

Strategische Analyse der Möglichkeiten zur stärkeren Industrialisierung der Ergebnisse der österreichischen Quantenforschung

Endbericht

Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie
Radetzkystraße 2, 1030 Wien
www.bmvit.gv.at
infothek.bmvit.gv.at

Erstversion: Mai 2018

Überarbeitete Version: August 2018

Ausgearbeitet von:

Hannes Hübel, Fabian Laudenschlager, Martin Suda und Martin Stierle

AIT – Austrian Institute of Technology GmbH
Giefinggasse 4, 1210 Wien

E-Mail: hannes.huebel@ait.ac.at

Inhalt

Strategische Analyse der Möglichkeiten zur stärkeren Industrialisierung der Ergebnisse der österreichischen Quantenforschung	1
Inhalt	2
1. Executive Summary	4
2. Zielsetzung und Übersicht	6
2.1. Hintergrund, Zielsetzung und Methodik	6
2.2. Übersicht der Quantentechnologie	6
2.3. Verwertungspotentiale der österreichischen Quantenforschung	6
2.4. Interesse der Österreichischen Industrie und internationales Umfeld	7
2.5. Empfehlungen	7
3. Übersicht der Quantentechnologie	8
3.1. EU-Flagship und nationale QT Programme	8
3.2. Beschreibung der Technologie in den vier thematischen Säulen	12
3.3. Österreichische Forschungslandschaft	24
3.4. Milestones in Österreich	28
3.5. Resümee	34
4. Verwertungspotentiale der österreichischen Quantenforschung	35
4.1. Verwertbare Ergebnisse der Österreichischen Forschung	35
4.2. Bedarf der Österreichischen Forschung	41
4.3. Patente	43
4.4. Firmengründungen	47
4.5. Zusätzliche Bedürfnisse	48
4.6. Resümee	49
5. Interesse der Österreichischen Industrie und internationales Umfeld	50
5.1. Standpunkt österreichischer Unternehmen zum Thema QT	50
5.2. Vernetzung der österreichischen Forschungsgruppen	52
5.3. Österreichische Technologiebringer	54
5.4. Internationales Firmenumfeld	54
5.5. Resümee	61
6. Empfehlungen	62
6.1. Förderung einer Quantentechnologie-Plattform	62
6.2. Förderung von Unternehmertum	63
6.3. Stärkung der F&E Aktivitäten	64

6.4. Förderinstrumente	64
6.5. Resümee	65
7. Anhang _____	66
7.1. Übersichtstabelle der Patenteinreichungen	66
7.2. Fragebogen Forschungsgruppen	69
7.3. Fragebogen Firmen	74

1. Executive Summary

Die sogenannte Zweite Quantenrevolution verspricht völlig neue Anwendungen und Technologien, die sich aus der Fähigkeit ergeben, einzelne Quantensysteme gezielt zu präparieren, manipulieren und letztendlich zu detektieren. Die technologischen Umsetzungen reichen von leistungsfähigeren Computern über sichere Kommunikation bis zu neuartigen Sensoren, die ihren klassischen Gegenstücke in vielen Belangen überlegen sind. Europa, das in der Erforschung der Quantentechnologien weltweit noch führend ist, soll nun, den Anschluss an den Rest der Welt nicht verlieren, wenn es zu Realisierungen und Anwendungen dieser Technologie kommt.

Dazu hat die Europäische Kommission ein Flagship zum Thema Quantentechnologie ins Leben gerufen. Die Hälfte, der insgesamt eine Milliarde Euro schweren Förderung, kommt von der Europäischen Kommission, der andere Teil wird von den beteiligten Mitgliedsländern aufgebracht. In Österreich wurde 2017 das nationale FTE-Förderungsprogramm „Quantenforschung und -technologie“ (QFTE) vorgestellt, das vom Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (FWF) und der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) umgesetzt wird. Ziel dieses Programms ist es, einen Transfer der herausragenden Forschungsarbeiten an den österreichischen Universitäten in die Industrie zu fördern.

Studie

Um sich einen Überblick des derzeitigen Stands der Quantentechnologie in Österreich zu verschaffen, wurde diese Studie vom Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (bmvit) in Auftrag gegeben, mit dem Ziel die Sicht der Forscher als auch die der Industrie abzubilden.

Den Beginn macht eine Gegenüberstellung der einzelnen Technologiesäulen (Quantenkommunikation, Quantencomputing, Quantensimulation und Quantensensorik) und die jeweilige Relevanz in der österreichischen Forschungslandschaft. In Befragungen mit den Forschungsgruppen, die an anwendungsnahen Quantentechnologien arbeiten, wurden die möglichen Verwertungsansätze für Quantentechnologien erhoben, zusammen mit dem Bedarf der Institutionen um ihre Forschungsagenden vorantreiben zu können.

In den Gesprächen mit Vertretern von österreichischen Unternehmen wurde, neben dem Interesse für Quantentechnologien, auch die Vernetzung mit österreichischen Forschern und Technologiebringern für die Forschung besprochen. Aus den damit gewonnen Informationen werden Empfehlungen, die zur Stärkung der Forschung und Industrialisierung von Quantentechnologien beitragen, abgegeben.

Resultate

Zu den verwertbaren Ergebnissen mit hohem technischen Reifungsgrad zählen die Quantenkryptographie, Atomuhren und Materie-Interferometer. Quantensimulatoren und Quanten Computer basierend auf Ionenfallen werden erst mittel- bis langfristig eine kommerzielle Rolle spielen. Weitere Quanten Sensorik Technologien wie N/V Zentren könnten, bei entsprechender industrieller Unterstützung, relativ schnell weiterentwickelt werden.

Der Bedarf der österreichischen Forschung reicht, unter anderem, von spezialisierten Laser Systemen, Hochfrequenz Elektronik bis zur Herstellung von photonischen Chips. Nur ein kleiner Bereich davon kann von der Österreichischen Industrie abgedeckt werden. Die Anzahl der Patente von österreichischen Institutionen liegt unter dem Europäischen Durchschnitt, ebenso ist die Zahl der Neugründungen von Unternehmen mit Quantentechnologie Fokus gering.

Obwohl die österreichischen Unternehmen von den Vorteilen der Quantentechnologie überzeugt sind und auch Kontakte mit den Forschungsgruppen pflegen, verhalten sich die meisten noch abwartend. Die Firmen könnten vereinzelt als Zulieferfirmen für die Forschung agieren, aber meist kommen ausländischen Firmen zum Zug. Dies ist zum Teil darauf zurückzuführen, dass die österreichischen Unternehmen den Forschungsgruppen nicht bekannt sind.

Eine zentrale Forderung ist daher die Errichtung einer „Quanten-Plattform“, die, bestehend aus akademischen und industriellen Partnern, einerseits zur Vernetzung dient, aber andererseits auch aktiv zur strategischen Entwicklung und bei Entscheidungsprozessen beitragen soll. Des Weiteren soll eine Gründerinitiative mit einem Quanteninkubator und einer gezielten Informations-Kampagne über Unternehmensgründungen, unterstützt werden. Die Infrastruktur für Forschung und Entwicklung sollte, vor allem im Bereich der Schlüsseltechnologien, ausgebaut werden und die Grundlagen der Quantentechnologie sollten schon früh in den Studienprogrammen, inkl. der Ingenieurwissenschaften, der Hochschulen vermittelt werden. Da der interne Markt für Quantentechnologien noch nicht vorhanden ist, sollte versucht werden öffentliche Institutionen als Pilotkunden zu gewinnen und den Forschungsstandort Österreich für ausländisches Investment attraktiv zu gestalten.

2. Zielsetzung und Übersicht

2.1. Hintergrund, Zielsetzung und Methodik

Hintergrund der vorliegenden Studie ist das von der Europäischen Kommission ins Leben gerufene Quantum Technology (QT) Flagship, im Rahmen dessen binnen der kommenden zehn Jahre eine Fördersumme von insgesamt einer Milliarde Euro ausgeschüttet werden soll. Dabei soll die Hälfte des Fördervolumens von der Europäischen Kommission direkt zur Verfügung gestellt werden und der Rest durch Initiativen auf nationaler Ebene ergänzt werden.

Ziel der Studie ist, ein umfassendes Bild der österreichischen Forschungslandschaft im Bereich Quantentechnologien zu zeichnen, den Entwicklungsgrad diverser Quanten-basierter Innovationen zu erheben sowie deren wirtschaftliche Verwertbarkeit zu beurteilen. Es soll der Bedarf der österreichischen Quantenforschung an fehlenden Technologiebausteinen ebenso erhoben werden wie das Interesse österreichischer Technologieunternehmen an der kommerziellen Nutzbarmachung der Quantenphysik. Darüber hinaus sollen Anhaltspunkte für das bessere Vorankommen Quanten-basierter Forschung und Entwicklung sowie für die verbesserte Vernetzung der österreichischen Quantenforschung und heimischer Industrieunternehmen erhoben und in konkrete Handlungsempfehlungen übersetzt werden.

Die in dieser Studie dargelegten Informationen wurden zum Teil durch Sekundärforschung erhoben und zum anderen Teil durch Fragebögen und Interviews mit Vertreter/innen der universitären Quantenforschung und Technologieunternehmen gewonnen.

2.2. Übersicht der Quantentechnologie

Die vier thematischen Säulen, entlang derer das QT-Flagship aufgebaut ist, werden einzeln vorgestellt sowie deren Potentiale und gegenwärtige Herausforderungen erläutert. Diese Säulen umfassen **Quantenkommunikation**, **Quantencomputing**, **Quantensimulation** und **Quantensensorik**. In den Beschreibungen wird auf die wissenschaftlichen Grundlagen sowie besonders auf nutzbare Anwendungsfälle eingegangen. Im Anschluss wird auf die Arbeit österreichischer Forschungsgruppen eingegangen, die sich in den jeweiligen Technologiesäulen besonders hervorgetan haben mit gesonderter Hervorhebung einiger wichtiger Meilensteine, welche die österreichische Quantenforschung ins internationale Rampenlicht gerückt haben.

2.3. Verwertungspotentiale der österreichischen Quantenforschung

Auf Basis von Interviews, die mit Gruppenleitern an der Universität Wien, der Technischen Universität Wien, der Universität Innsbruck sowie dem Institute for Science and Technology (IST) geführt wurden, wird eine Einschätzung der Verwertungspotentiale von Quantentechnologien im Allgemeinen und von einzelnen Technologiesparten im Speziellen ermittelt. Dabei wird einzeln auf die vier Technologiesäulen eingegangen und die dazugehörigen Anwendungen in Hinblick auf den Technologiestand in Österreich, auf den technischen Reifegrad, auf mögliche Interessenten aus der österreichischen Industrie sowie auf das internationale Marktumfeld beleuchtet.

Zusätzlich zur möglichen Kommerzialisierung von Quantentechnologien wird als weiterer Aspekt des Wirtschaftsfaktors Quantenphysik der Technologiebedarf österreichischer Forschungsgruppen erhoben. Dies soll als Anknüpfungspunkt für Kooperationen dienen, im Rahmen derer österreichische Unternehmen als Zulieferer für die universitäre Forschung agieren.

Als wichtiger Indikator für die kommerzielle Verwertung von Technologien, die aus der Quantenforschung hervorgehen, werden in diesem Kapitel Patenteinreichungen (im internationalen Umfeld und in Österreich) sowie die Gründungen von Spin-Offs aus der universitären Forschung diskutiert. Unter anderem wird auf die Anreize und Hürden für Patente und Firmengründungen entsprechend der Interviewauswertungen eingegangen.

2.4. Interesse der Österreichischen Industrie und internationales Umfeld

Es wird das Verwertungspotential von Quantentechnologien aus Unternehmensperspektive beleuchtet. Dafür werden die Gespräche mit Vertreter/innen diverser Wirtschaftstreibender aus der Technologiebranche ausgewertet. Es wird einerseits das Interesse der an der Studie beteiligten Unternehmen an Quantentechnologien diskutiert und andererseits für die Quantenforschung relevante Kompetenzen der Firmen ausgearbeitet. Auf einen Abriss der bestehenden Kooperationen zwischen Quantenforschung und Industrie folgen aus den Interviews erhobene Vorschläge zur besseren nachhaltigen Vernetzung der beiden. Um positive Beispiele für das wirtschaftliche Potential der Quantenphysik zu geben, wird ein Überblick über internationale Unternehmen hergestellt, die entweder als direkte Anbieter von Quantentechnologien oder als Zulieferer für die Quantenforschung Wertschöpfung betreiben.

2.5. Empfehlungen

Als Abschluss werden Empfehlungen zur Stärkung der Quantentechnologie Entwicklung in Österreich abgegeben. Zum Teil entstammen diese Vorgaben direkt aus den Befragungen mit den Forschungsgruppen und Unternehmen, zum anderen Teil wurden bereits erfolgreiche Umsetzungen in anderen Ländern analysiert und verwertet. Spezifische Empfehlungen werden für die Aufstellung einer Quantentechnologie-Plattform zur besseren Vernetzung gegeben. Des Weiteren werden Vorschläge zur Unterstützung von Unternehmensgründungen im Bereich Quantentechnologien aufgelistet. Die prinzipiellen Maßnahmen zur Stärkung der Forschung und Entwicklung werden ebenfalls aufgeführt, sowie Vorschläge für Förderinstrumente.

3. Übersicht der Quantentechnologie

3.1. EU-Flagship und nationale QT Programme

3.1.1. EU QT Flagship Program

Mit dem Quantum Technology (QT) Flagship versucht die EU, sich bei der Erforschung und Nutzbarmachung der Quantenphysik an der weltweiten Spitze zu etablieren. Ein besonderer Fokus ist dabei auf die Entwicklung von Quantentechnologien zur Marktreife gelegt. So soll das Flagship die Gründung neuer Startups, das Wachstum von Klein- und Mittelunternehmen und der Großindustrie anfeuern.

Es wird festgehalten, dass die europäische Quantenforschung bereits heute eine internationale Führungsposition innehat. Fünfzig Prozent der wissenschaftlichen Artikel im Bereich Quantentechnologien stammen von europäischen Forscherinnen und Forschern. Dennoch gilt es angesichts der Bemühungen außereuropäischer Forschung sowie der Quanten-Initiativen privater Großunternehmen (Google, IBM, Microsoft, Intel, Toshiba) den Anschluss nicht zu verlieren.

Über die vergangenen 20 Jahre wurde die Quantenforschung mit Geldern der Europäischen Kommission in der Gesamthöhe von 550 Mio. Euro gefördert. Demgegenüber steht eine Summe von 1 Mrd. Euro, die im Rahmen des Flagships in den kommenden zehn Jahren ausgeschüttet werden soll. Dabei sollen die Gelder aus den EU-Förderprogrammen Horizon 2020, FP9 und anderen EU-Quellen sowie aus nationalen Förderprogrammen stammen.

Grundsätzlich wird das Fördervorhaben in vier thematische Säulen gegliedert, wobei für jede Säule kurz- und langfristige Meilensteine und Ziele definiert wurden, welche gefördert durch die Mittel des Flagships die Quantentechnologien breiten Anwendungen zugänglich machen sollen. Die thematischen Pfeiler umfassen

- **Quantenkommunikation:** insb. Quantenkryptographie, Quantenzufallszahlengenerator, Quanteninternet
- **Quantencomputation:** dramatischer Speed-up bei bestimmten mathematischen Problemen und Suchalgorithmen, umfassend Fehlerkorrektur und Algorithmik
- **Quantensimulation:** insb. Simulation von Quantensystemen in Material-, Bio- und Pharmawissenschaft
- **Quantenmetrologie und –sensing:** insb. hochgenaue Vermessung von Zeit, Gravitation, elektrischen und magnetischen Feldern

Dabei werden die Fördergelder auch in sogenannte „enabling aspects“ investiert, das heißt in Schlüsseltechnologie und Infrastruktur, die auf dem einen oder anderen Weg das Vorankommen in den vier thematischen Pfeilern sicherstellt. Als enabling aspects genannt werden

- **Engineering und Control:** insb. das Vorantreiben der Entwicklung von Theorien und Konzepten zu anwendungsnahen Produkten. Darunter fallen vor allem die dafür nötigen Technologiebausteine, wie Materialfabrikation, Miniaturisierung, Integration auf elektrischen und optischen Chips. Auch die Weiterentwicklung bestehender Prototypen zu robusten low-cost Modellen fällt unter die Kategorie.
- **Software und Theorie:** Darunter fallen die Entwicklung von Algorithmen und Protokollen, welche mithilfe von Quanteneffekten deutliche Performancesteigerungen verglichen mit klassischen Algorithmen gewährleisten.

- **Wissenschaftliche und technologische Ausbildung:** Gemeint ist insbesondere das Heranziehen einer neuen Generation fähiger Wissenschaftler, Ingenieure und Produktentwickler, sowie eine verstärkte Kommunikation in Richtung Öffentlichkeit, um die Gesamtgesellschaft an das Potential der Quantentechnologien heranzuführen.

Als Ziele des QT Flagships werden genannt: (1) Die Konsolidierung und der Ausbau der europäischen Vormachtstellung in der Quantenforschung, (2) die Entfaltung der europäischen Industrie zum Repräsentanten Europas als führender Wirtschaftsstandort im Bereich Quantentechnologien und (3) die Etablierung von Europa als attraktiven Standort für Innovation, Forschung und Investment.

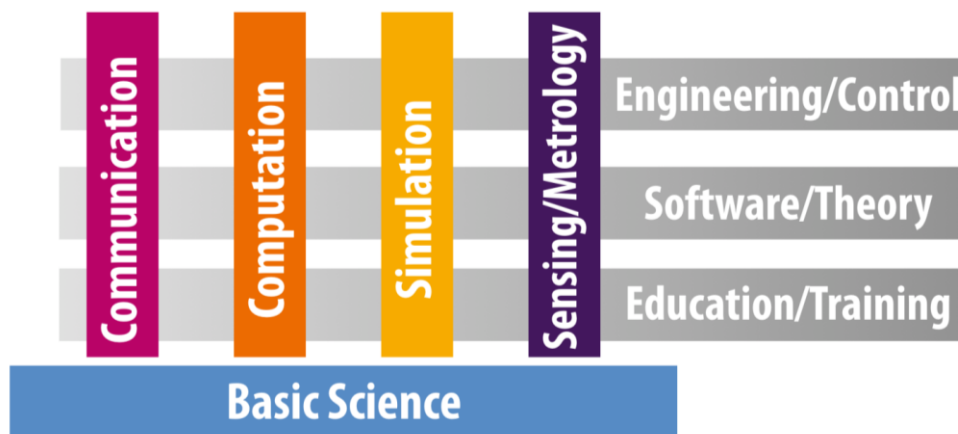


Abbildung 1: Die vier thematischen Säulen des QT-Flagships mit den querverlaufenden *enabling aspects*. Quelle: High Level Steering Committee, *Quantum Technologies Flagship – Final Report*, European Commission

3.1.2. Internationale QT Programme

3.1.2.1. Europa

In den letzten Jahren wurde weltweit vermehrt Förderbudget für die Entwicklung von Quantentechnologie-Anwendungen gesteckt. Das Augenmerk wurde dabei explizit auf Technologie-Entwicklung gelegt. Federführend in Europa war dabei Großbritannien, das schon 2013 ein nationales Programm startete. Im Zuge der europäischen Quantentechnologie-Initiative, bekannten sich auch andere europäische Länder dazu, die Quantentechnologie verstärkt zu fördern. Dabei sind die folgenden Programme erwähnenswert:

Großbritannien¹

Im Herbst 2013 wurde der Beschluss gefasst, ein nationales Quantum Technology Programm für 5 Jahre mit £270 Millionen zu fördern. Ziel des Programms war es die Umsetzungen von Quantentechnologien in eine Marktumgebung zu beschleunigen und dabei Innovationen von britischen Unternehmen zu fördern. Die Hälfte dieser Förderung wurde eingesetzt um 4 große Zentren (Quantum Technology Hubs) zu errichten, an denen erforscht wird, wie die

¹ <http://uknqt.epsrc.ac.uk/>

Eigenschaften der Quantenmechanik für den Einsatz in der Technologie nutzbar gemacht werden können. Die vier Hubs teilen sich in die folgenden Technologie-Sparten auf:

- Sensors and Metrology
- Quantum Enhanced Imaging
- Networked Quantum Information Technologies
- Quantum Communications Technologies

Deutschland²

Das Programm Quantentechnologie-Grundlagen und Anwendungen (QUTEGA) startete in 2017 und soll für 10 Jahre laufen. Dabei werden pro Jahr ca. €30 Millionen zur Förderung bereitgestellt. Im Rahmen von QUTEGA wurden bis jetzt 3 Pilotprojekte, mit den folgenden Themen, bewilligt:

- Optische Einzel-Ionen Uhr für Anwender
- Neue Quantensensoren für Mensch-Maschine Interfaces
- Quantenschlüsselverteilung mit Cube-Sats

Niederlande³

135 Millionen Euro werden in den nächsten 10 Jahren für die Forschung im Bereich Quanten Computing und Quanten Internet am Institute for Quantum Technology (QuTech) in Delft, bereitgestellt. QuTEch profitiert des Weiteren durch ein Industrial Partnership Programm mit Firmen wie Microsoft und Intel.

Schweden⁴

Das 2018 gegründete Wallenberg Centre for Quantum Technology (WACQT) ist eine 10-jährige Initiative (ca. €100 Millionen) mit dem Hauptziel, einen Quantencomputer basierend auf supraleitenden Qubits zu realisieren. Im kleineren Maßstab werden auch Technologien für Quantenkommunikation und Quantensensorik gefördert.

Frankreich⁵

In Frankreich gibt es mehrere Förderprogramme für Quantentechnologien, so z.B. das Research Priority Program for Quantum Technologies (€ 20 to € 50 Millionen für 10 Jahre), €1.6 Millionen pro Jahr aus dem Verteidigungsbudget und Einrichtungen wie das Quantum Engineering Zentrum⁶ der Universität Grenoble-Alps.

Italien⁷

Der QuantERA Call wird aber mit €2 Millionen unterstützt und ein nationales Quantenkommunikation Testbed (Italian Quantum Backbone) wird mit €6 Millionen über 5 Jahre gefördert.

² <http://www.qutega.de>

³ <https://qutech.nl/investmentquantumtechnology>

⁴ <http://www.chalmers.se/en/news/Pages/Engineering-of-a-Swedish-quantum-computer-set-to-start.aspx>

⁵ http://ec.europa.eu/newsroom/document.cfm?doc_id=43130

⁶ <https://quantum.univ-grenoble-alpes.fr/>

⁷ http://ec.europa.eu/newsroom/document.cfm?doc_id=43129

Ungarn⁸

In Ungarn werden €11 Millionen von 2017-2022 im Rahmen eines Quantentechnologie Forschungsprogramms zur Förderung ausgeschrieben.

3.1.2.2. Weltweit

Abseits von Europa sind die USA, China, Australien und Kanada die großen Akteure.

USA⁹

Das U.S. Department of Energy hat ein 3-Jahres Programm für die Forschung in Quantentechnologien mit einem Gesamtbudget von \$30 Millionen angekündigt. Zurzeit wird auch über eine große, \$500 Millionen schwere *National Quantum Initiative* verhandelt. Zu den USA ist auch zu sagen, dass neben der Förderung aus öffentlicher Hand auch viele große Firmen wie Google, Microsoft, Intel mit privaten Mitteln die Quantentechnologieentwicklung vorantreiben.

Australien¹⁰

Quantentechnologien wurden als eine der Prioritäts-Initiativen identifiziert und werden im Rahmen des Next Generation Technologies Fund des Departments of Defense gefördert. Das Gesamtvolumen des Funds für alle Technologiesparten beträgt \$575 Millionen für die nächsten 10 Jahre.

China¹¹

Der 13te 5-Jahres Plan (2016-2020) stufte Quantentechnologien explizit mit hoher Dringlichkeit ein. Unter den ambitioniertesten Projekten befanden sich die erfolgreiche Demonstration von Quantenkryptographie über Satelliten und der Aufbau eines 2000km langen Quantennetzwerks zwischen Peking und Shanghai. Die Bereiche Quanten Computer und Quantensensorik werden in einem neuen \$10 Milliarden teuren Forschungszentrum in Hefei erforscht und entwickelt.

⁸ http://ec.europa.eu/newsroom/document.cfm?doc_id=43134

⁹ <https://www.lightourfuture.org/getattachment/Home/About-NPI/Resources/NPI-Recommendations-to-HSC-for-National-Quantum-Initiative-062217.pdf>
http://www.newswise.com/doescience/?article_id=693918

¹⁰ <http://www.janes.com/article/77006/australia-seeks-guidance-on-quantum-technologies>

¹¹ <https://www.popsci.com/chinas-launches-new-quantum-research-supercenter>

3.2. Beschreibung der Technologie in den vier thematischen Säulen

3.2.1. Säule 1 – Quantenkommunikation

Informationsübertragung unter Nutzbarmachung von Phänomenen, die exklusiv der Quantenphysik zugerechnet werden (also keine Entsprechung in der klassischen Physik besitzen), wird allgemein als Quantenkommunikation bezeichnet. Diese quantenspezifischen Phänomene, die in der Quantenkommunikation Anwendung finden, sind unter anderem

- das Superpositionsprinzip,
- die Quantenverschränkung,
- die Heisenberg'sche Unschärferelation,
- das No-Cloning-Theorem,
- probabilistischer Messausgang.

Die verschiedenen Spielarten der Quantenkommunikation unterscheiden sich stark in ihrer technologischen Reife und auch in der ihnen zugesprochenen Nützlichkeit. Als wichtigste zu nennen ist die Quantenkryptographie, andere Protokolle sind Quantenteleportation und Superdense Coding.

3.2.1.1. Quantenkryptographie

Als Quantenkryptographie wird Verschlüsselung von Daten mittels Quantenphysik bezeichnet. Die mit Abstand nennenswerteste Anwendung der Quantenkryptographie ist die Quanten-Schlüssel-Verteilung (engl. „Quantum key distribution“, QKD). QKD erlaubt die symmetrische Erstellung von identischen zufallsbasierten Schlüsseln zwischen exklusiv zwei Gesprächspartnern. Dadurch wird die Verschlüsselung und Entschlüsselung mittels One-Time Pad (OTP) ermöglicht. Das OTP-Verfahren garantiert informationstheoretische Abhörsicherheit – im Gegensatz zur heute geläufigen asymmetrischen Public-Key-Verschlüsselung, deren Sicherheit auf der Komplexität der Primfaktorenzerlegung für klassische Computer beruht (RSA-Verfahren). Seit der Entdeckung des Shor-Algorithmus ist zudem bekannt, dass ein funktionierender Quantencomputer die Primfaktorenzerlegung wesentlich effektiver, in polynomieller statt exponentieller Zeit, lösen könnte und somit die gesamte geläufige Public-Key-Verschlüsselung obsolet machen kann. Die Quantenkryptographie bietet hingegen erwiesenermaßen informationstheoretische Sicherheit, auch gegen Quantencomputer und jegliche andere denkbare technologische Entwicklung in der Zukunft.

Dieses Protokoll erlaubt zwei einander vertrauende Personen (genannt Alice und Bob) über größere Distanzen hinweg einen zufälligen aber an beiden Kanalenden identischen Bitstring zu erzeugen, über den außer ihnen beiden keine dritte Partei brauchbare Informationen besitzen kann. Dieser Bitstring kann in weiterer Folge von Alice und Bob zur Ver- und Entschlüsselung sensibler Nachrichten verwendet werden. Eine lauschende Person (genannt Eve) kann durch abfangen der übertragenen Informationsträger (in der Regel polarisierte Photonen) zwar Informationen über den Schlüssel gewinnen, sie kann es jedoch nicht unbemerkt tun – Eves Eingriff in den Quantenkanal wird unweigerlich Spuren hinterlassen, die von Alice und Bob wahrgenommen werden. In diesem Fall wird das Protokoll gestoppt noch bevor die Verschlüsselung und Übertragung sensibler Nachrichten beginnen konnte. Der Unmöglichkeit, den übertragenen Schlüssel unbemerkt abfangen zu können, liegen zwei fundamentale Prinzipien der Quantenmechanik zugrunde:

- die Heisenbergsche Unschärferelation, welche besagt, dass ein Messausgang indeterminiert und zufällig ist, sofern in einer unpassenden Basis gemessen wird,
- das No-Cloning-Theorem, das besagt, dass von einem Quantenzustand keine Kopie erstellt werden kann, ohne den ursprünglichen Zustand zu verändern.

Bei QKD wird allgemein zwischen diskreten Variablen (DV-QKD) und kontinuierlichen Variablen (CV-QKD) unterschieden. Bei DV-QKD wird die zu übertragende Information meist in die Polarisation oder Phase einzelner Photonen kodiert, die nacheinander (per Glasfaser oder „free-space“) vom Transmitter zum Empfänger übermittelt werden. Vorteile dieser Variante bestehen in der relativen Einfachheit des Protokolls und der größeren Reichweite (~100

km); nachteilig sind die aufwändigen und teuren Verfahren der Einzelphotonendetektion. Bei CV-QKD ist die Information über den Schlüssel nicht in einem von endlich vielen (Polarisations-) Zuständen kodiert, sondern in die Quadraturkomponenten von schwachen Laserpulsen. Der große Vorteil dieser Technologie besteht in der Kompatibilität zu breit vorhandenem Telekom-Equipment: Die für CV-QKD eingesetzten Homodyne-Detektoren messen effizienter, mit höheren Raten (~10 GHz) und sind wesentlich günstiger als die für DV-QKD benötigten Einzelphotonendetektoren. Auch für die Modulation der Laserpulse können herkömmliche Telekom-Komponenten verwendet werden. Als Nachteile zu nennen sind jedenfalls die beschränkte Reichweite (<100 km) und die kompliziertere theoretische Sicherheitsanalyse.

3.2.1.2. Andere Protokolle

Neben der Quantenkryptographie umfasst die Quantenkommunikation noch weitere Protokolle; so fallen z.B. auch die Quantenteleportation, Dense Coding und Oblivious Transfer in die Kategorie Quantenkommunikation.

Quantenteleportation

Das von Charles Bennet u.a. im Jahr 1993 vorgeschlagene Protokoll ermöglicht die Übertragung eines Quantenzustands von einem Ort zum anderen. Das Besondere hierbei ist, dass der Quantenzustand nicht auf seinem Träger (das heißt auf seiner physikalischen Realisierung, bspw. einem Photon) transportiert wird, sondern der Zustand stattdessen auf einen vormals unabhängigen Träger teleportiert wird. Von Bedeutung ist die Teleportation insbesondere für Quantenrepeater, die ihrerseits ein entscheidender Technologiebaustein zur Erschließung höherer Reichweiten in der Quantenkommunikation sind. Ermöglicht wird das Protokoll vom Phänomen der Quantenverschränkung: Von einem Paar verschränkter Photonen wird ein Teil an den Sender zugestellt und der andere an den Empfänger. Der Sender vollzieht eine gemeinsame Messung an seiner Hälfte des verschränkten Paares mit dem Photon, dessen Zustand er teleportieren möchte. Dabei handelt es sich um eine sogenannte Bell-Messung, die prinzipiell vier Ergebnisse erlaubt. (Durch diese Messung werden beide Photonen beim Sender zerstört – einschließlich jenes, das den teleportierten Quantenzustand getragen hat; die Teleportation kann demnach nicht zum Kopieren von Quantenzuständen eingesetzt werden.) Durch die Messung beim Sender wird der Quantenzustand des zu teleportierenden Teilchens instantan auf das zweite verschränkte Photon übertragen, das zum Empfänger übermittelt wurde, allerdings noch mit gewissen Abweichungen, die vom Ergebnis der Messung beim Sender abhängig sind. Um diese Abweichungen zu korrigieren, teilt der Sender dem Empfänger das Ergebnis seiner Messung über einen klassischen Kanal mit, woraufhin der Empfänger entsprechend eine von vier möglichen Handlungen an seinem Photon ausübt: entweder er unternimmt nichts, oder er unternimmt eine Polarisationsdrehung, einen Phasenschub oder eine Kombination von beidem. Nach dieser Korrekturhandlung besitzt der Empfänger ein Photon, dessen Zustand identisch ist zu jenem, welches beim Sender durch die Bell-Messung zerstört wurde.

Superdense Coding

Superdense Coding kann als inverser Prozess zur Quantenteleportation verstanden werden. Während bei der Teleportation nämlich zwei klassische Bits übertragen werden, um den Zustand eines Qubits zu senden, so wird beim Superdense Coding ein Qubit übermittelt um zwei klassische Bits zu übertragen. Ähnlich wie bei der Teleportation erhalten Sender und Empfänger jeweils einen Teil eines verschränkten Photonenpaares. Der Sender unterzieht sein Photon einer von vier möglichen Operationen: einer Polarisationsdrehung, einem Phasenschub, einer Kombination von beidem oder gar keine Änderung. Das vom Sender mit zwei Bits kodierte Qubit (vier mögliche Operationen entsprechen zwei Bits) wird an den Empfänger übermittelt, der mit einer Bell-Messung der beiden verschränkten Paare eindeutig die vom Sender durchgeführte Operation zuordnen kann.

3.2.1.3. Bausteine der Quanteninformation und notwendige technische Weiterentwicklungen

Ob für die Präparierung von kohärenten Zuständen (CV-QKD) und polarisierten Einzelphotonen (BB84) oder für die Wahl der Messbasis: Zufällige Entscheidungen sind ein essentieller Baustein in der Quantenkryptographie. Sobald diese Abläufe nicht absolut zufällig und unwillkürlich ablaufen, ist die informationstheoretische Sicherheit von QKD (und auch von klassischer Kryptographie) nicht gewährleistet. Allerdings existiert so etwas wie der „perfekte Zufall“ in der

klassischen Physik nicht: Letztlich ist jedes Ereignis (auch ein scheinbar noch so zufälliges wie ein Münzwurf) durch seine Ausgangs- und Rahmenbedingung vordeterminiert. Dies gilt jedoch nicht für die Quantenphysik: Der Zeitpunkt eines Kernzerfalls oder der Weg eines Photons, das in einen Strahlteiler eintritt, lässt sich ausschließlich durch Wahrscheinlichkeiten beschreiben und ist selbst mit umfassender Kenntnis aller Rahmenbedingungen nicht mit Sicherheit vorhersehbar. Den reinen Zufall gibt es also nur in der Quantenphysik. Aus diesem Grund greift man in QKD-Anwendungen auf Quanten-Zufallszahl-Generatoren (*Quantum random number generators*, QRNG) zurück. Die Entwicklung und Charakterisierung von QRNG ist ein lebendiges Forschungsfeld und hat sich ob seiner Wichtigkeit zu einer eigenen selbständigen Sparte im Bereich Quantenkommunikation entwickelt.

Neben der Erzeugung verlässlicher Zufallszahlen besteht die gegenwärtig größte Herausforderung im Bereich Quantenkommunikation zweifelsfrei in den beschränkten Distanzen. Um größere Kanallängen erschließen zu können, sind zwei Zugänge nennenswert: Satellitenübertragung und Quantenrepeater.

Im Folgenden werden die genannten Bausteine der Quanteninformation (Quanten-Zufallszahl-Generatoren, Satellitenkommunikation und Quantenrepeater) einzeln diskutiert.

Quanten-Zufallszahl-Generatoren

Echte Zufallszahlen sind ein wesentlicher Baustein von zahlreichen kryptografischen Anwendungen, im klassischen wie auch im Quanten-Bereich. Die Verschlüsselung mittels One-Time-Pad (OTP) ist erwiesenermaßen informationstheoretisch sicher – aber nur unter der Voraussetzung, dass der verwendete Schlüssel (1) mindestens genauso lang ist wie die Nachricht selbst, (2) jeder Schlüssel nur ein einziges Mal eingesetzt wird und (3) der Schlüssel absolut zufällig ist. Als Goldstandard für Zufallszahl-Generatoren gelten solche, die quantenmechanische Effekte nutzbar machen, genannt Quanten-Zufallszahl-Generatoren (*quantum random-number generators*, QRNG). Hierfür eignen sich etwa radioaktive Zerfälle, der Pfad von Photonen, die auf einen halbdurchlässigen Spiegel treffen oder auch Messungen am Quanten-Schrotrauschen (Shotnoise). Nachdem nukleare Zufallszahl-Generatoren nur moderate Raten aufweisen (~kbit), haben sich optische Devices als brauchbarer herausgestellt, die entweder auf der Zählung von Einzelphotonen oder auf der Quadraturvermessung am Schrotrauschen basieren:

- **Einzelphoton-QRNG:** Für diese Technik werden Einzelphotonen nacheinander auf einen 50/50-Strahlteiler (entspricht einem halbdurchlässigen Spiegel) geleitet, an dessen beiden Ausgängen jeweils ein Detektor den Pfad des Photons registriert. Das Auslösen des Detektors im Reflexions- bzw. Transmissionspfads wird dann einem entsprechenden logischen Bit zugeordnet. Kommerzielle Anbieter implementieren diesen Aufbau als miniaturisierte Bauteile zur Bestückung von elektrischen Leiterplatten oder als USB-Devices. Die Technologie erlaubt Bitraten in der Größenordnung ~10 Mbit.
- **Homodyn-QRNG:** Ähnlich wie beim Einzelphoton-QRNG wird auch hier Licht auf einen Strahlteiler geschickt, nur sind es in diesem Fall Laserpulse statt einzelner Lichtteilchen. Die Differenz der optischen Leistung an beiden Ausgängen des Strahlteilers, die von PIN-Dioden in elektrische (messbare) Ströme umgewandelt werden, unterliegt den Quantenvakuumfluktuationen und ist daher rein zufällig. Der Vorteil dieser Technologie liegt in der Verwendung von PIN-Dioden, die sich gegenüber Einzelphotonendetektoren durch geringere Kosten, höhere Effizienz und schnellere Messungen auszeichnen. Kommerzielle Anbieter bewerben Homodyn-QRNGs mit Raten im Bereich von ~1 Gbit.

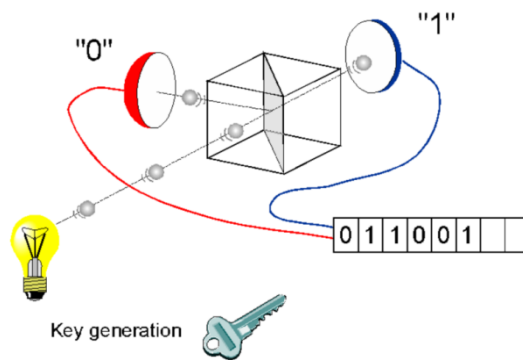


Abbildung 2: Funktionsweise eines optischen Zufallszahlengenerators. Quelle: <https://www.idquantique.com>

Satellitenübertragung

Bei der Überbrückung großer Distanzen stößt die Glasfaser rasch an ihre Grenzen. Schon bei 50 km muss mit Transmissionsverlusten von 90 % gerechnet werden, bei 100 km sind es bereits 99 %. Solche Verluste sind gerade in der Quantenkommunikation, wo mit äußerst schwachen optischen Signalen gearbeitet wird, kaum tolerierbar. Als Alternative zur Nutzung von terrestrischen Kanälen wird daher auch am Einsatz von Satelliten für die Übertragung von Quantensignalen gearbeitet. Die chinesische Akademie der Wissenschaften hat zu diesem Zweck im Jahr 2016 den Quantenkommunikationssatelliten Micius gestartet, der seither die Erde in ca. 500 km umkreist. Die Übertragungsdistanz Satellit-Bodenstation kann bis über 1000 km betragen, die aber aufgrund der dünnen Atmosphäre ab wenigen Kilometern Höhe einen Transmissionsverlust von nur etwa 50–85 % bewirken. Wesentlich stärker mit etwa 99 % Verlust wirkt sich die mangelhafte Einkopplung des über die lange Übertragungsdistanz auf mehrere Meter angewachsenen Strahldurchmessers aus. Das Forschungskonsortium konnte im Jahr 2017 zunächst eine Übertragung von BB84-Zuständen vom Satelliten zur Bodenstation demonstrieren, bevor ihnen in Zusammenarbeit mit der Österreichischen Akademie der Wissenschaften ein Quantenschlüsselaustausch von Bodenstation (Peking) zu Satellit zu Bodenstation (Graz) gelang.

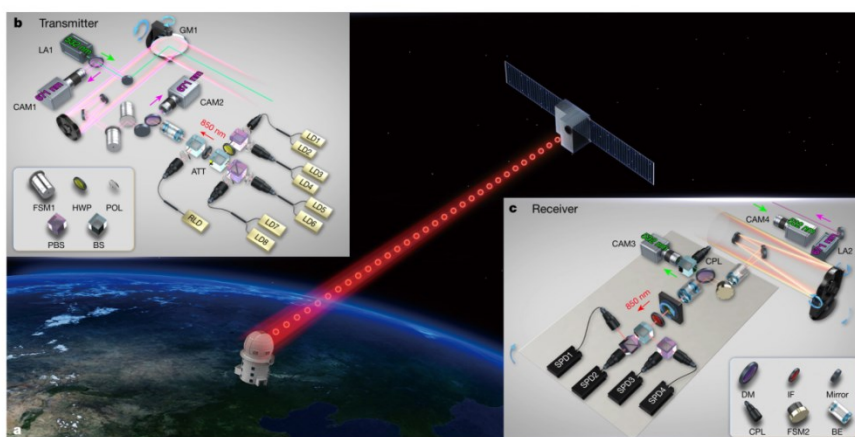


Abbildung 3: Der Quantensatellit Micius und die auf ihm montierten Sender- und Empfängermodule. Das Bild ist der wissenschaftlichen Publikation entnommen: Quelle: Nature 549, 43 (2017)

Quantenrepeater

Um Transmissionsverluste elektrischer oder optischer Signale zu kompensieren, werden auch in der klassischen Telekommunikation Repeater, also Signalverstärker, eingesetzt. Hierfür wird das eingehende Signal gemessen, verstärkt reproduziert und weiterversendet. Ein Quantenrepeater hat eine ähnliche Aufgabe, allerdings unter ungleich schwereren Bedingungen. Um die Sicherheitskriterien der Quantenschlüsselverteilung einzuhalten, müssen die in den Repeater eingehenden Quantenzustände verstärkt werden ohne gemessen oder kopiert zu werden. Das Prinzip des Quantenrepeaters wurde 1998 unter Mitwirkung des österreichischen Physikers Peter Zoller vorgestellt und basiert auf dem Phänomen des *Entanglement-Swapping*: Bringt man von zwei verschränkten Photonenpaaren jeweils eine Hälfte zusammen und vollführt eine gemeinsame (sogenannte Bell-) Messung an ihnen, so werden augenblicklich die jeweils anderen Hälften der verschränkten Paare nun untereinander verschränkt, obwohl sie noch nie direkt miteinander interagiert haben. Bei einer Kette von Quantenrepeatern entlang eines Quantenkanals teilt nun jeder Repeater mit seinen beiden Nachbarn einen verschränkten Zustand. Soll nun ein Quantenzustand von einem Ort zum anderen übertragen werden, so erzeugen Sender und Empfänger jeweils einen verschränkten Zustand (im Allgemeinen ein Photonenpaar), von dem sie eine Hälfte behalten und die andere Hälfte in den Quantenkanal leiten. Durch sequentielles Entanglement-Swapping zwischen benachbarten Repeatern werden letztlich die bei Sender und Empfänger verbliebenen Photonen miteinander verschränkt. Dieser verschränkte Zustand trägt zwar nicht die zu übertragende Information, ist aber die entscheidende Ressource für die Quantenteleportation, mittels derer schlussendlich der vom Sender präparierte Quantenzustand zum Empfänger übermittelt wird.

Um in der Quantenkommunikation terrestrische Links von mehr als 200 km zu ermöglichen, sind Quantenrepeater unabdingbar, weswegen auch intensiv an deren Entwicklung geforscht wird. Von funktionstüchtigen Repeatern für zweckdienliche Anwendungen ist die Forschung allerdings noch weiter entfernt. Eine der größten technischen Herausforderungen besteht in der Entwicklung von *Quantum Memories*, die für das Speichern der verschränkten Zustände bis zum Zeitpunkt des Entanglement-Swapping Prozesses zuständig sind. Quantum Memories bestehen üblicherweise aus Materieteilchen (Elektronenspins, Ionen, Moleküle) auf die der Quantenzustand eines Photons übertragen, gespeichert und zu einem späteren Zeitpunkt wieder auf ein Photon übertragen werden kann.

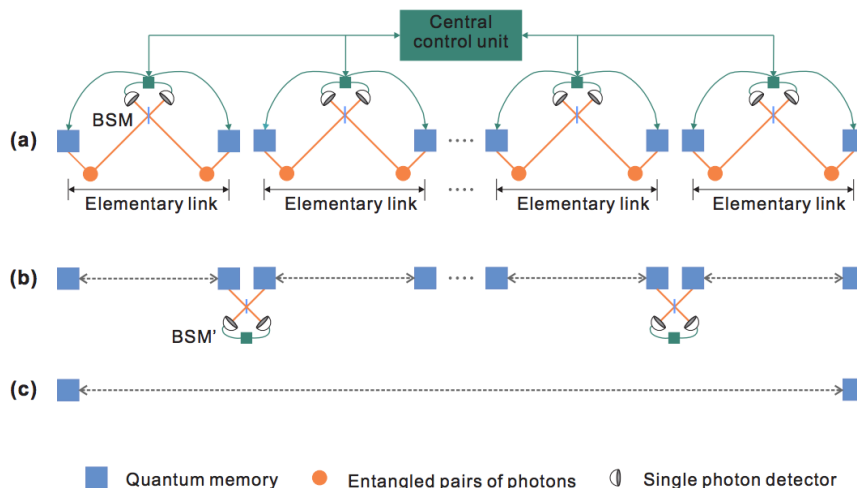


Abbildung 4: Funktionsweise einer Quantenrepeater-Kette. Jeder Link erzeugt verschränkte Photonen, deren Zustand in einem Quantum Memory gespeichert wird. Durch sukzessives Entanglement Swapping mit benachbarten Links entsteht schlussendlich ein einziger verschränkter Zustand zwischen Sender und Empfänger, der für Quantenteleportation genutzt werden. Quelle: <https://www.nextbigfuture.com/>

3.2.1.4. Literaturempfehlung

Populärwissenschaftlich

- Anton Zeilinger: Einsteins Schleier – Die neue Welt der Quantenphysik, Goldmann 2003, ISBN 3-442-15302-6
- Anton Zeilinger: Einsteins Spuk – Teleportation und weitere Mysterien der Quantenphysik, Goldmann 2005, ISBN 3-570-00691-3
- Simon Singh: Geheime Botschaften – Die Kunst der Verschlüsselung von der Antike bis in die Zeiten des Internet (orig.: The Code Book – The secret history of codes and code-breaking), dtv 2001, ISBN 3-423-33071-6

Wissenschaftlich

- Valerio Scarani et al.: The Security of Practical Quantum Key Distribution, Reviews of modern physics 81 (2009)
- Hans J. Briegel et al.: Quantum Repeaters: The Role of Imperfect Local Operations in Quantum Communication, Physical Review Letters 81 (1998)

3.2.2. Säule 2 – Quantencomputing

Die vielleicht aufregendste und mächtigste künftige Quantentechnologie ist die Entwicklung des Quantencomputers (QC). Der QC ermöglicht eine exponentiell schnellere Berechnung bei bestimmten mathematischen Aufgaben (z.B. bei Faktorisierung von Primzahlen oder bei Suchalgorithmen).

Das Bestreben, einen QC zu entwickeln, erfordert eine enorme technische Meisterschaft in der Herstellung der Bauteile auf Nano- oder möglicherweise auf atomarer Ebene, und zusätzlich eine präzise Kontrolle der Messung quantenmechanischer Zustände. Diese Aufgabe ist sehr herausfordernd wegen der inhärenten Fragilität der Quantenzustände und der Tatsache, dass das *Quantum Entanglement* (Quantenverschränkung) und seine Rolle in einem QC noch nicht wirklich ganz verstanden werden. Wenn man wirklich Bauteile fertigt, die quantenmechanische Effekte ausnützen, dann bekommt man einerseits eine noch nie dagewesene Kontrolle über fundamentale Naturkräfte als auch andererseits ein tiefes Verständnis quantenhafter Vorgänge.

Die Anforderungen an einen QC sind enorm: skalierbare physikalische Qubits, die gut von ihrer Umgebung isolierbar sind (sog. Quantenbits, also Superpositionszustände von Quantensystemen), müssen generiert werden, die aber auch initialisiert und gemessen werden können, und die kontrollierbar wechselwirken, damit universelle Quantenlogik-Gates implementierbar werden.

3.2.2.1. Technologie und Methoden für Quantencomputing

Hier werden die Technologie des QC, die verschiedenen Methoden für QC und die Entwicklungsstufe beschrieben. Personen sowie Institute sind angegeben, die federführend an der Entwicklung des QC mitgewirkt haben. Außerdem gibt es Literaturlisten und Webseiten – Hinweise.

Arten von Quantensystemen für Quanten Computer:

- Kalte und heiße Ionen
- Hohlraum QED (Quantenelektrodynamik)
- Neutrale Atome
- Flüssigkeits- und Festkörper NMR (*nuclear magnetic resonance*)
- Silizium-basierte nukleare Spins
- Quantendots
- Cooper Paare
- Josephson Verbindungen
- Linear-optische Systeme

Kriterien für den Bau eines Quanten Computers:

- Ein QC muss in der Lage sein, einen Quantenalgorithmus effizient durchzuführen.
- Quanten-Gates sind in der Lage, Qubit-Operationen auszuführen.
- Ein QC muss ein Memory besitzen.
- Er muss eine kontrollierte Veränderung dieses Quanten-Memorys ermöglichen.
- Eine Kühlvorrichtung für das Quanten-Memory muss vorhanden sein.
- Ein QC muss einen Auslesemechanismus besitzen.

Es folgt die Beschreibung der heutzutage gängigsten Methoden von Quantensystemen für QC:

Superconducting Quantum Computer und Josephson Junctions

Virtuelle Qubits in eiskalten Supraleitern: Der Quantencomputer IBM Q sorgte erst vor kurzem für Schlagzeilen, als er in einem Duell gegen einen anderen Quantenrechner antrat. Beide Quantencomputer rechneten mit jeweils fünf Qubits, diese bestanden jedoch bei seinem "Gegner" aus fünf Ytterbium-Ionen, bei IBM Q werden die Recheneinheiten von supraleitenden Spulen gebildet.

Das Herz des IBM-Quantenrechners bilden stark heruntergekühlte Metallspulen, die bei dieser Kälte supraleitend werden. Dabei bilden sich in ihnen virtuelle Teilchen in Form von supraleitenden Inseln, sogenannte Transmon Qubits. Sie sind über Mikrowellen miteinander verknüpft. Nullen und Einsen werden in diesem Quantenrechner durch zwei Niveaus der elektrischen Spannung in den Supraleitern umgesetzt.

Ionenfallen QC

Dieser Quantencomputer beruht auf der Wechselwirkung von Lasern mit gekühlten Ionenketten. Dies ist vermutlich der erste Vorschlag zur Verwirklichung eines Quantenrechners oder zumindest eines kleineren Quanteninformationssystems. An der experimentellen Realisierung wird zurzeit weltweit in mehreren Labors, darunter am NIST, Boulder, an der Universität Innsbruck, dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching und in Los Alamos gearbeitet. Dieses Modell nutzt als Qubits ultrakalte Ionen, die zwischen zwei inneren Zuständen wechseln können und die eine Kette bilden, die in einer linearen Ionenfalle, der Paul-Falle, gespeichert wird. Diese Falle besteht aus vier parallelen Metallstäben. Ein zeitabhängiges Radiofrequenzpotential wird an jeweils zwei gegenüberliegenden Stäben angelegt. Damit können sich die Ionen nur noch auf einer Linie parallel zu den Stäben anordnen. Zwei zusätzliche zirkuläre Elektroden dienen als Abschlüsse an den beiden Enden.

QC mit linear-optischen Methoden

Einzelphotonen als Qubits

Einzelphotonen sind weitgehend frei von Störungen (oder frei von Dekohärenz), die andere Systeme oft massiv beeinflussen. Einzelphotonen können relativ einfach manipuliert werden, um Einzel-Qubit-Logik-Gates zu realisieren. Sie ermöglichen Verschränkung in allen möglichen Freiheitsgraden, z. B. in der Polarisation, in der Zeit oder im Pfad eines Interferometers. Einzel-Qubit-Logik-Gates sind unkompliziert, verwenden doppelbrechende Wellenplatten, und können zwischen Pfad – und Polarisationsinformation unter Verwendung eines polarisierenden beam splitters (PBS) hin und her geschaltet werden.

Eine Hauptschwierigkeit für den so genannten linear optischen QC (LOQC) besteht darin, dass die Quantengates miteinander verschränkt werden, um eine universelle Quantenberechnung zu ermöglichen. Das sog. controlled NOT Gate (CNOT), das aus einem target (T) und einem control (C) Qubit aufgebaut ist, spielt dabei eine zentrale Rolle. T wird dann geflippt, wenn sich C im logischen Zustand „1“ befindet, anderenfalls wird der Zustand von T nicht verändert. Auch das sog. Hadamard – Gate, das im Wesentlichen aus einem Strahlteiler (beam splitter, BS) besteht, ist ein wesentlicher Bestandteil des LOQC.

Im Jahr 2001 gab es einen wissenschaftlichen Durchbruch, der gezeigt hat, dass ein skalierbarer QC möglich ist, der nur Einzelphotonen- quellen und -detektoren verwendet, um einfache linear – optische Gates, die aus BSn bestehen, aufzubauen (s. Literatur: Knill, Laflamme, Milburn, 2001).

Linear optischer QC (LOQC):

Der LOQC besteht aus solchen logischen Gates (CNOT, Hadamard, ...), die zu einem Netzwerk zusammengefügt werden. Gleichmaßen ist auch die Quantenteleportation ein wesentliches Element des LOQC, wo ein im Prinzip unbekannter Quantenzustand (Qubit) mithilfe eines verschränkten Photonenpaars auf ein anderes Qubit übertragen werden kann. Ein wichtiger Vorteil des LOQC besteht auch darin, dass ein einziges logisches Qubit in mehreren physikalischen Qubits kodiert werden kann, sodass, wenn eines davon gemessen wird, der Originalzustand rekonstruiert werden kann. Diese verschlüsselten Zustände sind verschränkt und benötigen daher verschränkte Gates, um sie zu realisieren. Im Prinzip besteht also ein LOQC aus Einzelphotonen-Eingängen mit C und T Qubits, einem linear optischen Netzwerk verschiedener Gates und aus Einzelphotonendetektionen am Ausgang. Im Jahr 2004 wurde erkannt, dass der Cluster-Ansatz riesige Vorteile für eine optische Realisierung des QC verspricht (s. Literatur: Nielsen, 2004). Da die Präparation eines Clusterzustands probabilistisch sein kann, sind nicht deterministische CNOT-Gates gerade dafür geeignet.

Möglicherweise besteht die wichtigste Eigenschaft der LOQC darin, dass sie fehlertolerant sind. Im Gegensatz zu herkömmlichen Computern sind QC für Umwelteinflüsse sehr störanfällig. Wenn diese Störanfälligkeit eine bestimmte Grenze nicht überschreitet, dann kann man durch lange Quantenberechnungen eine Fehlerkorrektur durchführen. Man hat z. B. gezeigt, dass, wenn das Produkt aus Quellen- und Detektoreffizienz größer als $2/3$ ist, das optische Quanten - Computing möglich ist, vorausgesetzt, dass die anderen Komponenten perfekt operieren.

Es gibt auch sehr strenge Anforderungen für Einzelphotonenquellen im LOQC. Festkörperquellen für Einzelphotonen sind da sehr vielversprechend, und Quanteninterferenz zwischen aufeinander folgenden Photonen, die von Halbleiter – Quantendots kommen, wurden schon beobachtet. Allerdings wird von einem LOQC verlangt, dass Quanteninterferenz zwischen Photonen aus unabhängigen Quellen zustande kommt. Aber auch dieses Phänomen wurde bereits beobachtet, was einen gewaltigen Fortschritt für den LOQC bedeutet (s. Literatur: Beugnon, 2007).

Tatsächlich ist es die inhärente Nichtlinearität der Photonenmessung, kombiniert mit Quanteninterferenz von Photonen, die den LOQC ermöglicht. Einzelphotonendetektoren sind kommerziell erhältlich und werden praktisch ständig eingesetzt, haben aber eine limitierte Effizienz. Detektoren, die auf Supraleiter-Basis funktionieren, werden in Zukunft einsetzbar sein. Hier ist noch viel Entwicklungspotential vorhanden.

Schließlich beruhen fast alle linear-optischen logischen Schaltkreise (s. Literatur: Politi, 2008) auf BSn und Reflektoren, wo die Photonen in Luft oder in Wellenleitern fortgeleitet werden. Eine verbesserte Effizienz, Miniaturisierung und Skalierbarkeit ist auch hier in Zukunft zu erwarten. Vielversprechend ist hier eine integrierte Optik, die analog zu elektrischen ICs entwickelt wird. Eine außerordentliche Herausforderung bedeutet dabei die Realisierung der Quanteninterferenz (s. Literatur: Afek, 2010) in derartigen Strukturen sowie die Integration von Einzelphotonenquellen und Einzelphotonendetektoren.

Neueste Entwicklungen lassen vermuten, dass hybride Strukturen große Vorteile haben könnten: Da Einzelphotonenquellen inhärent quantenmechanisch sind, ist ein vielversprechender Ansatz, diese als Quantenspeicher einzusetzen. Derartige Strukturen sind besonders für Quantenprozessoren geeignet, die als Knoten und Quanten – Repeater (Quantenverstärker) in Quantennetzwerken Verwendung finden (s. Literatur: Childress, 2006).

3.2.2.2. Ausblick

Trotz des großen Fortschritts bisher bleibt noch eine Menge zu tun, bis ein leistungsfähiger LOQC realisiert werden kann. Zurzeit ist noch nicht entschieden, ob das IC- oder das Clustermodell am vorteilhaftesten sein wird, oder eine Mischung aus beiden. Weiters hängt die Möglichkeit der Verwendung nichtlinearer Optik in einem künftigen LOQC von

ihrer Wirksamkeit und Anwendbarkeit ab. Zurzeit ist die Mehrheit der experimentellen Demonstrationen auf nicht skalierbare Einzelphotonenquellen, gängige optische Elemente und Einzelphotonendetektoren mit mäßiger Effizienz angewiesen. Man würde aber für sinnvolle Anordnungen hocheffiziente Einzelphotonenquellen und -detektoren benötigen, die mit mikroskopisch kleinen Wellenleiterschaltkreisen gekoppelt sind (s. Literatur: Kieling, 2006).

3.2.2.3. Literaturempfehlung

- Einen guten Überblick über die diversen Aspekte eines Quanten Computers findet man hier: <http://homepages.physik.uni-muenchen.de/~milq/quantencomp/quantencomputer.pdf>
- Einen sehr umfangreichen Newsfeed über die aktuelle Entwicklung des Quantencomputers und anderen Quantentechnologien gibt es auf: <https://quantumcomputingreport.com/>
- Einen Überblick über die Entwicklung und Methoden des QC kann man in Wikipedia nachlesen: https://en.wikipedia.org/wiki/Timeline_of_quantum_computing

3.2.3. Säule 3 – Quantensimulation

Quanten Simulatoren (QS) sind Geräte, die aktiv Quanten-Effekte nutzen, um Antworten über ein Systemmodell zu erhalten. Es werden also die Eigenschaften eines realen Systems dadurch untersucht (simuliert), dass man mit Hilfe mathematischer Funktionen in Verbindung mit einem Quanten-Gerät dieses reale System modellmäßig darstellt. Das ist immer dann notwendig, wenn das reale zu untersuchende System Quanteneigenschaften aufweist, was im Bereich atomarer Dimensionen der Fall ist. Der Einsatzbereich dieser Methode reicht von wissenschaftlichen Gebieten wie Hochenergiephysik, Kernphysik, Atom- und Festkörperphysik bis zur Thermodynamik und Molekularenergie in Chemie und Biologie. Die Technologien reichen von der Quanten-Hardware der Ionen-Fallen, über die Methode kalter Atome in optischen Gittern bis zur flüssigen und festkörperphysikalischen nuklearen Magnetresonanz, den Photonen, den Quantendots und den supraleitenden Schaltkreisen.

3.2.3.1. Prinzip und Grundlagen

Sowohl Computer als auch Simulatoren sind physikalische Geräte, die Informationen über mathematische Funktionen, die ein Rechenmodell beschreiben, zur Verfügung stellen. QS sind sogenannte analoge Simulatoren, deren Hamilton-Funktionen (Energieoperatoren) dazu verwendet werden können, um die Systemmodelle zu approximieren. Dabei spielt die universale unitäre Operation eine wichtige Rolle. Eigentlich ist der QS ein universeller Quantencomputer. Z. B. versucht die Firma D-Wave ein Gerät zu entwickeln, um den Grund-Zustand eines Ising-Modells (gekoppelte Spin-Zustände) durch Optimierung herauszufinden.

QS sind Quantengeräte, die ganz allgemein in der Quantentechnologie und der Quantenbiologie eingesetzt werden. Dabei wird mit Hilfe der Quantenmechanik die Struktur und Dynamik des zu untersuchenden physikalischen Objekts beschrieben, das sich nicht-klassisch verhält. Der Dichte-Operator, der das gesamte System quantenphysikalisch beschreibt, spielt dabei eine zentrale Rolle. Er besteht aus N-Teilchen, Fock-Zuständen und den dazugehörigen Wahrscheinlichkeiten für die verschiedenen Besetzungs-Zustände.

Verschränkung ist auch ein wichtiger Begriff beim QS. Z.B. werden Halbleiter im täglichen Gebrauch mit Computern ständig verwendet. Die Eigenschaften inhomogener Halbleiter, wo die Freiheitsgrade der Valenz-Elektronen modellhaft dargestellt werden müssen, sind mit Hilfe von QS zu untersuchen, um die Grundzustände des Systems genau zu erfassen. Die Ising-Spins sind hierbei gewöhnlich verschränkt. Klassisch kann man das nicht genau erfassen. Aber auch bei sogenannten Bose-Einstein Kondensaten handelt es sich um ein verschränktes Vielteilchensystem von bosonischen Teilchen. Die Nicht-Diagonalterme des Dichteoperators repräsentieren hier die Interferenz- und Verschränkungseigenschaften des Systems. Das Auffinden des Grundzustands eines Ising-Modells ist übrigens NP-schwierig.

3.2.3.2. Anwendungen

Die zentrale Aufgabe eines QS ist es, Information über die Quanteneigenschaften eines Systems bereitzustellen. Z.B. ist es für ein Fermi-Hubbard-Modell entscheidend wichtig, dass man Eigenschaften von Hochtemperatur-Supraleitern kennt. Supraleitung ist ein Quantenphänomen, das nur mit einem QS gezielt untersucht werden kann. Ohne QS ist man auf eine trial-and-error Methode angewiesen.

Auch bei der computerunterstützten Untersuchung im Medikamenten-Design kann man mit Hilfe von QS Zeit und Geld sparen. Die Simulation aerodynamischer Eigenschaften in Windkanälen kann mit Hilfe der QS optimal angegangen werden.

Es ist freilich nicht so einfach zu behaupten, dass QS „besser“ als ein klassischer Simulator wäre. Aber es ist doch so, dass ein Quantengerät in der Lage ist, effektiver NP-schwierige Probleme anzugehen. Das ist z.B. bei der dynamischen *Mean-Field-Theorie*, der *Density-Functional-Theorie* (DFT), der *Tensor-Netzwerk-Theorie*, und schließlich bei quantenhaften *Monte-Carlo-Algorithmen* der Fall. Gerade in der Tensor-Netzwerk-Theorie gibt es starke Verschränkung, gerade wenn es sich um bi-partite- bzw. multi-partite- Systeme handelt. Aber auch in der DFT bestehen starke Korrelationen, für deren Beschreibung gerade der QS bestens geeignet ist. Dann gibt es noch den großen Bereich molekuldynamischer Fragestellungen, wo auch Eigenwertprobleme eine Rolle spielen. Gerade dort, wo die Größe des Problems (Anzahl der Moleküle) eine entscheidende Rolle spielt und die Frage von Rechenzeiten in Betracht kommt, ist QS von Bedeutung.

Analoge QS werden in naher Zukunft eingesetzt werden, um große Systeme (mit vielen Teilchen) zu simulieren. Da stellt sich die Frage, ob man den Ergebnissen von QS vertrauen wird können. Gerade im Falle von Ising-Modellen, wo die Richtungen der Magnetfelder vielfach geflippt werden und dadurch multiple Spin-Flips auftreten, wird die Überprüfbarkeit der erhaltenen Resultate ein Problem darstellen. Es mag auch zutreffen, dass sich die Simulation in Bereichen, wo genaue analytische Resultate möglich sind, als wenig sinnvoll herauskristallisieren wird. Trotzdem wird sich der Einsatz von QS z.B. bei Problemen nahe von Phasenübergängen, wo analytische Modelle fehlen, als großer Vorteil erweisen.

Der große Vorteil der QS besteht erstens darin, dass man eine Anzahl interessanter neuer Probleme simulationsmäßig in Angriff nehmen kann und zweitens, dass gerade dem Experimentalisten ein flexibles Kontrollinstrument für seine Untersuchungen zur Verfügung stehen wird (Cirac, J.I., Zoller, P.: Goals and opportunities in quantum simulation, Nature Physics 8, 264-266 (2010)).

3.2.3.3. Literaturempfehlung:

- Einführung in die Quantensimulation: <https://epjquantumtechnology.springeropen.com/articles/10.1140/epjqt10>
- Photonic quantum simulators, A. Aspuru-Guzik, P. Walther, Nature Physics 8, 285-291 (2012).

3.2.4. Säule 4 – Quantensensorik

In der Quantensensorik und Quantenmetrologie wird die Möglichkeit genutzt einzelne Quantensysteme räumlich und zeitlich zu kontrollieren und auslesen zu können. Diese Systeme werden im Gegensatz zu den anderen Quantentechnologien jedoch nicht genutzt um Information zu speichern, sondern sie dienen als sehr präzise Messsensoren. Dabei werden Messsysteme (z.B. einzelne Atome) eingesetzt, die mehrere quantenmechanische Zustände einnehmen können. Die Systeme werden nun in eine quantenmechanische Überlagerung der Zustände gebracht, die sehr empfindlich auf externe Messgrößen wie elektrische, magnetische und Gravitationsfelder, Rotation, Beschleunigung, Zeit etc. reagieren. Durch gezieltes Auslesen des quantenmechanischen Systems lassen sich kleinste Änderungen der Messgrößen detektieren. Dabei können die zu messenden Felder sehr schwach sein, da die Quantensensoren eine Detektion der elektrischen bzw. magnetischen Eigenschaften einzelner Moleküle ermöglichen. Bei sogenannten Festkörper-Quantensensoren können die Moleküleigenschaften mit einer räumlichen Auflösung von wenigen Nanometern gemessen werden. Oft werden nicht die internen Energiezustände des Messsystems verwendet, sondern es wird eine Überlagerung von 2 räumlichen Zuständen des Systems (z.B. unterschiedliche Wege)

vorgenommen. Mithilfe solcher Materiewellen lassen sich Beschleunigung und Gravitationsfelder messen. Durch einen verbesserten Zeitstandard mit der neuesten Generation von Atomuhren, lassen sich Anwendungen in der Erdbeobachtung und Satellitennavigation stark verbessern. Auch optische Systemen lassen sich für die Quantenmetrologie benutzen, so erzielen „gequetschte“ Lichtquellen, die z.B. in Gravitationswellendetektoren eingesetzt werden, eine deutlich höhere Phasengenauigkeit als herkömmliche Laserquellen.

Die Quantensensorik zeigt auch die Vielzahl der möglichen Quantensysteme auf, mit denen es möglich ist, hochpräzise Messungen durchzuführen und bedient sich dabei der spezifischen Stärken der einzelnen Messsysteme.

Zu den wichtigsten Systemen und Anwendungen der Quantensensorik zählen:

Kalte Atom-Wolken

Messgrößen: Beschleunigung, Gravitation, Rotation, magnetische Felder
Anwendung: Erdbeobachtung und Erdexploration, Trägheitsnavigationssysteme

Dazu werden Atom-Wolken (meist Rubidium) fast bis zum absoluten Nullpunkt abgekühlt und in einer Falle gefangen. Die sehr kalte Wolke (Bose-Einstein-Kondensat) lässt sich danach mit geeigneten Laserpulsen in eine räumliche Überlagerung aus zumindest 2 Aufenthaltsorten bringen. Die Wellenfunktionen der Atomwolke an den unterschiedlichen Positionen erfahren ein leicht abweichendes Gravitationspotential und entwickeln sich zeitlich verschieden fort. Nachdem ein weiterer Laserpuls die Überlagerungen interferieren lässt, kann man die unterschiedliche Entwicklung anhand eines Interferenzmusters feststellen. Ändert sich nun das externe Gravitationsfeld, dann kommt es zu Verschiebungen dieser Interferenz. Mit einem solchen Materiewellen-Interferometer lässt sich die lokale Erdbeschleunigung sehr genau kartographieren. Dies ermöglicht eine geophysikalische Erkundung um Rohstoffe wie Gesteine und Flüssigkeiten unter der Erdoberfläche zu identifizieren oder auch Veränderungen der Erdkruste aufzuzeichnen. In der nicht-GPS gestützten Navigation können Materiewellen-Interferometer eine große Rolle spielen, da sie sehr empfindlich auf Beschleunigungen reagieren und somit Rotationen als auch Lage mit Hilfe von Gyroskopen genau messen lassen.

Atom-Uhren

Messgrößen: Frequenz, Zeit
Anwendung: Definition von Zeitnormalen, Satelliten-Navigationssysteme, Synchronisationsaufgaben

Der Übergang zwischen zwei Zuständen eines Quantensystems lässt sich auch als eine Frequenzreferenz darstellen. Vergleicht man diese Frequenz nun mit einem ungenauen elektrischen Oszillator, kann dieser auf die Frequenzreferenz gelockt werden. Damit ergibt sich eine sehr präzise Uhr deren Genauigkeit davon abhängt wie stabil die Frequenzreferenz ist. Da sich einzelne Quantensysteme, wie z.B. gefangene Ionen oder Atomwolken, sehr gut von der Umwelt abschirmen lassen, haben diese Uhren eine relative Genauigkeit von bis zu 10^{-18} . Die Anwendungen sind weit gefächert und reichen von praktischer Verbesserung der Positionsbestimmung mittels Satellitennavigation bis zur Grundlagenforschung, die zeitliche Veränderungen der „Naturkonstanten“ untersucht.

Ionenfallen

Messgrößen: Frequenz, Zeit, Kraft
Anwendung: Definition von Zeitnormalen, Satelliten-Navigationssysteme, Synchronisationsaufgaben

Ionen, gefangen in Vakuum Fallen, werden auch als Quanten Sensoren eingesetzt. Die am meisten fortgeschrittene Anwendung ist dabei die Messung von elektrischen Feldern und Kräften. Da der Sensor aus einem einzelnen Ion bestehen kann, lässt sich damit eine sehr hohe Positionsaufösung realisieren. Weitere Anwendungen mit Ionen liegen im Bereich der Spektroskopie und Zeitmessung.

Stickstoff-Fehlstellen-Zentrum

Messgrößen: Elektrische und magnetische Felder

Anwendung: Vermessung sehr kleiner Felder, Kernspinresonanz mit einzelnen Molekülen

Ein Quantensensor lässt sich auch mit Hilfe eines sogenannten Stickstoff-Fehlstellen-Zentrums (eng. *Nitrogen-vacancy center* oder *NV Center*) in einem Diamanten realisieren. Dabei handelt es sich um einen leichten Defekt in dem eigentlich ausschließlich aus Kohlenstoff bestehenden Edelstein. Konkret ersetzt ein Stickstoffatom ein Kohlenstoffatom im Kristallgitter, und zugleich fehlt in einem benachbarten Gitterplatz ein Kohlenstoffatom. Die Energiezustände einer solchen Fehlstelle kann man als Quantensystem mit zwei Niveaus betrachten und mit Hilfe von Mikrowellen und Laserstrahlen kontrollieren. Versetzt man das Quantensystem in eine Überlagerung der beiden Energiezustände, so kann man damit sehr schwache magnetische oder elektrische Felder messen. In der Kernspinresonanz wird das Zentrum sehr nahe an Moleküle gebracht und man kann dessen Eigenschaften detektieren. Durch die Kleinheit des N-V Zentrums lassen sich räumliche Verteilungen innerhalb eines Moleküls darstellen und damit die innere Struktur aufzeigen.

Neben einem N-V Zentrum im Diamant, gibt es auch eine andere, technologisch vielversprechende, Kristallstruktur: Siliziumkarbid (SiC). In diesem Material wird die Fehlstelle durch ein absentes Siliziumatom zusammen mit einem Stickstoffatom (anstatt eines Kohlenstoffatoms) gebildet. Das attraktive an diesem Material ist, dass es einerseits ähnlich stabile Qubits wie N-V Zentren im Diamant liefert, andererseits aber technologisch viel einfacher zu bearbeiten ist. Siliziumkarbid wird vor allem in der Mikro- und Leistungselektronik eingesetzt und kann auf industrielle Herstellungsprozesse zurückgreifen. Erste Versuche mit SiC zeigten bereits gute Erfolge mit Dekohärenz-Zeiten von bis zu 30 μ s (MRS Communications (2017), 7, 591–594). Ein weiterer Vorteil bei SiC liegt darin, dass sich die optischen Übergänge vom sichtbaren in den nahen infraroten Bereich (1200-1500nm) verschieben. Damit sind solche Quantenspeicher ideal an die Wellenlänge der Photonen, die in optischen Glasfasern übertragen werden, angepasst und können als direkte Schnittstelle zwischen Quantenkommunikationsnetzwerken und Quantencomputer fungieren.

Opto-Mechanische Sensoren

Messgrößen: Kraft, Beschleunigung, Masse, magnetische Felder, Spannung

Anwendung: Schwingungssensor, Waage, Beschleunigungs- und Drucksensor

Mit der Herstellung von hoch qualitativen mechanischen Oszillatoren ist es nun möglich einzelne Phononen, diskret quantisierte Energiepegel einer Schwingung, mit Lichtfeldern zu koppeln und zu messen. Da sich mechanische Freiheitsgrade an fast alle externen Felder koppeln, ist diese Art von Sensor geeignet eine Vielzahl von Anwendungen abzudecken.

Materiewelleninterferometer

Messgrößen: Dipolmoment, Suszeptibilität, Polarisierbarkeit, chemische Struktur

Anwendung: Analyse von Molekularstrukturen

Materiewelleninterferometrie lässt sich nicht nur mit Atomen, sondern auch mit großen Molekülen durchführen. Dabei werden keine externen Felder bestimmt, sondern vielmehr die Eigenschaften des Moleküls selbst, welches sich im Interferometer befindet. Die Materiewelleninterferometrie hat das Potential, all diese elektronischen, magnetischen, optischen und strukturellen Eigenschaften für viele komplexe Moleküle und Nanopartikel, isoliert oder in maßgeschneiderten Umgebungen, aufgrund der hohen intrinsischen räumlichen Auflösung des Interferogramms mit wesentlich verbesserter Präzision zu messen.

3.2.4.1. Literaturempfehlung:

- Einen Überblick über alle möglichen Sensorarten bildet der folgende Review: „Quantum sensing“, C. L. Degen, F. Reinhard, and P. Cappellaro, Rev. Mod. Phys. 89, 035002 (2017)
- Atom Chip Einführung: <http://atomchip.org/wp-content/uploads/2012/02/qjp2-eu-27.pdf>
- Bose-Einstein-Kondensat als Magnetfeldsensor: http://atomchip.org/wp-content/uploads/2012/02/wilderdmuth_PhiniuZeit_2006.pdf
- “Fifteen years of cold matter on the atom chip: promise, realizations, and prospects”, Journal of Modern optics, 2016 VOL. 63, NO. 18, 1840–1885, <http://dx.doi.org/10.1080/09500340.2016.1178820>
- Einleitung zu Fehlstellen im Diamant: https://www.uni-stuttgart.de/presse/archiv/themenheft/05/ein_quantencomputer_in_diamant.pdf
- Bericht zu Fehlstellen in SiC: <https://www.uni-wuerzburg.de/sonstiges/meldungen/single/news/besser-als/>
- Einführung ultradünne Glasfasern: https://ati.tuwien.ac.at/fileadmin/t/ati/aqp/files/Pages_from_Natur_und_Geist_01-2009.pdf

3.3. Österreichische Forschungslandschaft

3.3.1. Quantenkommunikation

Universität Wien / Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) Wien

Den Gruppen rund um Anton Zeilinger und Rupert Ursin ist es gelungen, mit ihren Experimenten zur Quantenteleportation über die wissenschaftliche Gemeinschaft hinaus in die öffentliche Wahrnehmung zu rücken. Beide Gruppen sind an den QKD-Experimenten mit dem chinesischen Quanten-Satelliten Micius beteiligt. Die Ursin-Gruppe befasst sich neben Satelliten-basierter Quantenkommunikation auch mit terrestrischer Quantenkryptographie (insbesondere QKD-Netzwerkarchitekturen) sowie mit Quellen für verschränkte Photonen.

Universität Innsbruck

An der Universität Innsbruck arbeitet die Gruppe von Gregor Weihs an der Integration von (verschränkten) Photonenpaarquellen auf optische Chips. Die Chips eignen sich für diverse Quantenkryptographie-Anwendungen, können als heralded (also angekündigte) Einzelphotonenquellen sowie als Bausteine von Quantenrepeatern dienen. Tracey Northup erforscht die Wechselwirkung zwischen Ionen und Photonen – ein Gebiet, das vor allem in Hinblick auf Quantenrepeater brandaktuell ist, wo die große technologische Hürde gerade in der Schnittstelle zwischen Informationsträger (Photon) und Quantenmemory (Ion) besteht.

Universität Linz

An der Universität Linz ist vor allem das Team rund um Armando Rastelli zu nennen. Professor Rastelli arbeitet an Einzelphotonenemittern, basierend auf sogenannten Quantenpunkten (engl.: Quantum Dots). Manipulierbare (und ggf. verschränkte Einzelphotonen) sind essentielle Bauteile in der Quantenkommunikation. Quantenpunkte sind Halbleiterteilchen, die durch Wechselwirkung mit elektromagnetischen Feldern Photonen emittieren können. Im Gegensatz zum probabilistischen Charakter von Fluoreszenzquellen, die auf Photonenzerfall in nichtlinearen Kristallen beruhen, ermöglichen Quantenpunkte die gezielte und kontrollierte Erzeugung von Einzelphotonen – sozusagen auf Knopfdruck.

AIT – Austrian Institute of Technology GmbH

Die Gruppe Secure Quantum Technology des AIT wurde im Jahr 2004 anlässlich des EU-Projekts SECOQC (SEcure COmmunication based on Quantum Cryptography) gegründet. Im Rahmen von SECOQC wurde unter Leitung des AIT ein Netzwerk zur sicheren Kommunikation in Wien und Umgebung aufgebaut. Die Gruppe entwickelt QKD-Komplettsysteme sowohl aufbauend auf der Zählung von Einzelphotonen (*discrete-variable QKD*) als auch auf kohärente Detektion von schwachen Laserpulsen (*continuous-variable QKD*). Zusätzlich werden Schlüsseltechnologien, wie Einzelphotonendetektoren, Timetagging-Module für die statistische Auswertung von detektierten Einzelphotonen, Steuerungselektronik und FPGA-Systeme, Quellen für verschränkte Photonenpaare sowie Postprocessing-Software, entwickelt und teilweise kommerziell vertrieben.

3.3.2. Quantencomputing

Universität Innsbruck / IQOQI Innsbruck

An diesem Institut werden bereits leistungsfähige Quantencomputer (QC) unter der Leitung des Experimentalphysikers Rainer Blatt entwickelt. Ein QC mit 14 Qubits und einer mit 20 Qubits werden gebaut.

Die bestehenden QC werden ständig verbessert. Auch werden Methoden entwickelt, die bestätigen sollen, ob die Rechenvorgänge in den neuartigen Systemen korrekt sind oder ob korrigierend eingegriffen werden muss. Die Systeme können auch alle Probleme lösen, die auch mit klassischen Rechnern lösbar sind. In ein paar Jahren werden die QC besser als klassische Rechner sein.

Zusammen mit Peter Zoller und anderen österreichischen Quantenforschern war Rainer Blatt maßgeblich an der Ausarbeitung des großen Flagship-Programms 2017 der EU beteiligt. Damit will man die Industrie näher an die Quantenforschung bringen. Dieser Brückenschlag ist wichtig, vor allem deshalb, weil wie Anfangs erwähnt China und die USA deutlich voraus sind und Firmen gründen, die die Technologien der QC bereits vermarkten.

Universität Wien

Die Gruppe um Prof. Walther fokussiert sich auf die Realisierung von Quanten Computern basierend auf Photonen. Neben der Demonstration von Cluster-State Quantencomputern wurden auch andere Aspekte einer zukünftigen Nutzung des Quanten Computers erforscht, wie z.B. das Blind Quantum Computing. Mit diesem Verfahren kann ein Kunde eine Berechnung an einem Quantencomputer durchführen lassen, ohne dass der Betreiber des Quantencomputers das Ergebnis der Berechnung kennt.

Die Entwicklung von den für die Umsetzung benötigten technologischen Bausteinen reicht dabei von Multiphotonenquellen und supraleitenden Einzelphoton-Nanodrahtdetektoren bis hin zu integrierten Wellenleiterstrukturen sowie nichtlinearen Medien für Photon-Photon-Wechselwirkungen und Einzelphotonenquellen auf Halbleiter Basis.

IST-Austria: Institut für Science und Technology Austria (Klosterneuburg):

An diesem Institut gibt es zwei Gruppen die sich mit Quantencomputing befassen. Die Gruppe um Johannes Fink arbeitet an opto-akustischen Schnittstellen, um mehrere supraleitenden Quanten Computer in einem optischen Netzwerk

zu verbinden. Um Maksym Serbyn wird eine neue Forschungsgruppe aufgebaut, um Vielteilchen-Quantensysteme für künftige QC theoretisch zu untersuchen. Sehr komplexe Systeme können mit wenigen Parametern beschrieben werden.

3.3.3. Quantensimulation

Universität Wien

Die Gruppe von Prof. Walther beschäftigt sich mit QS auf Basis von Photonen. Ein QS kann für die physikalische Darstellung von Quantensystemen verwendet werden und hat das Potential Probleme zu lösen, die konventionelle Computer nicht zu lösen vermögen. Man kann die photonische QS in der Quantenchemie, der Quantenbiologie und in der Festkörperphysik einsetzen. Die Technologie der photonischen Quantensimulation setzt dabei auf integrierte optische Bauteile auf denen Lichtwellenleiter aufgebracht sind und miteinander gekoppelt sind.

Universität Innsbruck/ IQOQI Innsbruck

An der Universität Innsbruck und IQOQI Innsbruck gibt es einige Gruppen die in ihren Experimenten komplexe Simulationen von Quantensystemen durchführen. Die Gruppe von Prof. Ferlaino benutzt ultra-kalte Erbium Atome, die, mit Hilfe eines Laser-Gitters, einzeln im Raum angeordnet werden können. Ähnliche Experimente, allerdings mit Molekülen, werden von der Gruppe um Prof. Nägerl betrieben. Der Vorteil ist, dass Moleküle, im Gegensatz zu Atomen, mehr Spin-Kombinationen erlauben und sich somit größere Spin-Systeme herstellen lassen, die gegenseitig wechselwirken. Simulatoren, bestehend aus supraleitenden Schaltkreisen, werden von Prof. Kirchmair untersucht. Mit diesen Systemen soll eine Plattform für die analoge Quantensimulation implementiert werden um interagierende Spin-Ketten in einer und zwei Dimensionen zu simulieren.

In eine andere Art von Quantensimulation ist die Gruppe von Prof. Läuchli involviert. Dabei werden klassische Super-Computer eingesetzt um Quantencomputer und Quantenalgorithmien zu simulieren. Dadurch lassen sich Einblicke in die zukünftigen Softwarearchitekturen gewinnen und Methoden finden um die Ergebnisse von Quantencomputern verifizieren zu können.

Technische Universität Wien

Simulationen von korrelierten Quantensystemen werden auch in der Gruppe von Prof. Schmiedmayer am Atominstitut durchgeführt, indem kalte Atome (Bose-Einstein Kondensat) magnetisch gefangen und manipuliert werden. Die Experimente mit diesen ultrakalten Atomen werden mit sogenannten Atomchips durchgeführt. Dies sind mikrofabrizierte Bauteile in welchen die kalten Atome gefangen werden. Durch die geringe Baugröße erschließen sich neue Anwendungsgebiete, da in Zukunft die bisherigen experimentellen Aufbauten auf einem einzigen Chip Platz finden.

Universität Linz

In der AG von Prof. Wille arbeitet man unter anderem an klassischer Simulation von Quanten Computern, um Funktionalitäten noch vor der experimentellen Realisierung testen zu können. Der Hauptfokus liegt dabei in der Ausführung eines neuen Konzepts für die Simulation von Quanten Computern, welches mehr Qubits in einer kürzeren Zeit berechnen kann als bisherige Methoden.

3.3.4. Quantensensorik

Universität Wien

An der Universität Wien finden sich 3 Gruppen, die im Bereich der Quantensensorik forschen. Die Gruppe von Prof. Arndt spezialisiert sich hierbei auf die Molekülinterferometrie. Neben fundamentalen Experimenten zur Natur der

Quantenmechanik, lassen sich damit auch Aufbauten zur Messung von speziellen Eigenschaften der Moleküle realisieren. Die Herstellung von biologischen Molekularstrahlen und Detektionsmethoden runden das Fachwissen ab.

Der Hauptfokus der Gruppe um Prof. Aspelmeyer liegt in der Quanten-Optomechanik. Dabei werden Lichtfelder mit mechanischen Oszillatoren gekoppelt und deren Quanteneffekte untersucht. Aus Anwendersicht ergeben sich nano- und mikromechanische Systeme für neuartige Sensorarchitekturen, z.B. als Photon-Phonon-Interface oder als Sensor zur Messung schwacher Gravitationskräfte.

Die Gruppe von Prof. Walther, die hauptsächlich auf dem Gebiet Quantencomputing arbeitet, ist erst spät zur Quantensensorik gestoßen. Die Arbeiten konzentrieren sich im Moment auf den Aufbau einer Sensormatrix bestehend aus Stickstoff-Fehlstellen-Zentren in Diamanten. Ein Einsatzbereich für diese Technologie wäre die Magnetspinresonanz an einzelnen Molekülen.

Technische Universität Wien

Das Atominstitut der Technischen Universität in Wien ist der zweite große Standort für Forschung mit möglichen Anwendungen in der Sensorik.

Die Gruppe um Prof. Schmiedmayer arbeitet daran, NV Fehlstellen im Diamant als Quantensensor zu nutzen um schwache magnetische Felder messen zu können. Zusätzlich lassen sich diese Systeme auch in der Quantenkommunikation, als Einzel-Photonenquellen und Quanten Speicher, einsetzen.

Die Quantenmetrologie nimmt eine zentrale Stelle in der Arbeit der Gruppe von Prof. Schumm ein. Der Schwerpunkt der Forschung liegt dabei im Aufbau von hoch-präzisen Atomuhren und in der Materieinterferometrie mit kalten Atom-Wolken. Die sich daraus ergebenden Anwendungsgebiete befinden sich in den Bereichen Zeit- und Frequenzmessung als auch der Trägheitssensorik.

Die Forschung der Gruppe von Prof. Rauschenbeutel beschäftigt sich hauptsächlich mit optischen Quantenexperimenten. Mit den, in dieser Gruppe hergestellten, ultradünnen Glasfasern ist es möglich einzelne Moleküle zu fangen und mit Licht, das teilweise aus den Fasern aus- und eintritt zu analysieren. Diese Technologie könnte eingesetzt werden um rein photonische Schaltelemente für Quantenkommunikation oder Quantencomputing zu realisieren.

Universität Innsbruck

Am IQOQI an der Universität Innsbruck, beschäftigen sich auch einige Gruppen mit Atom-Wolken, Bose-Einstein-Kondensaten, die als Sensoren eingesetzt werden könnten. Die Forschung in diesem Gebiet ist jedoch noch sehr grundlagenorientiert.

3.4. Milestones in Österreich

3.4.1. Quantenkommunikation

SECOQC

Als Meilenstein im Bereich Quantenkommunikation in Österreich gilt das von der EU geförderte Projekt SECOQC (*SEcure COmmunication based on Quantum Cryptography*), das in den Jahren 2004–2008 unter Leitung der Austrian Research Centers GmbH (heute AIT Austrian Institute of Technology GmbH) durchgeführt wurde. Im Rahmen dieses Projekts gelang es einem Konsortium von 41 teilnehmenden Institutionen (25 Universitäten, 4 national Forschungsinstitute, 8 multinationale Konzerne, 4 KMUs) aus insgesamt 11 europäischen Ländern, ein funktionales QKD-Netzwerk im Großraum Wien aufzubauen. Das Netzwerk umfasste insgesamt sechs Knoten, die durch insgesamt acht QKD-Links mit einer Gesamtlänge von mehr als 200 km verbunden waren. Für die QKD-Links wurden sowohl Einzelphotonen-Protokolle (prepare-and-measure BB84, entanglement-based E91) als auch CV-QKD –Protokolle verwendet (New Journal of Physics 11, 075001 (2009)).

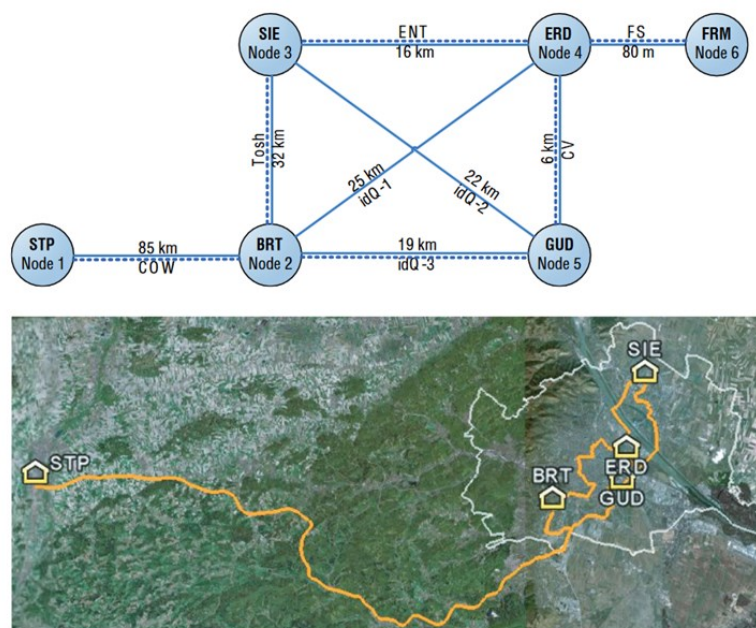


Abbildung 5: Schematische Darstellung des QKD-Netzwerks im Großraum Wien. Die sechs Knoten waren durch insgesamt acht QKD-Links verbunden. Quelle: New Journal of Physics 11, 075001 (2009).

Satellitengestützte QKD

Auch an einem der jüngsten weltweiten Meilensteine im Bereich Quantenkommunikation hat die österreichische Forschung entscheidend mitgewirkt. Einer Kooperation der Österreichischen und der Chinesischen Akademie der Wissenschaften sowie der Universität Wien ist es am 29. September 2017 erstmals gelungen, ein durch Quantenkryptographie gesichertes Videotelefonat von Wien nach Peking zu führen. Dem Telefonat voraus ging die abhörsichere Erzeugung von Quantenschlüsseln zwischen dem Satelliten „Micius“ und den jeweiligen Bodenstationen in Österreich und China. Dank der Gesetze der Quantenphysik kann sichergestellt werden, dass der generierte Quantenschlüssel nur legitimierte Partnern bekannt ist. Nachdem die Audio- und Videodaten mit dem sicheren Schlüssel ver- und entschlüsselt werden, konnte für das Videotelefonat an sich eine herkömmliche Internetleitung verwendet werden.



Abbildung 6: Das erste durch Satelliten-QKD gesicherte Videotelefonat. ÖAW-Präsident Anton Zeilinger (im Vordergrund rechts) im Gespräch mit seinem chinesischen Amtskollegen Chunli Bai (auf der Leinwand). Quelle: <https://www.oeaw.ac.at/oesterreichische-akademie-der-wissenschaften/die-oeaw/article/erstes-abhoersicheres-quanten-videotelefonat-zwischen-wien-und-peking-geglueckt-1/>

Teleportation auf den Kanarischen Inseln

Weltweites Aufsehen erregte das unter Leitung von Anton Zeilinger durchgeführte Experiment, bei dem die Teleportation von Quantenzuständen über eine Distanz von 143 km demonstriert werden konnte. Dabei wurden verschränkte Einzelphotonen über einen Freespace-Link zwischen den kanarischen Inseln La Palma und Teneriffa übertragen (Nature 489, 269–273 (2012)).

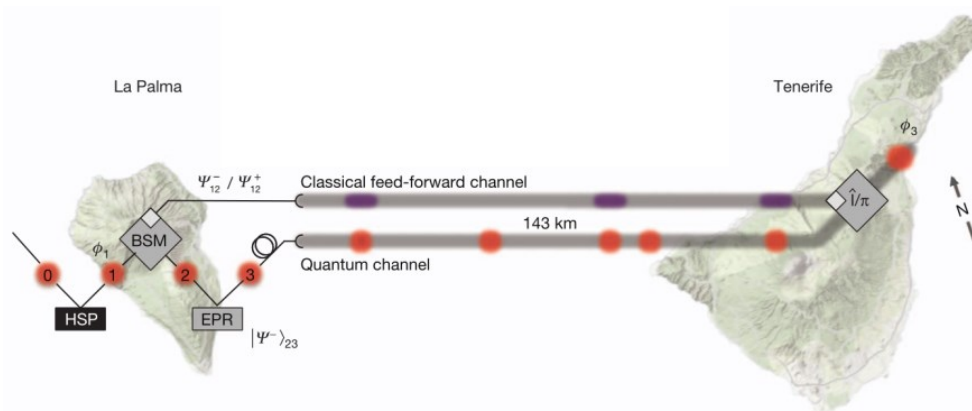


Abbildung 7: Schematischer Aufbau des Teleportations-Experiments. Die Grafik ist der offiziellen Publikation entnommen: Nature 489, 269–273 (2012).

3.4.2. Quantencomputing

Ionenfallen Quanten Computer

Im Bereich Quantencomputing konnte die Gruppe rund um Rainer Blatt und Peter Zoller an der Universität Innsbruck mit ihren Ionenfallen schon öfters internationale Schlagzeilen machen und ihre Position an der Weltspitze untermauern. 2005 demonstrierte die Gruppe die Verschränkung von acht Ionen und damit das erste „Quantenbyte“. Im Jahr 2014 konnten Prof. Blatt und seine Kollegen/innen ihren eigenen Rekord von acht auf aufsehenerregende 14 Qubits, im Jahr 2017 auf bereits 20 Qubits verbessern. Derzeit wird an einem dritten Quantenprozessor gearbeitet, auf welchem

effiziente Algorithmen zur Fehlerkorrektur implementiert sein werden – ein wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu Fault-tolerant Quantencomputing (Phys. Rev. X 8, 021012 (2018)).

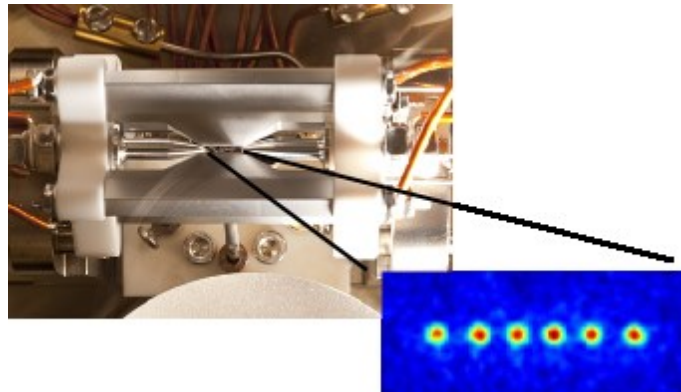


Abbildung 8: Ionenfalle für Quantencomputing mit sechs Qubits (im vergrößerten Ausschnitt sichtbar). Quelle: <https://quantumoptics.at/en/research/quantum-information.html>

Optische Quantencomputer

An der Universität Wien wurde 2005 erstmals die experimentelle Umsetzung eines Clusterstates mit vier optischen Qubits gezeigt. Clusterstates sind die Grundlage für den One-way Quantencomputer, die als vielversprechende Alternative zu Materie-basierten Quantencomputern gelten (Nature 434, 169–176 (2005)).

Ebenfalls in Wien zeigten im Jahr 2012 die Gruppe um Philip Walther und Anton Zeilinger die erste erfolgreiche Realisierung von Blind Quantum Computing, einer Vorstufe zu universellem Quantencomputing, bei welcher ein User eine Funktion von einem Quantenserver auswerten lässt, ohne dass der Quantenserver selbst verwertbare Informationen über den Input des Users erhält. Diese Technologie ist vor allem in Hinblick auf Cloud-Computing relevant, weil sie die Daten der Nutzer vor Zugriffen der Provider schützt (Science 335, 303–308 (2012)).

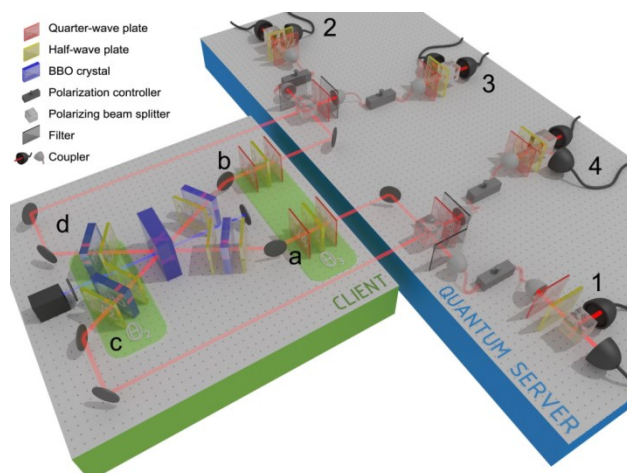


Abbildung 9: Experimentelle Realisierung von Blind Quantum Computing. Quelle: Science 335, 303–308 (2012).

3.4.3. Quantensimulation

Boson Sampling

In photonischen Boson-Sampling Experimenten werden Einzelphotonen in ein Netzwerk von Strahlteilern geschickt. An jeden Strahlteiler kommt es nun zu einer Interferenz zwischen den Zustandsamplituden der Photonen. Ein Galton-Brett liefert ein anschauliches klassisches Beispiel, bei dem Kugeln während des Herabfallens an Hindernissen nach rechts oder links abgelenkt werden. Die Verteilung, die am unteren Rande des Bretts entsteht, gleicht einer Binomialverteilung. Die quantenmechanischen Überlagerungen der Photonen verursachen allerdings eine sehr hohe Komplexität der sich ergebenden Verteilung für das Boson-Sampling, welche exponentiell mit der Anzahl der Photonen im Netzwerk steigt. Ab ca. 30 Photonen lässt sich die Verteilung am Ende des Netzwerkes nicht mehr mit klassischen Mitteln berechnen.

Die Arbeitsgruppe um Philip Walther an der Universität Wien demonstrierte 2013 als eine der ersten Gruppen weltweit einen experimentellen Boson-Sampling Aufbau. Das, im Glas eingeschriebene, optische Netzwerk bestand aus 5 Eingangs- und Ausgangsmoden, in welche 3 Einzelphotonen gesendet wurden. Die gemessene Verteilung an den Ausgangsmoden entsprach den theoretischen Vorhersagen. Ein großer Vorteil des Boson-Sampling im Vergleich mit einem vollständigen Quantencomputer ist die technische Einfachheit; es werden nur passive optische Bauteile benötigt und keine Quantenspeicher (Nature Photonics 7, 540 - 544 (2013)).

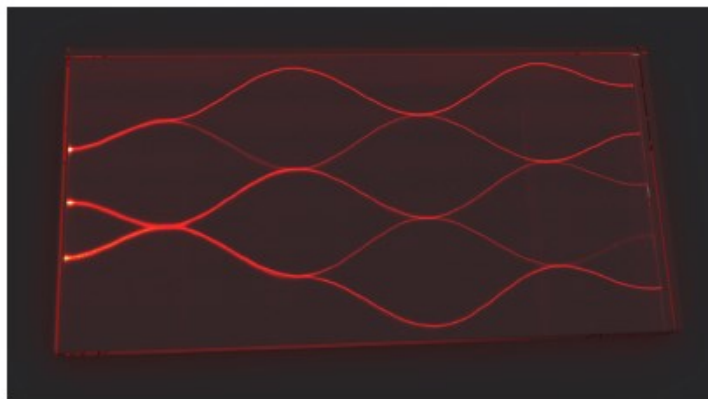


Abbildung 10: Optische Netzwerk für Boson-Sampling Quelle: Nature Photonics 7, 540 - 544 (2013).

Simulation von Quantenfeldtheorien

Ein Meilenstein im Bereich Quantensimulation gelang im Jahr 2017 der Gruppe rund um Jörg Schmiedmayer an der Technischen Universität Wien. Die Gruppe zeigte, dass mittels eines Gases ultrakalter Rubidiumatome auf einem Atomchip (Magnetfallen für Atome) Vielkörpersysteme simuliert werden können. Im Speziellen konnte die Gruppe durch Korrelations-Messungen auf ihrem Chip das Sinus-Gordon-Modell, eine Feldtheorie zur Beschreibung solcher Gase, realisieren. Die Methode lässt sich auch auf andere Feldtheorien anwenden, etwa zur Beschreibung des Universums kurz nach dem Urknall oder spezieller Materialien (Nature 545, 323–326 (2017)).

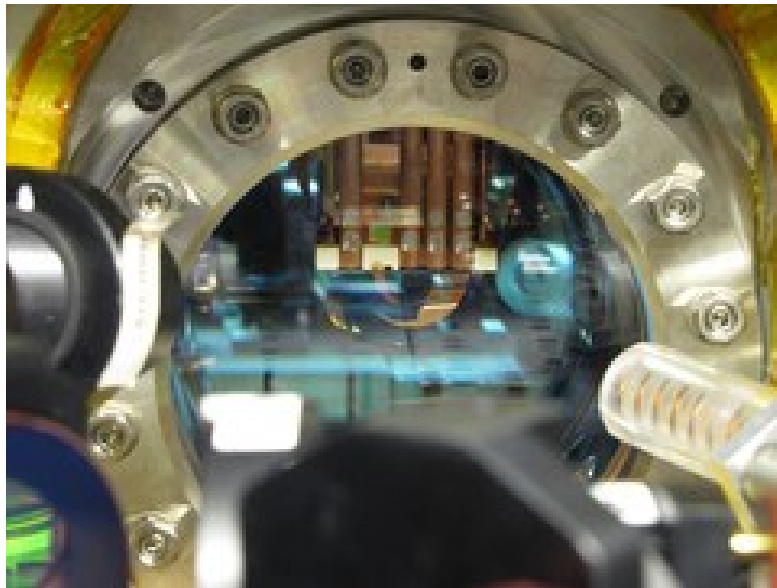


Abbildung 11: Der Atomchip der TU Wien. Quelle: https://ati.tuwien.ac.at/news_topics/news_detail/article/9307/EN/

3.4.4. Quantensensorik

Materieinterferometrie mit Molekülen

Der Nachweis der Welleneigenschaft von Materie gilt als einer der Meilensteine der modernen Physik und zeigt auf beeindruckende Weise den Welle-Teilchen-Dualismus der Quantenphysik. Experimente zur Materieinterferometrie mit sehr großen Molekülen wurden 1999 an der Universität Wien begonnen, in der die Welleneigenschaft von C_{60} Fullerenen demonstriert werden konnte. In den Jahren danach gelang der Nachweis mit immer größeren und schwereren Molekülen (bis zu 800 Atome). Der Einsatz von organischen Molekülen in der Materieinterferometrie eröffnet eine neue Methodik um chemisch-physikalische Eigenschaften bestimmen zu können (Nature Communications 2, 263 (2011)).

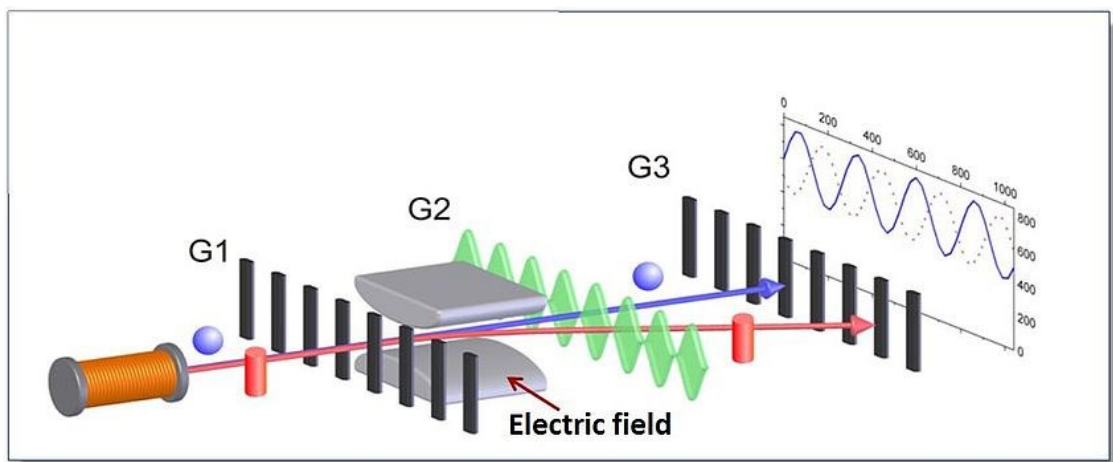


Abbildung 12: Schema eines Molekülinterferometers. Die Elektroden (grau) und das Laserfeld (G2) verändern das Interferenzmuster abhängig von der Elektrische Suszeptibilität und Polarisierbarkeit des Moleküls. Quelle: <https://arndt.univie.ac.at/research/q-assisted-measurements/>

Erhöhte Phasen Auflösung mit verschränkten Photonen

Eine sehr frühe Demonstration der Quantensensorik mit Photonen wurde 2003 an der Universität Wien durchgeführt. Die Forscher konnten zeigen, dass ein verschränkter 4-Photonenzustand ein Interferenzmuster bildet dessen Periodizität einem $\frac{1}{4}$ der Wellenlänge eines Einzelphotonzustandes entsprach. Das bedeutet, dass die Phasenauflösung um einen Faktor 4 besser war, als es die Wellenlänge der verwendeten Photonen klassisch zulassen würde. Generell gilt, dass die De Broglie Wellenlänge proportional zu $1/N$ ist, wobei N die Anzahl der Photonen darstellt, d.h. die Phasenauflösung lässt sich durch den Einsatz von größeren Photonencluster steigern. Diese Methode eignet sich für Quanteninterferometrie und Spektroskopie Anwendungen, in denen eine höhere Phasenempfindlichkeit notwendig ist (Nature 429, 158–161 (2004)).

NV-Zentren

Diese künstlichen Fehlstellen im Diamant, eignen sich hervorragend für verschiedenste Anwendungen in der Quantensensorik, da schwache magnetische Felder über einen hohen dynamischen Bereich erfasst werden können. Des Weiteren bieten die einzelnen Zentren auch die Möglichkeit Lichtquanten zu speichern, eine Voraussetzung für Quanten Repeater und für die Vernetzung von zukünftigen Quanten Computern. In der Gruppe von Dr. Majer am Atominstitut gelang eine Speicherung von Quantenzuständen bis zu einigen Stunden (Nature Materials, 17, 313–317 (2018)).

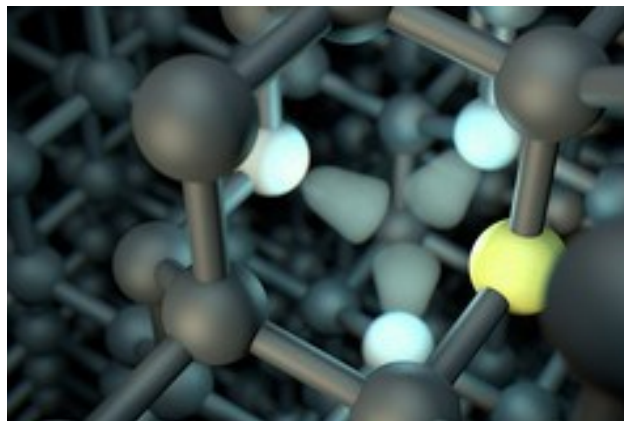


Abbildung 13: Gitterstruktur eines Diamanten. Die Lücke zwischen den (weißen) Kohlenstoffatomen und das gelbe Stickstoff Atom bilden ein NV-Zentrum. Quelle: https://ati.tuwien.ac.at/news_topics/news_detail/article/9833/EN/

Thorium Kernuhr

Die Gruppe um Prof. Schumm am Atominstitut leitet derzeit, ein im Rahmen von H2020 gefördertes, FET-Open Projekt. Die Zielsetzung des Projekts *nuClock* ist die Realisierung einer Kernuhr basierend auf Thorium-229. Da bei Kernuhren, im Gegensatz zu Elektronenübergängen in herkömmlichen Atomuhren, die Übergänge im Atomkern verwendet werden, liegt eine höhere Energie Differenz und Schwingungsfrequenz vor, die eine größere Präzision der Zeitmessung zulassen. Zusätzlich werden die im Kern liegenden Zustände durch die Elektronen in der Hülle gut gegen externe Einflüsse, die zu einer Ungenauigkeit führen, abgeschirmt. Näheres unter <https://www.nuclock.eu/>.

3.5. Resümee

- Die Europäische Union will in den kommenden zehn Jahren eine Milliarde Euro in die Entwicklung von Quantentechnologien investieren ("QT Flagship"). Dabei soll etwa die Hälfte des Förderbudgets direkt von der EU-Kommission ausgehen und die andere Hälfte von den einzelnen Mitgliedsländern zur Verfügung gestellt werden. Das Flagship ist thematisch in vier Säulen gegliedert: Quantenkommunikation, Quantencomputing, Quantensimulation und Quantensensorik. Darüber hinaus werden auch Technologien und Infrastruktur gefördert, die für das Vorankommen der Quantentechnologie als bedeutend eingestuft werden. Als solche "enabling aspects" werden genannt: Engineering, Software & Theorie sowie wissenschaftliche und technologische Ausbildung.
- Quantenkommunikation ermöglicht den abhörsicheren Austausch von kryptografischen Schlüsseln ("Quantum Key Distribution", QKD). Von den vier Technologiesäulen ist die Quantenkommunikation mit Abstand am weitesten fortgeschritten; mehrere Forschungsgruppen und Startups entwickeln und/oder vertreiben QKD-Systeme mit hoher technischer Reife. Um Distanzen über 100 km erschließen zu können, werden aber Satelliten und/oder Quantenrepeater benötigt.
- Quantencomputer können bestimmte mathematische Probleme exponentiell schneller lösen als klassische Supercomputer. Für die physikalische Realisierung gibt es unterschiedlichste Ansätze, die jeweils Vor- und Nachteile haben. Materie-basierte Systeme (z.B. Ionenfallen, Supraleiter) sind sehr fragil und erfordern aufwändige Abschirmung gegen Einflüsse der Außenwelt; optische Systeme sind stabiler, dafür muss die fehlende Wechselwirkung von Photonen mit größerem experimentellem Overhead umgangen werden.
- Quantensimulatoren entsprechen Quantencomputern, die bereits in ihrer Hardware-Ausführung darauf ausgelegt sind, bestimmte Probleme zu lösen, etwa die Simulation von komplexen (Quanten-) Systemen, wie etwa die Dynamik von hochenergetischen subatomaren Kollisionen oder größeren Molekülketten. Das macht das Gebiet vor allem für die Materialforschung und auch die Medizin und Pharmazie relevant. Weil sie im Gegensatz zu Quantencomputern nicht den Anspruch verfolgt, universelle Berechnungen zu beherrschen, befinden sich Quantensimulatoren in näherer experimenteller Reichweite.
- Die Quantensensorik nützt die Fragilität von Quantenzuständen (etwa Ionenfallen, Fehlstellungen in Kristallen, atomare Gase) zur präzisen Vermessung physikalischer Größen. Darunter fallen etwa elektrische und magnetische Felder, Gravitationsfelder, Beschleunigungen und Zeitintervalle. Anwendungsgebiete umfassen Trägheitsnavigationssysteme, Satelliten-Navigation, 5G, Kernspinresonanztomographie, Geophysik und andere.
- Die österreichische Quantenforschung ist durchaus gut aufgestellt und wird ihrer reichen Tradition gerecht. Insbesondere kann sich Wien zur Weltspitze in den Bereichen optische Quantenkommunikation und Materie-basierte Quantensensorik zählen; Innsbruck hingegen ist für die Forschung an Quantencomputern ein weltweit anerkannter führender Standort. Zu den Meilensteinen der österreichischen Quantenforschung zählen die Demonstration eines QKD-Netzwerks in Wien (2008), die Demonstration von Quanteninterferenz bei C60-Molekülen (Wien, 2011), die Teleportation von Quantenzuständen über 143 km auf den kanarischen Inseln (2012) und die Demonstration von 20 Qubits in der Ionenfalle in Innsbruck (2017).

4. Verwertungspotentiale der österreichischen Quantenforschung

Die Interviews erfolgten mit repräsentativen Forschungsgruppen aus Österreich. Aus all den Gruppen, die in der Quantenforschung aktiv sind, wurde eine Vorauswahl getroffen mit Hinsicht auf das Potential für verwertbare Ergebnisse. Diese ausgewählten Gruppen wurden kontaktiert und um ein Gespräch gebeten. Bei den Gesprächen selbst wurde ein Interviewleitfaden verwendet, welcher in Anhang 7.1 beigefügt ist. Die Eckpunkte der Interviews mit den Forschungsgruppen sind: Forschungsschwerpunkt, Verwertungspotentiale der Forschung, Bedarf an Technologiebausteinen für Forschung und Entwicklung, Patente und Spin-Off-Ausgründungen, sowie Möglichkeiten zur besseren Vernetzung mit der österreichischen Industrie. Mit folgenden Arbeitsgruppengruppen (AG) wurde dieser Fragebogen besprochen:

Tabelle 1: Auflistung der an der Befragung teilgenommenen Forschungsgruppen

Gruppe	Institution
AG Arndt	Universität Wien
AG Walther	Universität Wien
AG Brukner	IQOQI Wien
AG Ursin	IQOQI Wien
AG Rabl	Technische Universität Wien
AG Schumm	Technische Universität Wien
AG Läuchli	Universität Innsbruck
AG Nägerl	Universität Innsbruck
AG Weihs	Universität Innsbruck
AG Blatt	IQOQI Innsbruck
AG Kirchmair	IQOQI Innsbruck
AG Fink	Institute of Science and Technology Austria

4.1. Verwertbare Ergebnisse der Österreichischen Forschung

Die Mehrzahl der Gesprächspartner beurteilen die Möglichkeiten zur praktischen Verwertung von Quantentechnologien eher verhalten. So vielversprechend die Quantentechnologie auch sein mag, sie befindet sich noch in den Kinderschuhen. Die Entwicklung zu markttauglichen Anwendungen erfordere viel Zeit und kontinuierliche Arbeit, und genau hier erweise sich die akademische Welt als untauglich: Einerseits sei die in der Wissenschaft übliche Personalfuktuation zu hoch, um langfristig und beständig an Produktentwicklungen zu arbeiten (PhD- und PostDoc-Stellen sind auf wenige Jahre begrenzt), andererseits würden Wissenschaftler/innen eher danach streben, neue Innovationen in einem *Proof of Concept* zu demonstrieren als langfristig an Verbesserungen bestehender Technologien zu feilen. Inkrementelle Verbesserungen haben wenig wissenschaftlichen Wert und bringen keine Publikationen.

Für das Vorantreiben von Quantentechnologien wird allgemein ein großes österreichweites Zentrum vermisst, das einerseits die Potentiale der Quantenforschung nach außen repräsentiert und andererseits als Inkubator für Spin-offs

dienen kann. Ein solches Zentrum könnte etwa von den Universitäten in Wien (Quantenkommunikation und -sensorik) und Innsbruck (Quantencomputing und -simulation) geleitet werden. Die Gründung von Startup-Unternehmen wird häufig nicht zuletzt aufgrund überbordender Bürokratie und mangelnder staatlicher Unterstützung als nicht erstrebenswert empfunden.

Von den Gesprächspartnern aus der Quantenforschung wird die Entwicklungsreihenfolge auf dem Weg zur Marktreife folgendermaßen eingeschätzt:

1. **Quantenkommunikation:** am weitesten fortgeschritten, Komplettsysteme schon heute kommerziell erhältlich
2. **Quantensensorik:** erste Anwendungen in der Präzisionsmessung von Frequenz, Zeit und externen Feldern
3. **Quantensimulation:** Interessant für Pharma- und Materialwissenschaften; ca. 8 Jahre für Photonen-basierte Simulationen
4. **Quantencomputing:** Geduld und langer Atem erforderlich; Ionen QC in ca. 10 Jahren, photonischer QC in ca. 15 Jahren

Diese Einschätzung ist auch in Übereinstimmung mit dem Deutschen Quantentechnologieprogramm, das in der ersten Phase ein Projekt aus dem Bereich Quantenkommunikation und 2 Projekte aus dem Bereich Quantensensorik fördert¹².

Die folgenden Tabellen, geordnet nach den vier Säulen des QT-Flagships, geben eine detailliertere Aufschlüsselung der möglichen Verwertung. Zusätzlich zu den möglichen Anwendungen wird auch der jetzige Entwicklungsstand angegeben und der noch ausstehende Zeitraum zur Produktreife geschätzt. Der von den Studienautoren geschätzte Zeitraum korrespondiert gut mit einer europäischen Studie zum Thema „Industry Perspectives on Quantum Technologies“ aus dem Jahr 2015¹³. Das Interesse der österreichischen Industrie an den einzelnen Entwicklungen sowie internationale Anstrengungen und bereits bestehende Umsetzungen vervollständigen die Informationen in den Tabellen.

Zusätzlich zu den 4 Säulen gibt es auch eine Tabelle für Enabling Technology, da dieser Bereich der Schlüsseltechnologien in allen Forschungsgruppen eine große Rolle spielt und in Österreich Potential vorhanden ist, um Produkte in dieser Sparte zu entwickeln.

¹² www.qutega.de/en/pilot-projects/overview/

¹³ www.osa.org/en-us/corporate_gateway/publications/publication_report_library/industry_perspectives_on_quantum_technologies/

4.1.1. Verwertungspotential Quantenkommunikation

Tabelle 2: Verwertungspotential im Bereich Quantenkommunikation

Quanten-kommunikation	Technologie in Österreich	TRL	Zeitraum	Industrieinteresse in Österreich	Internationales Marktumfeld
QKD Satellitengestützt	Know How existiert, Bodenstation errichtet	hoch	2-5 Jahre	gering	chinesischer QKD Satellit, ESA plant QKD Mission
QKD Fasergestützt	Know How und experimentelle Demonstrationen	hoch	2-5 Jahre	ev. 2-3 Pilotkunden	1-2 kommerzielle QKD Anbieter
Quantenzufalls-generator	experimentelle Demonstratoren	hoch	1-2 Jahre	ev. Intel, internationaler Vertrieb	kommerzielle Anbieter vorhanden
One-time Programs	erste Demonstration im labor	mittel	3-5 Jahre	Gründung von Spin-off angedacht	Derzeit konkurrenzlos
Verschränkte-Quellen, Einzelphoton-Quellen	Quellen basierend auf Standard Optik	mittel-hoch	1-5 Jahre	ev. Roithner Laser Technik als Vertrieb	3-4 kommerzielle Anbieter vorhanden

In der Quantenkommunikation, die technologisch am weitesten fortgeschritten ist, ergeben sich einige Anwendungsfälle. Allen voran steht die Quantenschlüsselverteilung, deren Alltagstauglichkeit schon mehrmals in Österreich demonstriert wurde. Eine Entwicklung für faser- oder freistrahlbasierte QKD Systeme sollte daher kurzfristig möglich sein. Das Interesse, mit Ausnahme der Firma Novarion, ist aber eher als klein einzustufen und beschränkt sich auf einfache Demonstration der Technologie. International gesehen gibt es dazu bereits einige Entwickler und Anbieter von QKD-Systemen.

Eine weitere Anwendung stellen quantenbasierende Zufallsgeneratoren, QRNGs, dar. Da diese Systeme nicht so komplex wie vollständige QKD Systeme sind, existiert schon eine Reihe von Firmen die QRNGs entwickeln und kommerzialisieren. QRNGs wurden auch schon von einigen Gruppen in Österreich demonstriert und könnten kurzfristig in Produkte entwickelt werden. Der Bedarf für diese Technologie, an der Intel und Novarion Interesse bekundet haben, ist in Österreich gering, aber durch die Vielzahl an Anwendungen für Zufallszahlen ergibt sich global gesehen ein großer Markt.

Quellen für Einzelphotonen oder verschränkte Photonen sind noch ein Nischenprodukt und das Marktpotential abhängig von der Entwicklung im Quantensensorik- und Quantencomputing-Bereich. Hochintegrierte Lösungen, basierend auf photonischen Chips, stehen noch am Anfang der technischen Entwicklung und werden mittelfristig verfügbar sein. Dementsprechend klein sind der derzeitige Bedarf und das Angebot an Produkten. Eine sehr interessante Neuentwicklung sind quantenbasierende One-Time-Programs, die quantenmechanisch verschlüsselt, vom Benutzer nur ein einziges Mal laufen gelassen werden können. Die Technologischen Hürden dabei liegen im selben Bereich wie für QKD Systeme und könnten daher kurzfristig realisiert werden.

4.1.2. Verwertungspotential Quantencomputing

Tabelle 3: Verwertungspotential im Bereich Quantencomputing

Quanten-computation	Technologie in Österreich	TRL	Zeitraum	Industrieinteresse in Österreich	Internationales Marktumfeld
Ionen-Fallen Quanten Computer	Demonstration bis zu 20 Qubits	mittel	5-10 Jahre	Infineon als Komponentenhersteller	Konkurrenz von Intel, IBM, Google und Spin-Off Firma (Ion-Q)
Schnittstellen für Photonen und Materie Qubits, Quanten Memories	Grundlagenforschung	niedrig	10-15 Jahre	gering, eventuell CMS als Komponentenhersteller	Weltweite Forschungsaktivitäten, speziell am QuTech (NLD)
Optischer Cluster State Quanten Computer	Demonstration von 8 Qubits	niedrig	15 Jahre	Novarion	Weltweite Forschungsaktivitäten
Blind Quantum Computing	Demonstration im Labor	niedrig	10 Jahre	gering	2-3 Gruppen arbeiten aktiv an diesem Thema

Für die Verwertung von Quantencomputer Technologie gibt es in Österreich 2 Ansätze. Auf dem Gebiet der Ionenfallen-Computer gibt es die herausragenden Erfolge des IQOQI Innsbruck mitsamt Ausgliederung eines Unternehmens (Alpine Quantum Technologies), dessen Ziel es ist einen kommerziellen Quantencomputer nach diesem Prinzip zu bauen. Infineon unterstützt dabei die Entwicklung von miniaturisierten Ionenfallen.

Die photonische Realisierung von Quantencomputern hat auch eine lange Tradition und es existiert daher ein großes Know-how in der österreichischen Forschung. Die technologischen Hürden sind jedoch noch hoch um einen Cluster-State von mehr als 10 Qubits zu erschaffen. Durch die noch zu erwartende lange Entwicklungsphase gibt es keine direkten Verwertungsstrategien.

Die Entwicklung von Schnittstellen zwischen den *stationären* Qubits eines Quantencomputers und den *fliegenden* Qubits eines Quantennetzwerkes wird, wie Möglichkeiten zur Speicherung von Quantenzuständen, bereits von einigen Gruppen untersucht. Aber auch hier ist keine kurz- oder mittelfristige Verwertung abzusehen. Mit der Möglichkeit Qubits zu stationären Quantencomputern zu schicken, würde auch die Anwendung des *Blind Quantum Computing* technologisch realisierbar werden.

4.1.3. Verwertungspotential Quantensimulation

Tabelle 4: Verwertungspotential im Bereich Quantensimulation

Quantensimulation	Technologie in Österreich	TRL	Zeitraum	Industrieinteresse in Österreich	Internationales Marktumfeld
Optischer Quantensimulator	Demonstration mit 3 Qubits	niedrig	5-10 Jahre	Novarion	Weltweite Forschungsaktivitäten
Superconducting Quantensimulator	4 Qubits im Labor realisiert	niedrig	10 Jahre	gering	Konkurrenz von Intel, IBM, Google
Bose - Einstein Kondensate	Demonstrationen im Labor	niedrig	10 Jahre	gering	Weltweite Forschungsaktivitäten

Ähnlich ist die Lage bei den Quantensimulatoren. Auch hier gibt es sehr erfolgreiche Grundlagenexperimente in den unterschiedlichsten quantenmechanischen Systemen, aber da eine Anwendung erst mittelfristig absehbar ist, ist das Interesse noch gering. Novarion sieht ein mögliches Potential für Quanten Co-Prozessoren, die auf sehr spezielle Algorithmen ausgerichtet sind und damit auch ohne vollständigen Quantencomputer einen Quantenvorteil erzielen.

4.1.4. Verwertungspotential Quantensensorik

Tabelle 4: Verwertungspotential im Bereich Quantensensorik

Quantensensorik	Technologie in Österreich	TRL	Zeitraum	Industrieinteresse in Österreich	Internationales Marktumfeld
Trägheitssensoren	Prototyp entwickelt an TU Wien	mittel	3-5 Jahre	gering	kommerziell erhältlich von Muquans (FRA), Anfrage aus DEU
Atomuhren	Demonstration im Labor	mittel	3-5 Jahre	Infineon (Synchronisation von 5G Netzen)	Kommerzielle Entwicklung bei M Squared, Pilot Projekt in QUTEGA, nuClock Projekt (FET-Open)
Kernspin Sensor für Einzel-Moleküle	Grundlagenexperimente	niedrig	5 Jahre	Anton Paar, Infineon, EVGroup	Weltweite Forschungsaktivitäten, z.B. Universität Stuttgart
Materiewelleninterferometrie für Moleküle	Demonstration im Labor	niedrig	5 Jahre	ev. Pharmaindustrie	Derzeit konkurrenzlos

Nanorotoren	Demonstration im Labor	mittel	5 Jahre	Electrovac	
Opto-mechanische Resonatoren	Demonstration im Labor	niedrig	5-10 Jahre	CMS, Anton Paar, Infineon	

Die Technologie für Quantensensoren ist hingegen schon weiter vorgeschritten und ermöglicht es mittelfristig an mögliche Verwertungen zu denken. Konkret bieten sich Atominterferometer für Trägheitssensoren, sowie neuartige atomare Uhren für noch genauere Zeitmessungen an. Da es bereits Firmen und nationale Forschungsprogramme auf europäischer Ebene zu diesen Technologien gibt¹⁴, lässt sich rückschließen, dass eine erfolgreiche Kommerzialisierung von vielen als wahrscheinlich angesehen wird.

Ein Einsatzgebiet mit sehr großem Marktpotential ist der Pharma- und Biomedizinische Sektor. Österreich ist hier weltweit führend bei der Materieinterferometrie mit großen Molekülen, mit der sich verschiedenste molekulare Eigenschaften bestimmen lassen, allerdings gibt es noch keine Kontakte zu relevanten Unternehmen. Des Weiteren werden Anstrengungen unternommen, um einen Kernspinresonanzsensor für die Charakterisierung von Molekülen aus einer Anordnung von N/V Zentren zu konstruieren.

Nanorotoren sowie opto-mechanische Nanoresonatoren, die an den österreichischen Universitäten erforscht werden, würden sich auch als Sensoren für Druck, mechanische Schwingungen oder Abtastnadel einsetzen lassen. Bei diesen Arten von Sensoren spielen quantenmechanische Effekte eine untergeordnete Rolle, aber durch die sehr kleine Abmessung des Sensors ergeben sich neue Anwendungsgebiete.

4.1.5. Verwertungspotential Schlüsseltechnologien

Tabelle 5: Verwertungspotential im Bereich Schlüsseltechnologien

Enabling Technology	Technologie in Österreich	TRL	Zeitraum	Industrieinteresse in Österreich	Internationales Marktumfeld
Einzelphoton Detektoren	Produkte bereits vorhanden (AIT)	hoch	1-3 Jahre	Anton Paar, Riegler	Kommerzielle Anbieter vorhanden
Hochfrequenz Elektronik	teilweise vorhanden (AIT, Intel)	hoch	1-3 Jahre		Kommerzielle Anbieter vorhanden
Elektronische Pulskontrolle	teilweise vorhanden	hoch	1-3 Jahre		Speziallösungen am Markt

¹⁴ www.photonikforschung.de/media/quantentechnologien/pdf/optclock_Quanten-Pilotprojekt_Projektsteckbrief_Korr2017-09-11_bf_C1.pdf
www.m2lasers.com/quantum.html
www.muquans.com

Integrierte Elektronik	teilweise vorhanden (Infineon, AT&S, EVGroup)				Kommerzielle Anbieter
FPGA Entwicklung	teilweise vorhanden (Anton Paar, AIT)	hoch	1-3 Jahre		

Bei den Schlüsseltechnologien handelt es sich vor allem um Lösungen für die Forschung oder Entwicklung von auf Quantentechnologie basierenden Systemen. Daher gibt es auch kein direktes Industrieinteresse, sondern die Unternehmen agieren hier als Technologiebringer. Da es keine Laserindustrie in Österreich mehr gibt, beschränken sich die verwertbaren Technologien hauptsächlich auf den Bereich Mikro- und Nanoelektronik. Hier sei zu erwähnen, dass es bereits erfolgreiche Produkte für Zeitmessungen und Photodetektion existieren. Die Entwicklung digitaler Messsysteme und elektronischer Pulsgeneratoren könnte kurzfristig realisiert werden. Interessant sind diese Lösungen auch, da sie nicht ausschließlich den Quantentechnologiemarkt bedienen, sondern auch für andere Mess- und Analysesystemen einsetzbar sind. So haben z.B. Riegl und Anton-Paar Bedarf an Photodetektoren für sehr geringe Lichtleistung um Streulicht-Analysen durchführen zu können.

4.1.6. Verwertungspotential Lehr- und Ausbildungssysteme

Abseits der Entwicklungen für direkte Anwendungen in der Quantentechnologie, können Systeme welche die Grundprinzipien der Quantenphysik darbringen, auch als Demonstrationssysteme kommerzialisiert werden. Hierzu eignen sich vor allem Systeme die mit Photonen arbeiten, wie verschränkte Photonenquellen oder einfache QKD Systeme. Eine Erweiterung möglicher Demoexperimente, würde sich im Bereich Molekülinterferometrie oder Quantensimulation anbieten, bei Letzteren auch wieder basierend auf einer photonischen Implementation. Der Markt für solche Systeme ist jedoch überschaubar und beschränkt sich auf Hochschulen und ähnliche ausbildende Institute. Nichtsdestotrotz werden Demosysteme für Quantenkommunikation bereits von der Firma qutools kommerziell angeboten.

Tabelle 6: Verwertungspotential im Bereich Lehr- und Ausbildungssysteme

System	Technologie in Österreich	TRL	Zeitraum	Industrieinteresse in Österreich	Internationales Marktumfeld
Molekülinterferometer	Laboraufbauten	mittel	3-5 Jahren	Nicht erfasst	Nicht vorhanden
Photonische Quanteninformation (QKD, Verschränkung)	Prototypen vorhanden	hoch	1-2 Jahren	Roithner Laser Technik	Kommerzieller Anbieter (qutools)

4.2. Bedarf der Österreichischen Forschung

Der zurzeit größte Anknüpfungspunkt für Kooperationen von Quantenforschung und Industrie besteht in den fehlenden Technologiebausteinen, welche die Wissenschaftler/innen für die Entwicklungen ihrer Experimente benötigen. Hier gibt es regen Bedarf an Elektronik-Bauteilen, neuen Lasern und anderen Technologien. Die wissenschaftliche Forschung ist pausenlos auf der Suche nach Zulieferern aus der Wirtschaft, die in der Lage sind, die hochspezialisierten Ansprüche zu erfüllen. Thematisch geordnet lässt sich der Technologiebedarf der österreichischen Quantenforschung wie folgt darstellen:

4.2.1. Quantenkommunikation

Im Bereich Quantenkommunikation sind insbesondere Technologien für die verlässliche Erzeugung von Einzelphotonen und deren Verarbeitung auf integrierten Schaltkreisen gefragt. Darüber hinaus besteht dringender Bedarf an schneller (GHz) Elektronik zur Signalerzeugung und -verarbeitung.

- Einzelphotonquellen
- NV-Zentren mit Kernspin
- Fabs für photonische Integration: u.a. Photonenquellen, Cavities, nichtlineare optische Medien am Chip
- Schnelle Elektronik und Pulsgeneratoren (Pikosekunden)
- Molekularstrahlepitaxie
- Gute modengelockte Laser mit passender Pulsbreite
- Zeiterfassung mit hoher Rate und (Pikosekunden-) Auflösung

4.2.2. Quantencomputing und Quantensimulation

Bei Gesprächen mit Forschern im Bereich Quantencomputing und -simulation kristallisierte sich wiederum eine verlässliche und spezialisierte Elektronik als einer der Flaschenhälse heraus. Bedarf herrscht unter anderem auch an verbessertem Bonding von Chip und Faser und an rauscharmen Lasern.

- Mikrowellenelektronik im Kryogen-Bereich
- Elektronische Pulskontrolle: stabile Amplitude und Frequenz, phasengelockt, geringe Latenz
- Skalierbare Elektronik, die aus modularen Funktionseinheiten besteht, im PXI-Format
- Bessere Foundry-Prozesse
- Verbesserte Chip-Faser-Kopplung
- Packaging mit RF-Technology
- Zugang zu schnelleren (klassischen) Supercomputern
- Hochstabile Laser

4.2.3. Quantensensorik

Ähnlich wie in den Gebieten Quantenkommunikation und Quantencomputing stellt auch bei der Quantensensorik ungenügende Elektronik eine technologische Hürde dar. Des Weiteren werden unter anderem spezielle Laser und Verfahren zur Integration von photonischen Schaltkreisen auf Chips gewünscht.

- Intensive neutrale Molekularstrahlen
- Effiziente Detektoren für neutrale Teilchen im Flug
- Industrielle Fertigung und Stabilisierung der Interferometer
- Verbesserte UV-Lasertechnologie mit hoher, durchstimmbarer Leistung
- Fabs für photonische Chips
- Lösung für elektronische Ansteuerung und Auslese einzelner NV-Sensoren
- Aktivierte Chips mit Dockingstations für Moleküle
- Hochleistungslaser im UV Bereich

4.3. Patente

4.3.1. Internationaler Kontext

Die Daten in diesem Kapitel sind einer Studie des Joint Research Centre im Auftrag der Europäischen Kommission aus dem Jahr 2016 entnommen. Abbildung 14 zeigt einen Überblick über die bis 2015 eingereichten Patente, aufgeschlüsselt nach thematischer Einordnung und Einreichungsland. Die Grafik illustriert bereits anschaulich die thematische Aufteilung unter den globalen Playern: Im Bereich Quantenkommunikation und QKD spiegelt die Grafik das massive Investment, das in China getätigt wird, wider (genauer aufgeschlüsselt in Abb. 15). Die Anzahl der Patente im Bereich Quantencomputing untermauern deutlich die Vormachtstellung der USA in diesem Feld, was auch durch eine genauere Aufschlüsselung in Abb. 16 illustriert wird. Bei der Quantensensorik teilen sich die USA und China die Vorherrschaft was Patente angeht.

Die Daten zeigen, dass der EU-Raum bei der Verwertung von Quantentechnologien noch weit hinter den großen Akteuren USA und China hinterherhinkt und auch klar hinter Japan zurückbleibt.

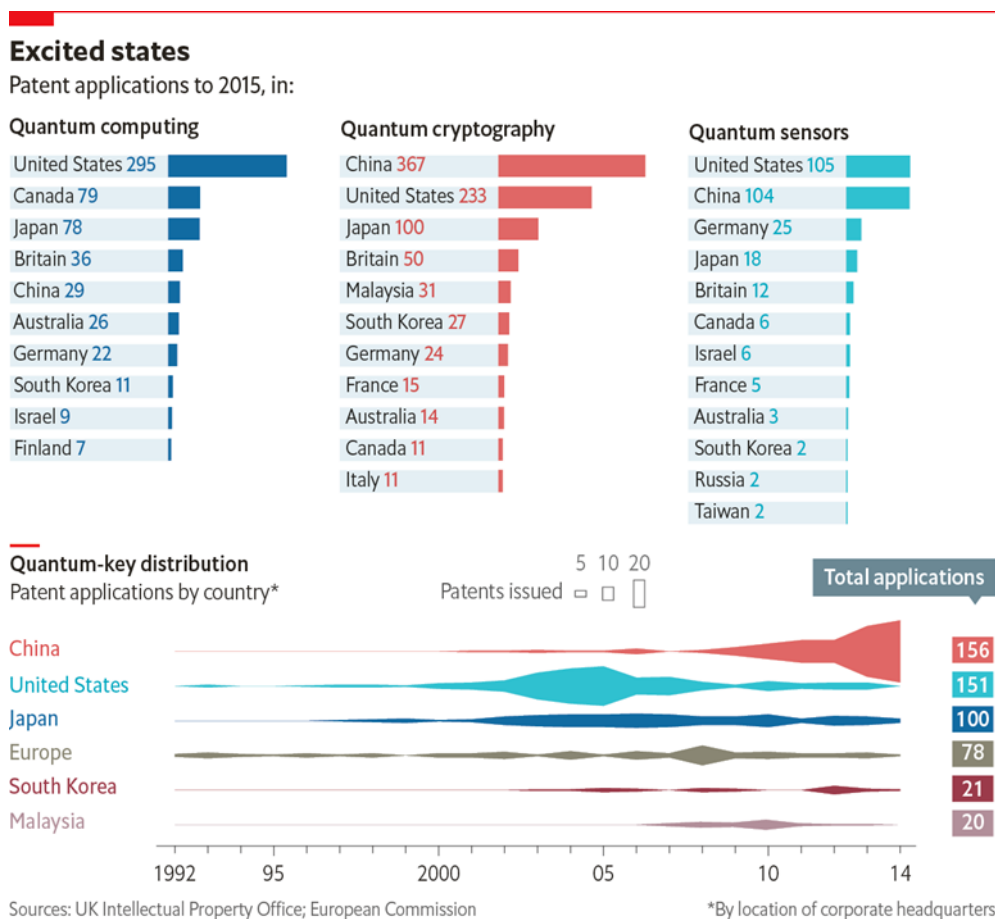


Abbildung 14: Patentanmeldungen nach thematischen Bereichen und Regionen sortiert. Quelle: <https://www.economist.com/news/essays/2171782-quantum-technology-beginning-come-its-own>

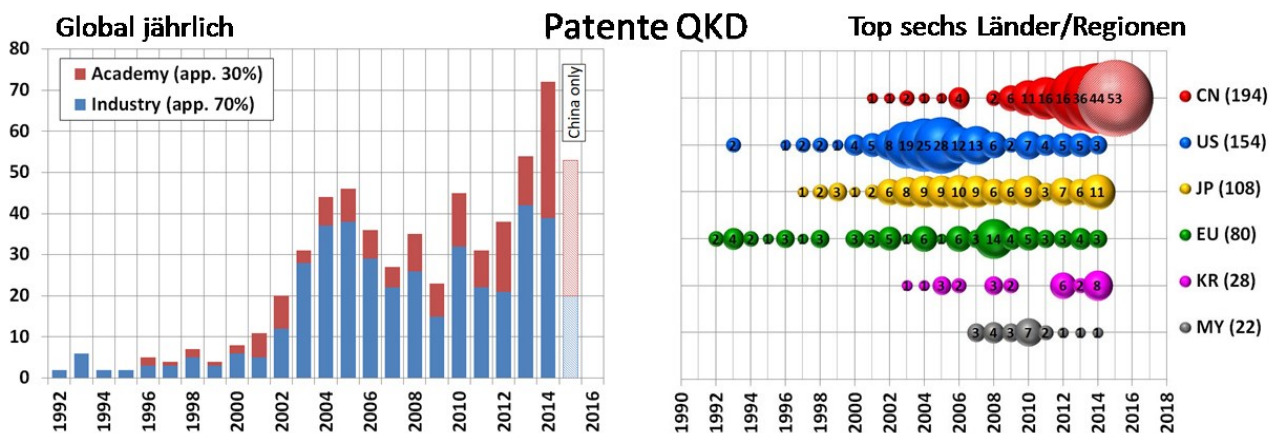


Abbildung 15: Patente im Bereich Quantenkommunikation und Quantenschlüsselverteilung. Quelle: „Patenting trends in selected Quantum Technologies, with a view on policy implications“, Joint Research Centre, European Commission (2016).

Bei den Patentanmeldungen im QKD Bereich (Abb. 15) ist klar ersichtlich, dass Europa hinter den USA und vor allem China zurückgefallen ist. In China ist zusätzlich ein sehr starker Trend zu einer höheren Anzahl an Einreichungen in den letzten Jahren sichtbar, der zeigt wie stark China in diesen Sektor investiert. Der „Ausreißer“ im Jahr 2008 für Europa ist wahrscheinlich auf das erfolgreiche SECOQC Projekt zurückzuführen. Leider konnte dieser Schwung nicht in die nächsten Jahre mitgenommen oder gar ausgebaut werden.

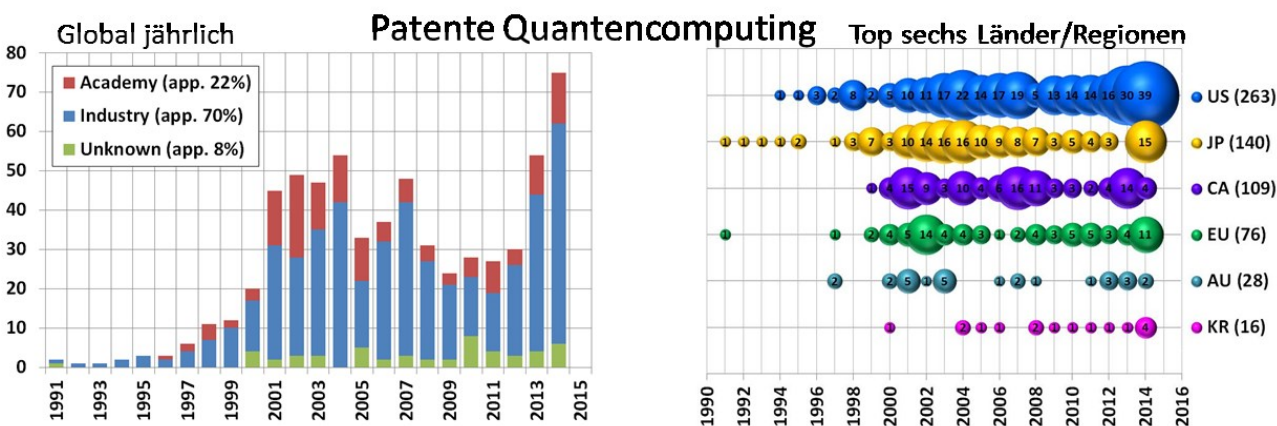


Abbildung 16: Patente im Bereich Quantencomputing und-simulation. Quelle: „Patenting trends in selected Quantum Technologies, with a view on policy implications“, Joint Research Centre, European Commission (2016).

Im Bereich Quanten Computing (Abb. 16) wird das Feld wenig überraschend von den USA angeführt, wo sowohl mehrere Industrieriesen als auch zahlreiche Startups intensiv an der Entwicklung von Quantencomputern arbeiten. Aber auch hier ist die EU von kleineren Ländern wie Kanada und Japan überholt worden.

Die Patentlage in der Quantensensorik (Abb. 14) lässt leichte Hoffnung keimen, da hier die EU zumindest den dritten Platz, hinter den USA und China belegen kann. Die größte Anzahl der Patente wird dabei in Deutschland und Großbritannien registriert.

4.3.2. Erhebung zur Patentlage in Österreich

Um einen Vergleich mit der europäischen und internationalen Patentlage auf dem Gebiet Quantentechnologie durchzuführen, wurde eine Patentrecherche durchgeführt mit dem Ziel die nationalen Patenteinreichungen zu erheben. Zusätzlich wurden die Interviewpartner nach ihrer Einstellung zu Patenten gefragt und welche Erfahrung in diesem Bereich gemacht wurden. Die online Recherche umfasste das Österreichische Patentamt¹⁵, das Europäische Patentamt¹⁶ und Google Patents¹⁷. Um nationale Einreichungen herauszufiltern wurden nur solche Patentanmeldungen berücksichtigt, in denen entweder zumindest einer der Erfinder in Österreich arbeitet, oder die einreichende Institution ihren Sitz in Österreich hat. Gesucht wurde einerseits nach einschlägigen Stichwörtern, wie z.B. Quanten, Quantum, QKD, Entanglement, usw., andererseits wurde auch nach Erfindern namentlich gesucht. Dazu wurden die Namen der Gruppenleiter, die an den Österreichischen Universitäten in der Quantenforschung involviert sind, verwendet. Die letztere Vorgangsweise war besonders hilfreich um Patente im Bereich Enabling Technologies aufzuspüren, da diese oft nicht zusammen mit Quantentechnologien erwähnt werden.

Im Zeitraum von 2002 bis 2016 wurden 15 Patente ermittelt, denen Erfindungen im Bereich Quantentechnologien zugeordnete werden können. Zählt man auch die Patente der Enabling Technologies hinzu, ergibt sich eine Gesamtanzahl von 22 Patenten in im ausgewerteten Zeitraum von 14 Jahren. Eine vollständige Liste der Patente ist im Anhang (7.1) am Ende der Studie zu finden. Der zeitliche Verlauf, dargestellt in Abbildung 17, ist bis auf das Jahr 2016 flach, mit ca. 1-2 Patenteinreichungen pro Jahr. Es bleibt zu sehen ob das Jahr 2016 mit insgesamt fünf Patenteinreichungen eine einmalige Situation darstellt, oder es wirklich zu einer Steigerung in den Einreichungen kam. Leider sind, aufgrund der Offenlegungsfrist von 18 Monaten, noch keine Daten für 2017 und 2018 verfügbar.

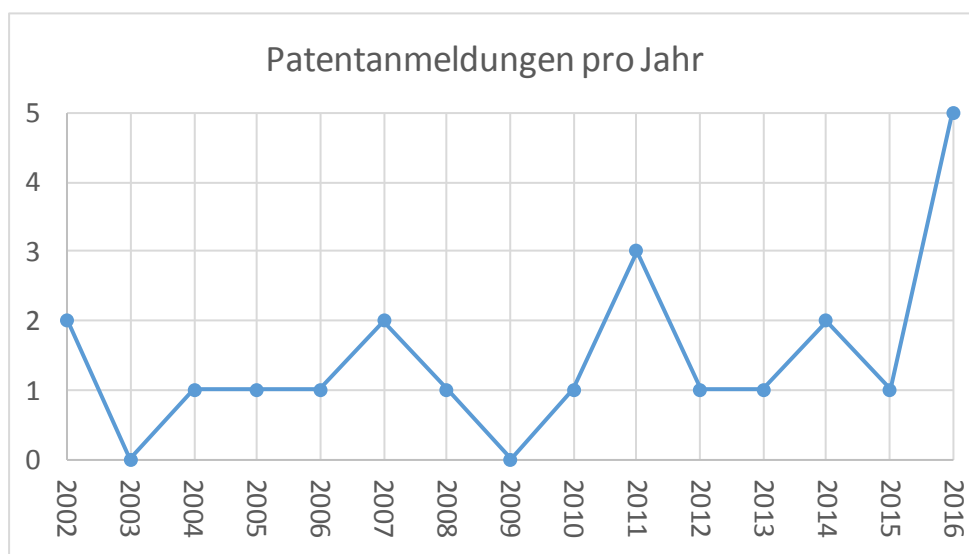


Abbildung 17: Österreichische Patenteinreichungen im Gebiet Quantentechnologien und Enabling Technologies für den Zeitraum 2002 bis 2016. Quelle: Eigene Erhebungen

¹⁵ <http://see-ip.patentamt.at/NPatentSuche>

¹⁶ <https://worldwide.espacenet.com/>

¹⁷ <https://patents.google.com/>

Die Analyse zeigt, dass sich in Österreich die Einreichungen im unteren zweistelligen Bereich bewegen. Im gleichen Zeitraum gab es ca. 200 Patente zu denselben Themen im EU Raum. Das Verhältnis (ca. 8% ohne Enabling Technologies) übersteigt bei weitem den Anteil Österreichs an Bevölkerung und Bruttoinlandsprodukt der EU-28.

Vergleicht man anhand der Förderbudgets (Mac Kinsey Studie¹⁸), so stellt Österreich 6 % des gesamten Förderaufwandes von €550 Millionen (EU Gesamt) in der Quantenforschung und die Anzahl der Patente würde in dieser Berechnung leicht über dem EU-Schnitt liegen. Zusammenfassend ist zu sagen, dass Österreich bei den Patenteinreichungen für Quantentechnologie im europäischen Vergleich eher gut abschneidet.

Abbildung 18 zeigt die Verteilung der Patenteinreichungen nach Themengebieten. Auffällig hier ist die starke Konzentration an Erfindungen im Bereich Quantenkommunikation und Enabling Technologies. Diese Häufung unterstreicht die auch die teilweise führende Rolle der Österreichischen Forschungsgruppen in der Quantenkommunikation, speziell in der Quantenkryptographie. Die Anzahl der Patente in diesem Bereich liegt klar über dem europäischen Durchschnitt. Aber auch bei den geringeren Patentanmeldungen für Quantencomputer und Quantensensorik folgt Österreich dem EU-Schnitt.

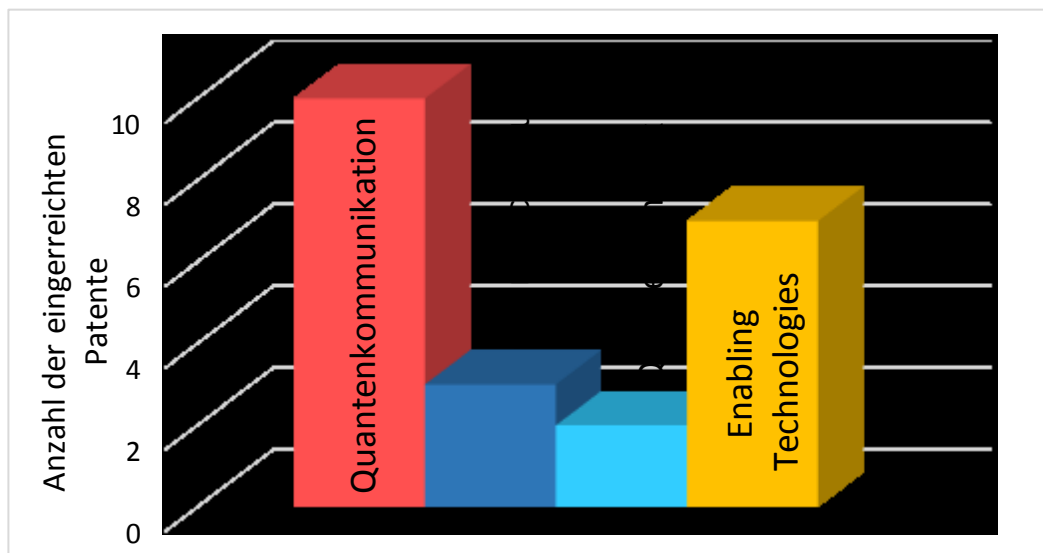


Abbildung 18: Aufschlüsselung der Patenteinreichungen nach Themenbereich. Quelle: Eigene Erhebungen

Im Europäischen Vergleich ist die Patentlage eher überraschend, da eine Patenteinreichung im Bereich Quantentechnologien nicht das vordergründige Ziel der Forscher an den österreichischen Universitäten ist. Wenn keine Firmengründung angestrebt wird, ist es für den einzelnen Forscher nützlicher seine Ergebnisse schnell zu veröffentlichen als sich um ein Patent zu bemühen. Viele Wissenschaftler/innen denken daher meist nicht an das Patentieren und nehmen auch oft an, dass ihre Erfindung keine Neuerung darstellt.

Um eine weitere Steigerung der Patentanträge zu realisieren, müssen diese aktiver verfolgt werden. Viele Forschungsabteilungen generieren kontinuierlich neue Innovationen um ihre Forschung auf höchstem Niveau zu halten. Diese Ideen und Umsetzungen, werden aber nicht geschützt, da dieser weitere Schritt als nicht wichtig eingeschätzt wird

¹⁸ <https://www.flagera.eu/wp-content/uploads/2016/02/05-EC-QT-Flagship-State-of-Play-30-June-2016.pdf>

– ein Fehler, wie sich später herausstellt, denn wenn es um mögliche Firmengründungen geht, sind Patente ein wertvolles Grundkapital, mit dem externes Investment leichter einzubringen ist.

Unterstützung zum Schutz und zur Verwertung von geistigem Eigentum ist in Österreich gegeben. Die befragten Gruppen, die Patente eingereicht haben, sind sehr mit der angebotenen Hilfe an den Universitäten zufrieden. Die „Technologie Transfer“ Abteilungen der Universitäten führen Patentrecherchen durch, begleiten unterstützend die Einreichungsphase und geben kompetente Auskunft über IPR Angelegenheiten.

4.4. Firmengründungen

Das Startup Crystalline Mirror Solutions (CMS) kann als Beispiel für eine erfolgreiche Firmengründung aus der österreichischen Quantenforschung verstanden werden. Die Firma entsprang der Forschungsgruppe von Prof. Aspelmeyer an der Universität Wien. Bei der Gründung konnte bereits auf ein Produkt (Spezialbeschichtete Spiegel) zurückgegriffen werden, und half CMS gleich in den Markt einzusteigen. CMS tat sich daher in weiterer Folge auch leichter Investment anzuziehen, im Vergleich zu Firmen die zwar eine gute Idee haben aber noch keinen produktfähigen Prototyp.

Ein weiteres Spin-off aus Wien die Quantum Technology Laboratories GmbH wurde 2017 von Dr. Ursin gegründet und sieht sich zurzeit vor allem in einer Beratungsfunktion und industriellem Prototyping für Quantenkommunikationstechnologien.

Als nennenswerteste Neuentwicklung im Bereich Spin-off gilt mit Sicherheit die kürzliche Gründung von Alpine Quantum Technologies GmbH (AQT), einer von Prof. Blatt, Prof. Zoller und Dr. Monz geleiteten Firma, welche Ionen-basierte Quantencomputer zur Marktreife bringen soll. Ziel ist es innerhalb von 3 Jahren einen Ionen-Quantencomputer auf modularer Basis zu entwickeln. Der modulare Ansatz soll dabei möglichst viele Freiheiten schaffen und Unabhängigkeit in der Lieferkette sicherstellen. Obwohl die Anzahl der Qubits nicht so hoch ist wie bei Realisierungen mit supraleitenden Elementen, zeigt die AQT einen technologischen Vorteil auf: da die Qubits eine höhere Güte aufweisen, eine größere Anzahl davon interagieren können und eine Schnittstelle zu optischen Quantennetzwerken leichter zu realisieren ist, kann die AQT bereits jetzt Möglichkeiten realisieren, von denen die Konkurrenz noch Jahre entfernt scheint. Die exakte Verwertungsstrategie inkludiert sowohl ein Serviceangebot (Rechenzeit verkaufen) bis zum Vertrieb der einzelnen Quanten-Module oder kompletter Quantencomputer. Bei den befragten Forschern korreliert der Anreiz zur Firmengründung in erster Linie damit, wie theoretisch bzw. experimentell die jeweilige Forschungsaktivität angesetzt ist. Während bei den Theorie-orientierten Gruppen von etwa Prof. Rabl und Prof. Brukner Spin-offs überhaupt nicht in Erwägung gezogen werden, so gibt es bei den experimentellen Gruppen rund um Prof. Arndt (smarte Laserschutzbrille), Prof. Walther (One-time Programs), Dr. Trupke (Moleküldetektion mittels Quantensensorik) durchaus Überlegungen in Richtung Firmengründung, abhängig von erfolgreichen proof-of-concept Experimenten.

Die Gründung von Spin-off-Firmen ist auch in das Bewusstsein der Universitäten getreten. Hierfür wird im Rahmen ihrer Wissenstransferzentren Unterstützung und Mentoring für die Firmengründer/innen angeboten. Am IST Austria wird z.B. gerade ein Technologiepark errichtet, an dem institutseigene als auch externe Spin-offs Labors und Büros beziehen können. Das IST bietet auch Vorlesungen zur Gründung von Startups an.

Das Spin-off CMS bewies, dass es auch in Österreich möglich ist als österreichisches Unternehmen Investoren zu gewinnen. Unter den Fördergebern befinden sich das AWS (Seedfinancing), tecnet, I.E.C.T. – Institute for Entrepreneurship Cambridge Tirol und eine Schweizer Investorengruppe. Ein bereits bestehendes Produkt und Patent waren dabei hilfreich. AQT hat es, in der derzeitigen Einreich-Phase von Patenten und der Sicherung existierender IPR, schwieriger im Lukrieren von Investment und sucht noch nach geeigneten Partnern. Zurzeit gibt es eine PreSeed-Finanzierung der AWS und Unterstützung durch STARTUP.TIROL. Weiters konnte die Industriellen-Vereinigung Tirol als Gesellschafter gewonnen werden.

Als lobenswert wurde die Unterstützung und Förderung (Seed-Programme) der AWS erwähnt, die sowohl CMS als auch AQT Förderungen gewährte. Dabei wurden die relative unbürokratische Antragsstellung, sowie das proaktive Auftreten als sehr positiv gesehen.

Bemängelt wurden zum Teil die zu starren Strukturen an den Universitäten, die es für die entstehenden Spin-offs schwierig machen, die Infrastruktur an den Universitäten längerfristig nutzen zu können. Laut den beteiligten Forschern sollen auch bürokratische Hürden verkleinert werden, wenn es um die Gründung von Start-Ups geht.

4.5. Zusätzliche Bedürfnisse

Bei den Gesprächen mit den Forschungsgruppen wurde immer wieder die Wichtigkeit des technischen Personals erwähnt. Die Wünsche und Vorstellungen sind hier beschrieben zusammen mit der Herausforderung gutes akademisches Personal zu finden und – noch wichtiger – zu halten.

4.5.1. Technisches Personal

Für die Fortführung der exzellenten Forschung und Entwicklung auf den Universitäten ist es unumgänglich geeignetes Fachpersonal zur Verfügung zu haben. Bislang wird von den Forschungsgruppen fast alles selbst entwickelt. Nur Standard Komponenten kommen aus dem Katalog, die kritischen Komponenten werden meist im Haus selbst gefertigt. Dabei ist die Qualität des einzelnen Mitarbeiters (Elektronik, Software, Maschinenbau) extrem wichtig. Zum Beispiel benötigt der Aufbau von Materiewelleninterferometern sehr gute Kenntnisse in Maschinenbau und Stahlverarbeitung. Die mechanische Fertigungstechnik der Werkstätten muss daher ausreichend ausgestattet und besetzt sein, um auch größere Apparate mit wenigen Mikrometer Toleranz reproduzierbar zu bauen.

Ein Wunsch wäre es, einen Cluster zu gründen, der die nötigen personellen und materiellen Ressourcen den Forschungsgruppen zur Verfügung stellt. Dieser Cluster würde quasi die Schlüsseltechnologie, die ja auch im QT Flagship vorgesehen ist, für die Forschung und Entwicklung liefern.

Dazu soll auch ein früher Umgang mit Quantentechnologie erlernt werden und Module, in denen auf die Eigenheiten der Quantenphysik eingegangen wird, sollen auch in den Ingenieurwissenschaften gelehrt werden. Vor allem im Bereich Informatik und Elektro- und Nachrichtentechnik muss ein größeres Bewusstsein für die Möglichkeiten und Anwendungen der Quantentechnologie geschaffen werden.

4.5.2. Akademisches Personal

Beim wissenschaftlichen Personal auf Dissertanten und PostDocs Stufe wurde befunden, dass die finanziellen Ressourcen vorhanden sind und genügend Stellen besetzt werden können. Die Schwierigkeit läge eher darin gute Personen zu finden. Dazu könnten neue Studienrichtungen oder spezielle Kurse angeboten werden. So gibt es z.B. in Großbritannien an mehreren Universitäten ein Masterstudium zum Thema „Quantum Engineering“. Ähnliche Initiativen werden auch von der ETH Zürich und der DTU in Kopenhagen gesetzt

Das wirkliche Problem ist allerdings, dass es keine längerfristigen Zukunftsperspektiven an den Universitäten gibt. Das bedeutet, dass gut ausgebildete und motivierte Personen nicht an den Instituten bleiben. Es muss hier mehr getan werden um diese Personengruppe aufzufangen und ihnen eine Möglichkeit geboten werden ihre Fähigkeiten, Innovationskraft und Motivation weiterhin einsetzen zu können. Da dies auf universitärer Ebene nicht möglich ist, sollte versucht werden die jungen Forscher dazu zu bringen ihre Ideen durch eine Firmengründung umzusetzen. Unterstützend dazu sollte die Errichtung eines Quanten-Gründerzentrums oder Quanten-Inkubators vorgesehen werden, an dem Ideen und Umsetzungen ausgetestet werden können, bevor sie Marktreife erlangen. Das Austria

Wirtschaftsservice fördert bereits Inkubatoren, wie den IST Cube oder TUW i²ncubator, und es wäre zu wünschen, dass auch ein spezieller Quanten-Inkubator hinzukommt. Länder wie Deutschland (IQST) und Großbritannien (Univ. Bristol) bieten dieses Service bereits an.

4.5.3. Infrastruktur

Die Infrastruktur wird von den wissenschaftlichen Gruppen unterschiedlich bewertet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass meist das Alter der Infrastruktur ausschlaggebend ist. Am IST ist man beispielsweise sehr zufrieden, im Gegensatz zur Universität Wien, wo es schwierig ist High-Tech Labors in die bestehende Gebäudesubstanz zu integrieren. Die Nähe zu Straßenbahn und U-Bahn Linien erschweren des Weiteren Experimente, die einen stabilen und vibrationsarmen Aufbau benötigen. Generell mehr Platz, vor allem für Labors, wird an der Universität Innsbruck gewünscht.

4.6. Resümee

- Nach Einschätzung unserer Gesprächspartner ist in Hinblick auf kommerzielle Verwertung die Quantenkommunikation am weitesten fortgeschritten. An zweiter Stelle steht die Quantensensorik, die bereits erste anwendungstaugliche Experimente demonstriert hat. Für die Quantensimulation und für den Quantencomputer ist noch viel Geduld gefragt.
- Zu Anwendungen mit vergleichsweise hohem technischem Reifegrad zählen Quantenkryptographie, Atomuhren und Materie-Interferometer.
- Die österreichische Quantenforschung hat einen regen Bedarf an hochentwickelter Technologie, um ihre Experimente zu einem höheren Reifegrad zu bringen und anwendungstauglicher zu machen. Es wird aktiv nach geeigneten Zulieferern aus der Industrie gesucht, um den hohen oft sehr speziellen Anforderungen genügen zu können. Insbesondere gefragt sind beispielsweise hochspezialisierte Lasersysteme sowie schnelle und präzise Elektronik.
- Patente im Bereich Quantentechnologie haben im Weltmaßstab zugenommen. Anhand der Patenstatistiken ergibt sich eindeutig die Vorherrschaft Chinas im Bereich Quantenkommunikation und der USA im Bereich Quantencomputing. Die EU befindet sich hier eindeutig in der Rolle des Nachzüglers.
- In der österreichischen Quantenforschung spielen Patente eine klar untergeordnete Rolle. Die Wissenschaftler/innen messen sich viel eher anhand ihrer Publikationen als an der Zahl der Patente. Auch wenn die jeweiligen Universitäten ihr Forschungspersonal durchaus teils munter zur Einreichung von Patenten anregen und auch entsprechende Unterstützung zur Verfügung stellen, wird von der Seite der Wissenschaftler/innen der damit verbundene Aufwand als nicht lohnend oder auch die eigene Forschung als nicht patentwürdig eingestuft. Entsprechend wurden in den vergangenen Jahren nur wenige Innovationen der österreichischen Quantenforschung zum Patent eingereicht.
- Ähnlich wie mit den Patenten verhält es sich mit Firmengründungen. Die meisten Forscher/innen begnügen sich, die Tauglichkeit ihrer Innovation in einem Proof-of-Concept zu demonstrieren. Der Zeit- und Engineering-Aufwand, der nötig wäre, um die Technologien zur Marktreife zu bringen, wird oft als nicht lohnend empfunden. Bis dato gibt es dennoch ein erfolgreiches Spin-Off der Universität Wien, zwei Neugründungen in Wien und Innsbruck und zwei weitere Ausgründungen werden in Erwägung gezogen.
- In den Gesprächen zur Studie wird häufig auf den Mangel an geeignetem Fachpersonal verwiesen. Das läge nicht zuletzt an der Abwanderung vielversprechender Jungforscher/innen ins Ausland. Hier gäbe es zu wenige ansprechende Zukunftsperspektiven, um Dissertanten und PostDocs binden zu können.
- Von vielen Seiten gewünscht wird ein "Technologie-Cluster" mit gut ausgebildeten Fachkräften in den Bereichen Informatik und Elektronik, welcher von der Quantenforschung institutsübergreifend genutzt werden kann.

5. Interesse der Österreichischen Industrie und internationales Umfeld

Parallel zu den Befragungen der Österreichischen Forschungsgemeinde wurden auch ausgewählte Akteure der Industrie zu Gesprächen eingeladen. Als Interviewpartner/innen wurden zum Teil zentrale Leitunternehmen aber auch KMUs und Spin-Off Betriebe (Quantentechnologie) befragt. Zu diesem Zwecke wurde ein zweiter Interviewleitfaden verwendet, welcher in Anhang 7.2 beigefügt ist. Die Eckpunkte der Interviews mit den Vertretern aus der Industrie sind: Vertrautheit mit den Anwendungen aus der Quantentechnologie, Kontakt mit der Österreichischen Forschung, Interesse an Quantentechnologie für eigene Produktentwicklung und die Bereitstellung von Technologie für Österreichische Forschungsgruppen.

Die Liste der an der Befragung teilnehmenden Unternehmen ist in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Auflistung der an der Befragung teilgenommenen Unternehmen

Unternehmen	Adresse
ams AG	Tobelbader Straße 30, 8141 Premstätten
Anton Paar GmbH	Anton-Paar-Straße 20, 8054 Graz
Infineon Technologies Austria	Siemensstraße 2, 9500 Villach
Novarion IT Service GmbH	Kranichberggasse 6, 1120 Wien
RIEGL Laser Measurement Systems GmbH	Riedenburgstraße 48, 3580 Horn
Roithner Lasertechnik GmbH	Wiedner Hauptstrasse 76, 1040 Vienna
Alpine Quantum Technologies GmbH	Maria-Theresien-Straße 26, 6020 Innsbruck
Crystalline Mirror Solutions GmbH	Lehargasse 1, 1060 Wien
Quantum Technology Laboratories GmbH	Skodagasse 9/38, 1080 Wien

5.1. Standpunkt österreichischer Unternehmen zum Thema QT

Generell kann gesagt werden, dass das Interesse der österreichischen Wirtschaftstreibenden an Quantentechnologien durchaus vorhanden ist. Von den befragten Firmen gaben die meisten an, die Entwicklung von Quantentechnologien in dem für sie relevanten Bereich, zumindest zu verfolgen. Dennoch sehen sich unsere Interviewpartner aus der Privatwirtschaft eher in einer beobachtenden Rolle (abgesehen natürlich von den neugegründeten Spin-offs).

Infineon verfolgt z.B. die Aktivitäten von LETI, die mit ihrem Forschungslabor in Grenoble (FRA) Einzelphotonquellen und Spin-basierende Qubits in Halbleitern untersuchen¹⁹. Infineon ist auch Mitglied der SystemX Alliance an der Stanford University und hält damit Kontakt mit den Entwicklungen in den USA. Derzeit ist Infineon nicht selbständig aktiv, sondern beobachtet wohin sich die Technologie entwickelt.

¹⁹ <https://quantum.univ-grenoble-alpes.fr/>

Andere große internationale Unternehmen mit Tochterfirmen in Österreich, die in der Forschung von Quantentechnologien involviert sind, führen diese Aktivitäten außerhalb von Österreich durch. Dies gilt z. B. für Intel und Bosch AG, die stark in den Niederlanden bzw. Deutschland präsent sind. Ähnlich verhält es sich mit ATOS, die in Frankreich stark in die Quantensimulation investieren aber in Österreich zu keiner Stellungnahme bereit waren.

Auf reine Beobachtung der Quantentechnologie beschränken sich im Moment AVL List, RIEGL und ams. Die wirtschaftstaugliche Nutzung wird noch als zu entfernt empfunden, und nur wenige sind bereit, das nötige langfristige Investment (zum Teil 10 Jahre oder länger) einzugehen.

Eine stärkere Involvierung liegt bei Infineon, Roithner Lasertechnik, Anton Paar GmbH und Novarion vor. Diese Firmen sind gut mit den Forschungsgruppen in Wien und Innsbruck vernetzt und verfolgen die Entwicklung in Österreich. Die Quantentechnologie wird dabei als sehr zukunftssträftig angesehen, und kann einen hohen Innovationsschub in den jeweiligen Anwendungen dieser Unternehmen vollbringen.

Die befragten Unternehmen gaben an, an den Ausschreibungen auf nationaler Ebene interessiert zu sein. Auf weniger Präferenz stieß dagegen die Möglichkeit auch direkt im EU-Flagship Programm einzureichen. Die Gespräche haben gezeigt, dass die Voraussetzung an einer Teilnahme klar von einer verwertbaren und, für die Firmen interessanten, Idee abhängig ist. Das Projekt muss zur Firmenstrategie passen, eine Vision besitzen und ein konkretes Ziel verfolgen.

5.1.1. Industrieinteresse an Quantentechnologien

Die Befragung ermittelte auch die Anwendungsmöglichkeiten für Quantentechnologie aus den Augen der befragten Firmen. Die Liste stellt eine Zusammenfassung der für die Firmen interessanten Anwendungsgebiete dar:

Roithner Lasertechnik vertreibt schon Produkte, wie Einzelphotondetektoren und Time-Taggers, die in diversen Forschungslabors eingesetzt werden. Die Firma versucht das Produktportfolio zu erweitern. Einerseits könnten die Spiegel der Firma CMS in den Vertrieb aufgenommen werden, andererseits wird auch Potential in der Vermarktung eines Quantenzufallszahlengenerators auf USB-Stick gesehen. Die Produkte aus der Quantenforschung sollten den Kunden überraschen und ansprechen (Aha-Effekt), und es dem Kunden ermöglichen sich selbst mit dieser Technologie näher auseinanderzusetzen (Erlebnissfaktor).

Infineon ist im Bereich der Sensorik an einigen Anwendungen interessiert, die zum Teil durch Quantentechnologien verbessert werden könnten. Darunter fallen präzise Zeitmessung für zukünftige 5G Netzwerke und Zeitreferenzen für Satellitenkommunikation. Gassensoren zur Messung von Luftgüte sowie Sensoren zur Erdbeobachtung sind ebenfalls von Interesse. Im Themenbereich Quantum Computing gibt es zwei Ansätze: Erstens die Entwicklung von Ionenfallen für die Quantencomputer Forschung in Innsbruck. Die andere Entwicklung liegt in der Quantenalgorithmik, wo versucht wird, mittels quanteninspirierten Software-Algorithmen leistungseffizientere (klassische) Prozessoren zu designen. Infineon versucht gerade einen Forscher der Columbia Universität (USA) für diese Aufgabe nach Österreich zu holen. Die Fertigungsanlagen für Siliziumkarbid-Halbleitern könnten genutzt werden um N-V Zentren in SiC zu realisieren.

Anton Paar hat Interesse an zwei Technologien. Erstens, die Detektion von Einzelphotonen für Messungen von Streulicht. Die benötigten Wellenlängen hierfür liegen im sichtbaren und schwachen Röntgen Bereich. Das zweite Anwendungsfeld stellt die Entwicklung von sehr empfindlicher Moleküldetektion dar. Ziel wäre es einzelne Moleküle an Oberflächen mittels miniaturisierter NMR-Sensorik detektieren zu können.

RIEGL benötigt eine sehr effiziente Detektion von Einzelphotonen im nahen Infrarotbereich.

Novarion vertreibt bereits QKD-Systeme der Firma IDQuantique und versucht Pilot-Kunden für den Einsatz von Quantenkryptographie in Österreich zu finden. Das größere Ziel ist allerdings der Einsatz von Hybrid Quantencomputer, die aus einem klassischen Hauptprozessor und einem Quanten Co-Prozessor bestehen. Damit sollte mit relativ niedrigem Aufwand bereits ein Quantenvorteil bei Berechnungen erzielt werden ohne die Notwendigkeit eines vollständigen Quantencomputers.

ams kann sich prinzipiell Anwendungen der Quantentechnologien im Sensorik Bereich vorstellen, insbesondere für optische Sensoren, die nahe am Einzelphotonniveau liegen. ams entwickelt bereits Einzelphotondetektoren für verschiedenste spektrale Bereiche (Röntgen bis nahes Infrarot). Es herrscht auch Interesse an neuen Magnetfeld Sensoren mit einem sehr breiten Linearitätsbereich, um die derzeitigen Hall-Sensoren zu ersetzen. Druck- und Teilchen-Sensoren für Umweltüberwachung sind ebenso gefragt. Allerdings ist für ams die Technologie noch nicht weit genug fortgeschritten um sich ernsthaft damit zu beschäftigen. Es müssen konkrete Anwendungen und Marktpotential (große Stückzahl) vorhanden sein. ams ist aber bereit im Rahmen von nationalen oder internationalen Ausschreibungen mit Forschungsgruppen zusammenzuarbeiten. Da

5.2. Vernetzung der österreichischen Forschungsgruppen

Es existieren zahlreiche Kooperationen zwischen universitären Forschungsgruppen und privatwirtschaftlichen Unternehmen. Dabei dient in den meisten Fällen die Industrie als Zulieferer für die Forschung; in einigen Fällen hingegen tritt das umgekehrte Szenario ein, dass die Industrie als Abnehmer der universitären Quantenforschung agiert.

Für die experimentelle Umsetzung von quantentechnologischen Innovationen sind meistens stark spezialisierte Instrumente erforderlich, die nur in wenigen Fällen von der Stange erhältlich sind. Produkte, die in Kooperation mit der universitären Forschung entwickelt werden (bzw. von universitärer Seite noch gesucht werden), umfassen Hochenergie-Laser (Toptica), optische Kristalle (chinesische Anbieter), elektro-optische Chips und Wellenleiter (IMEC), hochsensitive Einzelphoton-Detektoren (Single Quantum), schnelle Elektronik-Module (Keysight, Zurich Instruments), Photonenquellen (ID Quantique, Sparrow Quantum) und Sensorik (Attocube).

Ein Schwachpunkt stellt in Österreich die Laserindustrie dar. Es gibt praktisch keine österreichischen Hersteller von Lasern mehr, die sich für Quantentechnologien einsetzen ließen. Die in Wien gegründete Firma Femto-Laser wie auch High Q Laser in Vorarlberg wurden von Spectra-Physics, einer Abteilung der Newport Corp. übernommen.

Der Technologie-Rückfluss in die entgegengesetzte Richtung, also die Belieferung der Industrie durch die Quantenforschung hält sich noch in Grenzen. Während Regierungsorganisationen teilweise Interesse an Quantentechnologien zeigen (PTB Braunschweig, US Air Force) und auch mit österreichischen Gruppen kooperieren, werden die Errungenschaften der Quantenforschung von der Industrie im Allgemeinen nur am Rande wahrgenommen. Abgesehen von KMUs, die eine gewisse Bereitschaft für quantenbezogene Förderprojekte an den Tag legen (Roithner Lasertechnik, Anton Paar GmbH) beschränkt sich hier die Zusammenarbeit eher auf Startups, die ihrerseits selbst aus der Quantenforschung entstanden sind (CMS, Sparrow Quantum).

Industrielle Großkonzerne, die signifikante Investitionen in Quantentechnologien tätigen (ähnlich wie Google, Microsoft und IBM in den USA), sind in Europa grundsätzlich rar. Hierfür wird die Risikobereitschaft im Allgemeinen und das mangelnde Interesse an Quantentechnologien (die keine kurzfristigen Gewinne verspricht) verantwortlich gemacht. Als Ausnahmen genannt werden können die Firmen Bosch, die Interesse an Quantensensorik-Technologien gezeigt hat, und Infineon, die mit der Universität Innsbruck im Bereich Quantencomputer kollaboriert.

Es wurde auch erwähnt, dass vor allem im Bereich Quantensensorik, eine Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen (BEV) gewünscht wird. Im Moment gibt es für das BEV keinen Forschungsauftrag im Bereich Quantentechnologie. Auf internationaler Ebene werden in Metrologie Instituten sehr wohl Standards basierend auf Quanteneffekten und Zertifizierungsprotokolle für Anwendungen der Quantentechnologie untersucht und festgelegt. Zu den aktivsten Instituten zählen NIST in den USA, NPL in Großbritannien, PTB in Deutschland und INRIM in Italien.

Abbildung 19 zeigt die Vernetzung innerhalb Österreichs. Auf den ersten Blick scheint ein gutes Netzwerk vorhanden zu sein, bei genauerer Betrachtung ist jedoch ersichtlich, dass es für individuelle Partner meist nur 2-3 Verknüpfungen existieren. Des Weiteren sind zwar viele Kontakte gegeben, die Anzahl der Kooperationen ist jedoch gering.

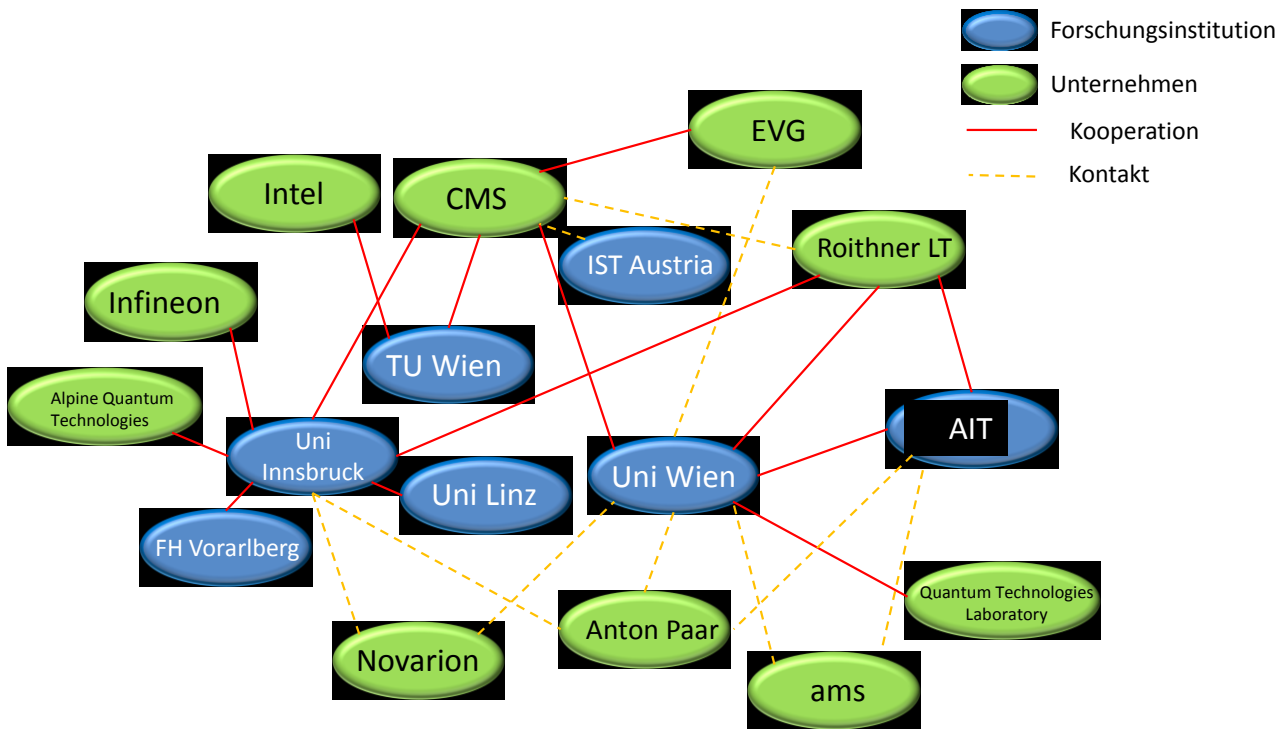


Abbildung 19: Vernetzung von Forschung und Industrie in Österreich Das IQOQI ist jeweils im Feld Uni Wien und Uni Innsbruck inkludiert. Quelle: Eigene Erhebungen

5.2.1. Vernetzungsstrategien

Wie aus den Gesprächen eindeutig hervorgegangen ist, ist der Wunsch nach besserer Vernetzung von Forschung und Industrie auf beiden Seiten vorhanden. Weder haben die Wissenschaftler/innen einen guten Überblick über die für ihre Forschung relevanten Firmen und welche davon für Kooperationen offenstehen, noch ist die Industrie gut informiert über die Wertschöpfungspotentiale der Quantentechnologien. Die Industrie muss wissen welche Vorteile die Quantentechnologien bieten. Aus den Gesprächen gingen einige Vorschläge hervor. Auch für potentielle Einreichungen zu Förderausschreibungen wäre es sinnvoll eine Liste von Firmen zu haben die gewillt sind Partner bei einem Ansuchen zu sein. Momentan werden nur immer die gleichen Firmen kontaktiert von denen man bereits weiß, dass sie Förderanträge unterstützen. So wurde etwa eine Informationsinitiative unter der gemeinsamen Leitung der Industriellenvereinigung und eines Quanten-Dachverband ins Treffen geführt. Teilaufgabe dieser Initiative soll die Einberufung halbjährlicher oder jährlicher Treffen zwischen Vertreter/innen der Industrie und Wissenschaft sein.

In eine ähnliche Kerbe schlägt der Vorschlag einer Leistungsschau der Quantenforschung für die Industrie, etwa im Rahmen eines jährlichen Zweitages-Seminars. Eine Möglichkeit wäre je einen Halbtage für eine der vier Säulen zu reservieren. Dabei wäre es möglich, im Detail die relevanten Entwicklungen und Verwertungspotentiale in den einzelnen Technologien für die heimische Industrie zu präsentieren. Allen Vorschlägen ist gemein, dass (in der einen oder anderen Form) eine standardisierte Informationsquelle geschaffen werden sollte, die die Recherche nach jeweiligen Kooperationspartnern erleichtern soll.

5.3. Österreichische Technologiebringer

Bei den Befragungen wurde auch festgehalten, welche technologischen Bausteine und Verfahren die österreichischen Unternehmen und Institute für Forschungszwecke anbieten können. Die Auflistung deckt sich zum Teil mit den verwertbaren Schlüsseltechnologien in Tabelle 5.

Crystalline Mirror Solutions

CMS bietet monokristalline Halbleiterspiegel mit exzellenten Eigenschaften im mittleren Infrarotbereich an. Die Spiegelbeschichtung lässt sich auf nahezu beliebige Materialien aufbringen und zeichnet sich unter anderem durch ausgesprochen geringe Absorption sowie durch hohe thermische Stabilität aus.

Infineon

Der deutsche Halbleiterhersteller mit Niederlassung in Österreich ist bereits jetzt wichtiger Kooperationspartner der österreichischen Forschung; vor allem ist die Zusammenarbeit mit der Universität Innsbruck bei der Entwicklung von Ionenfallen hervorzuheben. Infineon kann für die österreichische Forschung besonders in Hinsicht auf die Entwicklung von Testchips relevant sein.

Intel

Der US-amerikanische Halbleiterhersteller Intel unterhält Standorte in Villach und Linz. Das Unternehmen bietet sich vor allem mit ihrer Hochfrequenz-Elektronik und Simulationssoftware für optische Schaltkreise für die österreichische Quantenforschung an.

Anton Paar

Das Grazer Unternehmen verfolgt bereits einige Kooperationen mit der universitären Forschung. Unter anderem bietet Anton Paar Technologien für den 3D-Druck, Präzisionsmechanik, Spektroskopie sowie Elektronik-Lösungen an.

Roithner Lasertechnik

Die Wiener Vertriebsfirma bietet vor allem Laser, aber auch optische Bauteile (Linsen, Spiegel) und Photodioden an. Für Institute mit produktnaher Forschung bietet sich Roithner Lasertechnik als Vertriebspartner an.

AIT Austrian Institute of Technology

Das AIT bietet Systemdesign, Hochfrequenzelektronik, Steuersoftware sowie Technologien zur Signalverarbeitung an. Vom AIT entwickelte quantenoptische Schlüsseltechnologie (Einzelphotonendetektoren, Zeiterfassungsmodule) werden von Roithner Lasertechnik und Laser Components vertrieben.

5.4. Internationales Firmenumfeld

Um den Leser einen Überblick in den derzeitigen Stand der Verwertung von Quantentechnologien auf globaler Ebene zu geben, wurde hier eine Auflistung von Unternehmen erstellt, die aktiv an der Erforschung, Herstellung oder dem Einsatz von QT Systemen involviert sind. Die Liste ist eine Momentaufnahme und stellt auch keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Die Entwicklung hat in den letzten 12 Monaten sehr rasant zugenommen und neue Unternehmen kommen monatlich hinzu. Eine ausführlichere Liste, die sich mehr auf den Quantencomputing Markt konzentriert, kann auf <https://quantumcomputingreport.com> gefunden werden.

Die größte Anzahl an Firmen gibt es im Bereich Quantenkommunikation, ein Ergebnis das nicht sehr überrascht, da die Quantenkommunikation ja die fortgeschrittenste Technologie darstellt. Die meisten Firmen kommen aus dem KMU Sektor. Großindustrie ist nur durch einige Telekommunikationsunternehmen, wie Telefonica und BT, vertreten, die aber selbst keine Systeme herstellen. Eine Ausnahme macht Toshiba, das in seinem Forschungslabor in Cambridge, QKD Systeme entwickelt, diese aber nicht auf dem Markt anbietet.

Auf dem Quantencomputing und Quantensimulations Sektor ergibt sich ein anderes Bild. Hier sind es eindeutig die großen High-Tech Firmen aus den USA, die richtungsweisend agieren und viele Millionen investieren. Dennoch sind auch einige Startups an der Forschung und Realisierung eines Quanten Computers involviert. Zu erwähnen sei hier natürlich die Firma D-Wave, die 2011 erstmals einen Quantencomputer als Produkt präsentierte, wobei festzuhalten ist, dass der entwickelte Computer kein universeller Quanten Computer ist.

Obwohl Quantensensing ein sehr großes Marktpotential hat, gibt es in diesem Bereich nur einige wenige Unternehmen, die bereits Produkte anbieten können. Hier ist die Zeit wahrscheinlich noch nicht ganz reif und einige Jahre an weiterer Entwicklungsarbeit sind von Nöten.

Die Firmenliste für den Bereich Enabling Technologies ließe sich sicherlich endlos fortsetzen, hier wurden aber nur jene Unternehmen aufgelistet, deren Produkte und Technologien von den österreichischen Forschungsgruppen eingesetzt werden und explizit genannt wurden.

5.4.1. Quantenkommunikation

Als eine von wenigen Quantentechnologien haben QKD und Quantenzufallszahlengeneratoren mittlerweile Marktreife erreicht. Funktionierende Komplettsysteme werden bereits kommerziell vertrieben.

5.4.1.1. Großindustrie

Toshiba (JPN, GBR)

Der aus Japan stammende internationale Technologiekonzern ist seit einigen Jahren an der Entwicklung marktreifer Quantenkryptographie-Systeme aktiv und gilt als wegweisendes Beispiel für einen großen Konzern, der in die Forschung und Entwicklung im Bereich Quantenkommunikation investiert (analog etwa zu IBM und Google im Bereich Quantencomputing). Die Forschung findet im Toshiba Cambridge Research Laboratory (TERL) in England statt.

<https://www.toshiba.eu/eu/Cambridge-Research-Laboratory/Quantum-Information/>

British Telecom (GBR): Kooperation mit Toshiba zur Demonstration eines QKD-Netzwerks

<http://home.bt.com/tech-gadgets/future-tech/bt-and-toshiba-launch-uks-first-quantum-communication-showcase-11364104924789>

SK Telecom (KOR): SK Telecom übernahm Anfang 2018 die Mehrheit bei ID Quantique für \$65 Millionen²⁰ und nimmt daher Quantenzufallszahlengeneratoren, Einzelphotonendetektoren und QKD-Systeme in ihr Produktspektrum auf.

<https://www.idquantique.com/id-quantique-sk-telecom-join-forces/>

<http://www.sktelecom.com/>

Huawei (CHN, DEU): Quantenschlüsselverteilung mit kontinuierlichen Variablen

<https://www.hipeac.net/network/institutions/7829/huawei-german-research-center/>

²⁰ <https://www.idquantique.com/id-quantique-sk-telecom-join-forces/>

Telefonica (ESP): Quantenschlüsselverteilung
<https://iot.telefonica.com/blog/quantum-computing-in-the-future-of-the-iot>

5.4.1.2. Klein- und Mittelunternehmen

ID Quantique (CHE)

Gegründet 2001 als Spinoff der Universität Genf hat sich ID Quantique als bedeutender weltweiter Zulieferer entwickelt und kann als Musterbeispiel für die marktaugliche Verwertung von Quantentechnologien gesehen werden. Die Produktpalette umfasst Komplettsysteme zum Quantenschlüsselaustausch sowie auch deren wichtigste Bauteile, die auch weit über den Bereich der Quantenkommunikation hinaus von Bedeutung sind: Quantenzufallszahlengeneratoren und Einzelphotonendetektoren. ID Quantique kollaboriert eng mit der Universität Genf und beliefert mit ihren Detektoren zahlreiche Forschungseinrichtungen weltweit.

<https://www.idquantique.com/>

QuintessenceLabs (AUS, USA)

QuintessenceLabs ist ein 2008 gegründetes Spinoff der Australian National University in Canberra. Ähnlich wie ID Quantique bietet die Firma Lösungen im Bereich Quantenschlüsselverteilung und Quantenzufallszahlengeneratoren an. Im Gegensatz zu ihrem Schweizer Konkurrenten baut die Technologie von QuintessenceLabs nicht auf der Zählung von einzelnen Photonen, sondern auf der kohärenten Detektion von Gaußschen Zuständen auf. Die Zufallszahlengeneratoren basieren auf Messungen an den Quantenvakuumfluktuationen, die Quantenkryptographie-Systeme auf dem Versenden von Laserpulsen. Entscheidender Vorteil am Einsatz von kontinuierlichen Variablen (Quadraturen von Gauß'schen Zuständen statt Einzelphotonen) ist die wesentlich günstigere und effizientere Detektion, für die man sich aus dem Repertoire des hochentwickelten Telekom-Sektors bedienen kann.

<https://www.quintessencelabs.com/>

QuantumCTek Co. (CHN): Quantenschlüsselverteilung (Komponenten und Komplettsysteme)
<http://www.quantum-info.com/English/>

Infiniquant (DEU): Spin-Off des Max-Planck Instituts. Quantenzufallszahlengeneratoren, terrestrische und Satelliten-gestützte QKD-Technologie

<http://infiniquant.com/>

Quside (ESP): Quantenzufallszahlengeneratoren

<https://www.quside.com/>

Qutools (DEU): Didaktische Quantenkommunikationssysteme auf photonischer Basis. Kunde von Roithner Lasertechnik.

<http://www.qutools.com/>

KETS Quantum Security (GBR): Quantenschlüsselverteilung und Quantenzufallszahlengeneratoren am Chip

<http://kets-quantum.com/>

Laser Components (DEU): Laserdioden und Einzelphotonendetektoren (vertriebt u.a. InGaAs-Detektoren von AIT)

<https://www.lasercomponents.com/de/>

Sparrow Quantum (DNK): Hersteller von Einzelphotonquellen auf Quantendot-Basis

<http://sparrowquantum.com/>

Single Quantum (NLD): Hersteller von Superconducting-Nanowire-Detektoren

<http://www.singlequantum.com/>

Micro Photon Devices (ITA): Einzelphotonendetektoren

<http://www.micro-photon-devices.com/home>

AUREA Technology (FRA): Einzelphotonendetektoren und Photonenpaarquellen
<http://aureatechnology.com/en/>

OptoElectronic Components (CAN): Einzelphotonendetektoren und Zeiterfassungsmodule
<http://www.optoelectronics.com/home/>

Quantum Opus (USA): Superconducting-Nanowire-Detektoren
<https://www.quantumopus.com/web/>

NTT Advanced Technology Corporation (JPN): Photonik-Zubehör: Glasfaser-Technologien, optische Kristalle, Switches, etc.
<http://www.ntt-at.com/>

5.4.2. Quantencomputing

5.4.2.1. Großindustrie

IBM (USA)

IBM Q Systems

Zwei quantum computing Plattformen und prototypenhafte Prozessoren für ein kommerzielles IBM Q System wurden entwickelt. Es handelt sich um 16 bzw 17 Qubit-Prozessoren, die den früheren 5 Qubit Prozessor ersetzen sollen. Diese Plattformen können Probleme lösen, die für klassische Computer nicht lösbar sind. Es handelt sich um Probleme aus der Pharmaindustrie, der artificial intelligence, des Finanz-Service und der Logistik. Charles Bennett, ein Pionier auf dem Gebiet des QC, hat dazu ein Handbuch geschrieben. Prozessoren mit 50 und mehr Qubits sind in den nächsten Jahren geplant. Bisher ist diese spezielle Hardware nur für Forschung und government zur Verfügung gestanden; künftig soll sie aber einen breiteren Anwendungsbereich erhalten. Die 16 Qubits werden für wesentlich komplexere Probleme eingesetzt werden. Dafür steht ein neuer und erweiterter „experiment composer“ zur Verfügung.

<https://www.engadget.com/2017/05/17/ibm-quantum-q-experience-qubits-most-powerful-processor-yet/>

IBM Quantum Experience

Einen 5-Qubit QC bietet bereits IBM für den Eigengebrauch an. Es handelt sich um die cloud-basierte Plattform „Quantum Experience“. Man kann damit experimentieren und Algorithmen dafür erstellen sowie Simulationen durchführen. Es handelt sich noch nicht um einen universellen QC, aber ein Schritt in diese Richtung wurde damit bereits vollzogen. Forscher und Wissenschaftler können sich mit dem QC vertraut machen.

<https://www.engadget.com/2016/05/04/ibm-opens-quantum-computer-to-public/>

MICROSOFT (USA):

Mit dem ersten PC mit Namen Altair 8800 im Jahr 1976 hat MICROSOFT auch die Programmiersprache Altair BASIC entwickelt. Mit der Entwicklung des QC will man analog dazu die traditionellen Programmiersprachen wie C# und Python für QC fit machen.

Seit IBM seinen „Beginners Guide“ propagiert hat, will auch Bill Gates neue Microsoft-Initiativen im QC setzen. QC arbeiten mit Superpositions-Zuständen und Verschränkung. Mit diesen neuen „Qualitäten“ eines Computers können Probleme angegangen werden, die mit herkömmlichen Computern nicht oder kaum zu bewältigen sind. Das IBM Q – System, ein 16/17 Qubit-Rechner, wurde ja bereits entwickelt und kann als Vorbild dienen.

Die Microsoft-programming language hat zwar noch keinen eigenen Namen, dafür aber will Microsoft eine eigene QC-Software für AI (artificial intelligence) entwickeln. Der Microsoft Star-Theoretiker Michael Freedman will mit seinem Team

eine eigene Hard- und Software für einen topologischen QC erarbeiten. Dabei sollen mehr als 30 logische Qubits zur Verfügung gestellt werden. Topologische QC müssen aber auf fast null Grad Kelvin herab gekühlt werden, sodass ein kommerzieller QC noch längere Zeit für seine Entwicklung benötigen wird.

<https://www.engadget.com/2017/09/26/microsoft-new-coding-language-is-made-for-quantum-computers/>

Google (USA)

Google scheint angesichts der IBM- Initiative „quantum computing platform“ und der Microsoft- Bemühungen auf dem Gebiet der Software-Entwicklungen für QC auch Interesse zu zeigen, QC genauer ins Visier zu nehmen und sich zu bemühen, ihre cloud-Computer für die Quanten-Ära aufzurüsten.

<https://www.engadget.com/2017/07/17/google-puts-quantum-computers-to-work-in-cloud/>

Intel (USA)

Intel, der Welt größter Chip-Hersteller, investiert in die QC-Technologie. IBM, Google, Microsoft konzentrieren sich auf bestimmte Komponenten des QCs, Intel auf die Si-Technologie für QC. Intel arbeitet mit der TU Delft (NED) zusammen. Standard Wafers für QC-Chips sind angedacht. Dafür gibt es viel Fördergeld.

<http://trendintech.com/2017/01/10/intel-gets-closer-to-offering-quantum-computing-through-everyday-silicon/>

<http://www.datacenterdynamics.com/content-tracks/servers-storage/intel-to-spend-50-million-on-quantum-computing-research/94726.fullarticle>

Alibaba (CHN)

Die chinesische Handelsplattform will Quantencomputer entwickeln, um eine größere Sicherheit für den e-Kommerz zu erhalten. Im Juli 2015 entstand aus der Zusammenarbeit von Alibaba's Aliyun cloud - Einheit und der Chinesischen Akademie der Wissenschaften ein Forschungsfeld in Shanghai, das sich Alibaba Quantum Computing Laboratory nennt. Das Laboratorium bemüht sich um eine größere Sicherheit für den e-Kommerz und für Daten-Centers. Besonders in diesem Jahr wurde der erste Quanten-Satellit konzipiert und entwickelt, der Quanten-Kommunikation über große Distanzen ermöglichen soll.

<http://www.alibabagroup.com/en/news/article?news=p150730>

5.4.2.2. Klein- und Mittelunternehmen

D-Wave (CAN)

Die kanadische Firma D-Wave Systems mit Sitz in Burnaby, British Columbia, CA, ist ein Hardwarehersteller und wurde durch die Entwicklung des nach ihren Angaben 2011 ersten kommerziellen Quantencomputers bekannt. Käufer sind nach eigenen Angaben Lockheed, die NASA und Google. Die Computer sollen auf 512 Qubits rechnen können und arbeiten auf der Basis supraleitender Schleifen auf einem Chip.

Die Realisierung der eigentlichen Quantenverschränkung mit diesem sog. „Adiabatischen Quantencomputer“ wird aber bezweifelt, sodass es prinzipiell nicht möglich scheint, den Shor-Algorithmus auszuführen. Ausgewählte Optimierungsaufgaben sollen aber rascher lösbar sein als auf herkömmlichen Computern.

Es werden Quantenprozessoren verwendet, die auf Niob-Basis aufgebaut sind und bis auf 0.015 Kelvin herab gekühlt werden müssen, um die Dekohärenz so gering wie möglich zu halten. D-Wave 2000Q, wie das Modul genannt wird, läuft auf einer Web-Applikation für C/C++, Python und MATLAB.

Weitere Entwicklungen in Richtung Erhöhung der Anzahl der Qubits sind geplant bzw. sind bereits im Gange.

<https://www.dwavesys.com/home>

QuTech (NLD)

QuTech, eigentlich ein Forschungsinstitut der TU Delft, ist es hier erwähnt, da INTEL und Microsoft an diesem Standort ihre Quantencomputing Agenden in Europa verfolgen. Zusätzlich wird auch an der Realisierung eines „Quanten Internets“ gearbeitet, das eine globale Verknüpfung von Quanten-Prozessoren in einem optischen Netzwerk ermöglichen soll.

<https://qutech.nl/roadmaps/>

ionQ, Inc. (USA)

Es existiert eine Zusammenarbeit mit der Univ. of Maryland. Berühmte Leute wie C. Monroe und J. Preskill gehören zum Team. Quanten-Prozessoren werden entwickelt, Ionenfallen und optische Netzwerke verwendet, optimierte Algorithmen für einen skalierbaren QC erstellt.

<https://ionq.co/>

Rigetti (USA): Superconducting Qubits

<https://rigetti.com/>

Xanadu (CAN): Quantencomputing mit gequetschtem Licht

<https://www.xanadu.ai/>

5.4.3. Quantensimulation

5.4.3.1. Großindustrie

IBM (USA)

49-Qubit-Simulator für Quantenschaltkreise. Die cloud-basierte Plattform „Quantum Experience“ ist so etwas wie ein universeller QS.

<https://www.ibm.com/blogs/research/2017/10/quantum-computing-barrier/>

<https://quantumexperience.ng.bluemix.net/qx/experience>

Microsoft (USA)

LIQ|> ist eine von Microsoft entwickelte Software Architektur, die eine Programmiersprache, Algorithmen und einen QS enthält.

<https://cloudblogs.microsoft.com/quantum/tag/quantum-simulation/>

Atos (FRA, BEL): Quanten-Machine-Learning, Klassische Simulation von Quantencomputern

https://atos.net/en/2017/press-release/general-press-releases_2017_07_04/atos-launches-highest-performing-quantum-simulator-world

NTT Laboratories (JPN): Quantensimulation mit superconducting Qubits

http://www.brl.ntt.co.jp/E/group_015/group_015.html

5.4.3.2. Klein- und Mittelunternehmen

Riken Research (JPN): Privates Forschungsinstitut, das superconducting Qubits für Quantensimulation einsetzt

http://www.riken.jp/en/research/labs/cems/superconduct_qtm_sim/

5.4.4. Quantensensorik

5.4.4.1. Großindustrie

Bosch (DEU)

Bosch ist seit einigen Jahren in der Quanten-basierten Magnetfeldsensorik aktiv. Die Bosch AG ist auch Partner in einem der drei deutschen QUTEGA Pilotprojekten²¹.

5.4.4.2. Klein- und Mittelunternehmen

Muquans (FRA)

Muquans ist ein 2012 gegründetes Spin-Off des Pariser Institute d'Optique und des Observatoriums Paris. Die Firma entwickelt und vertreibt sowohl Atomuhren als auch hochpräzise Quantengravimeter.

<https://www.muquans.com/>

M Squared (GBR)

Das schottische Unternehmen kommerzialisiert Quantengravimeter, entwickelt Atomuhren und ist (in Kooperation mit dem Imperial College London) an der Entwicklung von Quanten-basierten Beschleunigungssensoren beteiligt.

www.m2lasers.com

5.4.5. Enabling Technology

Atto Cube (DEU): Nanomechanik, Vibrationsmessung

<http://www.attocube.com/>

IMEC (BEL): Forschungszentrum für Nano- und Mikroelektronik

<https://www.imec-int.com/en/home>

ST Microelectronics (NLD): Halbleiterhersteller

http://www.st.com/content/st_com/en.html

Universal Quantum Devices (CAN): Zeiterfassungselektronik

<http://uqdevices.com/>

Zurich Instruments (CHE): Signalgeneratoren, elektrische Verstärker

<https://www.zhinst.com/>

Toptica (DEU): Lasersysteme

<https://www.toptica.com/>

Keysight (USA): Signalgeneratoren, Spektrumanalysatoren, Oszilloskope, Powermeter, Multimeter

<https://www.keysight.com/us/en/home.html>

²¹ https://www.photonikforschung.de/media/quantentechnologien/pdf/BrainQSens_Quanten-Pilotprojekte_Projektsteckbrief_bf_C1.pdf

BlueFors (FIN): Kryogene Kühlung
<http://www.bluefors.com/>

Swabian Electronics (DEU): Hersteller von hochauflösenden Time Taggern und Puls Generatoren
<https://swabian-electronics.com/>

5.5. Resümee

- Die Innovationen aus der Quantenforschung werden von der österreichischen Industrie zum Teil mitverfolgt, nur wenige Firmen zeigen sich allerdings bereit, das nötige langfristige Investment zu tätigen. Dazu sind viele Quantentechnologien noch zu weit von brauchbaren Anwendungen entfernt.
- Es finden bereits viele Kooperationen zwischen der österreichischen Forschung und Industrieunternehmen statt. Diese bestehen in den meisten Fällen in der Zulieferung von Technologien an die Forschung und weniger in der industriellen Verwertung der universitären Quantenforschung.
- Geeignete österreichische Technologiebringer sind rar (oder deren Angebot zu wenig bekannt). In den meisten Fällen findet die Kooperation österreichischer Forschungsgruppen mit ausländischen Firmen statt.
- Sowohl vonseiten der österreichischen Industrie als auch von der Quantenforschung besteht der Wunsch nach besserer gegenseitiger Vernetzung. Es wird eine standardisierte Informationsquelle benötigt (etwa in Form eines Branchenbuchs), mittels derer einerseits die österreichische Industrie über die Potentiale der Quantentechnologien aufgeklärt werden und andererseits die Industrie ihr Technologieangebot der Forschung präsentieren kann.
- Einbindung des Bundesamts für Eich- und Vermessungswesens (BEV) ist erwünscht.
- Auf internationalem Maßstab engagieren sich mittlerweile zahlreiche Unternehmen im Bereich Quantentechnologien. Das betrifft einerseits zahlreiche Startups, die aus der universitären Forschung hervorgegangen sind und andererseits großindustrielle Unternehmen (z.B. IBM, Microsoft, Google, Toshiba, Huawei) die hinreichend viel Investitionsbudget zur Verfügung haben, um "nebenbei" an der Entwicklung von Quantentechnologien arbeiten zu können.

6. Empfehlungen

Zusammenfassend ist zu sagen, dass, obwohl die Ausgangslage für die Entwicklung von Quantentechnologie aufbauend auf der hervorragenden Grundlagenforschung eine gute ist, es dennoch viel Anstrengung und Geduld verlangen wird, bevor eine Verwertung dieser Technologie in allen Bereichen einsetzten wird. Die wichtigsten Aussagen aus den Befragungen mit den Forschern/innen und Unternehmen sind hier zusammengefasst, daraus abgeleitet wurde eine abschließende Liste von Empfehlungen und Maßnahmen.

Im Moment halten sich Firmen noch zurück da sie das Potential der Quantentechnologie noch nicht einschätzen können und noch kein Markt vorhanden ist. Da der Zeithorizont für manche Technologien sehr lange ist (10 Jahre oder mehr), kann die Produktentwicklung nicht vollständig von der Industrie getragen werden. Hier muss mit Förderinstrumenten gezielt unterstützt werden.

Weiters wurde ein fehlender Kontakt zwischen den Forschungsgruppen und österreichischen Firmen attestiert. Eine bessere Vernetzung von Firmen und Forschungsgruppen ist notwendig um eine Quantentechnologie aufzubauen. Forscher müssen zum Teil wissen was von der Industrie gebraucht wird, auf der anderen Seite ist es auch für Firmen wichtig zu sehen welche Forschungsergebnisse in Österreich für eine Verwertung in Frage kommen würden.

Um ein Quanten Ökosystem in Österreich zu errichten muss die Lücke zwischen Grundlagenforschung und Anwendung geschlossen werden, dazu benötigt es die (technische) Unterstützung der Industrie. Dabei werden hauptsächlich Techniken benötigt die eine Skalierung der Quantensysteme zulässt, wie Realisierung des Aufbaues auf Chipbasis, als auch Unterstützung in der Elektronikentwicklung und Signal-und Datenverarbeitung. Ein weiterer Weg der Markteinführung basiert auf vermehrter Gründung neuer Unternehmen. Dazu braucht es mehr Unterstützung bei Firmengründungen und ein besseres Verständnis der Wichtigkeit der Sicherung geistigen Eigentums. Patente sind eine wichtige Voraussetzung um an die, in der Anfangsphase notwendigen, Investitionen zu kommen.

Sehr oft wurde, etwas resignierend, gemeint dass Österreich einfach nicht groß genug wäre im Vergleich zu Ländern wie Deutschland, Großbritannien oder die Niederlande, die große Fördersummen für die Entwicklung von Quantentechnologien zur Verfügung stellen. Diese Art von Pessimismus ist jedoch fehl am Platz. Österreich hat in der Vergangenheit sehr wohl bewiesen, dass Spitzenforschung auch im Inland möglich ist unabhängig von der Größe des Landes. Es müssen jedoch die geeigneten Rahmenbedingungen geschaffen werden, sodass die Quantentechnologie ein ähnlicher Erfolg wird wie die Grundlagenforschung in der Quantenphysik.

Um eine erfolgreiche Weiterentwicklung und Markteinführung der Quantentechnologie zu ermöglichen und die damit einhergehende Stärkung der österreichischen Wirtschaft zu erzielen, sollten daher die folgenden Punkte adressiert werden:

- Verminderung oder Umkehr des Brain-Drain
- Steigerung von Unternehmensgründungen
- Entwicklung von Quantentechnologie-Produkten durch KMUs
- Involvierung der österreichischen Industrie
- Investitionen nach Österreich durch große, multinationale Firmen, die bereits an der Entwicklung von Quantentechnologien arbeiten
- Verstärkung des Bewusstseins für QT in der breiten Öffentlichkeit und bei potentiellen Endkunden

6.1. Förderung einer Quantentechnologie-Plattform

Eine der wichtigsten Empfehlungen ist die Errichtung einer zentralen Plattform zum Austausch zwischen Forschung und Industrie. Die Plattform soll dabei die organisatorische Leitung innehaben und die folgenden Aufgaben umsetzen:

- Organisation von halbjährigen Treffen zwischen Vertretern der Forschung und Industrie um Informationsaustausch (Forschungsergebnisse und industrieller Bedarf) zu betreiben, neue Projektpartner zu finden und gemeinsame Aktionen bzw. eine Roadmap zu planen.
- Zusätzliche Informationskampagne in Form eines Newsletters, die auch Firmen und Institutionen außerhalb der QT-Plattform erreicht.
- Organisation von Schwerpunktseminaren (Workshop oder Leistungsschau) zu thematischen Anwendungen mit Fokussierung auf einzelne Technologiesäulen. Dabei sollte neben der Wissenschaft auch die Kunden- sowie Herstellerindustrie eingebunden sein um konkrete Verwertungsstrategien zu erarbeiten.
- Die Plattform sollte als zentraler Ansprechpartner für Forschung, Industrie und staatliche Institutionen dienen. Auflage eines Quanten-Branchenbuches, das Information über die einzelnen Forschungsschwerpunkte, den Bedarf der Industrie und Technologiepartner in Österreich enthält.
- Organisation von Öffentlichkeitsarbeit. Für das breite Publikum bieten sich diverse Ausstellungen oder Demonstrationsabende (z.B. Lange Nacht der Forschung) zum Thema Quantentechnologien an, bei denen der Fokus auf konkreten Anwendungen liegen soll, um Quantentechnologien als reife Technologie (und keine abstrakte Forschung) präsentieren zu können.
- Die Plattform sollte auch als Schnittstelle zu den österreichischen Fördergebern fungieren, um Empfehlungen über zukünftige Ausschreibungen und Schwerpunktförderungen geben zu können.

6.2. Förderung von Unternehmertum

Ein Großteil der Unternehmen, die im QT Markt angesiedelt sind, entstanden aus Hochschulauslagerungen, da dort das nötige Wissen vorlag. Da sich diese Situation in den nächsten Jahren nicht viel ändern wird, ist es wichtig, Gründungen von Spin-Offs und Start-Ups zu unterstützen.

Daher erscheint die Errichtung eines Inkubators, der speziell auf Quantentechnologien ausgelegt ist, als notwendiger Schritt. Dabei können junge Forscher/innen und ihr Know-How, die nach Projektende die universitären Gruppen im Normalfall verlassen, länger gehalten werden, indem sie ihre eigenen Ideen im Inkubator umsetzen und weiterentwickeln können. Der wissenschaftliche Betrieb der Forschungsgruppen an den Universitäten wird dadurch nicht gestört. Abseits des Inkubators sollten die folgenden begleitenden Schritte für eine QT-Gründerinitiative gesetzt werden:

- Förderung von Neugründungen durch spezielle Finanzhilfen, bessere Information an wissenschaftliche Mitarbeiter/innen (Dissertanten, PostDocs) über Ablauf von Firmengründungen und über bestehende Finanzierungsmodelle.
- Bereitstellung von akademischer Infrastruktur für Spin-Off Unternehmen, speziell auch nach einer erfolgreichen Produkteinführung.
- Bewusstsein für die Wichtigkeit von IP schaffen.
 - Spezielle Schulung für Dissertanten und PostDocs
 - Anreize schaffen damit geistiges Eigentum patentiert wird
- Aufstellung eines Innovation Manager, der an Instituten auf die patentwürdigen Innovationen hinweist und meldet.

- Vermehrte Information über Förderung und Lukrierung von Investment in Österreich. AWS bietet eine Reihe von Fördervehikeln, dies muss aber besser an die Forschungsgruppen kommuniziert werden.
- Zugang von ausländischen Investoren für Spin-Offs und Start-Ups. Da in Österreich die Auswahl von Business Angels und Venture Capital nicht allzu groß ist, muss externes Investment angeworben werden.
- Organisation eines „QT-Investment-Tags“, an dem die Spin-Off Unternehmen einen *Elevator Pitch* vor möglichst vielen Investoren vortragen. Um eine kritische Masse an Präsentationen zu bekommen, könnte eine gemeinsame Organisation mit Deutschland oder der Schweiz von Vorteil sein.

6.3. Stärkung der F&E Aktivitäten

Die Forschungslandschaft in Österreich ist sehr heterogen mit einer Vielzahl an Gruppen an den zwei Hauptstandorten in Wien und Innsbruck. Es gibt aber kein großes Zentrum für die angewandte Forschung wie z.B. in den Niederlanden (QuTech) und die Quantum Technology Hubs in Großbritannien die sich auf einzelne Technologiebereiche (Sensorik, Kommunikation, Imaging) spezialisieren. Der Aufbau eines Zentrums für Quantentechnologie in Österreich würde einen zentralen Koordinator schaffen, der ebenfalls konzentrierte Aktionen setzt. Das Erwin Schrödinger Center for Quantum Science & Technology (ESQ) wurde mit diesem Hintergedanken gegründet, es zeigt allerdings nicht die gewünschte Wirkung. Das ESQ Programm ist noch zu sehr Grundlagen basierend, es werden neuartige Ansätze und Ideen gefördert, die aber noch sehr weit von einer möglichen Verwertung entfernt sind. Ein Quantentechnologiezentrum könnte auf dem ESQ aufbauen oder unter der Schirmherrschaft des ESQ stehen und eine industrienähere Forschung mit klaren Zielen betreiben. Zusätzlich sollte die Forschung in Österreich aktiv mit einer Ausbildungs- und Nachwuchsförderung unterstützt werden.

- Errichtung eines Zentrums für Quantentechnologie. Der Fokus soll auf Technologieentwicklung liegen, ähnlich wie bei den Quantum-Hubs in Großbritannien, oder dem QuTech in den Niederlanden.
- Ausbau von gemeinsamer Infrastruktur und Erweiterung der personellen Ressourcen, vor allem im Bereich der Querschnittstechnologien, wie Elektronik, Maschinenbau und Softwareentwicklung, die von allen Quantenforschern benötigt werden.
- Erweiterung von Studienprogrammen in Ingenieurwissenschaften mit den Grundlagen der Quantentechnologie.
- Einrichtung von Quantentechnologie-Studiengängen, wie einem, in britischen Universitäten bereits angebotenen, Masterprogramm, das technische, physikalische und informationstheoretische Aspekte vereint.
- An weiterbildenden Schulen sollen QT Themen, didaktisch aufbereitet und unterstützt durch experimentelle Aufbauten (z.B. Quanten-Explorer Baukasten), in den Unterricht eingebaut werden. Gleiches gilt für Einstiegsvorlesungen in allen naturwissenschaftlich-technischen Fächern auf Universitäten und Fachhochschulen.
- Suche nach strategischen Partnern, die das hohe Ausbildungsniveau in Österreich schätzen und in die QT Forschung investieren wollen.

6.4. Förderinstrumente

Das Ziel des Quantentechnologie Flagships ist der Aufbau einer Europäischen Wertschöpfungskette in dieser umwälzenden Technologie. Es ist daher notwendig bei Ausschreibungen ein Augenmerk auf Industriebeteiligung zu werfen. Firmen sollten auf jeden Fall in Projektanträgen involviert sein. Dabei soll aber beachtet werden, dass Firmen sich nicht nur pro-forma an den Ausschreibungen beteiligen. Die Firmen müssen aktiv im Projekt involviert sein, sei es

als Zulieferer spezieller Komponenten oder als Verwerter der Forschungsergebnisse. Da es noch keinen wirklichen Markt gibt, sollten auch End-Anwender (Pilotkunden) als förderbar eingestuft werden. Bei Ausschreibungen sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Eine strategische Roadmap sollte mit der QT-Community (ev. durch die QT-Plattform) ausgearbeitet werden, um die Identifikation und Entwicklung der verschiedenen Technologiesparten abstimmen zu können.
- Die Förderung sollte gezielt, unter Aufstellung von Schwerpunktthemen, erfolgen. Als Schwerpunktthemen eignen sich die vier Technologiesäulen oder Teilbereiche davon wie z.B. Quantensensorik für Life Science. Dadurch lässt sich auch Verbundforschung mit anderen Technologiebereichen unterstützen.
- Ein Augenmerk sollte auch auf die Wertschöpfungskette gelegt werden, und wie sich diese vermehrt in Österreich realisieren lässt. Die Verwertungsschiene für die entwickelte Technologie muss ersichtlich sein.
- Für Entwicklungen mit kurzer „Time-to-Market“ Erwartung (möglich in den Bereichen Quanten Kommunikation und Schlüsseltechnologien), sollten spezielle Programme mit kurzfristigen Zielen bei hohem TRL geschaffen werden.
- Der Aufwand für Anträge sollte geringgehalten werden. Dies ließe sich mit einem 2-stufigen Verfahren bewerkstelligen. Viele Firmen haben nicht die Ressourcen für einen Vollertrag, der nur geringe Förderchancen garantiert.
- Ausschreibungen und Förderung durch die öffentliche Hand. Als Early Adopters von Quanten Technologien müssen, auf Grund der Marktlage, öffentliche Institutionen in Betracht gezogen werden. Als mögliche Pilotkunden für QT kämen das BEV, das Institut für Weltraumforschung der ÖAW, oder andere öffentliche Stellen wie Ministerien, Ämter oder Anbieter im Gesundheits- und Energiebereich in Frage.

6.5. Resümee

- Förderung einer Quantentechnologie Plattform, die die Vernetzung zwischen Forschung und Industrie in Österreich stärkt. Dies sollte im Rahmen von periodischen Treffen und Schwerpunktseminaren erfolgen. Des Weiteren soll die Plattform ein zentraler Ansprechpartner für Forschung, Industrie und öffentlicher Hand sein und Öffentlichkeitsarbeit im Bereich Quantentechnologien organisieren.
- Unterstützung einer Gründerinitiative für Quantentechnologie Unternehmen. Der Aufbau von neuen Unternehmen wird als wichtiger Schritt für die Markteinführung von Quantentechnologie Produkten gesehen. Ein Quanteninkubator soll dabei den jungen Unternehmern/innen den nötigen Freiraum zur Entwicklung sowie Zugang zu nötiger Infrastruktur geben. Als begleitende Maßnahmen kämen eine Informations-Kampagne über Unternehmensgründung und Finanzierung, die Aufstellung eines Innovation Managers für die Suche nach patentwürdigen Entwicklungen, sowie Schritte zur Einwerbung von externem Investment in Frage.
- Verbesserung der F&E Aktivitäten mit der Errichtung eines Zentrums für Quantentechnologie und Ausbau der Infrastruktur im Bereich der Schlüsseltechnologien (Elektronik, Maschinenbau, Softwareentwicklung). Verbesserte Ausbildung von Forschern, durch zielgerichtete Studienprogramme wie ein Masterprogramm in Quantentechnologie, als auch ein früher Kontakt mit den Grundlagen der Quantentechnologien in den Studiengängen der Ingenieurwissenschaften. Zusätzlich sollten internationale Großunternehmen dazu gebracht werden in die Quantentechnologie am Forschungsstandort Österreich zu investieren.
- Aufbauend auf einer QT Roadmap, sollen verschiedene Förderinstrumente für Schwerpunktthemen, Schlüsseltechnologien und Technologien mit hohem TRL ausgeschrieben werden. Wo möglich, sollte es zu einer Reduktion des Aufwands z.B. mit einem 2-stufigen Antragsstellung, kommen. Öffentliche Institutionen sollen als Pilotkunden fungieren.

7. Anhang

7.1. Übersichtstabelle der Patenteinreichungen

QT Säule	Name der Erfinder	Antragsteller	Titel	Prioritätsdatum	Referenznummer
Quantenkommunikation	Peter Zoller, Luming Duan, Ignacig Cirac, Mikhail D. Lukin	MagiQ Technologies, Inc.	Long Distance Quantum Communication	20.05.2002	WO2002US15135
Quantenkommunikation	Christian Kollmitzer	ARC Austrian Research GmbH.	Communication System using Quantum Cryptography and comprising Switching Stations	22.11.2002	AT20020001755
Quantenkommunikation	Karl Svozil	Karl Svozil	Method and System of Communication using Quantum Cryptography	06.04.2004	US20040818995
Quantenkommunikation	Thomas Länger	ARC Austrian Research GmbH.	Hub Device for a Network Comprising Quantum Cryptographic Connections and Node Module for said Hub Device	03.07.2006	AT20060001118
Quantenkommunikation	Norman Finger, Christoph Pacher	AIT Austrian Institute for Technology GmbH	Device for generating Polarisation-entangled Photons	17.10.2007	EP2051138B1
Quantenkommunikation	Alois Homer	Novomatic AG	Method of and Device for generating true random Numbers and a Gaming System	09.11.2011	EP20110008930
Quantenkommunikation	Peter Rabl, Mohammad Hafezi	Peter Rabl, Mohammad Hafezi	Systems, Methods and Devices for optomechanically induced Non-Reciprocity	17.10.2012	US20140140651A1
Quantenkommunikation	Arno Rauschenbeutel, Jürgen Volz, Philip Schneeweiss, Clement Sayrin	Technische Universität Wien	Optische Diode	18.08.2014	AT20140050573

Quantenkommunikation	Marie Christine Röhsner, Philip Walther, Tiago Barbin Batalhao, Joshua Alexander Kettlewell, Joseph Fitzimons	Universität Wien, Singapore University of Technology and Design	Secure probabilistic one-time Program by Quantum State Distribution	30.03.2016	EP20160162886
Quantenkommunikation	Hannes Hübel, Bernhard Schrenk	AIT Austrian Institute for Technology GmbH	Verfahren zur Übertragung von Daten	17.06.2016	WO2017214655A1
Quantencomputing	Nathan K. Langford, Sven Ramelow	Nathan K. Langford, Sven Ramelow, Universität Wien	Coherent Photonic Frequency Conversion (CPFC) for Quantum Computing using pumped four-Wave mixing Processes	30.09.2008	US20080101473P
Quantencomputing	Muir Kumph	Universität Innsbruck	Apparatus and Method for trapping charged Particles and performing controlled Interactions between them	27.05.2010	US8426809B2
Quantencomputing	Wolfgang Lechner, Philipp Hauke, Peter Zoller	Österreichische Akademie der Wissenschaften, Universität Innsbruck	Quantum processing device and method	29.06.2015	EP20150174362
Quantensensorik	Sebastian Hofferberth, Peter Krüger, Jörg Schmiedmayer, Stephan Wildermuth	Universität Heidelberg	Sensor for Measuring Potential Fields using an optical Device which provides an Image of an Atom Cloud	20.05.2005	DE200510023937
Quantensensorik	Anton Zeilinger, Sven Ramelow, Radek Lapkiewicz, Victoria Borish, Gabriela Barreto Lemos	Universität Wien	Quantum Imaging with undetected Photons	19.12.2013	US9557262B2
Enabling Technologies	Hendrik Ulbricht, Markus Arndt, Nikolaus Gotsche	Universität Wien	Devices for and Methods of handling Nanowires	22.06.2007	PCT/EP2007/005546

Enabling Technologies	Vladimir Mitin, Andrei Sergeev, Gottfried Strasser	Vladimir Mitin, Andrei Sergeev, Gottfried Strasser	Vertically Correlated Clusters of Charged Quantum Dots for Optoelectronic Devices, and Methods of Making Same	29.03.2011	US201161468689P
Enabling Technologies	Markus Aspelmeyer, Garrett Cole	Crystalline Mirror Solutions GmbH	Substrate transferred monocrystalline Bragg Mirrors	22.12.2011	US9945996B2
Enabling Technologies	Markus Aspelmeyer, Garrett Cole	Universität Wien	Laser active Medium and Process of manufacturing the same	09.09.2014	US2017256904
Enabling Technologies	Philip Geyer, Markus Arndt, Ugur Sezer	Universität Wien	Protective Eyewear; against Radiation, in particular Laser Radiation	18.04.2016	EP20160165789
Enabling Technologies	Christoph Deutsch, Garrett Cole	Crystalline Mirror Solutions GmbH	Substrate - transferred stacked optical Coatings	16.03.2016	EP20160751
Enabling Technologies	Philip Walther, Francesco Massa, Amir Moqanaki	Universität Wien	Apparatus for generating Frequency converted Radiation, Multi-Frequency Radiation Source, Fiber Laser, Method of generating Frequency converted Radiation	01.11.2016	EP20160196744

7.2. Fragebogen Forschungsgruppen

*Studie zur österreichischen Forschungslandschaft
im Bereich Quantenphysik
Fragebogen*



A. THEMATISCHES

A1. Bitte beschreiben Sie in einigen Stichworten Ihr Forschungsgebiet.

A2. Beschreiben Sie mit einer Ziffer von eins bis fünf, wie grundlagen- bzw. anwendungsorientiert Sie Ihre Forschung einstufen (1 entspricht rein grundlagenorientiert, 5 entspricht rein anwendungsorientiert). TRL hier einfügen

A3. Welche Technologiebausteine werden noch benötigt? Welche Hürden gibt es (generell).

A4. Arbeitet Ihre Gruppe selbst an den fehlenden Technologiebausteinen, oder gibt es Partner (in der Industrie oder der Forschung), die bei der Entwicklung behilflich sind?

2 Studie zur österreichischen Forschungslandschaft im Bereich Quantenphysik – Fragebogen

B. FÖRDERUNGEN

B1. Lassen sich die Vorgaben des EU-Quanten-Flagships gut mit Ihrer Forschung in Übereinstimmung bringen (Technologie-Säulen, Enabling Technology)?

B2. Welche Projektpartner für das EU-Flagship (aus Industrie oder Forschung) werden von Ihrer Seite noch benötigt/gesucht?

B3. Gibt es thematische Defizite in bestehenden Förderprogrammen der EU (H2020)? Wenn ja, welche Themen, speziell im Bereich Quantenphysik, werden aktuell vermisst?

B4. Gibt es thematische Defizite in bestehenden österreichischen Förderprogrammen, im Speziellen Programme, die auf Stärkung der Kooperation zwischen Forschung und industrieller Anwendung abzielen?

3 Studie zur österreichischen Forschungslandschaft im Bereich Quantenphysik – Fragebogen

B5. Gibt es Beteiligungsbarrieren in bestehenden Förderprogrammen (auf europäischer und nationaler Ebene)? Wenn ja, welche?

EU: _____

national: _____

C. VERWERTUNG VON QUANTENTECHNOLOGY

C1. Wurden in den vergangenen Jahren Produkte entwickelt? Wenn ja, welche?

C2. Befinden sich bei Ihnen derzeit Produkte in der Planung/Entwicklung?

C3. Basiert die Funktionsweise Ihrer fertiggestellten bzw. geplanten Produkte direkt auf den Gesetzen der Quantenphysik (z.B. Quantenzufallszahlengenerator, Quantenkryptographie-System, Quantencomputer, etc.) oder handelt es sich um Produkte zur Unterstützung/Ermöglichung von Quanten-Technologien (Detektoren, Photonenquellen, Software & Simulation)?

4 Studie zur österreichischen Forschungslandschaft im Bereich Quantenphysik – Fragebogen

C4. Sofern Ihre Forschung anwendungsorientiert ist, ordnen Sie ihr bitte durch Ankreuzen einen *Technology Readiness Level** (TRL) zu.

*<http://sci.esa.int/sci-ft/50124-technology-readiness-level/>

- TRL 1: Beobachtung und Beschreibung des Grundprinzips
- TRL 2: Formulierung von Technologiekonzept und/oder Anwendung
- TRL 3: Proof of Concept
- TRL 4: Versuchsaufbau im Labor
- TRL 5: Versuchsaufbau in relevanter Einsatzumgebung
- TRL 6: Demonstration der grundlegenden Funktionstüchtigkeit des Prototyps in relevanter Einsatzumgebung
- TRL 7: Demonstration der umfassenden Funktionstüchtigkeit des Prototyps in tatsächlicher Einsatzumgebung
- TRL 8: System fertiggestellt und für operativen Einsatz freigegeben
- TRL 9: Erfolgreicher operativer Einsatz des Systems in tatsächlicher Einsatzumgebung

C5. Wurden in den vergangenen Jahren Patente eingereicht und bewilligt, und sind Patenteinreichungen in Zukunft geplant (wenn ja, wann)?

C6. Ist in den letzten Jahren aus Ihrer Gruppe ein Spin-Off hervorgegangen, und/oder wird die Gründung eines Spin-Offs in Erwägung gezogen?

5 Studie zur österreichischen Forschungslandschaft im Bereich Quantenphysik – Fragebogen

D. SONSTIGES

D1. Im Rahmen dieser Studie ist eine eintägige Informationsveranstaltung Ende 2017 geplant. Ziel der Veranstaltung ist unter anderem, Industrievertretern die Potentiale und künftigen Verfahren im Bereich Quantentechnologien frühzeitig bekannt zu machen, um mögliche Verwertungspartnerschaften zu initiieren. Des Weiteren stehen Vertreter der Förderungsgesellschaften für Fragen zur Verfügung. Wären Sie an der Teilnahme einer solchen Veranstaltung interessiert? Wenn ja, haben Sie bestimmte Ansprüche/Wünsche an die Veranstaltung?

D2. Haben Sie noch weitere Anmerkungen bzw. Anregungen?

7.3. Fragebogen Firmen

Studie zur österreichischen Forschungslandschaft
im Bereich Quantenphysik
Fragebogen



A. THEMATISCHES

A1. Kennen sie den Begriff „Quantentechnologie“, oder wissen sie über die möglichen Vorteile von Quanteninformationsanwendungen (Quantencomputer, Quantenkryptographie und Quanten Sensorik) Bescheid? Kennen sie das österreichische Forschungsumfeld im Bereich der Quantenphysik?

A2. Sind sie in Kontakt mit Forschungsgruppen auf dem Gebiet der Quantentechnologie? Verfolgen Sie den technologischen Fortschritt der Quantentechnologie? (Vorträge, Messen, Partnern od. Kunden)?

A3. Haben sie schon von der europäischen Flagship-Initiative zur Quantentechnologie gehört?

2 Studie zur österreichischen Forschungslandschaft im Bereich Quantenphysik – Fragebogen

B. VERWERTUNG VON QUANTENTECHNOLOGIEN

B1. Können sie sich vorstellen, dass Ihr Unternehmen/Ihre Produkte von einer Einbindung der Quantentechnologien profitieren könnten? Welche Produktionsprozesse od. Verfahren stoßen an die physikalischen Limits?

B2. Hätten Sie eher Interesse an Produkten, die direkt auf den Gesetzen der Quantenphysik basieren (z.B. Quantenzufallszahlengenerator, Quantenkryptographie-System, Quantencomputer, etc.) oder an Produkten, die zur Unterstützung/Ermöglichung von Quanten-Technologien entwickelt werden (Detektoren, Photonenquellen, Software & Simulation, etc.)?

B2. Können Sie sich vorstellen, dass sie Ihre Technologien und Produkte für die Quantenforschung relevant sein könnte? Gab es diesbezüglich Anfragen von Forschungsgruppen?

B3. Was fehlt ihrer Meinung nach, um stärkere Synergien zwischen Forschung und Industrie zu stärken?

3 Studie zur österreichischen Forschungslandschaft im Bereich Quantenphysik – Fragebogen

B4. Bereiten Sie eine Teilnahme am Flagship vor, bzw. wären Sie für eine Teilnahme an nationalen Förderprogrammen interessiert? Welche Rahmenbedingungen würden sie sich wünschen?

C. SONSTIGES

C2. Haben Sie noch weitere Anmerkungen bzw. Anregungen?
