele Patentanmeldungen pro 100 Publikationen eingereicht wurden.

4 Wissenschaftliche Publikationen und Patentanmeldungen

In Tabelle 4.1 ist die Anzahl an Publikationen und Patentanmeldungen zu den Quantentechnologien in den verschiedenen Säulen aufgelistet. Dabei fällt auf, dass die meisten Publikationen Quantencomputing und Quantenkommunikation adressieren und lediglich ein kleiner Teil auf Quantensensorik entfallen. Dabei ist die Betrachtung des zeitlichen Verlaufs der Veröffentlichungen aufschlussreich.

Bis Anfang der 1980er Jahre sind lediglich vereinzelt Publikationen zu verzeichnen, in Summe weniger als jeweils zehn Publikationen pro Jahr zu den verschiedenen Säulen der Quantentechnologien (s. Abb. 4.1). Bis Anfang der 1990er liegen die drei

Themengebiete hinsichtlich der Publikationszahlen etwa gleich auf, mit jeweiligen Publikationszahlen im unteren zweistelligen Bereich, bis es Mitte der 1990er Jahre zu einem starken Anstieg der Publikationszahlen beim Quantencomputing und bei der Quantenkommunikation kommt. Bei der Quantensensorik erfolgt ein qualitativ vergleichbarer Anstieg der Publikationszahlen ab Mitte der 2000er Jahre.

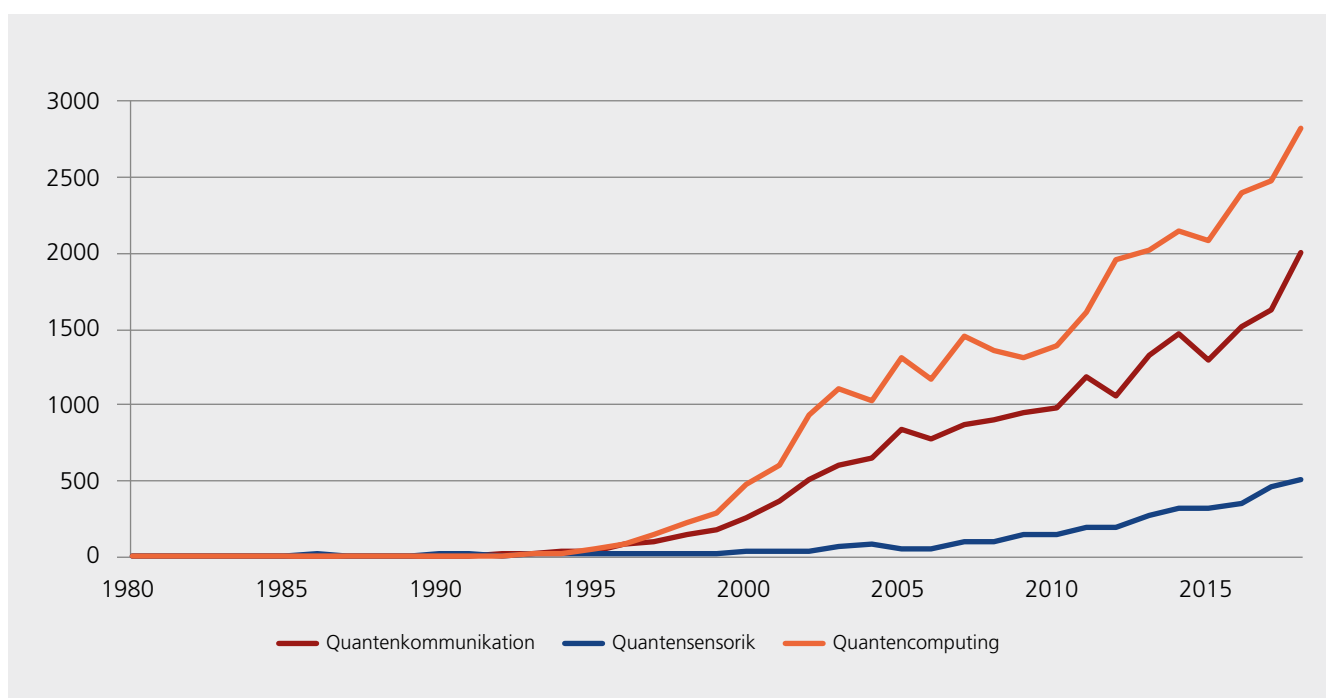


Abbildung 4.1: Publikationen pro Jahr in den verschiedenen Säulen der Quantentechnologien

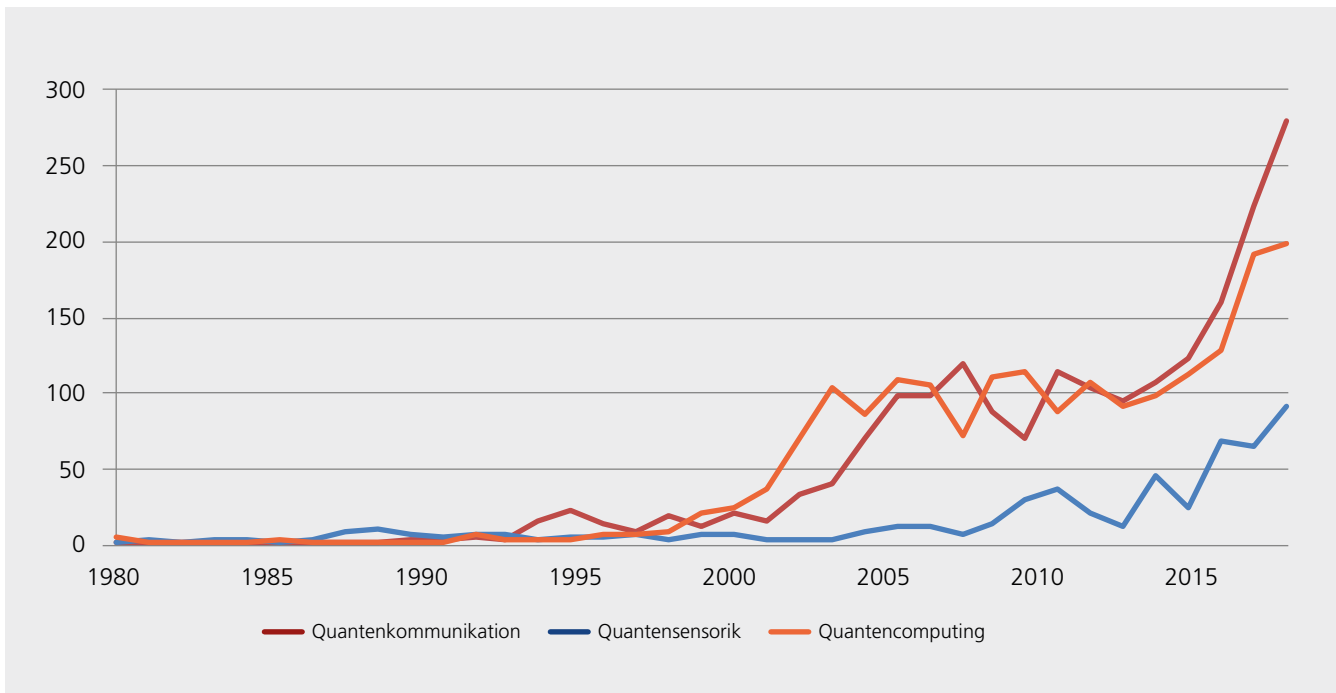


Abbildung 4.2: Patentanmeldungen pro Jahr in den verschiedenen Säulen der Quantentechnologien

Der Verlauf bei den Patentanmeldungen pro Jahr (s. Abb. 4.2) zeigt einen ähnlichen Trend verglichen mit den Publikationszahlen. Bis Ende der 1980er Jahre werden vereinzelt Patente angemeldet, jährlich mehrere Patente werden ab etwa 1990 angemeldet. Ende der 1990er Jahre steigen die Patentanmeldungen beim Quantencomputing und bei der Quantenkommunikation an, bevor ein zweiter starker Anstieg ab etwa 2010 erfolgt, zeitgleich mit dem Anstieg bei der Quantensensorik.

Insgesamt gesehen folgt der Verlauf der Patentanmeldungen pro Jahr in etwa den jeweiligen Publikationszahlen mit einer Verzögerung von ca. drei bis fünf Jahren. Die Quantensensorik ist – betrachtet man die Zahlen und Trends – ein jüngeres Themengebiet, von dem zu erwarten ist, dass es die Entwicklungen aus dem Quantencomputing und der Quantenkommunikation nachholt und damit sehr interessant für Wissenschaft und Wirtschaft ist.

Bei der Gesamtzahl (s. Abb. 4.3) liegt Deutschland mit 7 % der Publikationen an dritter Stelle hinter den USA (18 %) und China (16 %), dicht gefolgt von dem Vereinigten Königreich (7 %). Dies zeigt, dass China auch bei dem Zukunftsthema Quantentechnologien nicht nur aufgeholt hat, sondern mittlerweile einen Spitzenplatz im weltweiten Vergleich einnimmt. Japan zählt mit 6 % ebenfalls zu den fünf Nationen mit den meisten Publikationen. Mit Kanada (4 %), Italien (3 %), Frankreich (3 %) und Australien (3 %) gibt es eine Gruppe von Ländern mit ebenfalls zahlreichen Publikationen zu den Quantentechnologien.

Bei den Patentanmeldungen ändern sich die Anteile der Länder drastisch. Die Spitzenplätze nehmen USA (33 %), Japan (16 %), China (14 %), Kanada (9 %) und das Vereinigte Königreich (7 %) als einziges europäisches Land unter den ersten fünf ein. Deutschland liegt mit 2 % aller Patentanmeldungen an achter Stelle hinter der Republik Korea (3 %) und Australien (2 %). Auf die drei erfolgreichsten europäischen Länder Vereinigtes Königreich, Deutschland und Frankreich (2 %) verteilen sich lediglich 11 % aller Patentanmeldungen, wohingegen 63 % aller Patentanmeldungen bei den drei erfolgreichsten Ländern weltweit liegen. Die Kaimaninseln tauchen bei den Patenten in der Statistik weit vorne auf, da einige große internationale Konzerne die von ihnen gehaltenen Patente den Kaimaninseln zuordnen.

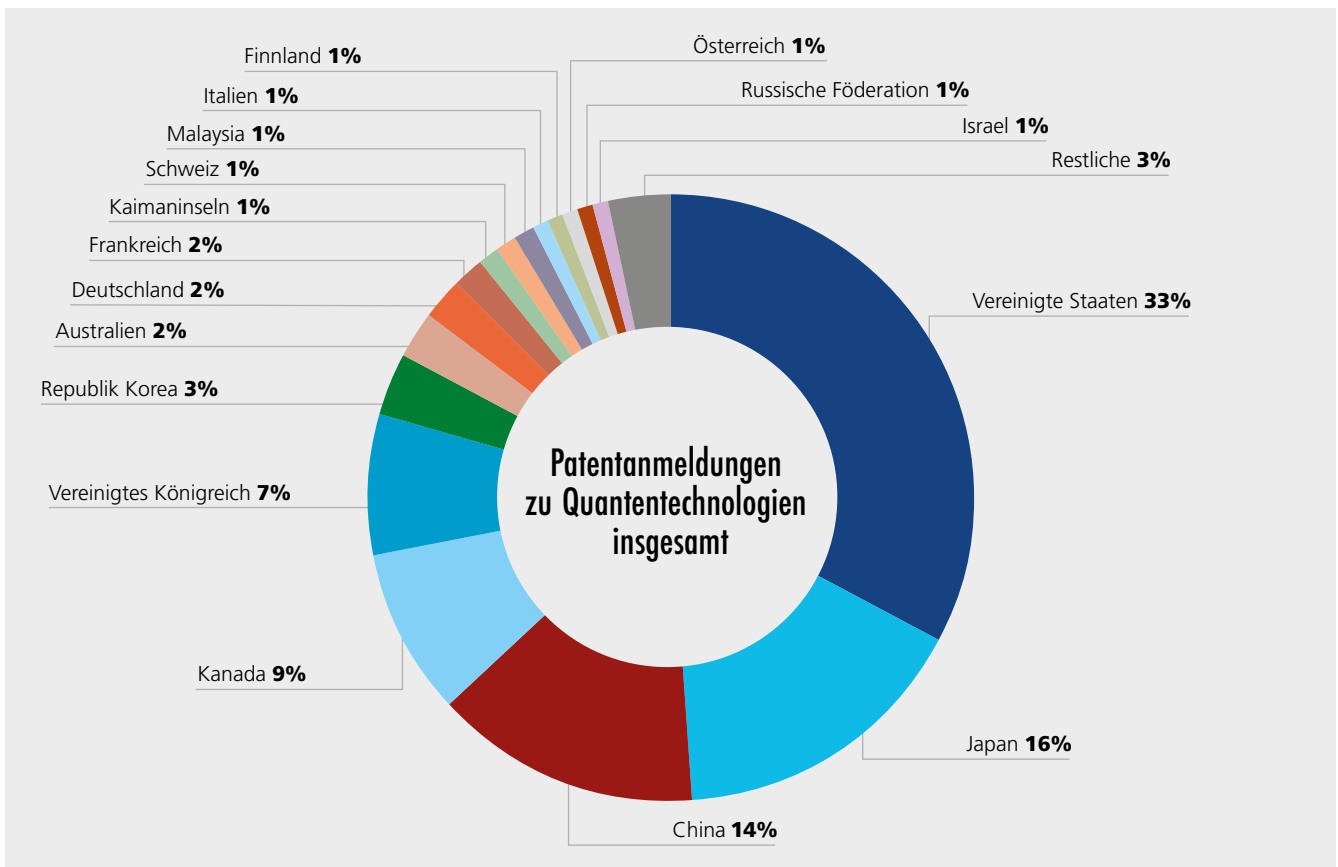
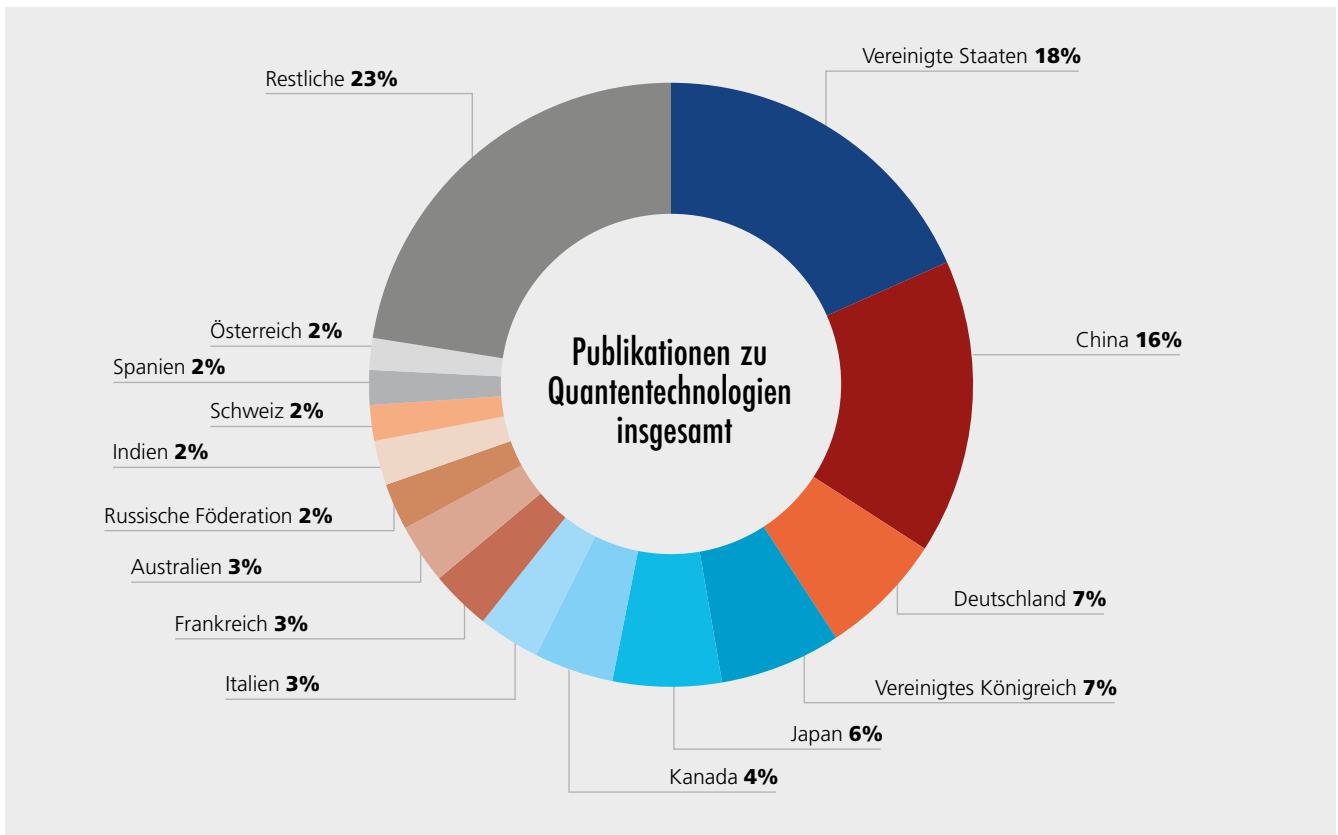


Abbildung 4.3: Alle Publikationen und Patentanmeldungen zu Quantentechnologien nach Ländern aufgeschlüsselt

4.1 Quantenkommunikation

Bei den Publikationen zur Quantenkommunikation (s. Abb. 4.4) liegt Deutschland mit 6 % an fünfter Stelle hinter China (21 %), USA (14 %), Vereinigtem Königreich (6 %) und Japan (6 %). Auf die drei führenden Nationen China (24 %), USA (24 %) und Ja-

pan (16 %) verteilen sich 64 % aller Patentanmeldungen. Das Vereinigte Königreich (10 %) liegt als erfolgreichstes europäisches Land im weltweiten Vergleich an vierter Stelle, Deutschland mit 2 % nur an 11. Stelle.

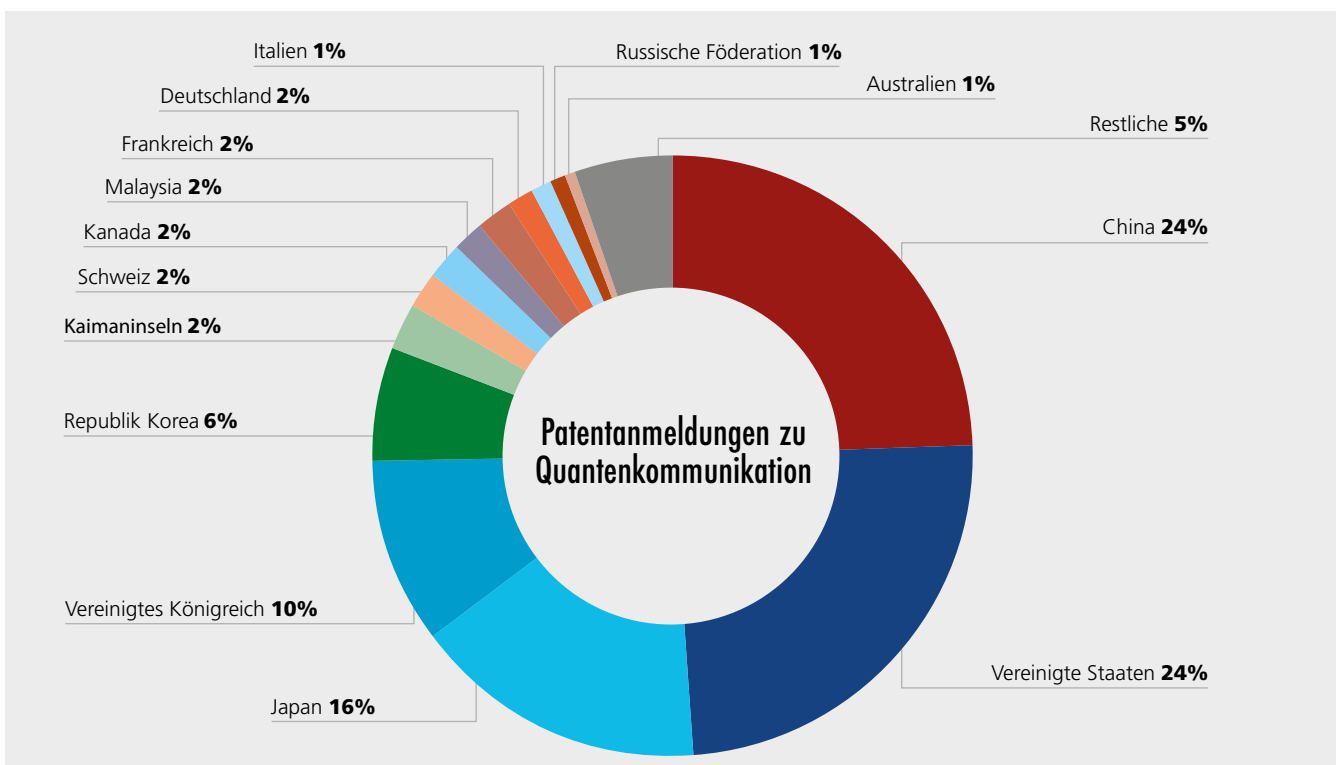
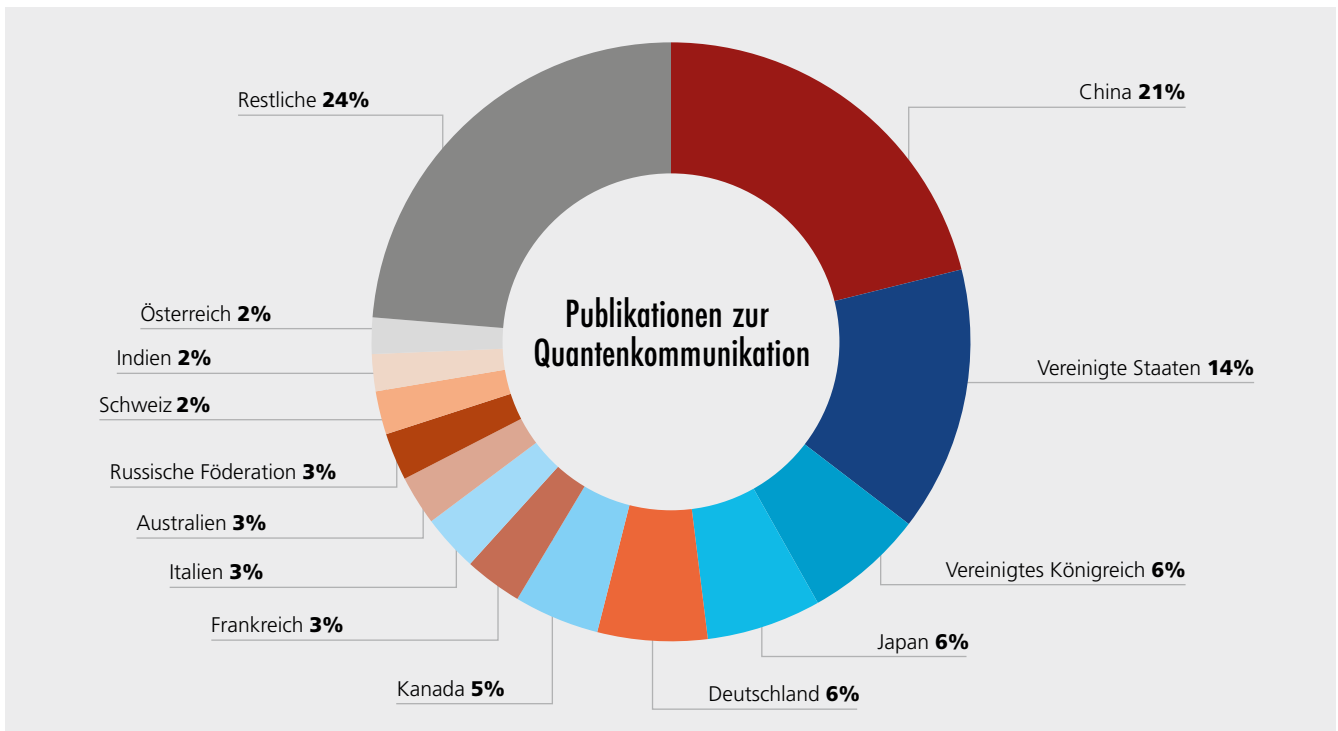


Abbildung 4.4: Publikationen und Patentanmeldungen zur Quantenkommunikation nach Ländern aufgeschlüsselt

4.2 Quantensensorik

Hinter den USA (21 %) liegt Deutschland bei den Publikationen zur Quantensensorik mit 10 % an zweiter Stelle, vor China (9 %), Vereinigtem Königreich (7 %) und Japan (5 %). Auf die USA ent-

fallen 49 % aller Patentanmeldungen, gefolgt von China (13 %), Japan (10 %), Vereinigtem Königreich (7 %) und Frankreich (5 %). Deutschland liegt knapp dahinter an 6. Stelle mit 4 %.

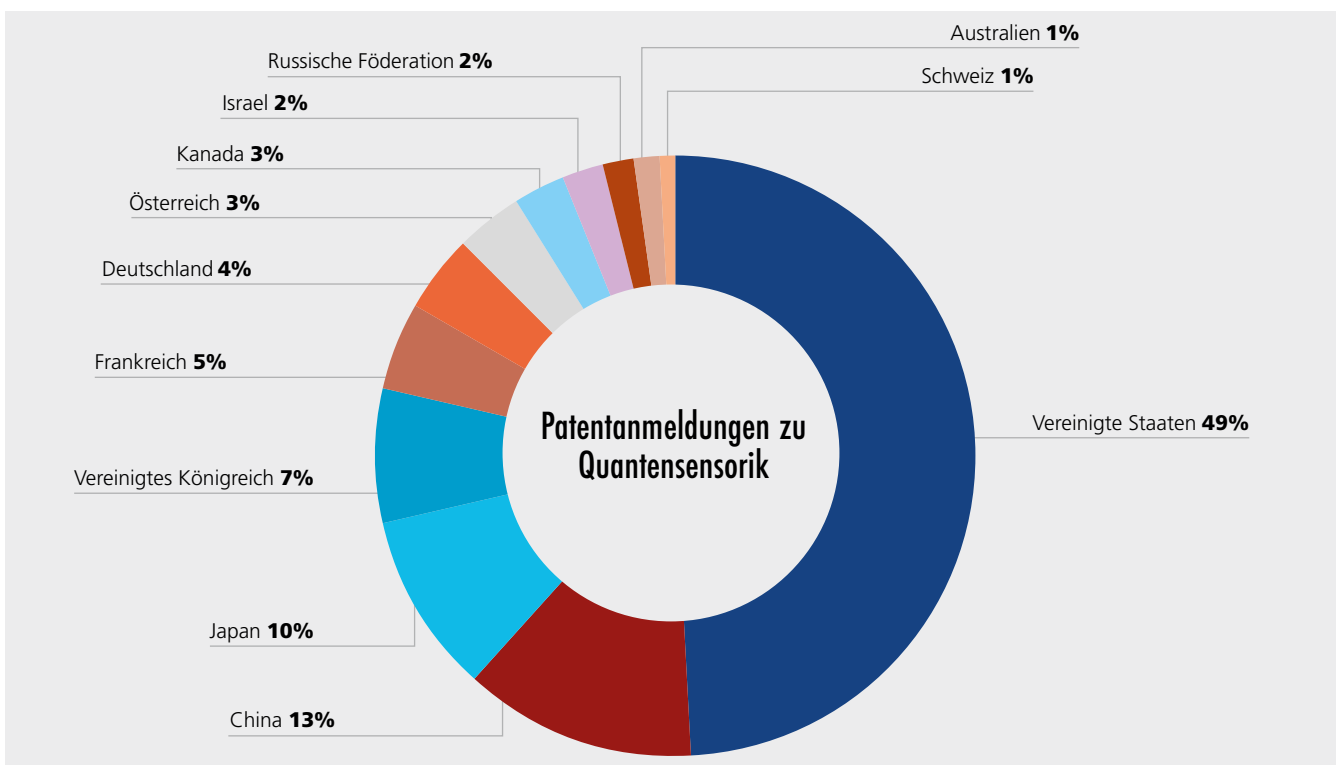
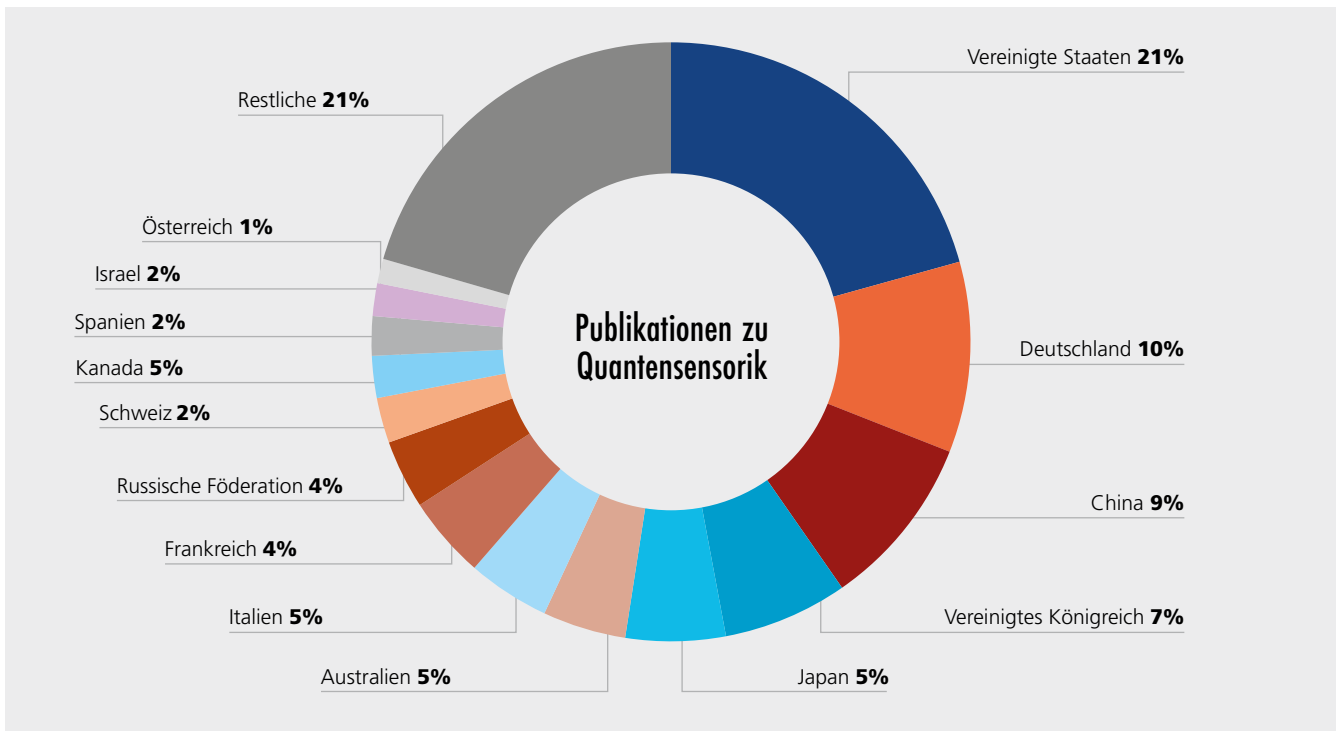


Abbildung 4.5: Publikationen und Patentanmeldungen zur Quantensensorik nach Ländern aufgeschlüsselt

4.3 Quantencomputing

Auch beim Quantencomputing führt die USA mit 21 % den weltweiten Vergleich bei den Publikationszahlen an, gefolgt von China (13 %) und Deutschland (7 %). Das Vereinigte Königreich (7 %) und Japan (6 %) liegen knapp dahinter. Die USA

(41 %), Kanada (17 %), Japan (14 %), China (9 %) und Australien (4 %) sind die fünf führenden Nationen bei den Patentanmeldungen. Deutschland folgt mit 2 % an 7. Stelle, hinter dem Vereinigten Königreich (3 %).

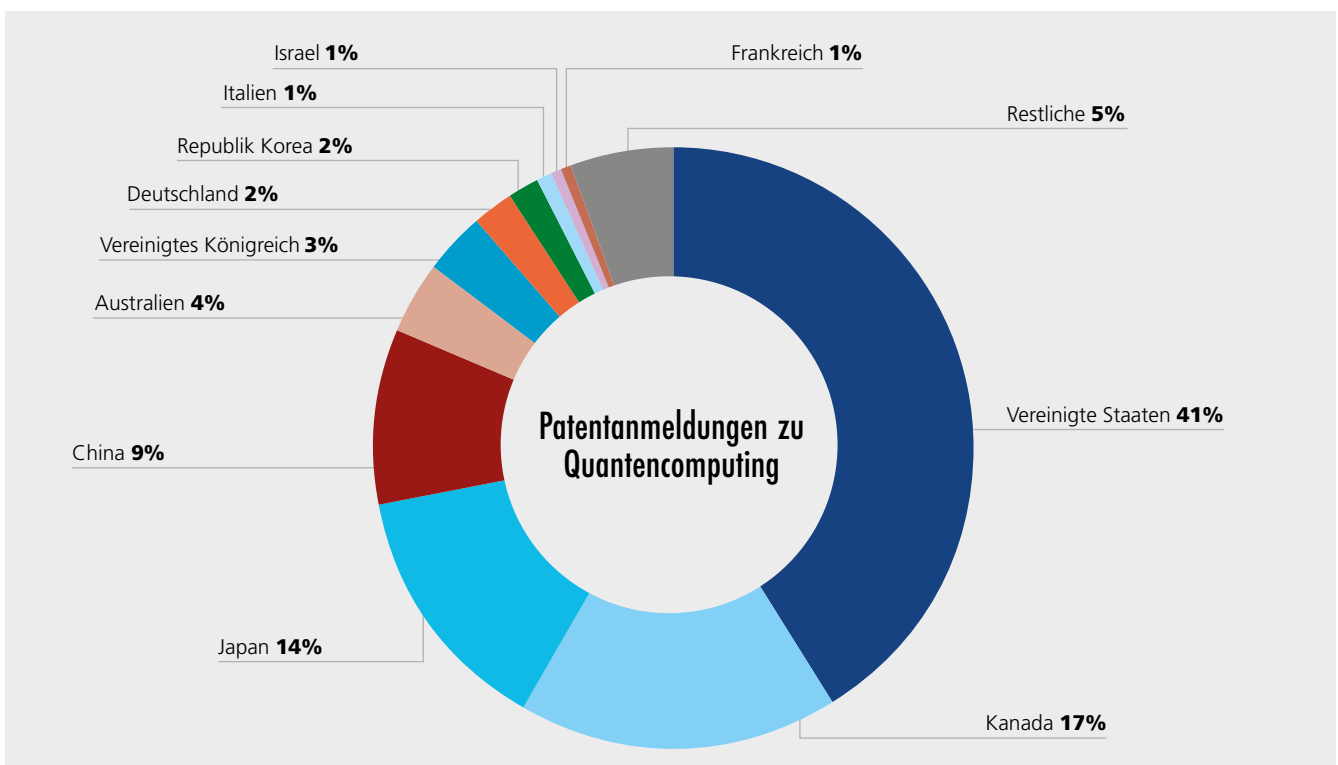
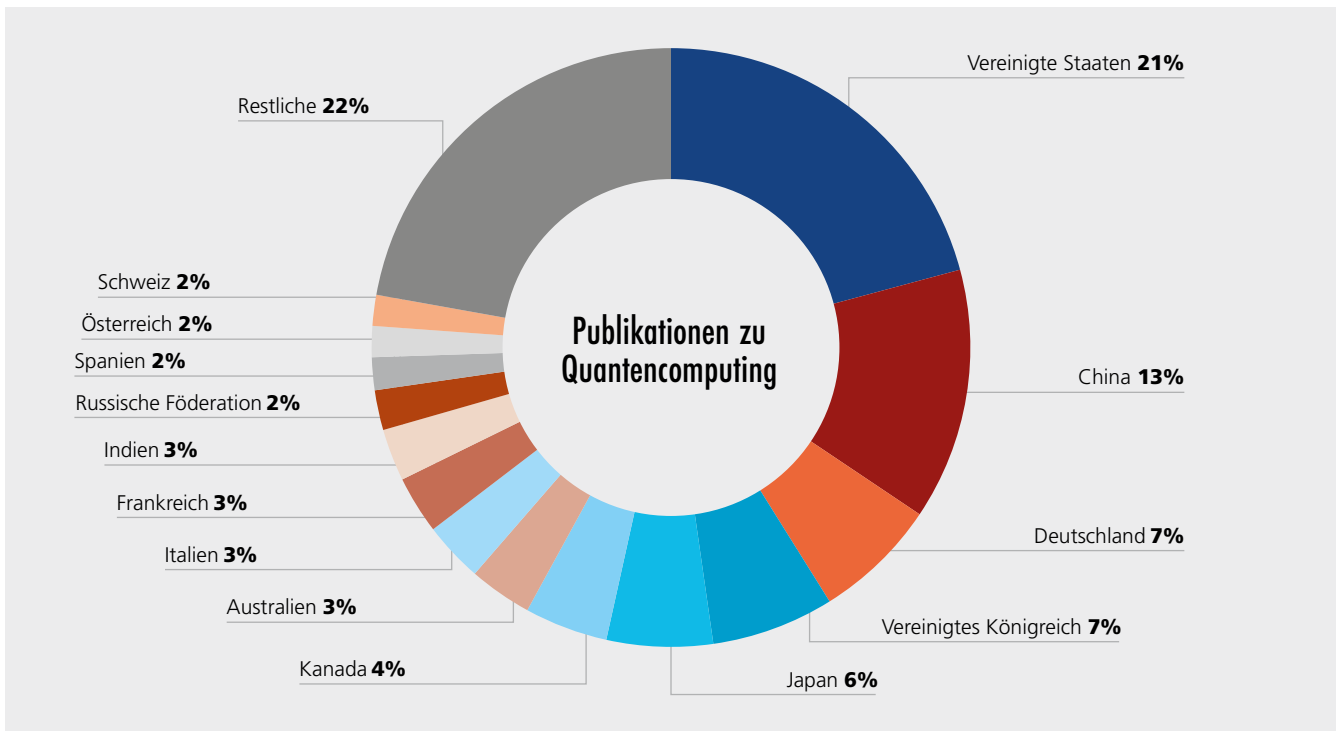


Abbildung 4.6: Publikationen und Patentanmeldungen zum Quantencomputing nach Ländern aufgeschlüsselt

4.4 Quantitative Gesamtbewertung

Deutschland liegt bei der Anzahl an Publikationen an dritter Stelle, bei den Patentanmeldungen jedoch lediglich an achter Stelle. Betrachtet man als Verwertungsindex die Anzahl an Patentanmeldungen pro 100 Publikationen für jedes Land, so ist Deutschland mit 1,91 weit abgeschlagen an 10. Stelle aller 14 betrachteten Länder hinter Österreich (2,81) und vor Italien (1,48). Führend sind Japan mit 15,67 Patentanmeldungen pro 100 Publikationen, gefolgt von Kanada (11,80), USA (10,20), Vereinigtem Königreich (6,49) und China (5,16).

Japan hat bei der Quantenkommunikation mit 21,80 den höchsten Verwertungsindex, die USA 19,81 bei der Quantensensorik und Kanada mit 18,59 beim Quantencomputing. Zum Vergleich liegen die Werte für Deutschland bei der Quantenkommunikation bei 2,30, bei der Quantensensorik 3,41 sowie beim Quantencomputing 1,52.

Insgesamt gesehen zeigen die Auswertungen, dass in Deutschland Quantensensorik ein wichtiges Themenfeld für Wissenschaft und Industrie ist. Der Transfer der Forschungsleistung in Deutschland in Patente erfolgt bei der Quantenkommunikation und beim Quantencomputing in geringerem Maße.

Vor dem Hintergrund der großen weltweiten Aktivitäten bei der Erforschung der Quantentechnologien der zweiten Generation und der Umsetzung in innovative Anwendungen sind europäische Maßnahmen wie das Quantum Flagship sowie die deutschen Fördermaßnahmen notwendig und wünschenswert. Deutschland und die europäischen Nachbarn als die Region, in der führende Wissenschaftler ihrer Zeit wie Max Planck und Albert Einstein vor etwas mehr als einhundert Jahren die Grundlagen der Quantenmechanik entdeckt haben, sollte alle Maßnahmen ergreifen, um sicher zu stellen, dass sie bei der Umsetzung der Quantentechnologien der zweiten Generation nicht ins Hintertreffen gerät.

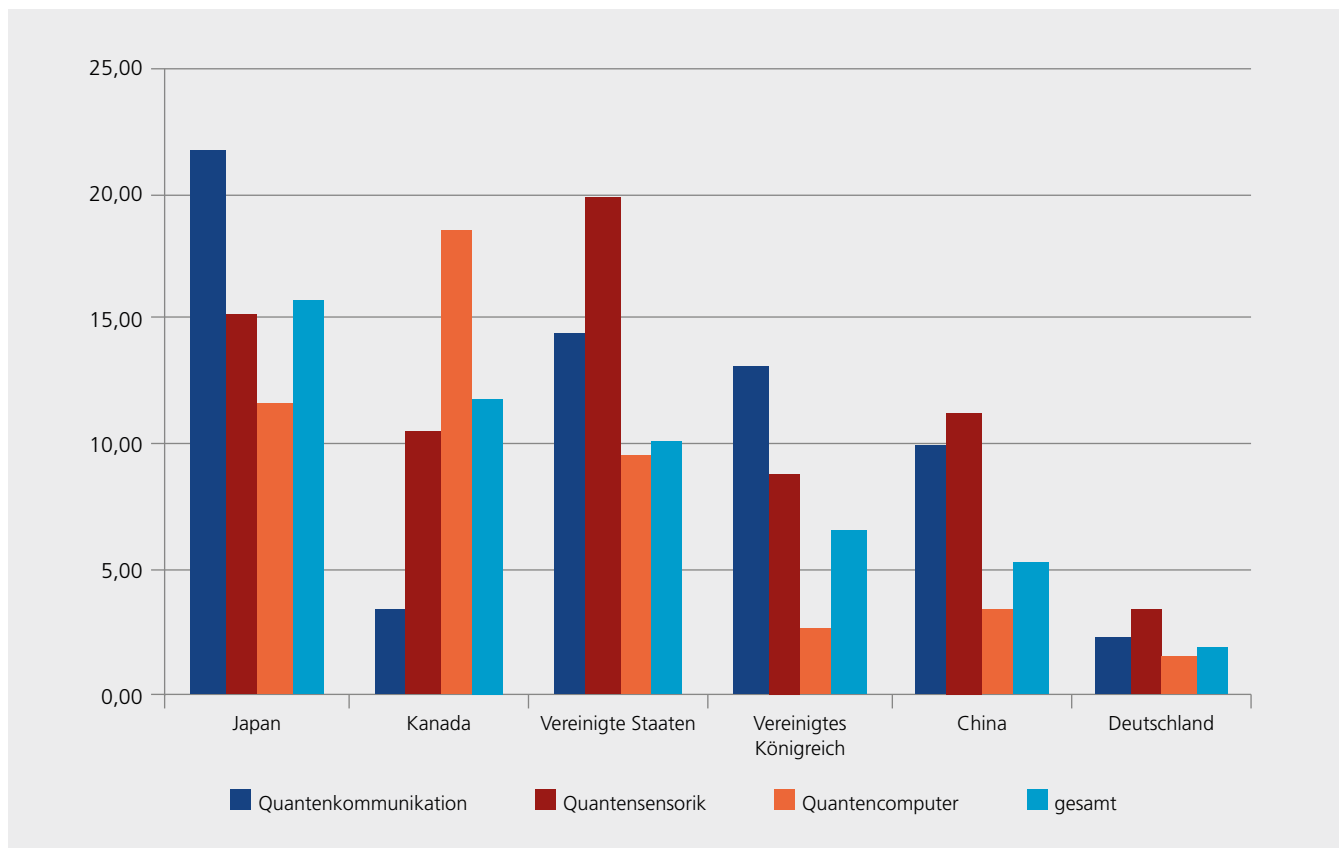


Abbildung 4.7: Verwertungsindex Patentanmeldungen pro 100 Publikationen nach Ländern aufgeschlüsselt

6 Betrachtet werden nur die publikationsstärksten Länder, d. h. solche, die mindestens 2 % aller Publikationen aufweisen (s. Abb. 4.1). Dadurch werden z. B. die Kaimaninseln und Malaysia nicht aufgelistet, bei denen keine bzw. wenige Publikationen zu verzeichnen sind, denen jedoch große Konzerne eine Vielzahl von Patentanmeldungen zugeordnet haben.

Herausgeber

*Prof. Dr. Volker Wittpahl
Institut für Innovation und Technik (iit)
in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH
Steinplatz 1, 10623 Berlin*

Kontakt

*Dr. Kristian Döbrich
Tel.: +49 (0) 30-310078-345
E-Mail: kristian.doebrich@iit-berlin.de*

iit perspektive Nr. 48

Dezember 2019

*Layout: Poli Quintana
Bildnachweis: Michaela Stahl*

ISBN: 978-3-89750-214-7

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird teils auf die gleichzeitige Verwendung männlicher und weiblicher Sprachformen verzichtet. Ferner wird auf die Verwendung des geschlechterneutralen Gender-Sterns verzichtet. Sämtliche Personenbezeichnungen gelten gleichwohl für jedes Geschlecht.

