

acatech

HORIZONTE

Quantentechnologien



Warum sind Quanten wichtig?

Grundlagen für das Verständnis
der Quantentechnologien

Quantentechnologien der ersten und
zweiten Generation

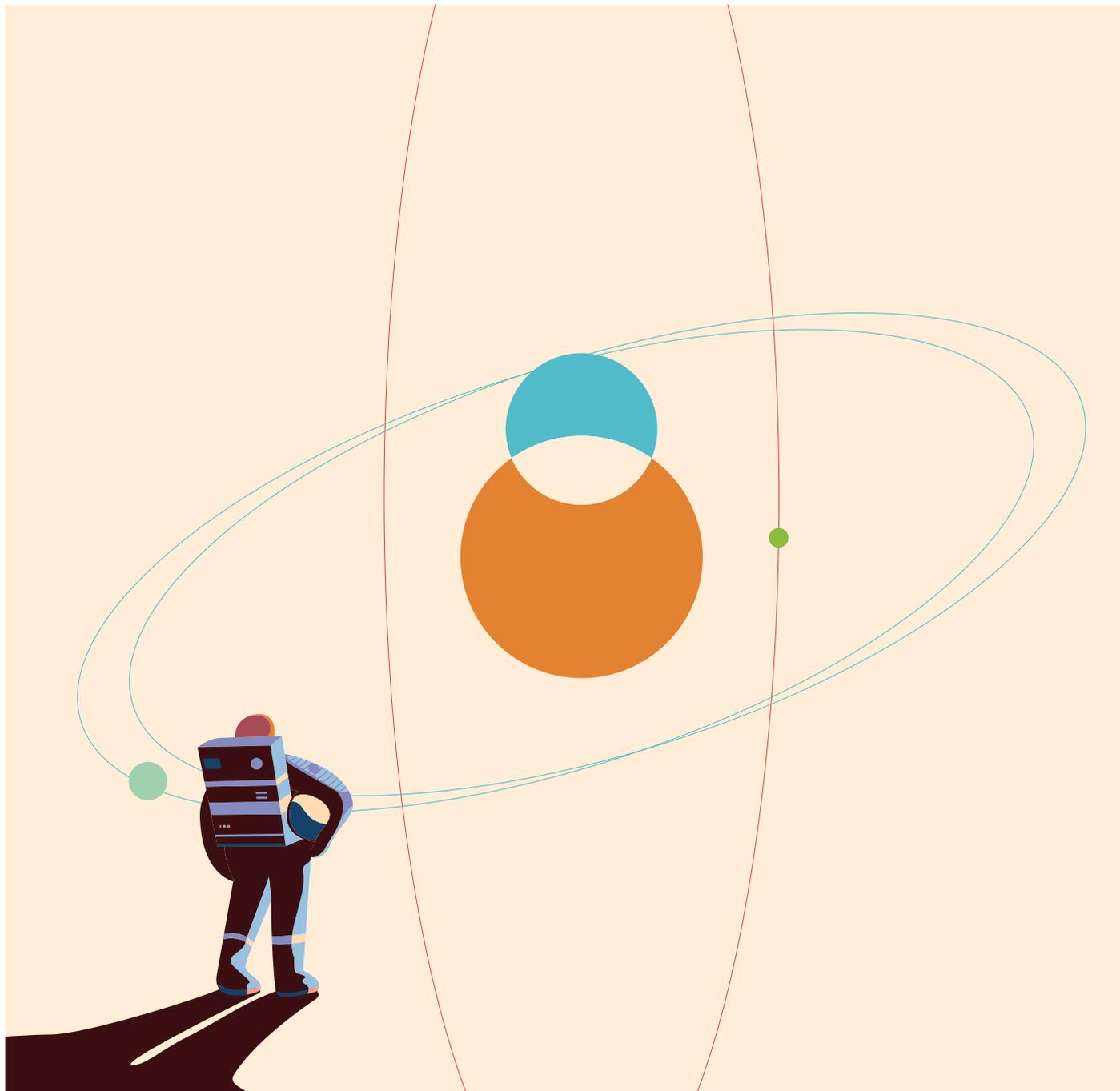
Gestaltungsspielräume und
Erwartungsmanagement

Mit der vorliegenden Publikationsreihe untersucht acatech bedeutende Technikfelder, die sich klar am Horizont abzeichnen, deren Auswirkungen aber noch geklärt werden müssen. Diese Technikfelder werden in acatech HORIZONTE fundiert und anschaulich aufbereitet. In diesen Prozess fließen der aktuelle Stand der internationalen Forschung, Entwicklung und Anwendung sowie die Wertschöpfungspotenziale der Technologien ein. Darüber hinaus nehmen die acatech HORIZONTE ethische, politische und gesellschaftliche Fragen sowie denkbare Entwicklungen und Gestaltungsoptionen in den Blick. Mit den acatech HORIZONTEN möchte die Akademie die Diskussion über neue Technologien anregen, politische Gestaltungsräume aufzeigen und Handlungsoptionen formulieren – und so einen Beitrag für eine vorausschauende Innovationspolitik leisten.

acatech **HORIZONTE**

Quantentechnologien



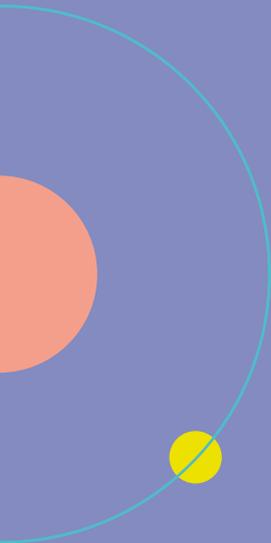


Inhalt

	Zwölf Botschaften	4
1	Warum sind Quanten wichtig?	6
	1.1 Quanten, ihre außergewöhnlichen Eigenschaften und Potenziale	8
	1.2 Eine kurze Geschichte der Quantenphysik	8
2	Grundlagen für das Verständnis der Quantentechnologien	12
	2.1 Wo wirken Quanten?	14
	2.2 Wie wirken Quanten?	14
	2.3 Ist das Quant Teilchen oder Welle?	16
	2.4 Quanteneffekte	20
3	Was sind Quantentechnologien der ersten und der zweiten Generation, und welche Potenziale haben sie für Wirtschaft und Gesellschaft?	26
	3.1 Quantentechnologien der ersten Generation und ihre Merkmale	28
	3.2 Quantentechnologien der zweiten Generation	30
	3.2.1 Quantencomputing und Quantensimulation	30
	3.2.2 Quantenkommunikation und Quantenkryptografie	40
	3.2.3 Quantenmetrologie, Quantensensorik und quantenbasierte Bildgebung	44
4	Gestaltungsspielräume und Erwartungsmanagement	52
	4.1 Unabhängigkeit in der Quantenkommunikation und Quantenkryptografie	54
	4.2 Deutschland als Vorreiter: Quantenmetrologie, Quantensensorik und quantenbasierte Bildgebung	54
	4.3 Von der Forschung zum Transfer am Beispiel des Quantencomputers	54
	4.4 Die „Quantessenz“	56
	Literaturverzeichnis	58
	Interviewpartnerinnen und Interviewpartner	60
	Mitwirkende	62

Zwölf Botschaften

- 1.** In der Welt der Quanten verhält sich vieles anders, als wir es aus unserer erfahrbaren Alltagswelt kennen.
- 2.** Das erscheint nicht nur Laien oft mysteriös. Jedoch ist die Quantenphysik der präziseste und bewährteste Werkzeugkasten, den die Physik hat, um unsere Welt und wie sie auf der kleinsten Ebene funktioniert zu beschreiben.
- 3.** Seit ihrer Entdeckung vor etwa einem Jahrhundert spielen Quanten in unserem täglichen Leben eine unverzichtbare Rolle: Von der Atomuhr über den Laser, die globale Satellitennavigation (GPS), moderne Elektronik und IT bis hin zu Glasfasernetzwerken und der Magnetresonanztomografie (MRT) – all diese Erfindungen wären ohne die Erkenntnisse aus der Quantenphysik nicht möglich gewesen.
- 4.** Inzwischen ist die Forschung in der Lage, Quantenzustände gezielt zu manipulieren und mit ihnen zu arbeiten. Quantencomputing, -kryptografie und -sensorik sind die Felder, in denen neue Technologien der sogenannten zweiten Quantenrevolution entstehen.
- 5.** Der Quantencomputer kann ganz spezielle Aufgaben lösen, für die klassische „Superrechner“ unvorstellbar lange brauchen würden oder die sie vielleicht auch nie lösen könnten. Dies birgt Potenziale für wissenschaftlichen und technologischen Fortschritt, aber auch Gefahren für die Sicherheit unserer Kommunikation. Die technische Realisierung von Quantencomputern steht jedoch noch am Anfang.
- 6.** Der Quantencomputer wird den klassischen Computer nicht ersetzen: Für Alltagsaufgaben, wie wir sie an unserem heutigen Rechner lösen, wird er sich vermutlich nicht eignen.

- 
- 7.** Die Quantenkryptografie ist eine Technologie, mit der eine vollständig abhörsichere Kommunikation möglich wäre. In der Praxis ist das allerdings bislang nur eingeschränkt der Fall.
 - 8.** Wir müssen schon heute an die Sicherheit von morgen denken, da Quantencomputer voraussichtlich klassische Verschlüsselungen, die heute noch als sicher gelten, „knacken“ können. Ob wir in Zukunft nur mit Quantenkryptografie sicher kommunizieren können oder ob Innovationen in der klassischen Kryptografie ausreichen werden, hängt also entscheidend vom technologischen Fortschritt ab.
 - 9.** Präzise Atomuhren und Quantensensoren verhelfen in Zukunft aller Voraussicht nach zu Durchbrüchen beispielsweise in der Erd- und Bodenerkundung oder der medizinischen Diagnostik. Die Quantenforschung hofft, so zum Beispiel Gehirnaktivitäten viel präziser messen zu können, als dies heute möglich ist.
 - 10.** Die Quantenbildgebung öffnet in der Biomedizin potenziell ganz neue Türen: Beispielsweise können lebende lichtempfindliche Zellproben besser untersucht werden.
 - 11.** Deutschland hat viele große Quantenphysiker hervorgebracht. Einige davon wurden für ihre Entdeckungen mit dem Nobelpreis geehrt. Auch heute mangelt es nicht an klugen Köpfen, denn in der Forschung sind wir Europäer nach wie vor Teil der Weltspitze. Wir müssen uns aber die Frage stellen, wie es gelingen kann, Erfindergeist mit Unternehmergeist zu koppeln, um Quantenprodukte zu realisieren und die technologische Souveränität Europas und Deutschlands zu stärken.
 - 12.** Der Aufbau eines europaweiten Quantenökosystems braucht gute Rahmenbedingungen. Produktive Kollaborationen zwischen den Fachbereichen Physik, Informatik und Ingenieurwesen sowie zwischen Forschung, Industrie und Start-ups sollten gezielt gefördert werden.

1

Warum sind Quanten wichtig?

Über Quantentechnologien wird derzeit viel berichtet. Vor allem die Schlagzeilen über einen Durchbruch bei Quantencomputern haben für Aufsehen gesorgt. Dabei erleichtern uns Quanten und ihre Eigenschaften schon lange das Leben: Ohne sie gäbe es heute beispielsweise kein schnelles Internet und keinen Laser.

Einzelne Quanten lassen sich mit bloßen Sinnen nicht wahrnehmen. Was sind sie also überhaupt? Dieses erste Kapitel führt ein in die spannende Welt des Allerkleinsten, wo nichts so ist, wie wir es kennen.

Zudem werfen wir einen Blick zurück in die Geschichte: Europäische Physiker spielten bei der Entdeckung der Quanten und ihrer außergewöhnlichen Eigenschaften eine maßgebliche Rolle. Anhand ihrer nobelpreiswürdigen Experimente und Entdeckungen lässt sich die Entwicklung der Quantenphysik nachvollziehen.



1.1 Quanten, ihre außergewöhnlichen Eigenschaften und Potenziale

Quantenphysik ist selbst für Fachleute schwer in Worte zu fassen. Einzelne Quanten kann man mit bloßen Sinnen erst einmal nicht wahrnehmen. Vielmehr wirken sie in der Welt des Allerkleinsten, der Welt der Atome, dem Nanokosmos. Quanten sind so etwas wie die kleinsten Einheiten, in denen uns die Welt entgegentritt. So ist zum Beispiel ein Lichtquant die kleinste Lichtmenge, die ein Atom aussenden kann. Unseren in der Welt des Großen geformten Sinnen bleibt diese Welt jedoch verschlossen.

„Wir müssen akzeptieren, dass es eine Realität außerhalb unserer Vorstellung gibt.“*

In der Welt der Quanten erweisen sich viele Gesetze der klassischen Physik, die beschreiben, wie sich alltägliche Dinge verhalten, als nicht mehr gültig. Schauen wir uns Quanten und ihre „verrückten“ Eigenschaften an, dann ist plötzlich vieles anders, als wir es zu kennen glauben: Ein einzelnes Quant legt – vereinfacht ausgedrückt – seinen Aufenthaltsort erst fest, wenn man es beobachtet. Es gibt sogar einen nahezu romantischen Aspekt: Zwei Quanten können miteinander „verschränkt“ sein, selbst wenn sie über Tausende von Kilometern voneinander getrennt sind. Sogar Einstein kam das seinerzeit ungläublich vor: Er nannte das eine „spukhafte Fernwirkung“.¹

„Bei Quanten versuchen wir die Sprache, in der wir uns bekannte Dinge beschreiben, auf Dinge zu übertragen, die wir nicht beobachten können. Vergleiche mit der uns bekannten Welt hinken dadurch häufig. Mathematisch sind Quanten und ihre Eigenschaften allerdings relativ leicht beschreibbar.“

Einerseits erscheinen uns die Quanten und ihre Welt unbegreiflich. Andererseits ist die Quantenphysik die beste und präziseste physikalische Theorie, die wir haben, um das Universum bis hinab in den Nanokosmos zu beschreiben. Dieses Spannungsfeld macht die Beschäftigung mit dem Thema so faszinierend.

* Einige ausgewählte Kerngedanken der für diese HORIZONTE Ausgabe befragten Expertinnen und Experten (siehe S. 60) sind im Text als anonymisierte Zitate aufgeführt.

Viele Fachleute sehen in der Quantenphysik großes Potenzial für technologischen Fortschritt. Zahlreiche ihrer Anwendungen haben schon jetzt unsere Wirtschaft und unser Leben stark verändert: Vom Laser über das Internet bis hin zur Atomuhr oder zum Globalen Positionsbestimmungssystem (GPS) oder seinem europäischen Äquivalent Galileo (GNSS) – diese Technologien wären ohne die Erkenntnisse aus der Quantenphysik nicht möglich. Dreißig Prozent des US-amerikanischen Bruttonationaleinkommens basieren schätzungsweise auf Erfindungen, die aus Erkenntnissen in der Quantenphysik hervorgegangen sind.² Vor Kurzem ist es erstmals gelungen, mit einzelnen Quanten zu „arbeiten“. Man kann sich vorstellen, dass dies aufgrund ihrer außergewöhnlichen Eigenschaften keine einfache Sache ist. Sollte es aber klappen, Quanten zu „bändigen“, werden wir in den kommenden Jahren und Jahrzehnten womöglich Quantencomputer, Quantenkryptografie und Quantensensoren erleben, die unser Leben weiter verändern und verbessern können.

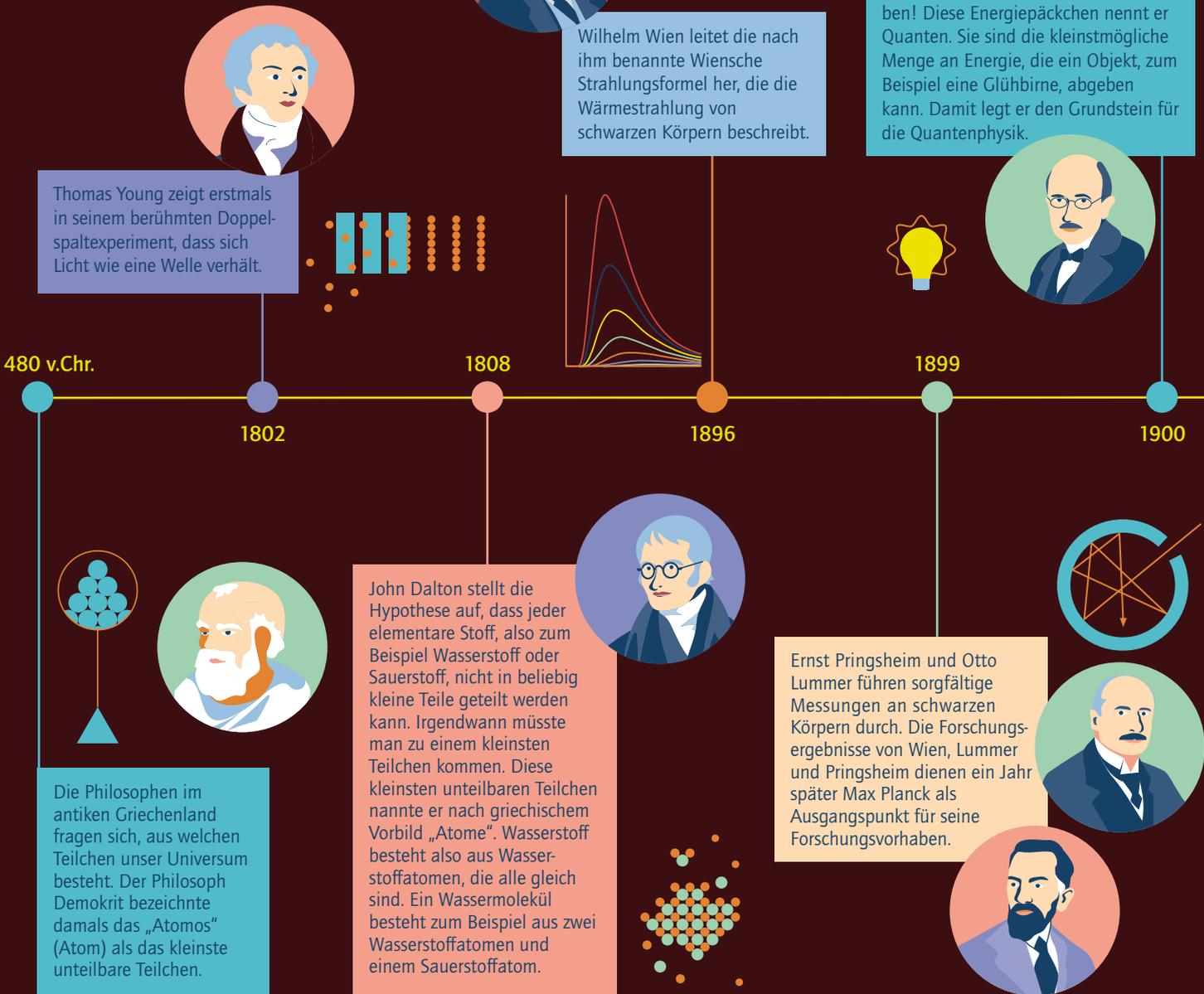
1.2 Eine kurze Geschichte der Quantenphysik

Den Grundstein für diese Technologien legten vor über hundert Jahren Theoretiker wie Max Planck, Albert Einstein, Niels Bohr, Werner Heisenberg und Erwin Schrödinger sowie eine Reihe von Experimentalphysikern wie Ernest Rutherford, Otto Lummer, Ernst Pringsheim und Wilhelm Wien. Sie stellten mit ihrer Forschung ihr eigenes Weltbild auf den Kopf: Bis dahin war die Forschungsgemeinschaft der Physikerinnen und Physiker davon ausgegangen, dass sie mit den bisherigen physikalischen Erkenntnissen das Universum verstehen und die Welt um uns herum in Gänze beschreiben könne.

Im mikroskopischen Bereich beobachtete man jedoch Anfang des 20. Jahrhunderts einige Phänomene, die sich nicht allein durch klassische Physik erklären ließen. Das bereitete Physikerinnen und Physikern weltweit Kopfzerbrechen. Eine andere Erklärung musste her: Hier setzt die – damals revolutionäre – Quantenphysik an. Das nachfolgende Schaubild zeigt einige ihrer frühen Meilensteine auf. In Kapitel 3.1 werden auch spätere Meilensteine dargestellt.



Eine kurze Geschichte der Quantenphysik



Ernest Rutherford zeigt, dass ein Atom aus einem positiv geladenen Kern besteht, der von negativ geladenen Elektronen umgeben wird.



1905



Albert Einstein baut auf den Erkenntnissen von Young und Planck auf: Er definiert erstmals das „Quantum des Lichts“, also die kleinstmögliche Menge an Lichtenergie, und nennt es „Photon“. Einstein stellt die Hypothese auf, dass sich Licht sowohl wie ein Teilchen als auch wie eine Welle verhält. Diese Erkenntnis ist revolutionär: Bisher dachte man, es sei entweder Teilchen oder Welle.

1912

Niels Bohr verfeinert Rutherford's Atommodell und beschreibt, dass sich die Elektronen auf Bahnen um den Atomkern bewegen, so wie die Planeten um die Sonne kreisen. Er nimmt an, dass Elektronen auf ihren Bahnen jedoch nicht auf Dauer „festsitzen“, sondern von einer auf die andere „springen“ können, wenn ein Quant mit der richtigen Menge an Energie im Spiel ist. Er nennt den Springvorgang des Elektrons entsprechend einen „Quantensprung“.

1913



Louis de Broglie beschreibt in seiner Doktorarbeit, dass sich nicht nur Photonen wie Wellen und Teilchen verhalten können, sondern auch Materie, wie zum Beispiel Elektronen.

1924



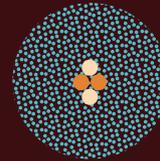
Erwin Schrödinger baut auf de Broglie's Erkenntnissen auf und postuliert seine berühmte „Schrödingergleichung“. Mit dieser Gleichung lassen sich zum Beispiel die diskreten Energiewerte in einem Atom berechnen.

1927

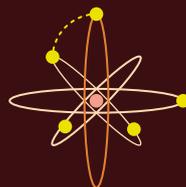


Werner Heisenberg ermittelt die Unschärferelation. Sie besagt, dass nur entweder die exakte Geschwindigkeit oder der exakte Ort eines Teilchens gemessen werden kann, aber nicht beides gleichzeitig – egal wie gut das Messgerät ist. Eben weil Teilchen in der Quantenwelt auch Wellencharakter besitzen, sind sie nicht so scharf definiert wie große Objekte in unserer beobachtbaren Welt. Das widerspricht einer Annahme aus der klassischen Physik, wonach sich prinzipiell alles exakt bestimmen lässt.

1926



Auf der fünften Solvay-Konferenz in Brüssel diskutieren die weltweit hochrangigsten Fachleute aus Physik und Chemie die neuen Erkenntnisse über Elektronen und Photonen. Neben den bereits genannten Planck, Einstein, Bohr, de Broglie, Schrödinger und Heisenberg sind auch Max Born, Paul Dirac und Wolfgang Pauli anwesend, die wichtige mathematische Grundlagen für die Quantenphysik legten. Von den 29 Wissenschaftlern, die an dieser Konferenz teilnehmen, werden im Laufe der Zeit insgesamt 17 zu Nobelpreisträgern. Ihre Erkenntnisse und die darauf aufbauende Forschung führen zu dem, was heute häufig als die „erste Quantenrevolution“ bezeichnet wird.



2

Grundlagen für das Verständnis der Quantentechnologien

Im Nanokosmos gibt es viele Phänomene, die unser Vorstellungsvermögen sprengen. Das liegt unter anderem daran, dass wir Quanteneffekte in unserer Welt nicht wahrnehmen, auch wenn sie überall um uns herum im Kleinsten stattfinden. Das folgende Kapitel soll erklären, wie und wo Quanten genau wirken, und einen Einblick in ihre faszinierenden Eigenschaften und Effekte bieten. Sie für Anwendungen nutzbar zu machen, ist das Ziel der Quantentechnologien.



2.1 Wo wirken Quanten?

Jedes Material, alles, was wir in unserem Büro oder Wohnzimmer sehen, unsere Kleidung, selbst das, was wir nicht anfassen können, zum Beispiel Licht, kann nur bis zu einem gewissen Punkt in kleinere Teile zerlegt werden. Genau ab dem Punkt, an dem man etwas nicht weiter zerteilen kann, sind wir in der Welt des Allerkleinsten, des einzelnen Atoms, dem sogenannten Nanokosmos („nanos“ ist griechisch und bedeutet „Zwerg“) und damit auch in der Welt der Quanten angekommen.

„Praktisch alles, woran man denken kann, ist quantisiert, zum Beispiel auch Licht.“

Quanten sind – vereinfacht gesagt – winzig kleine Energiepäckchen, die im Nanokosmos wirken. So nennt man die Energiepäckchen, aus denen Licht besteht, „Lichtquanten“ oder „Photonen“. Es gibt zwar noch weitere Arten von Quanten, aber das Photon ist zum jetzigen Zeitpunkt für die Entwicklung zahlreicher Quantentechnologien essenziell.

„Ein Lichtquant ist die kleinste Lichtmenge, die ein Atom aussenden kann.“

Doch neben dem Quant gibt es noch weitere Begriffe, die für die Beschreibung von Vorgängen im Nanokosmos und zum Verständnis der Darstellung der Quantentechnologien in Kapitel 3 wichtig sind. Das Schaubild auf der nächsten Seite erklärt sie genauer.

2.2 Wie wirken Quanten?

Ohne Atome gibt es – nichts. Zumindest nicht in unserer Wahrnehmung und hier auf der Erde. Alles, was wir sehen und anfassen können, besteht aus Atomen. Es ist tatsächlich den Eigenschaften der Quanten zu verdanken, dass Atome – als Quantensysteme – stabil bleiben: Ohne sie würden die negativ geladenen Elektronen vom positiv geladenen Atomkern angezogen, und das Atom würde „kollabieren“.

Man kann es sich ungefähr so vorstellen: Die Elektronen im Atom sind wie Planeten, die auf den immer gleichen Bahnen um die Sonne, also um den Atomkern, kreisen. Ihre Bahnen können wie die Planetenbahnen im Sonnensystem mal nah am Atomkern oder weiter weg liegen. Jedes Elektron sitzt wie jeder Planet eigentlich fest auf seiner Bahn.

Man stelle sich nun einen kleinen Steinbrocken vor, den man mit einem kräftigen Tritt Richtung Planet befördert, um diesen, rein bildlich gesprochen, auf eine andere Bahn zu katapultieren. Dann ist in dieser Analogie der Stein das Quant und der Planet das Quantenobjekt, hier ein Elektron, das von ihm von einer Bahn auf eine andere geschossen wird – fertig ist der sogenannte Quantensprung.

Der Stein beziehungsweise unser Quant, das Photon, muss jedoch genau die richtige Menge an Energie haben, um vom Atom überhaupt „bemerkt“ zu werden und den Quantensprung auszulösen. Arbeitet man mit einem Laser, der ausschließlich Photonen dieser einen, genau passenden Energie bereitstellt, dann finden die von den Photonen verursachten Übergänge nur zwischen zwei ganz bestimmten Energiezuständen des Atoms statt. Daher spricht man hier von einem Zwei-Zustands-System, das im folgenden Schaubild erläutert wird. Der Vergleich mit dem Planeten und seinen Bahnen ist übrigens nichts anderes als eine sehr vereinfachte Darstellung des sogenannten Bohrschen Atommodells.

Das Zwei-Zustands-System ist auch deswegen so wichtig, weil es die Grundlage für beispielsweise einen funktionierenden Quantencomputer bildet. Mehr dazu in Kapitel 3.2.1.

Wussten Sie, dass ...

... ein „Quantensprung“ in seiner eigentlichen, ursprünglichen Bedeutung gar nicht den Sprung des Quants bezeichnet? Und auch nicht, wie wir den Begriff in der Alltagssprache gerne verwenden, einen bahnbrechenden Fortschritt in sehr kurzer Zeit? In der Sprache der Physik bedeutet „Quantensprung“ die Anhebung eines Elektrons (Quantenobjekts) auf einen höheren Energiezustand durch die Aufnahme eines Quants (Energie).

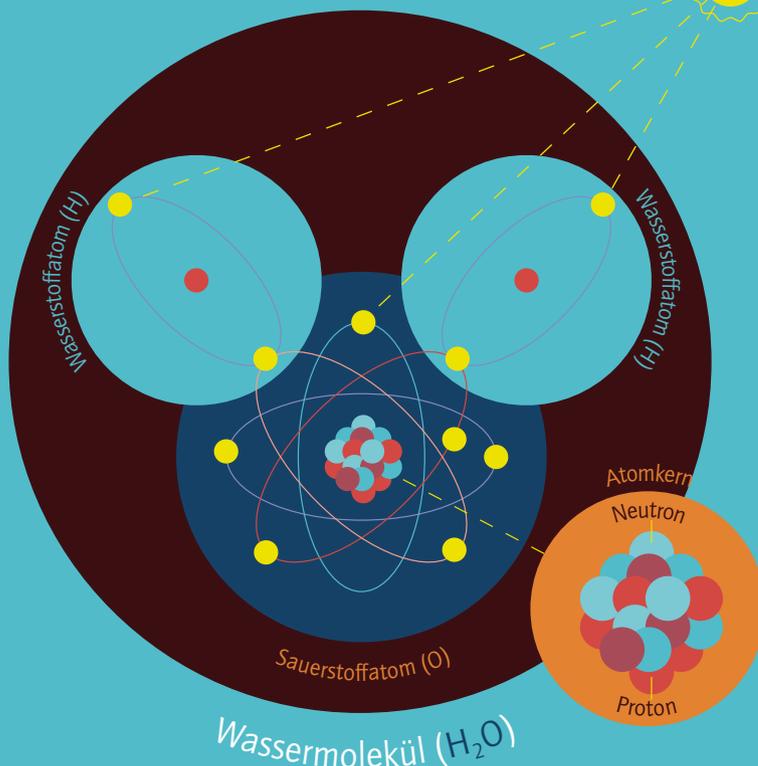
Photon, Atom, Molekül

- Erklärung von Begriffen aus der Quantenphysik

Quantenobjekte

sind Objekte, die Eigenschaften besitzen, die sich nicht mit der klassischen Physik vereinbaren lassen. So verhalten sich Quantenobjekte zum Beispiel in bestimmten Situationen wie ein Teilchen und in anderen wie eine Welle. Das lässt sich nur mithilfe der Quantenphysik erklären.

Elektronen gelten bis heute als unteilbar. Sie sind Teil von Atomen und umgeben den Kern. Während der Atomkern positiv geladen ist, haben Elektronen eine negative elektrische Ladung. Durch die Bewegung von freien Elektronen in eine Richtung wird elektrischer Strom erzeugt.



Quanten

Dadurch, dass Quanten kleine Energiepäckchen sind, können Quantenobjekte in einem Quantensystem auch nicht irgendwelche beliebigen Energiezustände einnehmen, sondern nur ganz bestimmte, was auch als „diskret“ bezeichnet wird. Vereinfacht kann man es sich so vorstellen, als könnte man nur eine Zimmertemperatur von 20°C oder 30°C einstellen, aber keine Werte dazwischen, etwa 22,5°C.

Photonen sind die Quanten der elektromagnetischen Kraft, aus denen auch das sichtbare Licht besteht. Es gibt noch weitere Arten von Quanten, Photonen spielen in der Entwicklung und Anwendung von Quantentechnologien allerdings die wichtigste Rolle.

Quantensystem

In Quantensystemen, etwa in einem Atom, wird der Zustand von Quantenobjekten durch den Einfluss von Quanten modifiziert. So können Elektronen (als Quantenobjekte) beispielsweise Photonen (also Quanten) und dadurch Energie aufnehmen und in einen höheren Energiezustand springen. Das Quantensystem befindet sich dann insgesamt in einem anderen Zustand als vorher.

Atome (zum Beispiel Wasserstoffatome) sind die kleinsten Bausteine von chemischen Elementen und Stoffen. Atome sind sogenannte natürliche Quantensysteme. Es gibt auch künstliche Quantensysteme, wie beispielsweise supraleitende Schaltkreise.

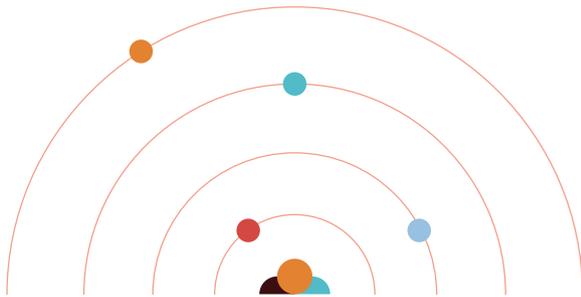
Moleküle bestehen aus Verbindungen zwischen Atomen. Beim Wasserstoff können sich beispielsweise zwei Wasserstoffatome zu einem Wasserstoffmolekül verbinden. Auch das Wasser, das wir trinken, besteht aus Wassermolekülen, die sich aus zwei Wasserstoffatomen und einem Sauerstoffatom zusammensetzen.

2.3 Ist das Quant Teilchen oder Welle?

Ein weiterer kurioser Fakt aus der Welt des Allerkleinsten: Quanten wie Photonen und Quantenobjekte wie Elektronen haben sowohl Teilchen- als auch Welleneigenschaften.⁴ Man spricht hier auch vom „Welle-Teilchen-Dualismus“.

Eine klassische Teilcheneigenschaft ist beispielsweise, dass ein Teilchen zu einer bestimmten Zeit nur an einem bestimmten Ort sein kann. Nicht anders als ein Fußball, der nur an einem Ort im Tor landen kann. Gleichzeitig haben Quanten und Quantenobjekte auch Welleneigenschaften, das heißt, sie können sich wellenförmig im Raum ausbreiten. Dabei überlagern sie sich teilweise auch gegenseitig, wenn ihre Wellen aufeinandertreffen. Das wird als Interferenz bezeichnet. Diese Phänomene sind uns tatsächlich auch aus unserer erfahrbaren Welt bekannt: Wasserwellen verhalten sich nicht anders.

Genauer erklärt das das berühmte Doppelspaltexperiment (siehe Seite 18). Thomas Young zeigte bereits 1802 mit diesem Versuch das Wellenverhalten des Lichts.⁵ 1961 schickte Claus Jönsson Elektronen auf einen engen Doppelspalt⁶ und sah, dass sich auch Elektronen als Quantenobjekte wie Wellen verhalten. Vor diesem Beweis war man davon ausgegangen, dass Elektronen ausschließlich Teilcheneigenschaften besitzen. Nun wusste man: Beides ist richtig. Und das trifft sowohl auf Quantenobjekte wie Elektronen als auch auf Lichtquanten selbst zu. Dieser sogenannte Welle-Teilchen-Dualismus ist eines der Hauptprinzipien hinter den vermeintlich verrückten Effekten, die in der Quantenwelt auftreten.



a Quanten können im Übrigen auch etwas ganz anderes sein, weder Teilchen noch Welle. Der Einfachheit halber sprechen wir hier jedoch lediglich von Quanten mit nur Wellenbeziehungsweise Teilcheneigenschaften.

Wie klein ist ein Atom?

Die Welt des Allerkleinsten, der Nanokosmos, ist die Welt des einzelnen Atoms. Der Durchmesser eines einzelnen Atoms beträgt etwa 10^{-10} Meter = 0,0000000001 Meter = ein zehn milliardstel Meter. Der Begriff „Atom“ leitet sich wie „Nano-“ ebenfalls aus dem Griechischen ab: Die antiken Philosophen waren sich bereits bewusst, dass alles, was sie sahen, aus kleinsten, unteilbaren Teilchen bestehen musste. Diese nannten sie nach dem griechischen Adjektiv átomos = unteilbar „Atome“ (siehe Schaubild „Eine kurze Geschichte der Quantenphysik“).

Nachdem die Rechnerei im Fall von Atomen mit sehr vielen Nullen verbunden ist, wurde eine neue Maßeinheit eingeführt, damit mit einfachen Zahlenwerten gearbeitet werden kann. Der Durchmesser eines Atoms beträgt demnach etwa 1 Ångström, was genau 10^{-10} Meter entspricht. Ein kurzer Vergleich zur Größeneinordnung: Ein Sandkorn ist typischerweise 0,001 Meter groß. Ein Atom ist also bis zu 10 Millionen Mal kleiner als ein Sandkorn.

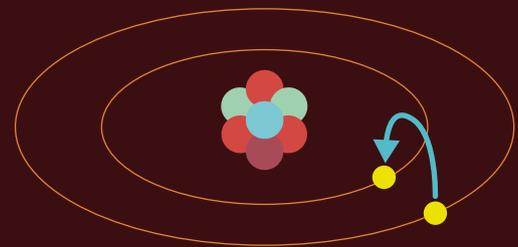
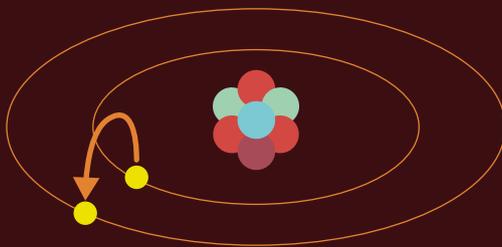
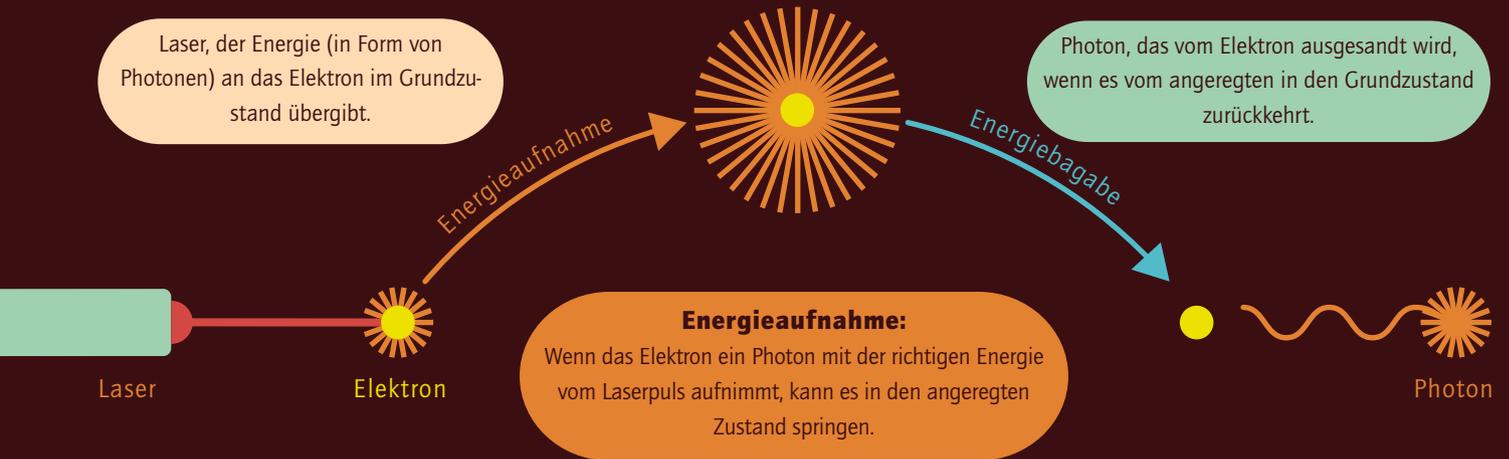
Werner Heisenberg und seine Unschärferelation

Hinter der Heisenbergschen Unschärferelation steht eines der fundamentalsten Prinzipien der Physik. Sie besagt, dass zwei komplementäre Eigenschaften eines Teilchens simultan niemals exakt gemessen werden können. Das heißt: Wenn ich beispielsweise die Geschwindigkeit des Teilchens exakt messe, dann kann ich seinen eigentlichen Aufenthaltsort nur ungenau messen. Möchte man den Ort eines Teilchens präzise messen, dann muss man sich mit einer unpräzisen Aussage zu dessen Geschwindigkeit zufriedengeben.

Das Zwei-Zustands-System

Vereinfacht kann man sagen: Dank der Quanten ist unsere Materie stabil. Doch wie genau interagieren Quantenobjekte und Quanten in einem Atom? Sie tun das in sogenannten Quantensystemen. In diesen können beispielsweise Elektronen, als Quantenobjekte, zwischen zwei

verschiedenen Energiezuständen hin- und herspringen: einem Grundzustand und einem (energiereichen) angeregten Zustand. Deswegen auch der Name „Zwei-Zustands-System“. Dieser Wechsel geschieht durch das Zuführen oder Abführen von abgepackter Energie (= Quanten).



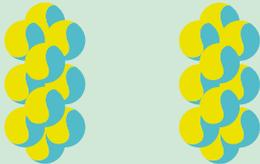
Vereinfacht dargestellt kreisen die Elektronen auf Bahnen um den Atomkern. Je weiter weg eine Bahn vom Atomkern ist, desto höher ist die Energie des Elektrons auf dieser Bahn.

Bei der Energieaufnahme springt das Elektron vom Grundzustand in den angeregten Zustand und somit von der Bahn mit dem niedrigeren Energielevel auf die mit einem höheren Energielevel. Bei der Energieabgabe findet der umgekehrte Prozess statt.

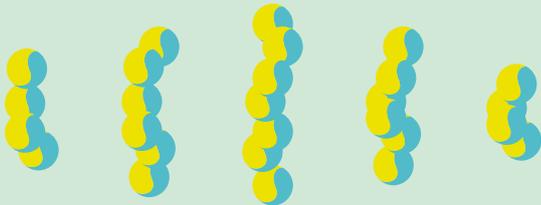


Das Doppelspaltexperiment

Thomas Youngs Doppelspaltexperiment mit Lichtquanten, den Photonen, kann man sich im übertragenen Sinne folgendermaßen vorstellen: Die Spieler eines Fußballteams schießen mit verbundenen Augen etwa gleichzeitig auf eine Torwand. Diese Wand hat statt Torlöchern zwei Torspalten für die Treffer. Dahinter steht ein Detektor, der aufnimmt, welcher Treffer wo landet. Die Bälle verhalten sich so, wie wir es aus unserer Erfahrung heraus erwarten: Der Detektor zeigt uns zwei Sammellinien für die Treffer. Das würde in etwa so aussehen:



Wären wir aber im Nanokosmos und würden sich die Fußballer wie Quanten verhalten, würden wir folgendes Bild sehen:



Warum ist das so? Die einzig mögliche physikalische Erklärung ist: Wenn die Quanten nicht beobachtet werden, das heißt, wenn nicht durch eine Messung festgestellt wird, durch welchen Spalt sie jeweils fliegen, verhalten sie sich (oder in der Analogie die Fußballer) wie Wellen. Es zeigt sich ein sogenanntes Interferenzmuster – übrigens genauso, wie wir es aus der makroskopischen Welt von Wasserwellen kennen: Sie überlagern sich und können sich gegenseitig verstärken und abschwächen.

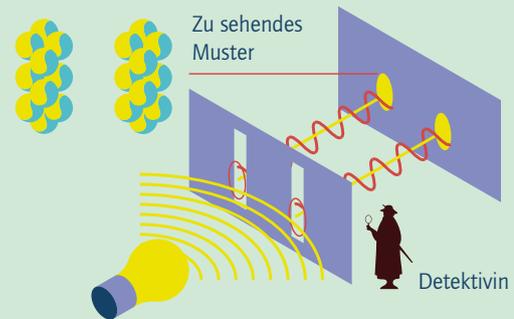
Physiker fragten sich daraufhin, was passieren würde, wenn einzelne Photonen wirklich nacheinander durch die Spalte fliegen, sodass sie sich nicht überlagern können. In unserem Fall würde dann nur ein einzelner Spieler mit verbundenen Augen einen Fußball nach

dem anderen auf die Torwand schießen. Erstaunlicherweise zeigt sich trotzdem immer noch das gleiche Interferenzmuster – also die gleichen beispielhaften fünf Linien – wie zuvor.

Die einzig mögliche Erklärung dafür ist nun: Die Photonen interferieren nicht unbedingt miteinander. Ein Photon kann durch beide Öffnungen gleichzeitig gehen^b und interferiert dann mit sich selbst.

Das Experiment geht immer noch weiter: Nun stellt sich eine Detektivin hinter die Torwand und beobachtet, durch welches Loch die Bälle gehen.

Das Ergebnis: Das Interferenzmuster verschwindet, und es zeigen sich wieder zwei klare Linien. Die Quanten verhalten sich also wieder, wie es auch ein Fußball tun würde – es ist klar, durch welchen Spalt der Ball beziehungsweise das Photon geflogen ist.



Welche Erklärung gibt es dafür? In dem Augenblick, in dem die Quanten beobachtet werden, wird die Wellennatur der Quanten, also ihre Fähigkeit, zu interferieren, gestört, und sie müssen sich entscheiden, durch welchen Spalt sie gehen wollen. Da sie nur noch durch einen Spalt hindurchfliegen, geht das Interferenzmuster verloren. Die entscheidende Frage ist hier jedoch auch: Warum konnte ein Quant davor überhaupt durch beide Spalte gleichzeitig gehen? Weil sich das Teilchen unbeobachtet nicht entscheiden musste, sondern durch beide Spalte gleichzeitig gehen konnte. Klingt verrückt? Ja! – und entführt uns in die Welt der wirklich unglaublichen Quanteneffekte.

b Korrekt wäre eigentlich, dass wir lediglich keine Information darüber haben, durch welche Öffnung das Photon fliegt; beide Möglichkeiten „überlagern“ sich.

2.4 Quanteneffekte

Wenn man verstehen will, wie die Quantentechnologien funktionieren kommt man nicht umhin, sich mit den Effekten der Quantenwelt auseinanderzusetzen. Quantentechnologien der sogenannten zweiten Generation werden nur möglich, weil es inzwischen zunehmend gelingt, einzelne Quanten und ihre Effekte auszunutzen und Quantensysteme kontrolliert zugänglich zu machen. Die Quanteneffekte spielen unter anderem eine wichtige Rolle beim Bau von Quantencomputern und könnten eines Tages für die Realisierung abhörsicherer Kommunikation genutzt werden. Doch dazu mehr in Kapitel 3.

Dieses Kapitel und das Schaubild auf Seite 22 erklären die wichtigsten Effekte der Quantenwelt in aller Kürze. Dabei wird wieder versucht, Quanteneffekte mit Bildern aus unserer Alltagswelt zu beschreiben, obwohl klar ist, dass jeder Vergleich schnell an gewisse Grenzen stößt.

Superposition

In unserer wahrnehmbaren Welt kann ein Objekt zu einem Zeitpunkt nur einen einzigen Zustand haben. Man weiß beispielsweise mit Sicherheit, ob die Lampe im Wohnzimmer gerade an oder aus ist: Ihr Zustand ist festgelegt. Bei einem Quant oder Quantenobjekt hingegen können sich – vereinfacht gesagt – mehrere Zustände gleichzeitig „überlagern“. Sie können gewissermaßen beliebige Zwischenzustände – sogenannte Superpositionszustände – einnehmen. Das kann man sich so vorstellen, als wäre die Wohnzimmerlampe mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit an wie auch mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit aus. Solange man nicht versucht, sie zu beobachten, bleiben die Überlagerungen oder Zwischenzustände bestehen.

Beobachtereffekt oder der „Tod der Superposition“

Erst in dem Augenblick, in dem man das Quant oder Quantenobjekt beobachtet (man spricht hier auch von „messen“), legt es seinen Zustand fest. Im übertragenen Sinne wäre das so, als würde die Wohnzimmerlampe erst entscheiden, ob sie an oder aus ist, wenn jemand hinsieht. Der Beobachter muss hier nicht unbedingt ein Mensch sein, es kann auch ein Detektor sein, der Quanten beobachten und messen kann. Erst mit der Messung wird also im Nanokosmos der Zustand des Objekts auf einen Wert festgelegt. Dadurch befindet sich das Quant oder das Quantenobjekt auch nicht mehr in Superposition. Zur Erklärung des Beobachtereffekts und auch der Superposition wird häufig das Gedankenexperiment „Schrödingers Katze“ bemüht (siehe „Schrödingers Katze“ Seite 24).

Der Beobachtereffekt erklärt mitunter auch, weshalb wir Quanteneffekte in unserem Alltagsleben nicht wahrnehmen: Gerade dadurch, dass Quanten in unserer Welt ständig mit der Umgebung wechselwirken (also „beobachtet“ werden), kollabieren ihre Effekte.

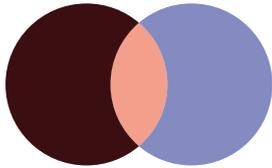
Verschränkung

Bei der Verschränkung sind zwei oder mehr Teilchen auf eine nicht intuitiv erklärbare Art und Weise miteinander verbunden, auch wenn sie räumlich weit voneinander entfernt sind. Man kann sich das etwa so vorstellen: Zwei winzige kleine Planeten treffen sich irgendwann irgendwo im Universum: Sie sind nun miteinander verbunden, also „verschränkt“, und bleiben das auch, wenn sie sich wieder getrennt haben und sich an zwei weit entfernten Orten des Universums befinden. Das Resultat dieser Verschränkung ist, dass sich beide Planeten mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit nach rechts und mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit nach links drehen. Dies ist eine sehr vereinfachte Darstellung dessen, was man in der Quantenphysik als „Spin“ oder in manchen Fällen als „Polarisation“ bezeichnet. Sobald man nun einen der beiden Planeten beobachtet, also misst, und damit seine bislang unbestimmte Drehrichtung festlegt, weiß man, dass sich der andere in die entgegengesetzte Richtung dreht. Das Beobachten löst auch hier gleichzeitig die Verschränkung der beiden Planeten auf.

Wussten Sie, dass ...

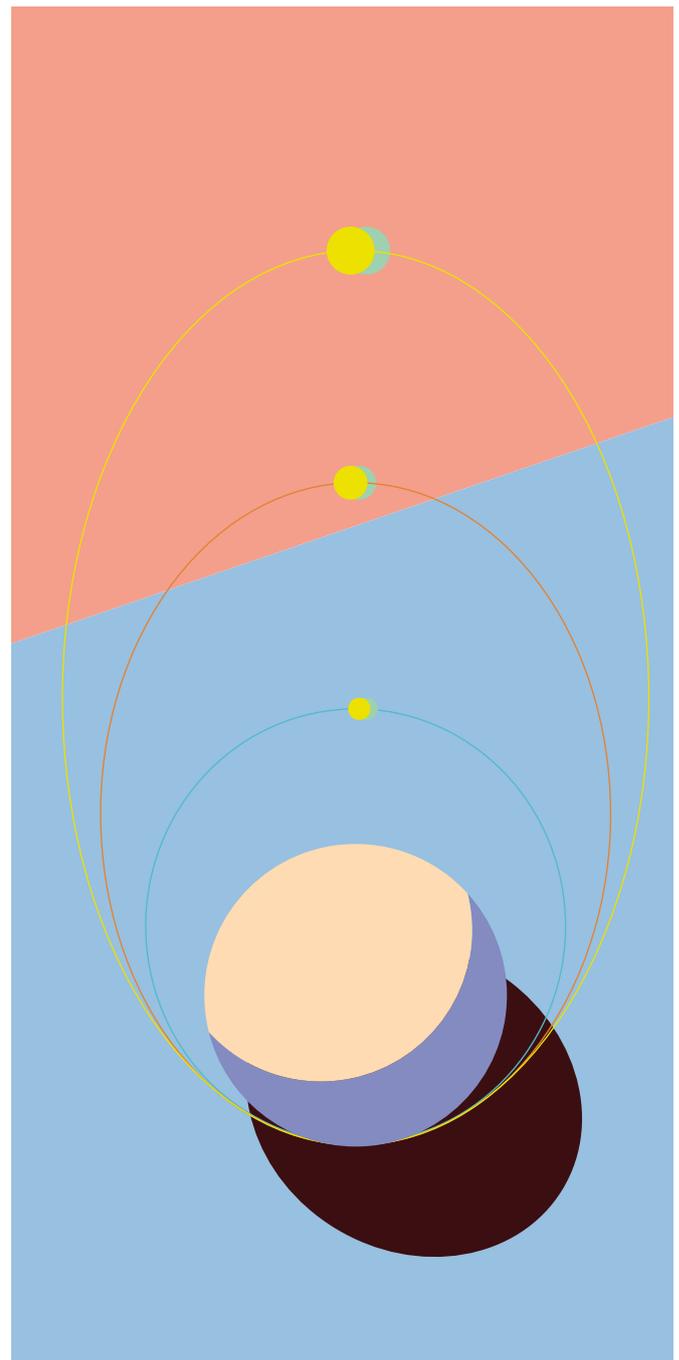
... es Einstein schwerfiel, an die Theorie der Verschränkung zu glauben, obwohl er selbst an ihrer Entstehung beteiligt war? Er nannte sie „spukhafte Fernwirkung“, und sie verleitete ihn zu seinem berühmten Satz: „Es scheint hart, dem Herrgott in die Karten zu gucken. Aber dass er würfelt und sich telepathischer Mittel bedient (wie es ihm von der gegenwärtigen Quantentheorie zugemutet wird), kann ich keinen Augenblick glauben.“⁷

„Sobald die Masse groß wird, dominiert die Teilcheneigenschaft über die Welleneigenschaft. Das ist eine Regel der Physik. Deshalb können wir die Effekte der kleinen Welt in unserer großen Welt nicht wahrnehmen.“



Fun Fact: Die Größe des Quantenobjekts

Sie erinnern sich an das Doppelspaltexperiment aus Kapitel 2.3? Je größer die Masse eines Teilchens ist, desto schwieriger wird es, in einem Experiment seine Welleneigenschaften zu beobachten: Irgendwann werden diese verschwindend gering. Deswegen landet der Fußball auch nur an einer Stelle im Tor, selbst wenn der (geübte) Fußballer mit verbundenen Augen schießt und kein Zuschauer dabei ist, also kein Beobachtereffekt wirken kann. Die Masse des Fußballs ist viel zu groß. Nur die winzig kleinen Quantenobjekte landen im Setting ohne Beobachter auf ihrem Detektor in einem Interferenzmuster, zeigen also ihre Welleneigenschaften.



- c Doppelspaltexperimente können nicht nur mit Photonen, sondern sogar mit recht großen Molekülen durchgeführt werden. „Recht groß“ bedeutet jedoch immer noch weniger als zum Beispiel die Größe eines Proteins und gilt auch nur, wenn das Molekül eine sehr geringe Masse hat.

Phänomene der klassischen Physik versus Quantenphysik

Was wäre, wenn die Regeln der Quantenphysik auch für große Objekte in unserer Alltagswelt gelten würden ...?



Zwei Freunde, Quentin und Alice, haben sich als Urlaubssouvenir jeweils eine Münze gekauft. Bevor sie wieder zurück in ihre Heimat fliegen, gehen sie eine Wette ein. Sie flippen beide ihre Münzen und fangen sie, noch während sie sich in der Luft drehen, in einer Kugel ein. Quentin tippt, dass ihre Münzen die gleiche Seite zeigen, Alice wettet, dass sie auf unterschiedlichen Seiten gelandet sind. Sie beschließen, ihre Münzen erst daheim wieder anzuschauen, und machen sich auf den Weg nach Hause. Quentin fliegt nach Deutschland, Alice nach Australien.

Klassische Physik



Eindeutigkeit

In der Welt, wie wir sie kennen, zeigt bei der Münze in der Kugel eindeutig eine Seite nach oben und eine nach unten.

Quantenphysik



Superposition

In der Quantenwelt kann sich die Münze in einem Zustand der Superposition befinden: Mit gleicher Wahrscheinlichkeit zeigen sowohl Kopf als auch Zahl nach oben. Die beiden Zustände überlagern sich.



Objektivität

Nach den Gesetzen der klassischen Physik ist der Zustand der Münze immer eindeutig festgelegt, egal ob Alice sie beobachtet oder nicht.



Unabhängigkeit

In der Welt der klassischen Physik verhalten sich die Münzen von Alice und Quentin vollkommen unabhängig voneinander. Wenn Quentin seine Kugel öffnet und Zahl sieht, steht dadurch nicht fest, welche Seite Alices Münze zeigen wird.



Beobachtereffekt

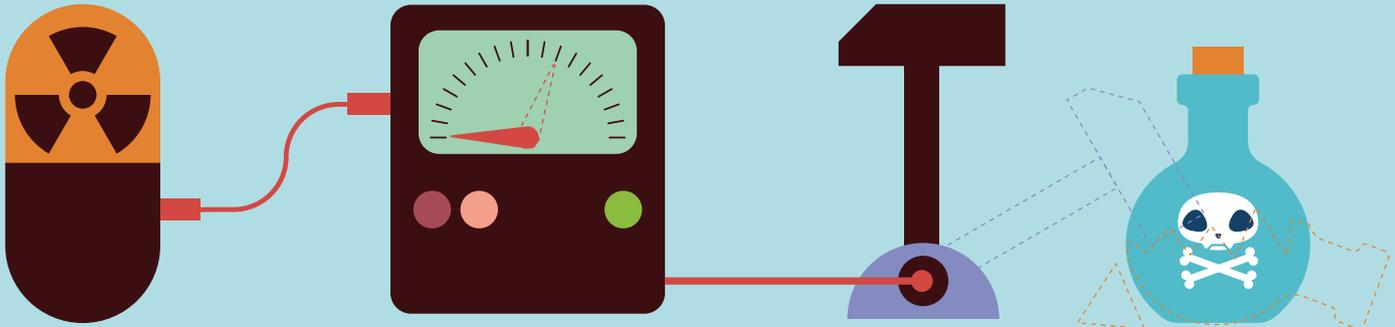
Solange Quentin die Münze in der Quantenwelt nicht betrachtet, ist sie in Superposition. Erst wenn Quentin die Kugel öffnet und die Münze anschaut, entscheidet sie sich zufällig für einen bestimmten Zustand und zeigt entweder Kopf oder Zahl.



Verschränkung

In der Quantenwelt treffen sich die Münzen von Quentin und Alice am Urlaubsort und sind fortan verschränkt. Sobald Quentin seine Kugel in Deutschland öffnet und die Münze betrachtet, entscheidet sie sich zufällig für einen bestimmten Zustand, in unserem Beispiel für Zahl. Im selben Augenblick steht fest, dass Alices Münze beim Öffnen der Kugel Kopf zeigt.

Wanted: Dead AND Alive – Schrödingers Katze



Superposition und Beobachtereffekt – beziehungsweise die (für uns so wirkende) Seltsamkeit dieser Effekte – veranlassten Erwin Schrödinger zu einem Gedankenexperiment mit einer Katze in einer Kiste. Dabei ging es ihm ursprünglich gar nicht um eine Erklärung von Superposition und Beobachtereffekt in einfachen Worten, sondern um das Ad-absurdum-Führen der beiden Konzepte. Eine Katze, die gleichzeitig tot und lebendig ist – also bitte, wie ist das möglich?

Der makabre Aufbau des Gedankenexperiments:

Eine Katze befindet sich in einer Box. Diese enthält eine Apparatur mit einer kleinen Menge von radioaktivem Material und einem Geigerzähler, der messen kann, ob ein radioaktiver Zerfall geschehen ist.

Die Mechanik des Apparats:

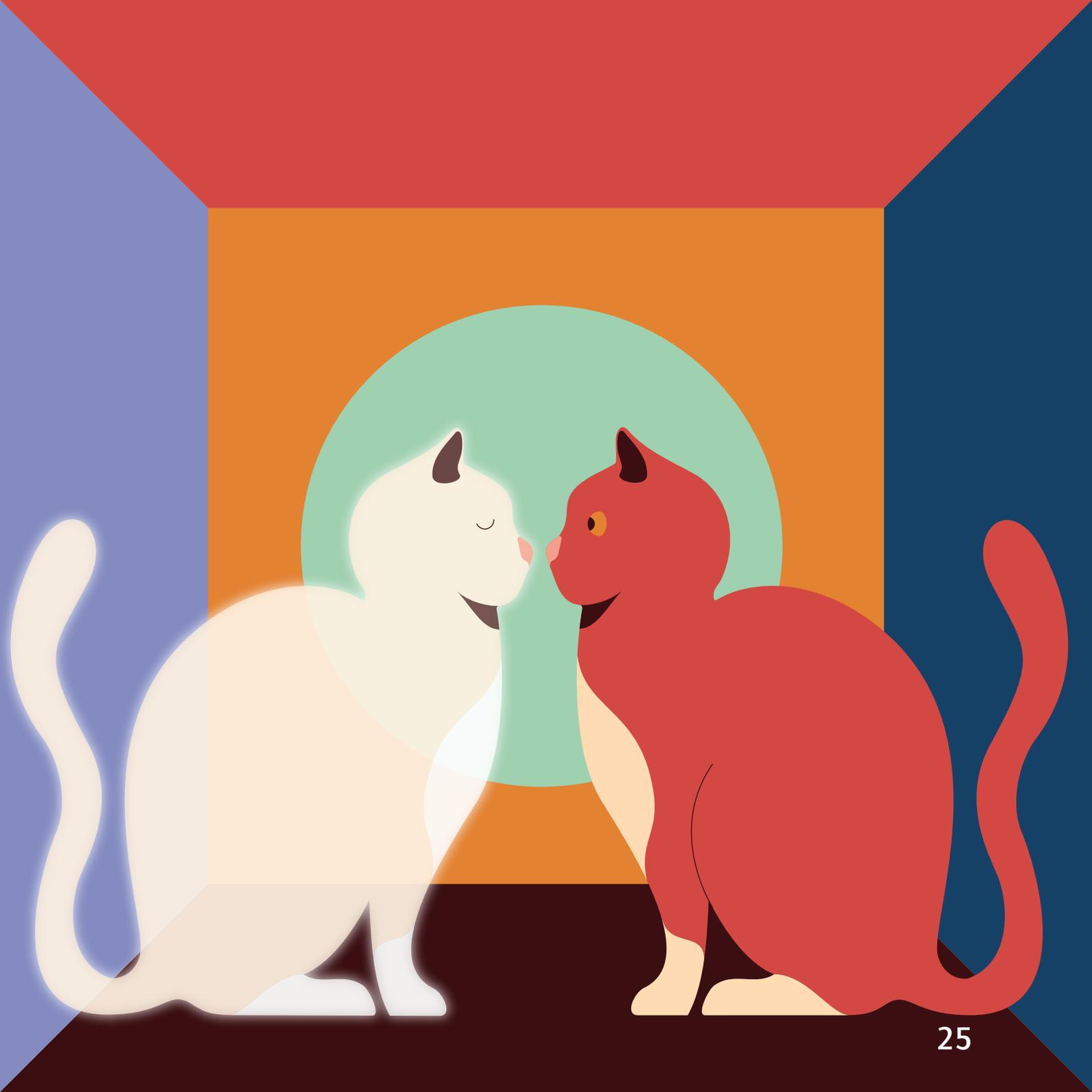
Das radioaktive Material ist so gewählt, dass innerhalb der nächsten Stunde mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit eines der Atome zerfällt, aber mit gleicher Wahrscheinlichkeit nicht zerfällt. Sobald der Geigerzähler einen radioaktiven Zerfall registriert, betätigt der Detektor ein Hämmerchen, das eine Flasche mit Blausäure zertrümmert und die Katze somit dem Gift aussetzt.

Atom und Katze im Limbo:

Sieht man nun von außen auf die verschlossene Box, weiß man nicht, ob das Atom zerfallen ist oder nicht. Diese Ungewissheit über den Zustand des radioaktiven Atoms überträgt sich nun im Prinzip auf das Makroobjekt Katze. Ergo: Auch die Katze befindet sich in einer Art Zwischenzustand, sie ist also mit fünfzigprozentiger Wahrscheinlichkeit lebendig und mit fünfzigprozentiger Wahrscheinlichkeit nicht. Das bedeutet nicht, dass die Katze gleichzeitig tot und lebendig ist, vielmehr ist ihr Zustand unbestimmt. Sie befindet sich im Quantenzustand der Superposition, in dem sich die beiden Zustände (tot und lebendig) überlagern, solange das Innere der Box nicht beobachtet wird. Wird die Box geöffnet und nachgeschaut, ist das Atom entweder zerfallen oder nicht, und die Katze befindet sich in nur einem Zustand: lebendig oder tot.

Das Paradoxon der tot-lebendigen Katze:

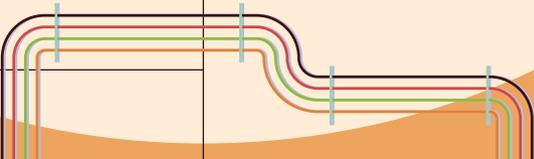
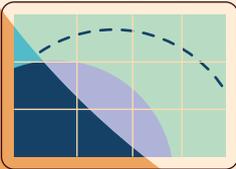
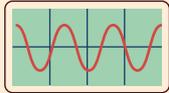
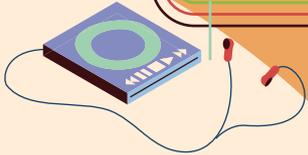
Basierend auf dem Verständnis unserer vertrauten Alltagswelt ist es absurd, dass sich die Katze in einem Überlagerungszustand aus tot und lebendig befindet, der so lange anhält, bis ihr Zustand durch eine Beobachtung festgelegt wird. Schrödinger zeigt damit, wie problematisch die direkte Übertragung quantenmechanischer Begriffe und Gesetze auf die makroskopische Welt ist – und zeichnet gleichzeitig (wahrscheinlich unabsichtlich) ein Bild zu Vorgängen, die ansonsten schwer nachzuvollziehen sind.



3

Was sind Quantentechnologien der ersten und der zweiten Generation, und welche Potenziale haben sie für Wirtschaft und Gesellschaft?

Von der „Überlegenheit der Quanten“, auch „Quantumsupremacy“ genannt, berichten viele Medien und beschwören eine nahe Zukunft herauf, in der Quantencomputer jeden Superrechner alt aussehen lassen werden. Stehen wir wirklich am Anfang einer Quantenepoche? Gleich vorweg: Einen Quantencomputer für universelle Aufgaben gibt es (noch) nicht. Die Entwicklungen werden von den Medien interessiert begleitet. Diese prägten auch gleich einen Begriff für die vielversprechenden neuen Quantentechnologien: die „zweite Quantenrevolution“. Ältere Quantentechnologien, zu denen beispielsweise auch der Laser oder die Atomuhr gehören, werden so kurzerhand ex post zur „ersten Quantenrevolution“, obwohl sich viele quantentechnologische Entwicklungen eher stetig fortentwickelt haben. Wie sich dieser technologische Fortschritt vollzogen hat, lesen Sie auf den folgenden Seiten.



3.1 Quantentechnologien der ersten Generation und ihre Merkmale

Es ist sehr schwierig oder sogar unmöglich, Quantentechnologien der sogenannten ersten und zweiten Revolution ganz trennscharf voneinander abzugrenzen. Zwar gab es im Vorfeld der zweiten Revolution einige Schlüsselforderungen wie die gezielte Herstellung verschränkter Zustände. Einige andere notwendige Technologien verbesserten sich jedoch nicht abrupt, sondern im Laufe der vergangenen Jahrzehnte graduell. Fachleute bevorzugen für die verschiedenen Fortschrittslevel von Quantentechnologien deshalb den Begriff „Generation“.

„Das Wissen hinter Quantentechnologien der zweiten Generation war teilweise schon seit den 1950er Jahren vorhanden, nur noch nicht in Technologien umsetzbar.“

Will man die Quantentechnologien in Generationen einteilen, dann bietet sich folgende gedankliche Unterscheidung an:

Für die Erfindungen der ersten Generation – wie Laser oder Atomuhr – wurden die im letzten Kapitel dargestellten Quanteneigenschaften eher „einfach nur“ kollektiv genutzt. In der zweiten Generation versuchen Physikerinnen und Physiker nun, diese Eigenschaften beziehungsweise den Zustand von individuellen Quantensystemen gezielt zu manipulieren, um neue Funktionalitäten zu schaffen. Insbesondere die systematische Nutzung der Verschränkung ist ein Merkmal der zweiten Generation.

Letzten Endes ist die genaue Abgrenzung beider Generationen nebensächlich. Wichtig ist nur, zu verstehen, dass man mit Quantentechnologien bessere Sensoren, Komponenten und Anwendungen entwickeln und bereitstellen kann beziehungsweise können wird. Ob diese neuen Technologien tatsächlich „revolutionär“ sind, wird sich erst in der Retrospektive zeigen. Das Potenzial dazu haben sie allemal.

Wie wir heute wissen, legte Max Planck bereits um 1900 wichtige theoretische Grundlagen für die Quantenphysik und damit auch die Quantentechnologien. Wie wichtig seine Erkenntnisse waren, lässt sich nicht nur an dem Nobelpreis ablesen, den er dafür erhielt, sondern auch daran, dass wir so gut wie jede einzelne Quantentechnologie der ersten Generation aus unserem Alltag kennen. Auf die eine oder andere Weise erleichtern sie – teilweise schon seit Jahrzehnten – unser Leben. Das folgende Schaubild gibt einen Überblick.



1970er

In der Medizin sind dank der Quantenphysik neuartige bildgebende Verfahren möglich, beispielsweise die Magnetresonanztomografie (MRT). Dadurch können wir Gewebe und Organe des menschlichen Körpers besser verstehen und Krankheiten genauer diagnostizieren.



1960er

Durch die Erkenntnisse der Quantenphysik können ultrapräzise Atomuhren gebaut werden, die in 300.000 Jahren nur eine Sekunde nachgehen. Neuere optische Atomuhren haben das Potenzial, in mehreren Milliarden Jahren nur eine Sekunde falsch zu gehen. Mit dieser Genauigkeit lassen sich die fundamentalen Gesetze der Physik überprüfen, zum Beispiel, ob unsere Naturkonstanten auch tatsächlich konstant sind (siehe Kapitel 3.2.3).



1900

Die theoretischen Grundlagen der Quantenphysik legt Max Planck bereits vor über hundert Jahren, als er erstmals das Lichtquant als kleinstmögliches Energiepackchen definiert.

Quantentechnologien der ersten Generation

Quantentechnologien der sogenannten ersten Generation durchdringen unsere moderne Gesellschaft.



1990er bis 2000er

Dank der Quantenphysik und auf Basis der Atomuhren werden Satellitennavigationssysteme entwickelt, die erstmals auch Privatpersonen zugänglich gemacht werden können.

2

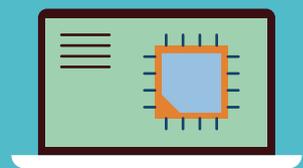
Gipfel der Quantentechnologien der zweiten Generation

1

Gipfel der Quantentechnologien der ersten Generation

1960er

Alle Laser, die wir heute kennen, basieren auf reinen Quantenphänomenen.



1920er bis 1940er

Unser Wissen aus der Quantenphysik über Halbleitermaterialien hat zur Entwicklung von Transistoren – den elementaren Bestandteilen in jedem Computerchip – geführt. Computer haben unsere Lebensweise revolutioniert.

3.2 Quantentechnologien der zweiten Generation

Im Unterschied zu Quantentechnologien der ersten Generation sind wir dank technischem Fortschritt heute in der Lage, einzelne Quantensysteme kontrolliert zu manipulieren – mit dem Ziel, bahnbrechende innovative Technologien zu entwickeln. Die folgenden Seiten geben einen ersten Einblick in Funktionsweisen und Potenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation.

„Die sogenannte zweite Quantenrevolution ist bisher nur eine Annahme. Wir hoffen, dass sie sich in Zukunft tatsächlich als Revolution erweisen wird.“

3.2.1 Quantencomputing und Quantensimulation

Was uns heute ganz selbstverständlich erscheint – Videos oder Hunderte von Bildern in hoher Qualität auf unserem Smartphone speichern –, war aufgrund der Datenmengen bis vor einigen Jahren undenkbar. Auch in Industrie und Forschung wird heute mit riesigen Datenmengen und immer komplexeren Computerprogrammen gearbeitet. All dies bedarf immer größerer Rechenleistung.

In den vergangenen sechzig Jahren sind Computer immer kleiner und leistungsstärker geworden. Diese Verbesserungen stoßen jedoch irgendwann an physikalische Grenzen. Computern ist gewissermaßen eine Geschwindigkeitsbegrenzung gegeben. Interessanterweise fängt sie dort an, wo die Transistoren auf dem Herzstück von Rechnern, der CPU, so klein werden, dass dort nicht mehr die Prozesse stattfinden können, die dort eigentlich stattfinden sollen, weil diese von Quanteneffekten gestört werden – die hier nicht hilfreich sind.⁹

Worin besteht das Potenzial von Quantencomputern?

Im Vergleich zu klassischen Computern, die immer nur eine Berechnung nach der anderen durchführen können, ermöglichen Quantensysteme durch ihre besonderen Eigenschaften die Verarbeitung mehrerer paralleler Rechenoperationen (für einen genaueren Vergleich zwischen Quanten- und klassischen Computern siehe auch Seite 33 und das Schaubild auf Seite 34).

Das heißt, potenziell können Quantencomputer bestimmte Rechenaufgaben, für die es die passenden Quantenalgorithmen gibt, in extrem kurzer Zeit lösen. Tatsächlich haben die ersten Quantencomputer heute zumindest bereits in Ansätzen bewiesen, dass sie bestimmte Aufgaben in wenigen Minuten bewältigen können, für die ein klassischer

Computer mit sehr großer Rechenleistung Tausende von Jahren gebraucht hätte. Solche direkten Vergleiche von klassischen „Superrechnern“ mit Quantencomputern bei der Lösung sehr spezieller Aufgaben haben in Fachkreisen dazu geführt, eine „Quantenüberlegenheit“¹⁰ festzustellen, die die Medien bereitwillig aufgenommen und verbreitet haben.

Industrieunternehmen und Regierungen versprechen sich daher von Quantencomputern große Fortschritte bei der Lösung spezieller Probleme, zum Beispiel in der Kryptografie (siehe Kapitel 3.2.2) und in der Künstlichen Intelligenz (KI). Die Schnittstelle zwischen KI und Quantencomputing¹¹ steckt zwar noch in den Kinderschuhen, wird aber heute schon eifrig erforscht und ist besonders für die Wirtschaft interessant, etwa wenn es um neue, innovative Anwendungen in der Produktion geht, denn für viele Problemstellungen der KI sind höhere Rechenkapazitäten vonnöten. Auch verspricht man sich große Fortschritte bei der Lösung komplexer Optimierungsprobleme, zum Beispiel die Berechnung der optimalen Route bei der Auslieferung von Waren unter Verwendung verschiedener Lieferanten und Transportmittel. Quantencomputer arbeiten hier potenziell nicht nur erheblich schneller, sondern können zukünftig komplexe Aufgaben lösen, die heute noch als unlösbar gelten.

Vor welchen Herausforderungen stehen Quantencomputer?

Derzeit ist der Nutzen von Quantencomputern in der Anwendung noch sehr begrenzt. Die Rechenbasis eines Quantencomputers sind sogenannte Quantenbits, auch „Qubits“ genannt. Es gibt viele unterschiedliche Herstellungsmethoden und Arten von Qubits; hier spricht man auch von unterschiedlichen „Plattformen“ (zu den verschiedenen Technologien, Qubits zu erzeugen, siehe auch die Tabelle „Verschiedene Arten von Qubits“ auf Seite 38). Derzeit wird viel dazu geforscht, und momentan sind die Technologien der Supraleiter und der Ionenfallen führend. Bisher hat sich jedoch noch keine dieser Plattformen wirklich durchgesetzt.

Qubits befinden sich im Zustand der Superposition und können miteinander verschränkt sein. Diese Eigenschaf-

ten führen dazu, dass ein Quantencomputer tatsächlich eine Rechenoperation gleichzeitig für mehrere Zahlen ausführen kann. Wie Quanten und Quantenobjekte reagieren auch die Qubits extrem sensibel auf äußere Einflüsse. Störungen und Vibrationen aus der Umgebung führen sozusagen zu einer „Messung“ (ohne dass wir das Ergebnis kennen), die Superposition und Verschränkung zerstören (siehe Kapitel 2.4). Dann verhält sich ein Qubit wieder ganz normal nach den Regeln der klassischen Physik; der Quantencomputer funktioniert nicht mehr beziehungsweise gibt falsche Ergebnisse aus.

Die Zeit, in der Berechnungen durchgeführt werden können, ist die Kohärenzzeit. Im sogenannten supraleitenden Quantencomputer sind das aktuell nur sehr, sehr wenige Sekundenbruchteile, um die 0,1 Millisekunden. Zwar finden während dieser kurzen Kohärenzzeit einige Hundert Rechenoperationen statt; sie reicht jedoch noch nicht für eine umfassende Fehlerkorrektur der Rechenoperationen. Die Verlängerung der Kohärenzzeit ist deshalb eine der größten Herausforderungen für die Zukunft.

Damit der supraleitende Quantencomputer überhaupt arbeiten kann, muss man den Chip, auf dem sich die Qubits befinden, isolieren und kühlen. Nur so kann selbst die sehr kurze Kohärenzzeit erreicht und können die Qubits für die Berechnung startklar gemacht werden. Deshalb muss diese Art von Quantencomputern in einem abgeschotteten Raum stehen; sie benötigen außerdem eine große Kühlapparatur. Bevor sie ihr volles Potenzial entfalten können, müssen zudem Methoden entwickelt werden, mit deren Hilfe bis zu Tausende, wenn nicht sogar Millionen Qubits verlässlich kontrolliert werden können. Dies ist bisher nur für eine Qubit-Anzahl von circa 50 bis 70 wirklich möglich.

Im Quantencomputer, der mit den sogenannten Ionenfallen arbeitet, sind dies aktuell nur etwa zwanzig Qubits. Er hat jedoch den Vorteil, dass er bei normaler Raumtemperatur arbeiten kann, wobei dafür im Gegenzug viele Laser zum Fangen und Kühlen der Ionen sowie eine Vakuumkammer eingesetzt werden müssen. Auch die Kohärenzzeit ist mit etwa 15 Minuten schon sehr lang, was ihn weniger fehleranfällig als den supraleitenden Quantencomputer macht.

Wer sagt eigentlich, dass ...

... der Quantencomputer ein Allzweckgerät sein muss, das alle möglichen Arten von Rechenoperationen löst? Einem im Jahr 2019 unter großem medialen Interesse vorgestellten Quantencomputer wird beispielsweise vorgeworfen, dass er nur auf dieses eine, spezielle Rechenproblem optimiert worden sei, das er äußerst schnell löste.

Tatsächlich werden heute auch klassische Superrechner auf bestimmte Rechenoperationen optimiert, die sie dann eben besonders schnell lösen – beispielsweise auf die Bereitstellung individueller Daten in extrem kurzer Zeit. Ein Beispiel dafür ist die Erstellung von Webseiten „on the fly“ – also eine Personalisierung in dem Augenblick, in dem der Nutzer oder die Nutzerin auf die Seite kommt. Eine solche Personalisierung ist genau genommen immer dieselbe Art von Rechenoperation, jedoch tauchen dabei unendlich viele Spielarten auf.

Das ist keine Aufgabe, die ein Quantencomputer übernehmen könnte, aber entsprechend kann auch der Quantencomputer auf einen Algorithmus optimiert werden, zum Beispiel auf den Shor-Algorithmus, der das mathematische Problem der Primfaktorzerlegung löst (siehe Seite 44). Hier stößt wiederum der klassische Superrechner an seine Grenzen.

Die Potenziale der Quantencomputer im Allgemeinen sind groß, wenn sie eines Tages ausgeschöpft werden können: Kommt bei einem klassischen Computer ein einziges Bit dazu, verändert sich die Rechenleistung nur minimal. Bei einem Quantencomputer hingegen verdoppelt sich die Rechenleistung mit jedem zusätzlichen Qubit. Wichtig zu wissen ist dabei aber auch, dass es nicht rein auf die Anzahl der Qubits ankommt. Es geht beispielsweise auch um eine bessere Fehlerkorrektur (die jedoch auch zahlreiche Qubits benötigt), höhere Messgenauigkeit und längere Kohärenzzeit, damit ein Quantencomputer schnell und zuverlässig rechnen kann. Teilweise wird von Expertinnen und Experten dementsprechend bei der Leistungsfähigkeit nicht mehr nur von der Anzahl der Qubits gesprochen, sondern vom „Quantenvolumen“, das – auch, aber nicht ausschließlich – mit der Anzahl der Qubits wächst.

Der Quantencomputer – Hype oder nahe Zukunft?

Wann wir tatsächlich mit praktikabel einsetzbaren Quantencomputern rechnen können, weiß noch niemand. Es könnte noch mehrere Jahrzehnte dauern, bis wir gute, zuverlässig funktionierende und skalierbare oder gar universelle Quantencomputer haben. Bisher ist nicht einmal klar, welche der Plattformen, also die „Art“ der verwendeten Qubits, sich durchsetzen wird. Ob die beiden momentan führenden Technologien der Supraleiter und der Ionenfallen dann auch auf Dauer die besten sein werden, bleibt abzuwarten. Es wird auch weiter an neuen und besseren Materialien für Qubits geforscht, in denen die Quantensysteme weniger störanfällig „arbeiten“ können (siehe hierzu auch die Tabelle „Verschiedene Arten von Qubits“).

Es sei außerdem darauf verwiesen, dass es nicht nur um die rein technologische Entwicklung von Qubits geht, sondern auch um neue Wege der Programmierung: Es muss eine komplett neue Softwarearchitektur entwickelt werden, die speziell auf den Quantencomputer ausgerichtet ist.

Selbst wenn ein voll funktionsfähiger, skalierbarer Quantencomputer irgendwann entwickelt ist, wird dieser aufgrund der aufwendigen Hardware vermutlich nicht bei jeder Privatperson in der Wohnung stehen, sondern eher als Co-Prozessor im großen Rechenzentrum von Unternehmen neben anderen klassischen Rechnern für ganz spezielle Aufgaben genutzt werden. Quantencomputer sollen zumindest in der gegenwärtigen Vorstellung also nicht die klassischen Computer ersetzen, sondern ganz spezifische Probleme bewältigen und herkömmliche Rechner komplementieren. Man soll zwar niemals „nie“ sagen – man dachte zu Beginn des Informationszeitalters auch, der klassische Computer würde sich nicht allgemein durchsetzen –, vor übertriebenen Erwartungen sei an dieser Stelle jedoch gewarnt.

Quantensimulation

Eine der wichtigsten Anwendungen für den Quantencomputer könnte die Quantensimulation werden. Dabei versucht man, komplexe Quantensysteme zu simulieren, die man heute sogar mit einem Supercomputer nicht virtuell nachbauen kann. Beispielsweise ist bei der Suche nach neuen Medikamenten das computergestützte Simulieren von Proteinen eine zutiefst komplexe, aber zugleich besonders vielversprechende Methode in der Arzneimittelentwicklung. Eine Quantensimulation kann man also als ein Experiment verstehen, das nicht, wie heute üblich, im Labor, sondern auf einem Quantencomputer durchgeführt wird.

„Wir müssen bei den Qubits unterschiedliche Wege ausprobieren, auch wenn wir ab und zu gegen die Wand rennen.“

Richard Feynmans Traum auf dem Weg zur Realität

„[Ich] kann [...] mit Sicherheit behaupten, dass niemand die Quantenmechanik versteht“¹² ist eines der berühmtesten Zitate von Richard Feynman. Er gilt als einer der größten Physiker des 20. Jahrhunderts und wurde für seine Arbeiten zur Quantenelektrodynamik 1965 mit dem Nobelpreis ausgezeichnet. Über seinen Tod hinaus hat er den Ruf eines Visionärs und Querdenkers. In einem berühmt gewordenen Vortrag prägte er 1959 den Satz: „There is plenty of room at the bottom“ (zu Deutsch: „Unten ist eine Menge Platz“).³ In diesem Vortrag beschreibt er, wie wir in Zukunft Technologien verwenden, die nur ein paar Mikro- und Nanometer groß sind. Der Anstoß für die heute unverzichtbaren Nanotechnologien wie den Computerchip war damit gegeben. Feynman pflegte einen unkonventionellen Lehr- und Vortragsstil, mit dem er es schaffte, auch komplexe physikalische Themen anschaulich zu erklären. 1981 hielt er seinen zweiten legendären Vortrag: „Physik mit Computern simulieren“. Er sprach erstmals von Quantencomputern, mit denen es möglich sein würde, quantenphysikalische Vorgänge in der Natur präzise zu simulieren. Durch das bessere Verständnis dieser Vorgänge könne man neue Anwendungen, etwa in der Chemie, Medizin und in der Materialwissenschaft, entwickeln. Heute, fast vierzig Jahre später, sind wir dabei, seinen Traum Realität werden zu lassen.³

Klassischer Computer versus Quantencomputer: Wie rechnen sie?

Bei klassischen Computern ist die kleinste Informationseinheit ein „Bit“. Ein Bit kann zwei unterschiedliche Zahlen darstellen, also entweder eine Null oder eine Eins. Null bedeutet zum Beispiel „Strom aus“, und eins bedeutet „Strom an“. In Computern werden mehrere aufeinanderfolgende Bits zu einer Einheit zusammengefasst, um mit ihnen größere Zahlen darzustellen. Acht Bits ergeben zum Beispiel ein Byte, wodurch sich alle Zahlen von 0 bis 255 darstellen lassen. Moderne Computer verwenden inzwischen größere Einheiten von meist 32 oder 64 Bit, wobei sich mit letzteren grob gesagt die Zahlen von minus 9 Trillionen bis plus 9 Trillionen darstellen lassen.

Um beispielsweise die Zahlen 0 bis einschließlich 15 darzustellen, benötigt man vier Bit (siehe Schaubild auf der nächsten Seite). Genauso wie wir in unserem Dezimalsystem zum Beispiel eine Einer-, Zehner- und Hunderterstelle haben, repräsentiert das erste Bit die erste Stelle, das zweite Bit die zweite Stelle und so fort.

Mit diesen Zahleneinheiten rechnet der Computer dann weiter. Dabei schickt er sie durch elektronische Schalter, sogenannte Transistoren. Je nachdem, wie diese Transistoren angeordnet und kombiniert sind, können damit unterschiedliche Rechenoperationen ausgeführt, zum Beispiel zwei Zahleneinheiten addiert werden. Eine bestimmte Anordnung dieser Transistoren für eine bestimmte Rechenoperation nennt man „Logikgatter“. Transistoren in modernen Computern sind mittlerweile extrem klein und haben eine Größe von circa 50 Nanometern. Der bisher kleinste gebaute Transistor ist sogar kleiner als 10 Nanometer. Zum Vergleich: Ein Blatt Papier hat eine Dicke von 100.000 Nanometern. Selbst unsere roten Blutkörperchen sind über hundert Mal größer als ein moderner Transistor.

Moderne Computer haben die sequenzielle Verarbeitung mit Bits nahezu perfektioniert. Sie können zwei Milliarden Arbeitsschrit-

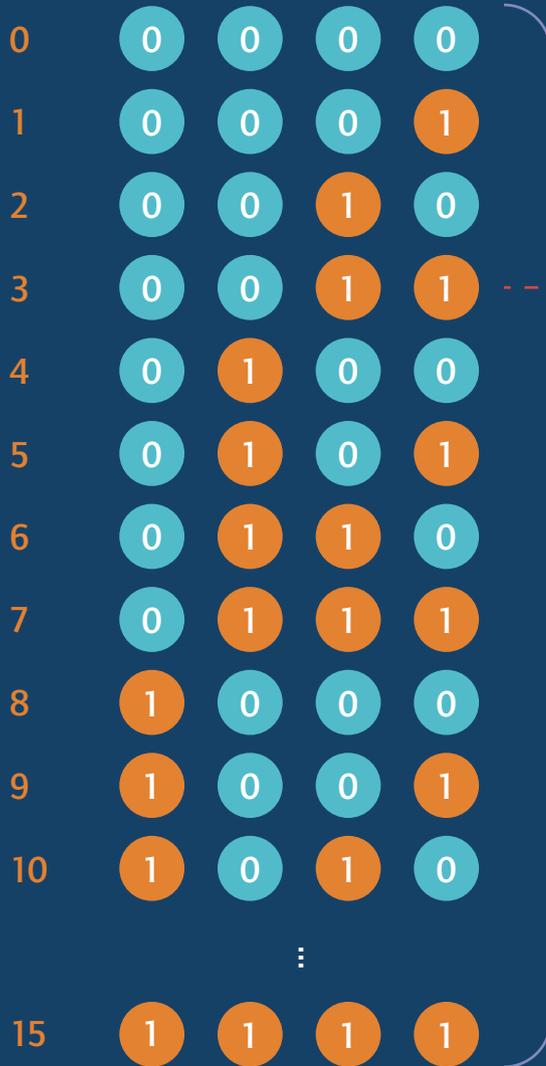
te pro Sekunde verarbeiten. Trotzdem gibt es Aufgaben, für die ein klassischer Computer zu langsam ist.

Hier kommt der Quantencomputer ins Spiel, der mit Qubits statt Bits rechnet. Ein Qubit kann ebenso wie ein Bit eine Eins oder eine Null repräsentieren. Um mit Qubits wirklich effektiv rechnen zu können, müssen aber die Superposition und die Verschränkung genutzt werden. Wie schon bei den vier klassischen Bits zuvor können auch mit vier Qubits die einzelnen Zahlen von 0 bis 15 dargestellt werden. Der Trick für die Rechenleistungssteigerung beim Qubit ist jedoch, dass es sich auch in einem Superpositionszustand befinden kann, in dem es mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eine Eins und mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit eine Null zeigt. Aufgrund des Superpositionszustands können mit vier Qubits deshalb auch simultan alle Zahlen von 0 bis 15 auf einmal dargestellt werden. In jedem Rechenvorgang wird dann das Ergebnis für all diese Zahlen gleichzeitig parallel berechnet. Während man also beim klassischen Computer die Berechnung für jede einzelne Zahl einzeln nacheinander durchführen muss, kann man beim Quantencomputer mit nur vier Qubits schon eine Berechnung für alle Zahlen von 0 bis 15 gleichzeitig durchführen. Dies ist erst durch die Kombination von Verschränkung und Superposition möglich. Darin liegt der enorme Vorteil des Quantencomputers. Benutzt man beim Quantencomputer nicht vier, sondern 20 Qubits, kann man bereits über eine Millionen Zahlen (2^{20}) parallel darstellen und berechnen.

Aber was kommt bei diesen Berechnungen nun heraus? Das Ergebnis einer Berechnung durch einen Quantencomputer ist eine einzelne, ablesbare Zahl, die aus den vielen parallelen Rechnungen hervorgegangen ist: eine Lösung des Problems, die mit der höchsten Wahrscheinlichkeit richtig ist.

Der klassische Computer

Der klassische Computer repräsentiert Information in Form von aufeinanderfolgenden Einsen und Nullen, auch „Bit“ genannt.



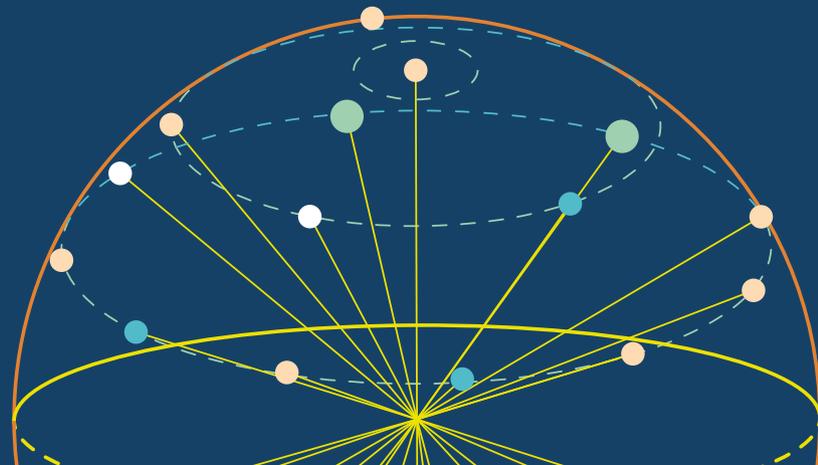
Der Quantencomputer

Der Quantencomputer repräsentiert Information in Form von Qubits. Diese können eine einzelne Zahl, zum Beispiel die 3, aber auch alle Zahlen auf einmal darstellen.

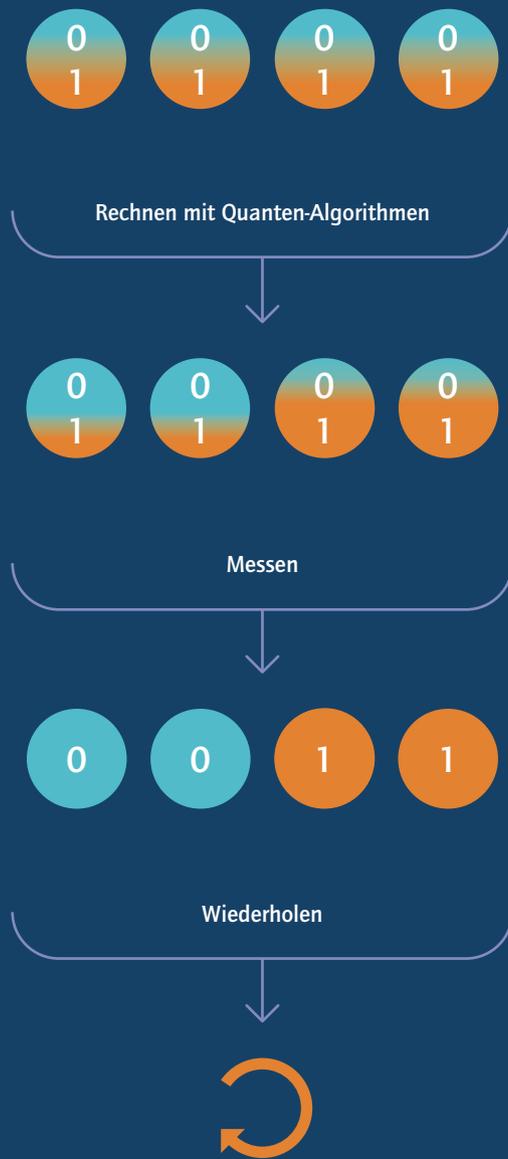
Einzelne Zahl 3



Superposition aller Zahlen von 0 - 15



Wie rechnet der Quantencomputer?



Sogenannte Quantenalgorithmen verändern die Wahrscheinlichkeiten der Superpositionszustände der einzelnen Qubits. So wird der Zustand, der die richtige Lösung repräsentiert, immer wahrscheinlicher und die falschen Lösungen immer unwahrscheinlicher.

Danach „misst“ man das Ergebnis und die Superposition endet.

Da hierbei das Wahrscheinlichkeitsprinzip gilt, also selbst die falschen Lösungen mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit auftreten können, führt man die Berechnung und die Messung viele Male durch, bis das Ergebnis mit der gewünschten statistischen Genauigkeit vorliegt.

Klassischer Computer versus Quantencomputer

Ein klassischer Computer müsste die Berechnungen nacheinander für alle Zahlen von 0 bis 15 durchführen, um auf das richtige Ergebnis zu kommen. Der Quantencomputer kann dies gleichzeitig für alle Zahlen berechnen und gibt am Ende das richtige Ergebnis aus.

Quantencomputer: Cool, aber wie funktio- niert der eigentlich?

In den Medien wird der Quantencomputer gerne als „Supercomputer“ der Zukunft dargestellt. Hier wird das Funktionsprinzip beispielhaft anhand eines Quantencomputers, der supraleitende Qubits verwendet, erklärt. Das ist einer der möglichen Ansätze, um Quantencomputer zu realisieren.

Datenübertragung

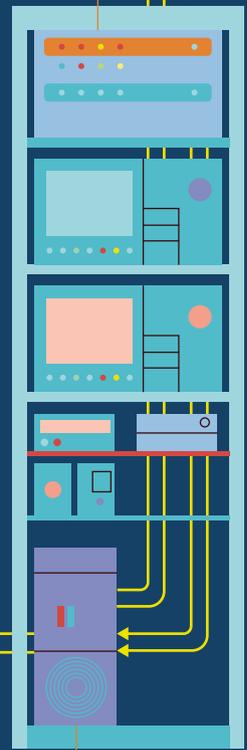
Mit dem Quantencomputer werden Anweisungen und Daten in Form von Mikrowellen ausgetauscht. Digitale Signale vom Steuercomputer werden durch eine Mikrowellenelektronikeinheit in Mikrowellenimpulse verwandelt und an den Quantencomputer weitergeleitet. Umgekehrt werden wie andersrum die Mikrowellensignale, die der Quantencomputer als Output schickt, in digitale Signale umgewandelt, die der Steuercomputer dann lesen kann.

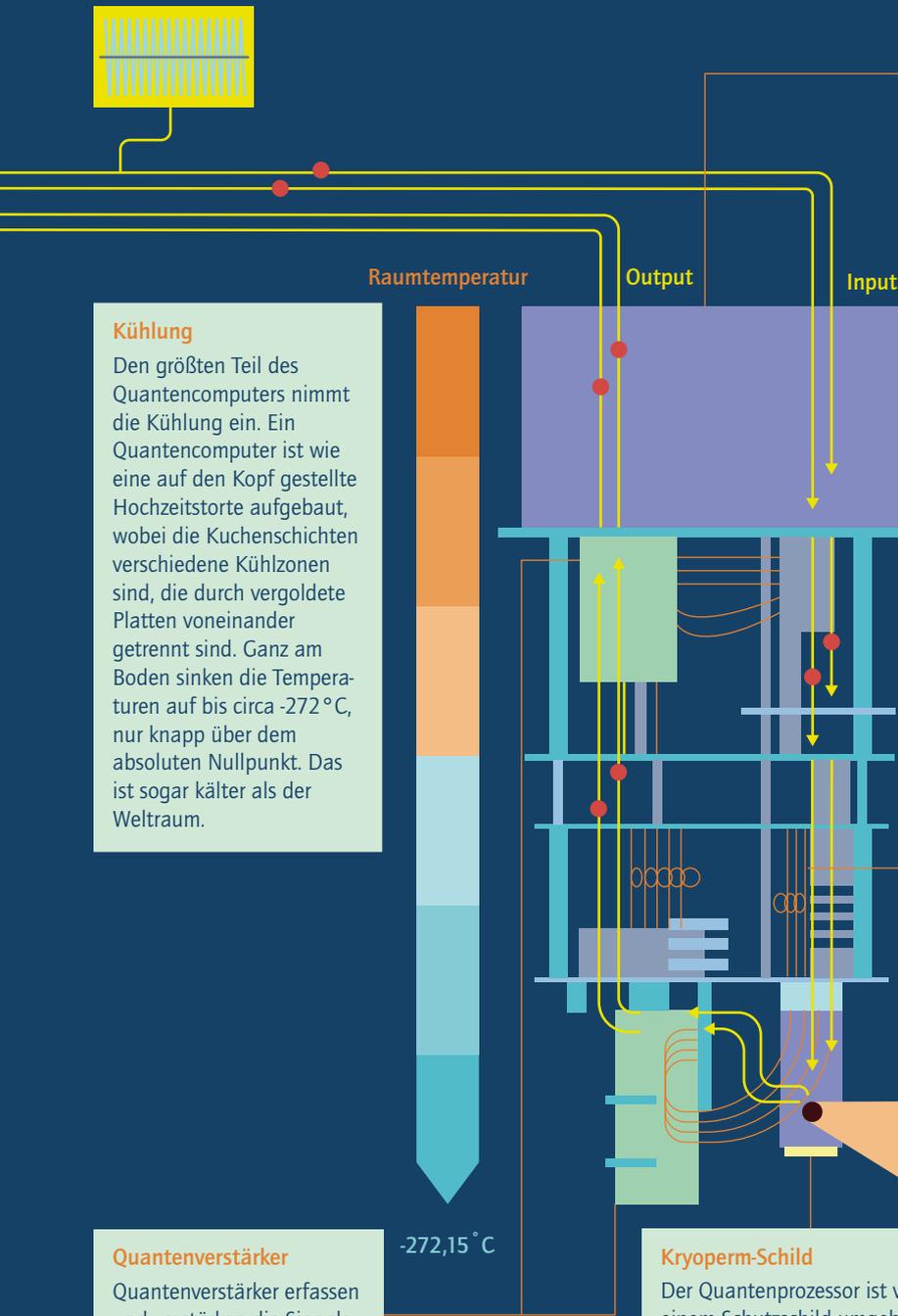
Programmierung

Schon heute ist es für Wissenschaftler möglich, an ihren herkömmlichen Rechnern einen Auftrag für einen Quantencomputer zu erstellen. Diesen Auftrag schicken sie an die Cloud einer Firma, die ihre Quantencomputer öffentlich zur Verfügung stellt. In der Cloud werden die Aufträge an den Computer weitergeleitet, der den Quantencomputer steuert.

Datenauswertung

Ein klassischer Computer, der bei Raumtemperatur arbeitet, steuert den ganzen Prozess. Er verarbeitet eingehende Aufträge, gibt Anweisungen an den Quantencomputer und schickt die Ergebnisse zurück an den Auftraggeber.





Kühlung
 Den größten Teil des Quantencomputers nimmt die Kühlung ein. Ein Quantencomputer ist wie eine auf den Kopf gestellte Hochzeitstorte aufgebaut, wobei die Kuchenschichten verschiedene Kühlzonen sind, die durch vergoldete Platten voneinander getrennt sind. Ganz am Boden sinken die Temperaturen auf bis circa -272°C , nur knapp über dem absoluten Nullpunkt. Das ist sogar kälter als der Weltraum.

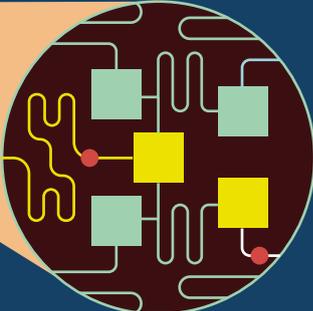
Quantenverstärker
 Quantenverstärker erfassen und verstärken die Signale, die der Quantenprozessor ausgibt.

Kryoperm-Schild
 Der Quantenprozessor ist von einem Schutzschild umgeben, der ihn von elektromagnetischer Störstrahlung abschirmt.

Hülle
 Wenn der Computer in Betrieb ist, umschließen ihn fünf Gehäuseschichten, die wie russische Puppen ineinander verschachtelt sind. Sie dienen zur Abschirmung, um das Innere superkalt und vakuumdicht zu halten.

Spiralen
 Die Spiralförmigkeit der Kabel, die die Daten übertragen, verringert die Spannung, die durch die starke Kühlung des Innenraums entsteht. Ohne diese Windungen würden die Kabel reißen. Sie vermindern zudem den Wärmeeintrag in den Quantenprozessor.

Quantum-Processing Unit (QPU)
 Es gibt bisher keinen standardisierten Quantenprozessor, da noch an der besten Realisierungsmethode geforscht wird. Er könnte aber zum Beispiel aus einem Siliziumplättchen mit mehreren supraleitenden Qubits bestehen. Dabei ist jedes Qubit mit einem sogenannten Resonator verbunden. Mithilfe dieser Resonatoren lässt sich der Zustand des Qubits steuern und lesen. Die eingehenden Mikrowellensignale interagieren mit den Qubits durch die Resonatoren. Zusätzliche Resonatoren verbinden mehrere Qubits, um eine Verschränkung zu ermöglichen.



Plattformen für die Bildung von Qubits

In den letzten zwanzig Jahren Entwicklung sind weltweit einige Hardwareplattformen zur Bildung von Qubits entstanden. Die gegenwärtig führenden Plattformen zur Bildung von Qubits werden in der folgenden Tabelle vergleichend dargestellt.

	Wie funktioniert's?	Nachteile
Supraleitend	Ein supraleitendes Qubit besteht nicht aus einem Atom, sondern aus einem Schaltkreis, der ein „künstliches Atom“ darstellt. Dieser Schaltkreis verhält sich wie ein Atom mit zwei Energiezuständen, zwischen denen er hin- und herwechseln kann.	Der Schaltkreis muss aus einem supraleitenden Material bestehen, damit Elektronen ohne Widerstand hindurchfließen können. Nur dann können die Elektronen ihre Quantenzustände einnehmen und behalten. Dafür kann zum Beispiel supraleitendes Aluminium verwendet werden, das allerdings bis fast auf den absoluten Nullpunkt gekühlt werden muss. Das ist teuer und aufwendig. Außerdem ist die Kohärenzzeit wesentlich kürzer als bei Ionenfallen-Qubits, wodurch die Berechnungen fehleranfälliger werden.
Ionenfallen	Ein Ion ist ein Atom, das eine positive oder negative elektrische Ladung besitzt. In einer Ionenfalle werden zum Beispiel positiv geladene Kalziumatome im Vakuum eingefangen. Dort werden sie durch Laser gekühlt, sodass sie sich fast nicht bewegen. Diese eingefangenen Ionen werden als Qubits verwendet, und ihr Zustand kann durch die Bestrahlung mit Lasern mit unterschiedlicher Frequenz und Dauer gesteuert werden.	Ionenfallen benötigen zwar keine aufwendigen Kühlkammern wie supraleitende Qubits, allerdings werden Laser zum Kühlen und für die Steuerung der Ionenfallen-Qubits sowie eine Vakuumkammer benötigt. Zudem kann man mit ihnen deutlich langsamer rechnen als mit supraleitenden Qubits.
Topologisch	Von allen Qubit-Ansätzen klingt die Idee hinter den topologischen Qubits am verrücktesten. Sie beruht auf sogenannten Anyonen, auch „Quasiteilchen“ genannt. Quasiteilchen sind eigentlich eine Menge von Teilchen, die sich im Kollektiv gleich verhalten und dadurch Eigenschaften zeigen, als wären sie ein einzelnes Teilchen. Die Besonderheit dieser Anyonen ist, dass sie sich nur im zweidimensionalen Raum bewegen. Bei ihrer Bewegung durch Raum und Zeit formen die Anyonen sogenannte Braids (Zöpfe). Diese Braids sind die Qubits eines topologischen Quantencomputers.	Die Entwicklung topologischer Quantencomputer hinkt den anderen Ansätzen hinterher und muss aufholen.
Elektronenspin	Ein Elektronenspin-Qubit besteht aus einem Elektron, das in einer sogenannten Halbleiternanostruktur gefangen ist. Die zwei Energiezustände des Qubits entsprechen den beiden Einstellungen des Elektronenspins: Man kann sich diese vereinfacht wie zwei unterschiedliche Drehrichtungen vorstellen. Dieser Spin wird dann zum Rechnen im Quantencomputer verwendet.	Fortschritte in der Kontrolle der Elektronen und bei der Messung des Spins sind notwendig, um diese Art von Qubits auf eine wirklich nützliche Weise und in größerer Menge verwenden zu können.
Photonbasiert	Photonen, also Lichtquanten, kommen als Qubits zum Einsatz. Bei definierter Erzeugung können ihre Quanteneigenschaften, wie Polarisation oder Energie, vorgegeben werden. Zum Rechnen werden viele dieser Photonen wellenleiterbasierten optischen Schaltkreisen zugeführt, in denen programmierbare Quantenoperationen ihre Zustände verändern. Der abschließende Messprozess der resultierenden Photonenzustände ist ein wichtiger Bestandteil des photonischen Quantencomputings.	Die Erzeugung einer großen Zahl von Photonen mit absolut gleichen Quanteneigenschaften und absolut gleichzeitiger Verfügbarkeit ist eine große Herausforderung. Zur Durchführung des Messprozesses braucht man auch hier Tieftemperaturtechnologie.

Vorteile	Aktueller Stand
<p>Industrieunternehmen haben viel Expertise in der Chiptechnologie und wie sie diese leistungsfähig in die Anwendung bringen. Auf dieser Expertise bauen sie nun mit den supraleitenden Qubits auf und erzielen konstante Fortschritte.</p>	<p>Momentan liegt die Anzahl an supraleitenden Qubits, die erfolgreich in einem Quantencomputer gesteuert werden können, zwischen 53 und 72.</p>
<p>Die Ionenfallen-Qubits können sehr gut kontrolliert werden und sind im Vergleich sehr stabil. Sie können schon über 15 Minuten im Kohärenzzustand bleiben. Dadurch sind sie natürlich auch weniger fehleranfällig als supraleitende Qubits. Dieser Ansatz wird vor allem von Wissenschaftlern an Universitäten verfolgt, es gibt aber auch einige Firmen, die auf diese Hardwareplattform setzen.</p>	<p>Die höchste Anzahl an Qubits, die kontrolliert werden konnten, liegt derzeit bei 20.</p>
<p>Topologische Qubits sind theoretisch weniger anfällig für Störungen, wenn nicht sogar ganz resistent dagegen. Dadurch benötigt man insgesamt weniger Qubits, die man sonst für die Fehlerkorrektur verwenden würde. Aufgrund dieser Stabilität könnten topologische Quantencomputer längere und komplexere Berechnungen durchführen.</p>	<p>In der Praxis wurde noch kein einziges topologisches Qubit erfolgreich gebildet.</p>
<p>Ein Vorteil von Elektronenspin-Qubits ist, dass ihre Herstellung auf der Halbleitertechnologie beruht, die schon von der heutigen Computerindustrie verwendet wird. Dadurch ist auch eine leichtere Integration in bereits vorhandene Computerbauteile möglich. Elektronenspin-Qubits lassen sich außerdem leicht und schnell steuern. Das kann zum Beispiel durch Änderung des umgebenden Magnetfelds, elektrische Felder oder Photonen passieren.</p>	<p>Bis zum jetzigen Zeitpunkt ist es gelungen, einen funktionierenden 2-Qubit-Quantencomputer herzustellen.</p>
<p>Die Quanteneigenschaften von Photonen sind sehr robust gegen äußere Störungen. Die wellenleiterbasierten optischen Schaltkreise können mit bereits existierenden Chiptechnologien hergestellt und skaliert werden.</p>	<p>Bis zum jetzigen Zeitpunkt wurden Demonstratoren mit bis zu zwanzig Photonen realisiert. Unterschiedliche Start-ups arbeiten daran, erste Quantencomputer in den nächsten Jahren zu bauen. Neuere Konzepte nutzen neben einzelnen Photonen auch komplexere photonische Zustände.</p>

Implikationen für Wirtschaft und Gesellschaft

Dem Quantencomputer wird unter allen Quantentechnologien der zweiten Generation zweifelsohne das größte Potenzial für bahnbrechende Innovationen in Wirtschaft und Gesellschaft zugeschrieben, auch weil viele Verschlüsselungsmethoden, die wir momentan verwenden, durch einen Quantencomputer leicht „geknackt“ werden könnten (siehe auch Kapitel 3.2.2).

Ob der Quantencomputer tatsächlich die gesamte Computerindustrie und unser Leben bahnbrechend verändern oder sich die Erwartungen an ihn nicht erfüllen werden, kann niemand vorhersehen.

„Die interessante Frage ist: Kann der Quantencomputer irgendwann auch ökonomisch einen ‚Quantenmehrwert‘ generieren? Erst dann können wir von einer tatsächlichen ‚Quantenrevolution‘ sprechen.“

3.2.2 Quantenkommunikation und Quantenkryptografie

Wird der Quantencomputer realisiert, kann sich das auch auf die Sicherheit unserer Kommunikation auswirken: Denn ein Quantencomputer könnte viele Verschlüsselungsmethoden, die wir gegenwärtig verwenden, „knacken“. Deshalb müssen unsere Sicherheitssysteme grundlegend überdacht und überarbeitet werden, um die Sicherheit unserer Kommunikation auch für die nächsten Jahrzehnte gewährleisten zu können. Hier setzen die Quantenkommunikation und die sogenannte Quantum-Safe-Kryptografie (diese wird häufig auch als „Post-Quantum-Kryptografie“ bezeichnet) an, deren Verschlüsselung selbst ein Quantencomputer nicht knacken kann.

Quantenkommunikation

„Quantenkommunikation“ ist ein Überbegriff für die Vermittlung einer Nachricht mittels Quantenkryptografie, das heißt die Übertragung von Verschlüsselungscodes mithilfe von kodierten Photonen (zur genauen Funktionsweise siehe Seite 42). Bei der (Quanten-) Kryptografie geht es darum, einen Schlüssel, den nur Sender und Empfänger kennen sollten, auf sichere Weise auszutauschen. Das heißt, es wird nicht die ganze Nachricht mittels Quantenkryptografie übertragen, sondern nur der Schlüssel zum Ver- und Entschlüsseln der Nachricht. Die eigentliche Kommunikation findet dann ganz ohne die Mitwirkung von Quanten über klassische Wege statt, beispielsweise durch das Versenden einer (verschlüsselten) Nachricht per E-Mail.

Während für Quantencomputer hochsensible und instabile Quantensysteme verwendet werden, benutzt man in der Quantenkommunikation und -kryptografie sehr stabile Quanten, die Photonen. Bisher haben wir das Photon nur als Quant kennengelernt, das in der Lage ist, den Zustand eines Quantensystems, etwa eines Atoms, zu modifizieren (siehe Kapitel 2). Das Photon ist allerdings auch selbst in der Lage, zwei unterschiedliche Zustände einzunehmen.^d Man spricht hier auch von „Polarisation“. Bezeichnet man wie beim Computer einen Zustand als 1 und den anderen Zustand als 0, kann man durch Messen, in welchem dieser Zustände sich das Photon befindet, Informationen übertragen und erhalten. Das Photon ist also nicht nur ein Quant, sondern auch ein Qubit.

Photonen-Qubits werden auch als „fliegende Qubits“ bezeichnet,

da sie mit Lichtgeschwindigkeit durch den Raum fliegen. Fliegende Qubits sind sehr robust: Solange sie existieren, behalten sie ihren Zustand stabil bei. Diejenigen, die es bis zum Empfänger schaffen, sind also vollkommen unverändert. Ein Problem ist jedoch, dass Photonen auf dem Weg vom Sender zum Empfänger durch Interaktion mit ihrer Umgebung verloren gehen können, indem sie zum Beispiel absorbiert werden.

Herausforderungen bestehen in der Quantenkryptografie momentan darin, dass die Datenraten noch nicht ausreichend sind und die Reichweite der auf einzelnen Photonen beruhenden Quantenschlüsselverteilungstechnologie (Quantum Key Distribution, kurz: QKD) über Glasfaser nur etwa hundert Kilometer beträgt. Möchte man Informationen über eine längere Strecke übertragen, benötigt man einen Vermittler dazwischen, der den Schlüssel weitergeben kann. Dieser Vermittler erzeugt Schlüssel mit dem Sender und dem Empfänger, gleicht diese ab und autorisiert schließlich einen gemeinsamen Schlüssel. Das setzt voraus, dass der Vermittler vertrauenswürdig ist. Eine Schwachstelle des Ansatzes mit dem Vermittler ist, dass sich an den Knotenpunkten, an denen dieser sitzt (also tatsächlich ein physisches Gebäude), auch Lauscher unberechtigten Zugang verschaffen könnten. Diese Orte müssen also gesichert werden. Allerdings ist es auch heute schon üblich, große Rechenzentren mit hohen Sicherheitsvorkehrungen zu umgeben.¹⁹

Ein üblicher Verstärker oder Repeater, wie man ihn in kleiner Form beispielsweise vom WLAN-System in Privathaushalten kennt, ist hingegen nicht zur Erhöhung der Reichweite einsetzbar, da unbekannte Quantenzustände nicht geklont und so verstärkt oder weitergereicht werden können (siehe Non-Cloning-Theorem auf Seite 42). Eine vielversprechende Möglichkeit, dies zu umgehen, ist aber der sogenannte Quanten-Repeater, der Quellen für verschränkte Photonenpaare und Verschränkungs-austausch über größere Distanzen hinweg nutzt, um deutlich höhere Reichweiten und Schlüsselraten zu erzielen. Die dafür nötigen Technologien werden derzeit im Labor entwickelt und getestet.²⁰

Die kommerzielle Nutzung der glasfaserbasierten Quan-

^d Das Photon bringt alle Voraussetzungen mit, die wir von einem idealen Übermittler von Information erwarten würden: Es ist Träger eines Drehimpulses, des Spin, der zwei Einstellrichtungen hat und das Photon zu einem Zwei-Zustands-System macht. Auch hier stehen alle Superpositionszustände zur Verfügung.

tenkommunikation erfordert auch den Aufbau eines neuen Quantennetzwerks, das aus qualitativ hochwertigen, dämpfungsarmen und „dunklen“, das heißt exklusiv für QKD genutzten, Glasfasern besteht. Da der Aufbau einer derartigen Infrastruktur sehr teuer ist, wird erwartet, dass die QKD-Technologie in der Anfangsphase primär von Nutzern mit höchsten Sicherheitsbedürfnissen eingesetzt werden wird.

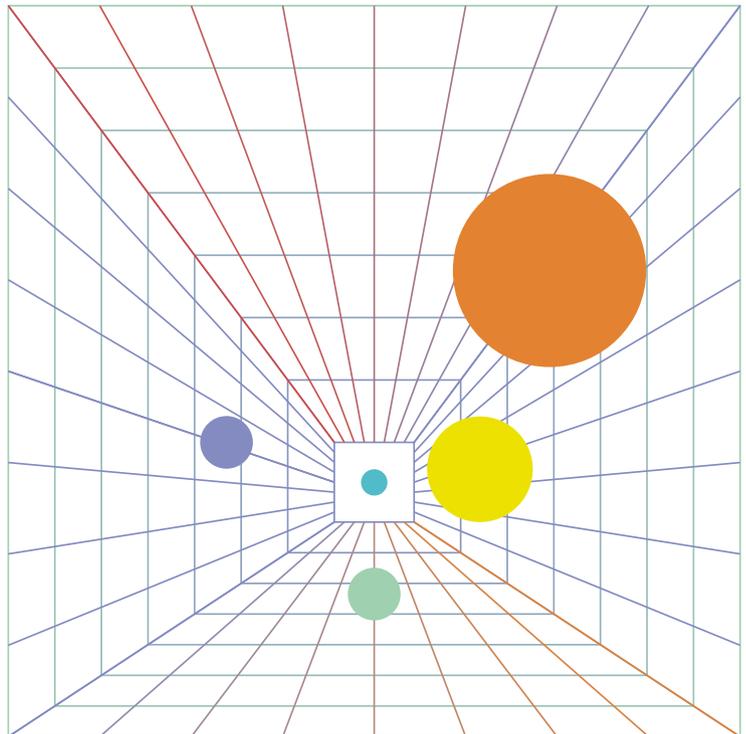
Es gibt jedoch alternative Technologien zur Glasfaser, die die genannten Probleme umgehen. Einige Wissenschaftler nutzen statt Glasfasernetzwerken Satelliten für QKD.²¹ Dabei machen sie sich die Tatsache zunutze, dass sie ihre Photonen ungestört über einen großen Teil der Strecke durch das Beinahe-Vakuum des Weltraums senden können. Doch auch hier gibt es noch einige Herausforderungen, die überwunden werden müssen. Der Photonenstrahl, der vom Satelliten ausgesendet wird, muss auf den Empfänger ausgerichtet bleiben, während der Satellit in 300 Kilometern Höhe mit einer Geschwindigkeit von 8 Kilometern pro Sekunde über die Erde fliegt.²² Auch die Durchquerung der Luft, sobald sich die Photonen der Erde nähern, stellt eine Herausforderung dar, da sie in der Erdatmosphäre absorbiert, gestreut oder von Wolken gänzlich abgehalten werden können. Da die optische Übertragung per Satellit sehr von atmosphärischen Bedingungen am Boden abhängt, ist diese jedoch nur bei guten Wetterbedingungen möglich. Die Schlüssel, die von einer Station auf der Erde empfangen werden, müssen in einer sicheren Hardware gesammelt und bis zur Verwendung gespeichert werden. Erschwerend kommt hinzu, dass die QKD aktuell nur bei Dunkelheit, also in der Nacht, erfolgen kann, da selbst kleine Mengen von gestreutem Sonnenlicht die hochsensiblen Einzel-Photonen-Detektoren blenden würden. Werden diese Herausforderungen gemeistert, wäre ein sicherer Austausch von Schlüsseln mittels QKD über enorme Reichweiten möglich.

Das ultimative Ziel der Quantenkommunikation ist es, nicht nur Schlüssel sicher zu verschicken, sondern zwei Quantencomputer, die sich zudem in unterschiedlichen Ländern befinden können, komplett miteinander zu koppeln. Dazu könnte der Zustand eines Qubits zwischen zwei Quantencomputern teleportiert werden, was letztlich zum visionären Quanteninternet führen würde. Dies ist allerdings noch Zukunftsmusik, und es

gibt viele Probleme, die noch gelöst werden müssen, bevor diese Art der Quantenkommunikation Realität werden kann.

Insgesamt betrachtet bleiben in der Praxis bei der Quantenkommunikation noch weitere Gefahren bestehen, zum Beispiel Schwachstellen im Computer des Senders oder Empfängers, die Zugriff auf bereits entschlüsselte Informationen erlauben. Ein weiterer Schwachpunkt ist der Missbrauch von Identitäten, den auch die Quantenkryptografie nicht lösen kann. Es braucht Authentifizierungsmechanismen, die garantieren, dass Alice wirklich Alice und Bob wirklich Bob ist. Doch diese Risiken gelten natürlich auch für die klassische Kryptografie.

„Auch Quantenkryptografie ist kein Allheilmittel. Wenn man das Passwort aufschreibt und ein Hacker den Zettel findet, bringt auch die sicherste kryptografische Technologie recht wenig.“



Quantum Key Distribution

Wie kann man Quanteneigenschaften nutzen, um den Schlüssel zu übertragen, der zum Dekodieren einer verschlüsselten Nachricht benötigt wird? Das Verfahren dafür wird als Quantenschlüsselverteilungs-Technologie oder häufiger als „Quantum Key Distribution“ (QKD) bezeichnet. Dabei wird der Schlüssel mittels einer Sequenz aus kodierten Photonen übertragen. Die Sicherheit dieses Verfahrens basiert auf dem Beobachtereffekt und dem sogenannten Non-Cloning-Theorem. Zweiteres besagt, dass ein unbekannter Quantenzustand nicht kopiert werden kann. Dazu müsste das ursprüngliche Photon (= das Quant) gemessen werden. Wie in Kapitel 2.4 beschrieben führt dieser Messprozess aber zu einer Änderung des Zustands. Die Kopie unterscheidet sich dann vom Original. Beispielhaft kann man an ein Bild denken, das kopiert werden muss, ohne dass man es kennt. Doch wie funktioniert QKD genau?

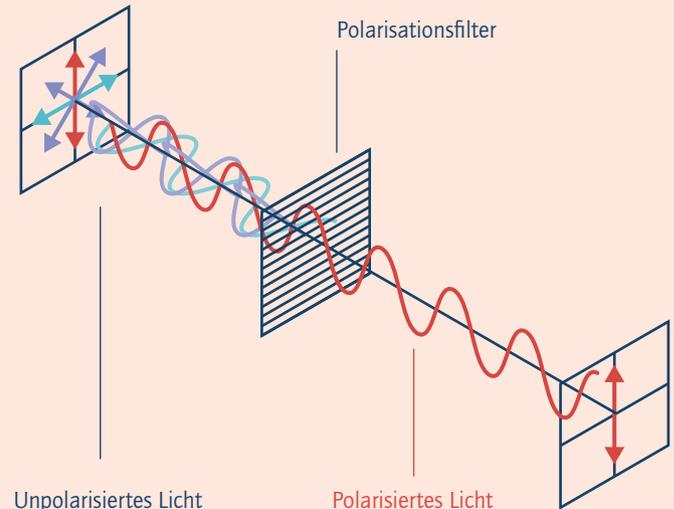
1. Übertragung von Photonen von Alice an Bob

Alice möchte eine Nachricht an Bob senden und dafür QKD nutzen. Zu diesem Zweck sendet sie, vereinfacht gesagt, Photonen oder genauer fliegende Qubits zum Beispiel über eine Glasfaserleitung an Bob, wobei sie die Photonen zuerst „polarisiert“. Das heißt nichts anderes, als dass die Photonen^e in eine bestimmte Richtung schwingen.

In unserem Beispiel werden vier verschiedene Polarisationszustände verwendet: rechts- und linksdiagonal sowie vertikal und horizontal. Alice weist den einzelnen Zuständen dabei Werte zu: Rechtsdiagonale und vertikale Photonen stellen eine 1 dar, linksdiagonale und horizontale Photonen eine 0. Alice verwendet vier verschiedene Filter zur Erzeugung dieser Polarisationszustände, die in zufälliger Reihenfolge eingesetzt werden.

Auf der anderen Seite versucht Bob, die Polarisation der Photonen, die ihm zugeschickt wurden, zu messen. Dafür benutzt er zwei unterschiedliche Detektoreinheiten in zufälliger Reihenfolge. Die eine erlaubt es in der horizontal/vertikal orientierten Basis, Nullen von Einsen eindeutig

zu unterscheiden, die andere in der rechts-/linksdiagonal orientierten Basis. Nur wenn er zufällig die passende Detektoreinheit ausgewählt hat, kann er die korrekte Information auslesen. Die Chance dafür ist aufgrund der zufälligen Auswahl der Polarisationsbasen 50/50. Das gehört zum Konzept und stellt die Abhörsicherheit der Kommunikation sicher, wie später noch gezeigt wird.

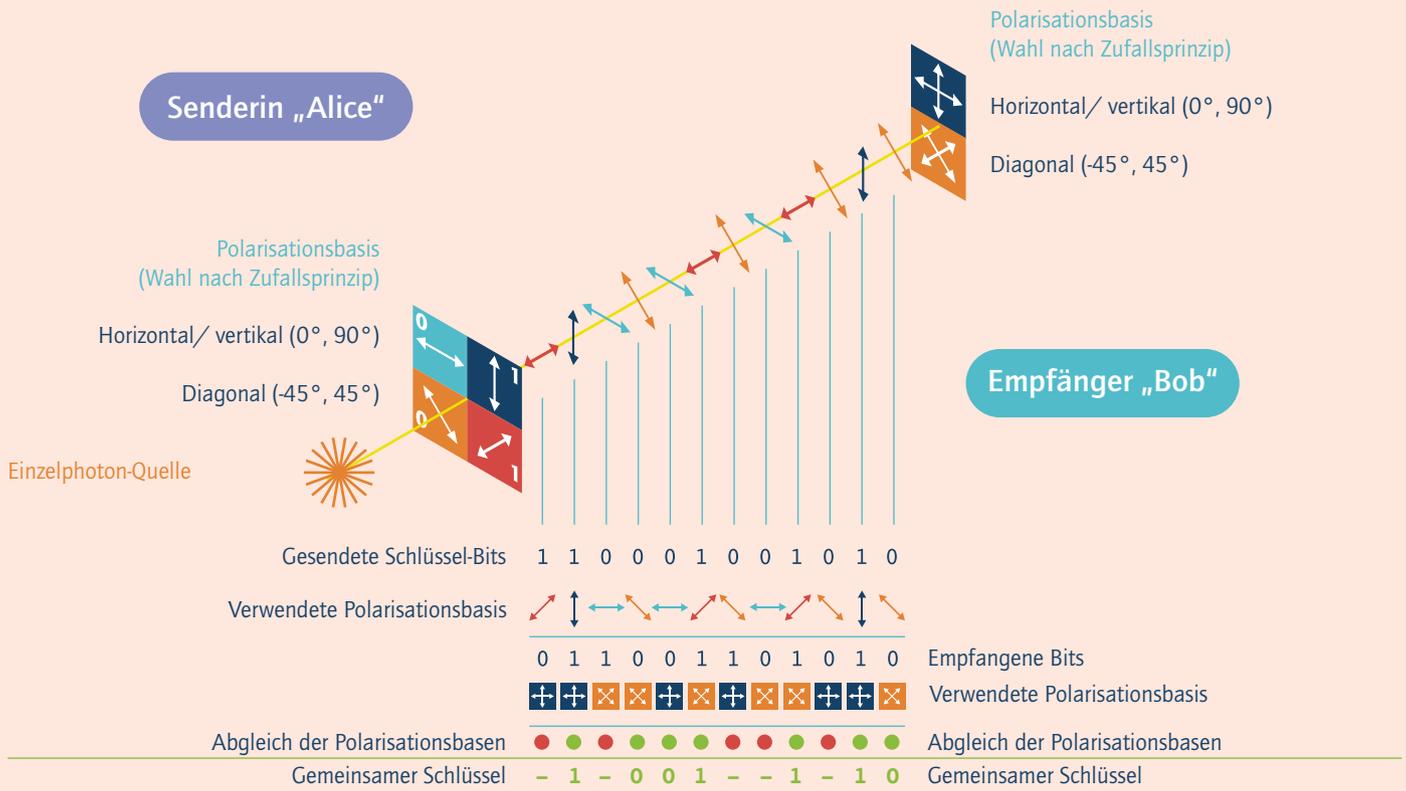


Quelle: Eigene Darstellung nach Zivkovic et al. 2019²³

2. Identifikation des Schlüssels

Alice und Bob vergleichen nach der Übertragung nur die Einstellungen der jeweils gewählten Polarisationsbasen, um den richtigen Schlüssel zu bestimmen. Dieser Abgleich kann sogar öffentlich, auf klassischem Weg passieren, also zum Beispiel per Telefon. Würde jemand den Vergleich mithören, so würde man beispielsweise nur „horizontal/vertikal“ oder „diagonal“, aber nicht das dazugehörige Messergebnis, also 1 oder 0, hören. Nach dem Vergleich entfernen Alice und Bob diejenigen Messergebnisse aus der Sequenz, für die Bob eine andere Polarisationsbasis als Alice verwendet hat. Der Quantenschlüssel ergibt sich dann aus den Messergebnissen, bei denen die verwendeten Polarisationsbasen übereingestimmt haben.

^e Genauer gesagt die elektrischen Felder dieser Photonen



Quelle: Eigene Darstellung nach Mavroeidis et al. 2018²⁴

3. Lauschangriff durch Eve

Die Spionin Eve plant einen Lauschangriff auf Alice und Bob. Dafür versucht sie, erstens den Schlüssel während der Übertragung der Photonen von Alice an Bob abzufangen, und zweitens, den Filtervergleich zwischen Alice und Bob abzuhören. Denn Eve kann mit der Information aus dem Abhören des Filtervergleichs alleine eben nichts anfangen. Auch im ersten Schritt, beim Abfangen des Schlüssels, treten Probleme auf. Wenn Eve, die ebenfalls ihre Filter zufällig wählen muss, die übertragenen Photonen abfängt, kommen sie beim Empfänger gar nicht mehr an: Sie wurden ja von Eve durch ihre „Beobachtung“ entfernt (siehe „Beobachtereffekt“ in Kapitel 2.4) und tragen so nicht mehr zum gemeinsamen Schlüssel von Alice und Bob bei – die Information ist für die Spionin also wertlos.

Alleine durch das Abfangen der Photonen bemerken Bob und Alice noch nicht, dass Eve sie belauschen wollte. Auch wenn Eve einen Teil der Photonen herausfiltert, ist das noch kein Problem für

Alice und Bob, die ihren Schlüssel einfach aus dem restlichen Anteil bilden. Da der Übertragungsweg entweder über Glasfaser oder Satellit ohnehin stark verlustbehaftet ist, würden Alice und Bob nicht zwangsweise darauf schließen, dass sie belauscht worden sind.

Wenn Eve nach ihrer Messung vermeintlich passende Ersatzphotonen einschleusen und an Bob weiterleiten würde, hilft ihr das auch nicht weiter, da sie bei falsch eingestellter Polarisationsbasis nur zufällige und damit falsche Messergebnisse erhält und weiterleitet. Dafür sorgt das Non-Cloning-Theorem: Eve kann die Photonen, die sie von Alice abgefangen hat, nicht exakt nachbilden. Alice und Bob würden dann durch Auswertung und Vergleich von Prüfsummen den Angriff erkennen und den gemeinsamen Schlüssel als falsch verwerfen.

Aufgrund dieser Hindernisse, die es Eve unmöglich machen, den Schlüssel zu stehlen, gilt die Übertragung mittels QKD (und genauer per BB84-Protokoll²⁵) als abhörsicher.

Quantum-Safe-Kryptografie

Auch wenn es zum Verwechseln ähnlich klingt, bezeichnet die „Quantum-Safe-Kryptografie“ ein ganz anderes Verfahren als die Quantenkryptografie, das zudem nichts direkt mit Quanten zu tun hat. Es geht vielmehr darum, gegenwärtige Verschlüsselungsmethoden „quantensicher“ zu machen. Der Grund, warum unsere gebräuchlichsten Kryptografieverfahren so leicht von einem Quantencomputer geknackt werden können, ist, dass dieser potenziell über eine extrem hohe Rechenleistung verfügt. Unsere Verschlüsselungsmethoden beruhen unter anderem auf dem mathematischen Problem der Primfaktorzerlegung, für dessen Lösung normale Computer extrem viel Zeit benötigen. Ein universeller Quantencomputer mit ausreichender Anzahl an Qubits könnte dieses Problem allerdings durch Anwendung des sogenannten Shor-Algorithmus sehr effektiv lösen. Der amerikanische Mathematiker Peter Shor entwickelte diesen Algorithmus bereits in den 1990er Jahren.²⁶ Für kleine Primzahlen wurde experimentell gezeigt, dass der Shor-Algorithmus erfolgreich auf einem Quantencomputer durchgeführt werden kann.²⁷

„Wir müssen uns jetzt schon Gedanken machen über die Verschlüsselung von morgen und dürfen nicht warten, bis es zu spät ist. Beim Internet haben wir es verpasst, Sicherheit von Anfang an mitzudenken.“

Quantum-Safe-Kryptografie, also quantensichere Kryptografie, befasst sich mit der Suche nach Verschlüsselungsalgorithmen, die gegen Entschlüsselungsversuche sowohl von klassischen als auch von Quantencomputern resistent sind. Die Idee ist, andere mathematische Probleme als die Primfaktorzerlegung zur Verschlüsselung zu verwenden, die von einem Quantencomputer nicht so schnell berechnet werden können. Dabei tapen wir allerdings etwas im Dunkeln, da wir noch nicht sicher wissen, wie viel Zeit ein Quantencomputer für welche Berechnungen benötigen wird. Deshalb wird an unterschiedlichen Ansätzen getüftelt – in der Hoffnung, dass sich einer davon gegen einen möglichen Quantencomputer in der Zukunft behaupten kann. Bei der Quantum-Safe-Kryptografie geht es vor allem darum, die Sicherheit von morgen schon heute mitzudenken und sich auf zukünftige Herausforderungen vorzubereiten – was nicht heißt, dass die Verfahren nicht bereits heute angewandt werden könnten, um unsere Kommunikation schon jetzt sicherer zu gestalten. Deswegen ist die Bezeichnung „Post-Quantum-Kryptografie“, die für diesen Bereich häufig auch verwendet wird, eher irreführend.

Implikationen für Wirtschaft und Gesellschaft

Ob wir jemals mit Quantenkommunikation oder quantensicherer Kryptografie eine komplett abhörsichere Kommunikation für alle realisieren können, bleibt ungewiss. Am Ende müssen sich die Verfahren für die Anwender rechnen, das heißt einen Mehrwert bringen. Das mag in manchen Fällen durchaus der Fall sein, denn der Bedarf an Quantenkryptografie ist teilweise tatsächlich schon in sicherheitsrelevanten Bereichen vorhanden. Mit entsprechendem Aufwand können bestimmte wichtige Kanäle, zum Beispiel zwischen wichtigen Behörden, sicherer gestaltet werden. Ähnlich wie beim Quantencomputer könnte es letztlich eine strategische Entscheidung sein, die Technologien dafür hierzulande weiterzuentwickeln oder sie von außen einzukaufen. Gegenwärtig gibt es in Deutschland große Entwicklungsbemühungen in Richtung Quantenkryptografie und auch Quantum-Safe-Kryptografie.²⁸

3.2.3 Quantenmetrologie, Quantensensorik und quantenbasierte Bildgebung

Was sind Metrologie, Sensorik und Bildgebung, und wie hängen sie zusammen? Während die Metrologie die Wissenschaft des Messens ist, sind die Sensoren die Geräte, mit denen relevante Messgrößen wie beispielsweise Temperatur oder Beschleunigung im Alltag tatsächlich erfasst werden. Auch für die Bildgebung braucht es einen Sensor, meistens einen optischen Sensor in Form eines Kamerachips. Setzt man ein „Quanten-“ vor die Begriffe, also „Quantenmetrologie“, „Quantensensorik“ und „Quantenbildgebung“, bedeutet das, dass die Prozesse des Messens und Erfassens jeweils mithilfe von Quanten geschehen und deshalb sehr genau sind.

Quantenmetrologie

Abstände, Temperatur, Zeit, Druck, Gewicht oder Geschwindigkeit – über all diese physikalischen Größen möchten wir in unserem Alltag oft sehr genau Bescheid wissen. Niemand würde sich gerne in ein Auto ohne Tachometer setzen oder ein Medikament einnehmen, ohne die korrekte Dosierung zu kennen.

Die Quantenmetrologie, auch „quantenbasierte Metrologie“ genannt, erforscht, wie Quanteneffekte genutzt werden

Kommt Zeit, kommt Caesium

Der Begriff „Caesiumübergangsfrequenz“ klingt sperrig und ist wohl den wenigsten bekannt. Caesium ist ein Metall. Es verhält sich in seiner Dampfphase (nicht, wenn es als physisches Metall vorliegt) im Grunde wie ein Zwei-Zustands-System: Es hat zwei Energiezustände, zwischen denen es hin- und herspringen kann. Strahlt man nun Mikrowellen mit einer ganz bestimmten Frequenz (9.192.631.770 Hertz, um genau zu sein) auf das Caesiumatom, dann springt es von einem Energiezustand in den anderen. 1967 wurde festgelegt, dass eine Sekunde genau die Zeitdauer ist, in der diese Mikrowelle, die das Caesiumatom von einem Zustand in den anderen „schubst“, 9.192.631.770 Mal nach oben und wieder nach unten „schwingt“.⁸

Warum wurde gerade die Caesiumübergangsfrequenz für die Definition der Sekunde herangezogen? Die Wahl fiel unter anderem deshalb darauf, weil der Übergang des Caesiumatoms zwischen den beiden Zuständen durch Mikrowellen angeregt wird. Zur Zeit der Entwicklung der ersten Atomuhren, also in den 1960er Jahren, gab es bereits die Technologie, die es erlaubte, den Frequenzbereich der Mikrowellen zu nutzen.

Caesium liefert demnach eine genaue Definition der Sekunde, die mit 16 Nachkommastellen die am genauesten realisierte Einheit darstellt. Dank deren Definition konnten im Laufe der Zeit nun Größen wie ein Meter genau festgelegt werden: Wie weit kommt das Licht in einem bestimmten, sehr kleinen Sekundenbruchteil? Hier war die Naturkonstante der Lichtgeschwindigkeit maßgebend (im wahrsten Sinne des Wortes).

können, um Messungen noch viel genauer zu machen als bisher. Dabei profitieren wir davon, dass man ganz genau weiß, wie ein Quantensystem aufgebaut ist und welche Eigenschaften es hat, zum Beispiel welche Übergangsfrequenz es aufweist (siehe Kasten „Kommt Zeit, kommt Caesium“). Quantenmetrologie revolutionierte bereits geradezu die Genauigkeit von Messungen und die Festlegung von Naturkonstanten wie der Lichtgeschwindigkeit und ermöglichte es so, ein universelles Einheitensystem aufzubauen.

Die physikalischen Einheiten sind im sogenannten „SI-System“ (vom französischen „Système International d’Unités“) festgelegt. Den Begriff kennen zwar wohl die wenigsten, was dahinter steckt, begegnet uns allen jedoch täglich. Das SI-System beschreibt einheitlich alle physikalischen Einheiten durch sieben Basisgrößen: Sekunde für die Zeit, Meter für die Länge, Kilogramm für die Masse, Ampere für die Stromstärke, Kelvin für die Temperatur, Mol für die Stoffmenge und Candela für die Lichtstärke. Aus diesen sieben Basisgrößen lassen sich alle anderen physikalischen Größen ableiten, zum Beispiel die Geschwindigkeit eines Objekts, die sich aus Meter pro Sekunde zusammensetzt.²⁹

„Das SI-System ist so etwas wie die Währungsunion der Physiker.“

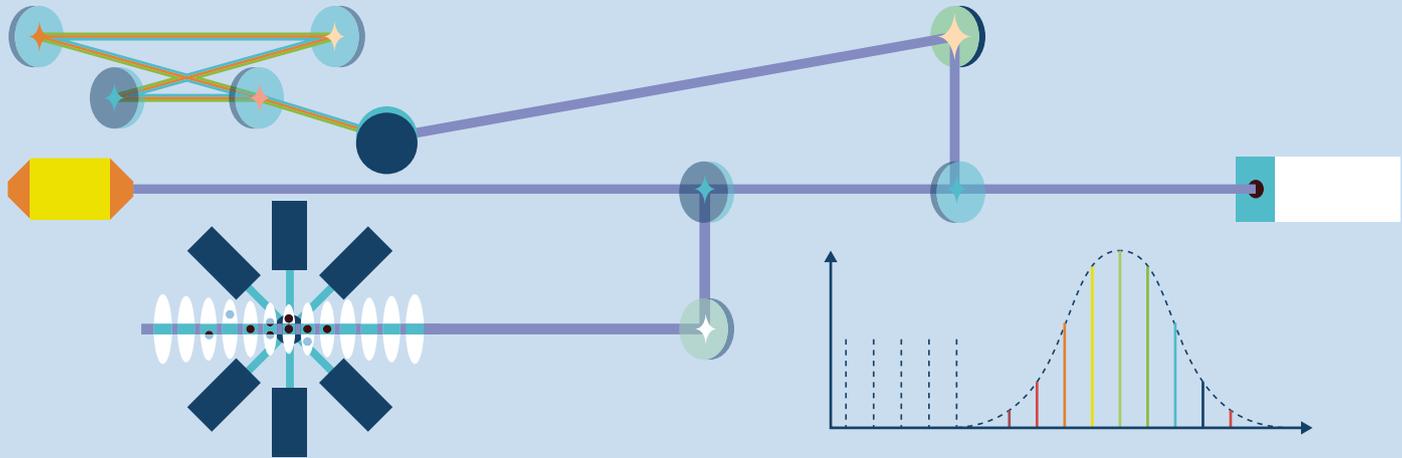
Jede der sieben Basisgrößen basiert auf Naturkonstanten und ist damit eindeutig und präzise festgelegt. Erst 2019 wurde die vollständige Definition aller Basisgrößen durch Naturkonstanten umgesetzt. Dies war nur aufgrund von Fortschritten in der Quantenphysik in den vorangegangenen Jahrzehnten möglich.

So können heute auch alle elektrischen Einheiten – also Spannung, Stromstärke und Widerstand – über Quanteneffekte miteinander verbunden werden und bilden damit einen Teil des Systems. Die Grundlagen dafür schafften der Josephson-Effekt (für den Brian D. Josephson 1973 den Nobelpreis für Physik erhielt) und der Quanten-Hall-Effekt (für den Klaus von Klitzing 1985 den Nobelpreis für Physik erhielt).

Quantensensorik

Die Waage in unserer Küche hilft uns beim Kuchenbacken, und anhand des Thermometers im Backofen können wir die richtige Temperatur einstellen. Mag die heutige Sensortechnik fürs Kuchenbacken reichen, gibt es Felder wie die medizinische Diagnostik oder die Erdbeobachtung, in denen heutige Sensoren an ihre Grenzen stoßen, da hier immer präzisere Messungen erforderlich werden.

Die Atomuhr - wichtig für unseren Alltag



Der Frequenzkamm als metrologische Grundlage der optischen Atomuhr

Licht besteht aus Photonen, die sich wie Teilchen und Welle gleichzeitig verhalten können. Dabei besitzt jede Welle auch eine Frequenz, die angibt, wie viele Schwingungen sie pro Sekunde macht.

Sichtbares Licht besteht aus Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen, die wir als unterschiedliche Farben wahrnehmen. So schwingt rotes Licht langsamer als blaues Licht, besitzt also eine niedrigere Frequenz.

Um die Frequenz von Licht (und auch allgemein von elektromagnetischer Strahlung) sehr präzise zu messen, benötigt man ein besonderes „Lineal“: den Frequenzkamm.^f Möchte man die Frequenz eines anderen Lasers messen, überlagert man das Licht des Frequenzkamms mit dem Licht des Lasers, indem man sie gemeinsam einem Detektor zuführt. Über das elektrische Signal, das im Detektor entsteht, kann man dann die Frequenz des zu messenden Lasers präzise bestimmen.

Dadurch lassen sich noch viel genauere optische Atomuhren herstellen, die unter anderem bei der Satellitennavigation eine wichtige Rolle spielen. Für die Erfindung der Frequenzkammtechnik – die erst in den späten 1990er Jahren erfolgte – erhielt Theodor Hänsch 2005 den Nobelpreis in Physik.

Präzise Standortbestimmung als Anwendung einer Atomuhr

Atomuhren sind die genauesten Uhren der Welt. Ohne es zu wissen, benutzen wir sie tagtäglich, denn sie sind die Grundlage präziser Standortbestimmungen durch die Navigationssysteme GPS oder Galileo (GNSS). Rund 400 Atomuhren weltweit erzeugen gemeinsam die international verbindliche Zeit, und jeder kann sie in seiner Funkuhr einfach abrufen. Auch wenn die Atomuhr nicht so aussieht wie die gewöhnliche Armband- oder Standuhr, funktioniert sie nach dem gleichen Prinzip: Sie misst Zeitintervalle. Was bei der Standuhr die Frequenz eines schwingenden Pendels ist, entspricht in der Atomuhr der Übergangsfrequenz, wenn ein Elektron in einen anderen Zustand springt (siehe auch „Zwei-Zustands-System“, Kapitel 2.2). Hätten seit Beginn des Universums (vor 13,7 Milliarden Jahren) optische Atomuhren mit dem Ticken begonnen, würden sie seitdem nur eine Sekunde falsch gehen.⁸

Noch sind keine optischen, sondern andere Arten von Atomuhren in um die Erde kreisenden Satelliten verbaut, doch zukünftig werden optische Atomuhren wegen ihrer noch höheren Genauigkeit für die Standortbestimmung verwendet werden.

f Um diesen Frequenzkamm zu erzeugen, benötigt man einen speziellen Laser, der eine Serie extrem kurzer Laserpulse in extrem genau kontrollierten Zeitabständen erzeugt. Das Farbspektrum des Laserpulses setzt sich dann aus einem dichten Kamm einzelner Frequenzen zusammen, deren Abstände äußerst präzise definiert sind – das ideale „Lineal“ zur Messung optischer Frequenzen.

Die Quantensensorik nutzt die hohe Empfindlichkeit von Quantensystemen gegenüber kleinsten Einflüssen wie elektrischen oder magnetischen Störungen. Diese Empfindlichkeit, die bei der Entwicklung von Quantencomputern, die aus vielen Qubits bestehen, eine große Herausforderung darstellt (siehe Kapitel 3.2.1), ist für die Quantensensorik ein Segen, denn sie erlaubt in Kombination mit anderen Faktoren die Entwicklung von Sensoren mit bisher nie da gewesener Messgenauigkeit. Erste technisch anwendbare Quantensensoren für Magnetfelder wurden bereits 1964 realisiert.³⁰ Die Empfindlichkeit dieser Magnetfeldsensoren ist heute so groß, dass sogar Körperfunktionen oder Gehirnströme über deren externe Magnetfelder gemessen werden können. Neueste Entwicklungen basieren unter anderem auf sogenannten Stickstoff-Fehlstellen (oder kurz „NV-Zentren“) in Diamanten. Dabei handelt es sich im Prinzip um einen Strukturfehler in einem Diamanten, in den man ein Quantensystem „einsperrt“. Dadurch können hochsensitive magnetische Resonanzmessungen bei Raumtemperatur durchgeführt werden, auf deren Basis auch die Bestimmung von Magnetfeldern und der Temperatur möglich ist (siehe Schaubild auf Seite 48). Ein weiteres Ziel ist die Entwicklung von genaueren Sensoren für die Navigation beim autonomen Fahren.

Quantenbasierte Bildgebung

Ohne Bildgebung blieben viele Fragen unbeantwortet. Egal ob es um das Diagnostizieren von Krankheiten und Knochenbrüchen oder das Verhalten von Bakterien geht, die dabei helfen, neue Medikamente zu entwickeln: Beobachtungen mit bloßem Auge ließen keinerlei zuverlässige Schlüsse zu. Bildgebungsverfahren wie hochauflösende Mikroskope oder MRT eröffneten neue Welten und gaben uns ein neues und vor allem besseres Verständnis von unserer Umwelt.

Mithilfe der sogenannten STED-Mikroskopie („STED“ steht für „Stimulated Emission Depletion“) ist es bereits heutzutage möglich, ein hochauflösendes „Live-Bild“ von einzelnen Körperzellen zu erhalten. Für die Entdeckung und Entwicklung dieser Technologie wurden Stefan Hell, Eric Betzig und William Moerner 2014 mit dem Nobelpreis für Chemie ausgezeichnet.³² Die STED-Mikroskopie baut auf der Lichtmikroskopie auf und

erlaubt einen enormen Sprung in der Auflösung von Bildern. Bis dahin dachte man, dass Lichtmikroskope nie über eine gewisse physikalische Grenze hinauskommen könnten. Der Trick der STED-Mikroskopie besteht in einer geschickten Verwendung von Fluoreszenzfarbstoffen und Lasern, die auf Erkenntnissen und Fortschritten in der Quantenoptik basiert. Dabei werden jedoch relativ hohe Laserintensitäten benötigt, die zum einen den Zellen schaden und zum anderen den Fluoreszenzfarbstoff ausbleichen können.³³

Hier setzt die quantenbasierte Bildgebung (englisch: „Quantum Enhanced Imaging“) an, deren Ziel es ist, in den kommenden Jahren eine weitere, neue Ära der Bildgebungsverfahren einzuläuten. Durch Nutzung von Quanteneffekten könnte es in naher Zukunft möglich sein, Bilder zu erzeugen, die selbst mit modernsten Mikroskopen nicht generiert werden können (siehe Schaubild auf Seite 50).

Implikationen für Wirtschaft und Gesellschaft

Vor allem in der Magnetfeld- und der Schwerefeldmessung hat die neue Generation der Quantensensoren das Potenzial, aktuelle Sensorkonzepte um ein Vielfaches zu übertreffen. Fortschritte in der Magnetfeldmessung könnten vor allem in der medizinischen Diagnostik zur Messung von Magnetfeldern des Gehirns und von Gehirnströmen von Nutzen sein. Eine verbesserte Schwerefeldmessung der Erde kann hingegen helfen, ein besseres Bild des Erdinneren zu liefern. Dies könnte vor allem als Frühwarnsystem bei Erdbeben und Vulkanausbrüchen, beim Aufspüren von Bodenschätzen oder zur Detektion von Löchern im Untergrund helfen.

Die Effekte auf die Gesellschaft könnten recht groß sein. Sollte man durch Quantensensorik riesige Vorkommen an neuen Ressourcen entdecken oder Krankheiten frühzeitig besser erkennen können, würde die Gesellschaft sehr davon profitieren.

„Deutschland ist ein Sensorland.“

Im Gegensatz zur Entwicklung von Quantencomputern oder der Quantenkryptografie sind die Einstiegshürden für Firmen hier relativ gering, da Unternehmen, die bereits im Bereich der Sensorik arbeiten, keine fundamental neue Infrastruktur benötigen. Das soll jedoch nicht heißen, dass Entwicklungen auf dem Gebiet der Quantensensorik einfach wären. Überall werden neue Materialien, neue Sensorkonzepte, neue Algorithmen und neues Wissen gebraucht. Außerdem ist noch nicht vorhersehbar, für welche Anwendungen sich die Quantentechnologien der zweiten Generation kommerziell durchsetzen werden. Das muss die Zukunft zeigen.

Quantensensorik

Quanten reagieren extrem sensibel auf Umwelteinflüsse. Deshalb können sie sehr gut als Sensoren eingesetzt werden. Doch wie funktionieren Quantensensoren, und wo werden sie angewendet?

Voraussetzungen für den Bau eines Quantensensors



1 Damit Quantensysteme als Sensoren verwendet werden können, müssen sie von der äußeren Welt abgeschottet werden. Man muss sie sozusagen „einsperren“.



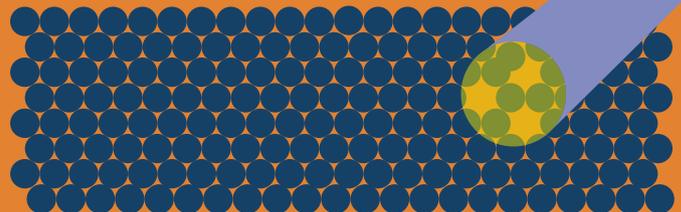
2 Veränderungen in der Quantenwelt können wir nur sehr schwer beobachten, da bereits die schiere Beobachtung den Quantenzustand beeinflusst (siehe Kapitel 2.4). Quanten sind also sehr „scheu“: Man muss die Veränderungen deshalb „indirekt beobachten“.

Aufbau und Funktionsweise eines Quantensensors

3 Ein Ergebnis bisheriger Forschung ist, dass sich Diamanten, die einen bestimmten Strukturfehler haben, gut dazu eignen, Quantensysteme einzusperren. Durch den Strukturfehler entstehen sogenannte Stickstoff-Fehlstellen-Zentren. Diese kleinen Bereiche im Diamant lassen sich gut als „Gefängniszellen“ für Quantensysteme nutzen.



4 Größen wie Temperatur sowie magnetische und elektrische Felder beeinflussen den Zustand des eingespernten Quantensystems im Diamant. Aus der Veränderung des Quantensystems in der „Gefängniszelle“ kann man auf Veränderungen der äußeren Welt um den Diamanten schließen, ohne den Beobachtereffekt auszulösen. Durch Kontrolle und Abfrage eines einzelnen, hochempfindlichen Quantensystems gelingt die Messung von kleinsten Effekten, die sonst nicht erfassbar wären.



Anwendung von Quantensensoren in der Medizin

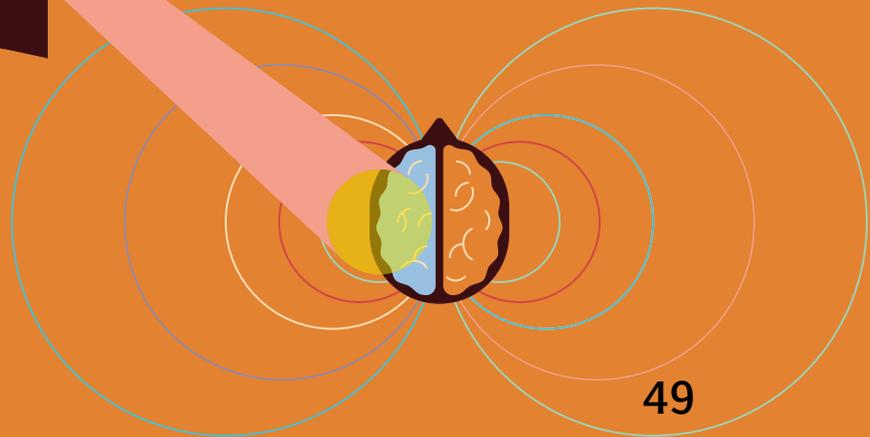
5

In der Medizin ist man auf Sensoren angewiesen. Vom Fieberthermometer bis zum Magnetresonanztomograf (MRT) – all diese Geräte messen Zustände in unserem Körper. Diagnostik und Behandlung von Krankheiten wären ohne Sensoren nicht möglich.



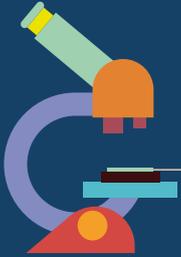
6

Durch Quantensensoren kann sich die medizinische Diagnostik deutlich verbessern. Sie sind so genau, dass beispielsweise das Magnetfeld unseres Gehirns gemessen werden kann. Dies könnte ein entscheidender Fortschritt für die Behandlung von Krankheiten wie Epilepsie sein. Bisher waren Gehirnstrommessungen sehr umständlich und oft unangenehm für die Patientinnen und Patienten. Könnte man das Magnetfeld mit hochsensiblen Sensoren erfassen, wären diese Unannehmlichkeiten Vergangenheit.

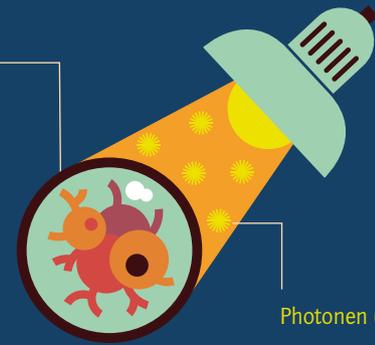


Klassische Bildgebung

Eine Biologin untersucht mit einem Mikroskop eine Krebszelle, um neue Behandlungsmethoden zu erforschen. Damit sie etwas sehen kann, muss sie die Probe in irgendeiner Form mit Licht bestrahlen.

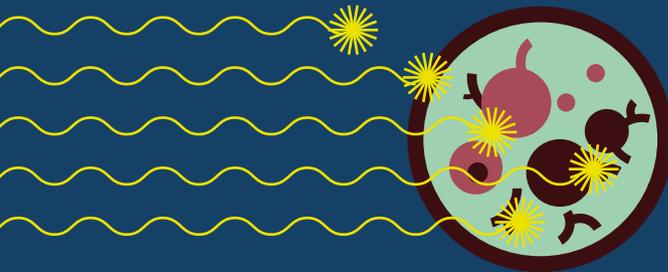


Wenn die Lichtstrahlen die Probe treffen, interagiert die Probe mit dem Licht. Im Prinzip kann man das mit unserer Haut vergleichen, wenn wir uns der Sonne aussetzen. Unsere Haut besteht auch aus einzelnen Zellen und reagiert auf die einfallenden Lichtstrahlen der Sonne.



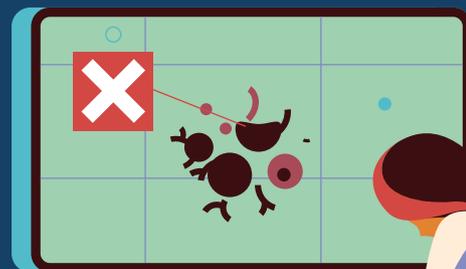
Photonen (= Lichtquanten)

Photonen in zellschädigenden Wellenlängen



Das Problem dabei ist, dass bestimmte Zellen, wie in unserem Fall die Probe der Biologin, sehr lichtempfindlich sind. Ein heute übliches Mikroskop schickt eine sehr große Anzahl von Photonen (= Lichtquanten) aus. Deshalb kann es passieren, dass die Lichtstrahlung des Mikroskops die Probe bei längeren Untersuchungen beschädigt oder zerstört.

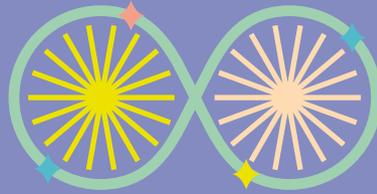
Mit bisherigen Bildgebungsverfahren kann man lichtempfindliche Zellproben also nur über einen begrenzten Zeitraum messen, bevor sie zerfallen. Dabei kann die Beobachtung von Zellen über einen längeren Zeitraum jedoch in manchen Fällen sehr wichtig sein, um beispielsweise Abläufe in den Zellen besser zu verstehen.



Quantenbasierte Bildgebung

Dank der quantenbasierten Bildgebung könnten wir in Zukunft einzelne Zellen von Lebewesen viel genauer abbilden, als dies aktuell der Fall ist. Wie funktioniert die neue Art der Bildgebung, und was macht sie besser als bisherige Verfahren?

Eine Biologin nutzt die Quantenbildgebungstechnologie zur Untersuchung der Zelle. Sie erzeugt dafür Photonenpaare.



Die Biologin macht sich die Paareigenschaften von Lichtquanten zunutze, indem sie mit dem einen Photon des Paares die Zellprobe bestrahlt. Das andere Photon ist auf eine Kamera gerichtet.

Photonen in sichtbarer Wellenlänge

Photonen in nicht zellschädigender Wellenlänge

So kann sie gezielt die Information des einen Photons (in einem potenziell schwer zu detektierenden Lichtbereich) über das Partner-Photon (in einem potenziell leichter zu detektierenden Lichtbereich) auslesen. Das interagierende Photon wird dabei nie auf die Kamera gebracht, und dennoch entsteht das Bild.

Das Besondere an der quantenbasierten Bildgebung ist: Das Photon, das die Kamera erreicht, interagiert selbst nie mit der Zellprobe, nur sein Partner-Photon hat Kontakt zur Probe. Zudem lässt sich bei der Quantenbildgebung die Lichtmenge reduzieren, wodurch lichtempfindliche Proben geschont werden.

4

Gestaltungsspielräume und Erwartungsmanagement

Die Potenziale und der Entwicklungsstand der Quantentechnologien der zweiten Generation sind unterschiedlich, auch wenn sie alle auf den gleichen theoretischen und experimentellen Grundlagen der Quantenphysik beruhen. Ab 1900 haben deutsche Quantenphysiker wichtige Grundlagen für die Quantentechnologien gelegt. Auch heute noch hat Deutschland in der Quantenforschung mit seiner einzigartigen Forscher-Community die Nase vorn. Zusammen mit den europäischen Forschenden ist man sogar weltweit Spitzenreiter: Europa beschäftigt nahezu 40 Prozent aller Quantenforscherinnen und Quantenforscher und ist für rund 50 Prozent aller Veröffentlichungen in diesem Bereich verantwortlich.³⁵ Was aber ist zu tun, damit Forschung und Entwicklung zur Anwendungsreife gelangen?



4.1 Unabhängigkeit in der Quantenkommunikation und Quantenkryptografie

Die deutsche Bundesregierung hat bereits erklärt, dass der Aufbau einer Quantenkommunikationsinfrastruktur für sie ein wichtiger Förderungsschwerpunkt ist.³⁶ Das Bewusstsein, dass unsere Kommunikationssysteme in Zukunft noch besser geschützt werden müssen, ist vorhanden. Dabei muss frühzeitig mitgedacht werden, dass die Quantenkryptografie auch zum Rest der Infrastruktur und Sicherheitsarchitektur passen muss. Sicherheit durch Quantenkryptografie muss Teil einer technologieübergreifenden Sicherheitsarchitektur für IT-Systeme sein.

Außerdem scheint es sinnvoll, eine mögliche Abhängigkeit Deutschlands von anderen Ländern oder von Firmen zu reduzieren. In Europa gibt es deshalb Bestrebungen, eine bezahlbare, massenmarktaugliche Lösung für Quantenkommunikation zu entwickeln. Jedoch ist die QKD-Technologie mit unseren Netzen zunächst nicht unmittelbar kompatibel. Zwar gibt es bereits Start-ups in diesem Bereich, von denen man Anschlussgeräte für eine Punkt-zu-Punkt-Verbindung erwerben kann. Doch insgesamt muss die Technologie noch viel günstiger und müssen die notwendigen Geräte viel kleiner werden. Ebenso müssen neue Wege gefunden werden, unsere Glasfaserinfrastruktur QKD-tauglich zu machen oder komplett neu aufzubauen. Man kann sich vorstellen, dass dies mit sehr viel Aufwand und Geld verbunden ist. Passiert es allerdings nicht, ist eine deutschlandweite Implementierung noch in sehr weiter Ferne. Auch deshalb hoffen viele darauf, dass die einfacher zu implementierende Quantum-Safe-Kryptografie einen zuverlässigen Schutz bieten kann – doch das lässt sich zum jetzigen Zeitpunkt nicht garantieren.

Möglich ist auch, dass es in Zukunft je nach Sicherheitsbedarf eine gemischte Anwendung dieser Verschlüsselungstechnologien geben wird. Die ersten Anwender der QKD werden vermutlich Regierungen und Militär sein, während Netzwerk-Provider daran arbeiten werden, die QKD-Technologie auch in ihre Netze zu integrieren.³⁷ Denn Privatanwender oder Privatanwenderinnen nutzen Verschlüsselungstechnologien meist „as a service“, als Dienstleistung, die ihnen automatisch zur Verfügung gestellt wird.

China ist in der Entwicklung der Quantenkryptografie mit einer langen Glasfaserteststrecke zwischen Schanghai und Peking bereits vorangeschritten, ähnliche Bestrebungen sind beispielsweise auch in England und den Niederlanden zu beobachten. Zudem ist China mit dem Micius-Satelliten bei der satellitenbasierten QKD auf dem Vormarsch, wobei Europa und auch Deutschland hier langsam aufholen. Die Technologie

für den chinesischen Satelliten stammt übrigens aus einer Kooperation mit österreichischen Forschenden.³⁸

4.2 Deutschland als Vorreiter: Quantenmetrologie, Quantensensorik und quantenbasierte Bildgebung

„Quantentechnologie ist eine Komplementärtechnologie: In Deutschland sind wir auch in der Optik und der Sensorik rund um die Quantentechnologie gut aufgestellt.“

In der Quantenmetrologie, Quantensensorik und quantenbasierter Bildgebung ist Deutschland schon jetzt insgesamt hervorragend aufgestellt. Das ist wichtig, denn hier erhofft man sich auch in Zukunft weitere Durchbrüche, beispielsweise in der (Bio-)Medizin oder der Bodenerkundung. Die Fortentwicklungen der Quantentechnologien der ersten Generation, bei denen Deutschland als „Laser-Land“ bereits gut vertreten war, sind hier eher gradueller Natur. Das kommt dem Entwicklungsstandort Deutschland bei der Entwicklung von Quantenmetrologie, Quantensensorik und quantenbasierter Bildgebung entgegen. Besonders der deutsche Mittelstand ist in den Bereichen Laser und Sensorik sehr stark. Hier stehen die Chancen gut, als Zulieferer von hochwertigen Komponenten auch bei den Quantentechnologien der zweiten Generation in Erscheinung zu treten.

4.3 Von der Forschung zum Transfer am Beispiel des Quantencomputers

Auch wenn Deutschland grundsätzlich ein hochinnovatives Land ist: Wenn es darum geht, Forschung aus potenziell bahnbrechenden (und damit oft auch sehr risikobehafteten) Bereichen in anwendbare Produkte umzusetzen, tun wir uns derzeit eher schwer. Das gilt nicht nur für Quantencomputer, ist aber an diesem Beispiel besonders gut zu beobachten. Bei der Forschung zu theoretischen

schen Grundlagen von Quantencomputern steht Deutschland hervorragend da – aber die ersten (in Grundzügen) funktionierenden Quantencomputer stehen fast allesamt in den USA, nicht zuletzt auch deswegen, weil Firmen mit enormen Kapitalreserven, wie wir sie in Deutschland nicht haben, massiv investieren. Aufgrund ihrer Investitions- und Innovationskraft arbeiten bei diesen Firmen auch hervorragend ausgebildete Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus Deutschland.³⁹ Auch Deutschland hat sich zum Ziel gesetzt, für den Bau von zwei Quantencomputern zwei Milliarden Euro zu investieren.⁴⁰

Ob man einen Quantencomputer selbst herstellt oder gegebenenfalls zukaft, hat jeweils Vor- und Nachteile. Diese gegeneinander abzuwägen, ist eine deutsche und europäische Aufgabe, denn noch ist gar nicht abzusehen, ob sich die medial vermarktete „zweite Quantenrevolution“, vor allem im Hinblick auf den Computer, tatsächlich als Revolution erweisen wird. Falls die Erwartungen hier erfüllt werden, sind die Potenziale groß, und technologische Abhängigkeiten bei Hard- und Software wären von Nachteil.

Was machen andere Länder anders?

Es ist in den Medien kaum zu überlesen, dass US-amerikanische Konzerne in den Bau des Quantencomputers enorm viel Zeit und Geld investieren und in großen Schritten voranschreiten, während es in Europa keinen vergleichbaren Tech-Riesen gibt, der einen Quantencomputer auf die Beine stellen könnte. Zudem gibt es bisher vergleichsweise wenige Quanten-Start-ups. Gerade die Start-up-Mentalität mit ihrem Klima aus Kreativität und Agilität, in dem sich Innovationen schneller und gezielter umsetzen lassen, wird derzeit in Deutschland verhältnismäßig wenig gefördert. Hinzu kommt, dass es in Ländern wie den USA fast zum guten Ton gehört, auch mal zu scheitern, während das in Europa vornehmlich negativ konnotiert ist. Darüber hinaus herrscht in etablierten deutschen Konzernen oftmals die Befürchtung, dass zukünftige (noch ungewisse) Produkte aktuelle (bereits erfolgreiche) Produkte kannibalisieren.

„Wir haben in Deutschland gewisse Denkstrukturen, die die Politik nicht einfach per Hebel ändern kann. In anderen Ländern werden neue Technologien oft mit mehr Optimismus und vor allem mit mehr Risikobereitschaft vorangetrieben und sind auch von der Gesellschaft akzeptiert. Wissenschaftler werden in Deutschland eher für neue Ideen anerkannt und weniger für deren Transfer in die Anwendung.“

Der Quantencomputer beginnt im Quantenökosystem

Wie kommen wir in Deutschland trotz anderer Voraussetzungen von der Forschung in die Anwendung? Es mangelt gewiss nicht an klugen Köpfen. Vielmehr ist die Frage, wie es gelingen kann, Erfindergeist mit Unternehmergeist zu koppeln. Damit Forschende, Industrie und Start-ups auf nationaler wie europäischer Ebene kooperieren können, bedarf es guter Rahmenbedingungen für ein Quantenökosystem. Nur mit Geld allein ist es aber nicht getan. Getragen wird der Transfer von der Neugier, gemeinsam mit anderen Disziplinen und Akteuren, auch aus unterschiedlichen europäischen Ländern, zu forschen, auszuprobieren und umzusetzen. Das gilt insbesondere für die Industrie sowohl als Hersteller als auch als Anwender zukünftiger Quantencomputer, deren Unternehmergeist und Neugier in einem Quantenökosystem unabdingbar sind.

„Wir brauchen nicht unbedingt neue Studiengänge, sondern eine Schnittstelle zwischen der grundlagenorientierten Physik und dem Ingenieurwesen, um Quantenprodukte zu schaffen.“

Durch ein solches Quantenökosystem könnte man dem befürchteten technologischen Monopol beim Quantencomputer entgegenwirken und die Unabhängigkeit Europas und Deutschlands von anderen Wirtschaftsräumen gewährleisten. Das könnte nicht nur enorme Summen an Geld sparen, sondern würde auch die technologische Souveränität stärken.

Das Gesamtpaket zählt

„Wir sollten Quantencomputer als Teil einer Kette von Technologien sehen, nicht als alleinstehende Technologie.“

Hardware und Software gehen Hand in Hand: Es reicht also noch nicht aus, „nur“ einen neuen Quantencomputer oder Quantensensor (also die Hardware) zu erfinden und zusammenzubauen. Denn diese Geräte werden erst dann erfolgreich sein, wenn sie einen Quantenmehrwert liefern, das heißt, wenn sie gerade die Lücken füllen, bei denen herkömmliche Computer oder Sensoren an ihre Grenzen stoßen, und die zudem ökonomisch einen Vorteil bringen. Gerade um diesen Quantenmehrwert zu generieren, muss man die Quantentechnologie als eine Kette von Technologien betrachten: Hier bedarf es einerseits der Programmierung ganz neuer Algorithmen (also Software), damit Quantengeräte auch einen Mehrwert liefern können und Anwendung finden. Bislang haben sich erst wenige deutsche oder europäische Firmen an die Herstellung von Quantensoftware gewagt. Andererseits haben die Technologien um die Hardware herum – also etwa die Herstellung von Kühlanlagen für den supraleitenden Quantencomputer – ebenso große Potenziale, um das Gesamtpaket eines Quantenprodukts international erfolgreich und exportfähig zu machen.

„Neue Anwendungen bedürfen Investments, die man sich trauen muss. Wir brauchen Leuchtturmprojekte, um die Möglichkeiten aufzuzeigen, wie man mit Quantentechnologien richtig Geld verdienen kann.“

4.4 Die „Quantessenz“

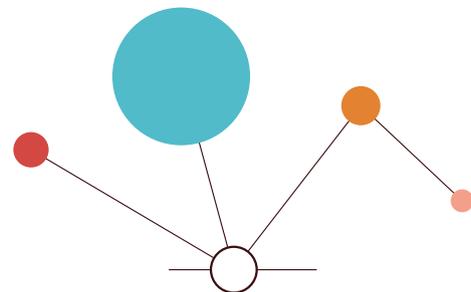
Wir leben in einer Zeit steigender Begeisterung für Quantentechnologien. Dass Potenziale vorhanden sind, grundsätzlich einen Quantenmehrwert zu schaffen, ist unumstritten. Die Gefahr, dass diese Begeisterung als Hype verpufft, weil die Erwartungen, vor allem an den Quantencomputer, zu hoch sind, besteht jedoch ebenso. Fachleute appellieren daher an Kommunikatoren aller Bereiche – von den Medien über Politik, Industrie bis hin zur Wissenschaft –, ein realistisches Erwartungsmanagement zu betreiben:

Erstens bedarf es Geduld und Durchhaltevermögen, denn es wird noch länger dauern, bis die neuen Quantenanwendungen kommen und im Vergleich zu heutigen Technologien einen echten Mehrwert bieten.

Zweitens sollte niemand enttäuscht sein, wenn Systeme der Quantensensoren, -computer oder -kryptografie in der nahen bis mittleren Zukunft nicht in jedem Haushalt zu finden sein werden. Für Privatpersonen werden die Quantentechnologien als Teil von Geräten und Dienstleistungen, die allen zugutekommen, im Alltag unsichtbar bleiben. Firmen und Regierungen werden voraussichtlich zunächst diejenigen sein, die Quantentechnologien tatsächlich anwenden.

Drittens sind mehr Agilität und Risikobereitschaft manchmal von Vorteil. Oft machen wir uns das Leben selbst schwer, wenn es um Anträge, Vergaben, Förderprojekte und Entscheidungen geht. Große ausländische Tech-Firmen sind hier im Vorteil, da sie schneller reagieren können. Gerade deshalb ist es für Europa nun vielleicht an der Zeit, große Quantensprünge – also das, was man in der Alltagssprache darunter versteht – zu wagen.

„Wir müssen auf die richtigen Felder setzen, damit aus dem Quanten-Hype auch Technologien entstehen. Wir brauchen deshalb jetzt einen nüchternen Blick auf das Thema.“





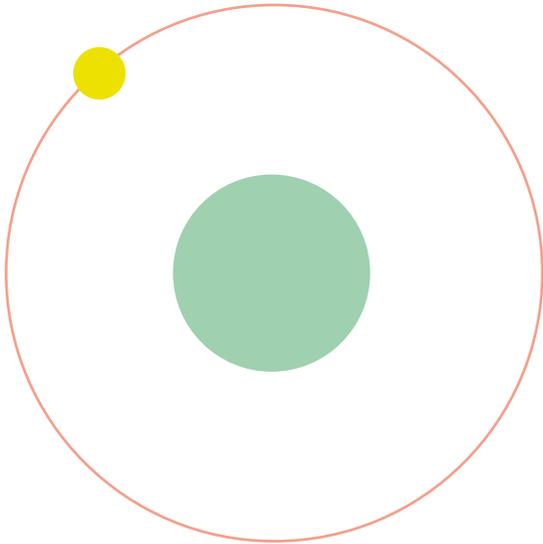
Literaturverzeichnis

- 1** Buhrman, H., Cleve, R., van Dam, W. (2001): zitieren: „**Letter from Einstein to Max Born, 3 March 1947; The Born-Einstein Letters, Correspondence between Albert Einstein and Max and Hedwig Born from 1916 to 1955, Walker, New York, 1971.**“ In: Quantum Entanglement and Communication Complexity. SIAM Journal on Computing, 30(6):1829-1841.
- 2** Tegmark, M., Wheeler, J. A. (2001): **100 Years of Quantum Mysteries.** Scientific American.
- 3** Jaeger, L. (2018): **Die zweite Quantenrevolution.** Vom Spuk im Mikrokosmos zu neuen Supertechnologien. Springer, Berlin.
- 4** Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) (2012): **PTR/PTB: 125 Jahre metrologische Forschung.** Online verfügbar unter https://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/ptb_mitteilungen/mitt2012/Heft2/PTB-Mitteilungen_2012_Heft_2.pdf, zuletzt geprüft am 03.11.2020.
- 5** Britannica: **Learn about Thomas Young's double-slit experiment which contradicted Newton's theory of light.** Online verfügbar unter <https://www.britannica.com/video/179685/experiment-Thomas-Young>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 6** Jönsson, C. (1961): **Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten.** Zeitschrift für Physik, 161(4):454-474.
- 7** Filk, T. (2019): **Zitate zur Quantentheorie.** Albert Einstein über die Quantenmechanik in einem Brief an Cornelius Lanczos, 21. März 1942, Einstein-Archiv 15-294, zitiert nach Einstein, Briefe, Seite 65, zitiert nach Alice Calaprice (Hrsg.): Einstein sagt, Piper-Verlag, München, Zürich 1996, S. 146. In: Filk, T. (Hrsg.), Quantenmechanik (nicht nur) für Lehramtsstudierende. Springer Spektrum, Berlin.
- 8** Konitzer, F. (2014): **Atomuhren.** Welt der Physik. Online verfügbar unter <https://www.weltderphysik.de/gebiet/technik/atomuhren/atomuhren/>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 9** Seabaugh, A. (2013): **The Tunneling Transistor.** IEEE Spectrum. Online verfügbar unter <https://spectrum.ieee.org/semiconductors/devices/the-tunneling-transistor>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 10** Brooks, M. (2019): **Beyond quantum supremacy: the hunt for useful quantum computers.** Nature, 574(7776):19-21.
- 11** Krieger, S. (2019): **Künstliche Intelligenz und Quantencomputing: Das Beste aus beiden Welten.** Online verfügbar unter <https://www.f05.uni-stuttgart.de/fakultaet/aktuelles/news/Kuenstliche-Intelligenz-und-Quantencomputing-Das-Beste-aus-beiden-Welten-00003/>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 12** Feynman, R., Mößbauer, R., Summerer, S. (1990): **Vom Wesen physikalischer Gesetze.** Piper, München.
- 13** Olson, E. (2019): **How quantum computers work.** Electronics 360. Online verfügbar unter <https://electronics360.globalspec.com/article/13553/how-quantum-computers-work>, zuletzt geprüft am 14.09.2020.
- 14** Hui, J. (2019): **QC - How to build a Quantum Computer with Superconducting Circuit?** Medium. Online verfügbar unter <https://jonathan.hui.medium.com/qc-how-to-build-a-quantum-computer-with-superconducting-circuit-4c30b1b296cd>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 15** Tavernelli, I. (2018): **Quantum Computing at IBM.** Quantum Computing for High Energy Physics. IBM Research - Zürich. Online verfügbar unter https://indico.cern.ch/event/719844/contributions/3019718/attachments/1749768/2835637/CERN_Tavernelli4_1.pdf, zuletzt geprüft am 05.11.2020.
- 16** Castelvecchi, D. (2017): **The strange topology that is reshaping physics.** Nature News, 547(7663):272.
- 17** Bechtold, A., Rauch, D., Li, F., Simmet, T., Ardel, P.-L., Regler, A., Müller, K., Sinitsyn, N. A., Finley, J. J. (2015): **Three-stage decoherence dynamics of an electron spin qubit in an optically active quantum dot.** Nature Physics, 11(12):1005-1008.
- 18** Popkin, G. (2016): **Scientists are close to building a quantum computer that can beat a conventional one.** Online verfügbar unter <https://www.sciencemag.org/news/2016/12/scientists-are-close-building-quantum-computer-can-beat-conventional-one>, zuletzt geprüft am 02.11.2020.
- 19** Giles, M. (2019): **Explainer: What is quantum communication?** MIT Technology Review. Online verfügbar unter <https://www.technologyreview.com/2019/02/14/103409/what-is-quantum-communications/>, zuletzt geprüft am 21.10.2020.
- 20** Bundesministerium für Bildung und Forschung (2018): **Q.Link.X. Quantenrepeater für eine abhörsichere Kommunikation über große Distanzen. Q.Link.X, Verbundprojekt Quanten-Link-Erweiterung.** Online verfügbar unter <https://www.forschung-it-sicherheit-kommunikationssysteme.de/projekte/q-link-x>, zuletzt geprüft am 05.11.2020.
- 21** Liao, S.-K., Cai, W.-Q., Liu, W.-Y., Zhang, L., Li, Y., Ren, J.-G., Yin, J., Shen, Q., Cao, Y., Li, Z.-P., Li, F.-Z., Chen, X.-W., Sun, L.-H., Jia, J.-J., Wu, J.-C., Jiang, X.-J., Wang, J.-F., Huang, Y.-M., Wang, Q., Zhou, Y.-L., Deng, L., Xi, T., Ma, L., Hu, T., Zhang, Q., Chen, Y.-A., Liu, N.-L., Wang, X.-B., Zhu, Z.-C., Lu, C.-Y., Shu, R., Peng, C.-Z., Wang, J.-Y., Pan, J.-W. (2017): **Satellite-to-ground quantum key distribution.** Nature, 549(7670):43-47.

- 22** Popkin, G. (2017): **China's quantum satellite achieves 'spooky action' at record distance.** Science, American Association for the Advancement of Science (AAAS), Online verfügbar unter <https://www.sciencemag.org/news/2017/06/china-s-quantum-satellite-achieves-spooky-action-record-distance>, zuletzt geprüft am 27.11.2020.
- 23** Zivkovic, A. B., Hristov, N. P., Jerković, D. D., Bogdanović, B. S., Milutinović, J. M. (2019): **Automatic measurement of precision and accuracy from the hit pattern of small arms using electronic target system.** IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 659:12015.
- 24** Mavroeidis, V., Vishi, K., Zych, M., Jøsang, A. (2018): **The Impact of Quantum Computing on Present Cryptography.** International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 9(3).
- 25** Bennett, C. H., Brassard, G. (1984): **Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing.** Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems, and Signal Processing.
- 26** Shor, P. W. (1997): **Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer.** SIAM Journal on Computing, 26(5):1484-1509.
- 27** Martín-López, E., Laing, A., Lawson, T., Alvarez, R., Zhou, X.-Q., O'Brien, J. L. (2012): **Experimental realization of Shor's quantum factoring algorithm using qubit recycling.** Nature Photonics, 6(11):773-776.
- 28** Bundesministerium für Bildung und Forschung (2019): **BMBF-Initiative QuNET baut hochsicheres Quantennetzwerk.** Online verfügbar unter <https://www.bmbf.de/de/bmbfinitiative-qunet-baut-hochsicheres-quantennetzwerk-10126.html>, zuletzt geprüft am 27.11.2020
- 29** Bureau International des Poids et Mesures (2019): **The International System of Units (SI).** 9. Auflage.
- 30** Johnson, A. (2014): **How the Ford Motor Co. Invented the SQUID.** IEEE Spectrum. Online verfügbar unter <https://spectrum.ieee.org/tech-history/silicon-revolution/how-the-ford-motor-co-invented-the-squid>, zuletzt geprüft am 06.11.2020.
- 31** Thiel, L., Rohner, D., Ganzhorn, M., Appel, P., Neu, E., Müller, B., Kleiner, R., Koelle, D., Maletinsky, P. (2016): **Quantitative nanoscale vortex imaging using a cryogenic quantum magnetometer.** Nature nanotechnology, 11(8):677-681.
- 32** The Royal Swedish Academy of Sciences: **The Nobel Prize in Chemistry 2014.** The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Chemistry for 2014 to Eric Betzig, Stefan W. Hell and William E. Moerner "for the development of super-resolved fluorescence microscopy". Online verfügbar unter <https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/press-26.pdf>, zuletzt geprüft am 27.11.2020
- 33** Fischer, L. (2014): **Bilder von der Grenze zwischen Biologie und Chemie.** Nobelpreise 2014. Spektrum.de. Online verfügbar unter <https://www.spektrum.de/news/nobelpreis-fuer-chemie-2014-geht-an-deutschen-und-zwei-amerikanische-mikroskopieforscher/1311875>, zuletzt geprüft am 19.10.2020.
- 34** Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF (2019): **Quantenrevolution in der Medizintechnik kündigt sich an.** Quanten-imagingsystem vom Fraunhofer IOF liefert erste vielversprechende Bilder. Online verfügbar unter <https://www.iof.fraunhofer.de/de/presse-medien/pressemitteilungen/2019/Quantenrevolution.html>, zuletzt geprüft am 27.11.2020
- 35** Bundesministerium für Bildung und Forschung (2018): **Quantentechnologien von den Grundlagen zum Markt.** Rahmenprogramm der Bundesregierung. Online verfügbar unter https://www.bmbf.de/upload_filestore/pub/Quantentechnologien.pdf, zuletzt geprüft am 20.10.2020.
- 36** Deutscher Bundestag (2020): **Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Manuel Höferlin, Frank Sitta, Grigoris Aggelidis, weiterer Abgeordneter und der Fraktion der FDP – Drucksache 19/17500. Hochsicheres Quantennetzwerk QuNET.** Online verfügbar unter <https://dip21.bundestag.de/dip21/btd/19/183/1918355.pdf>, zuletzt geprüft am 20.10.2020.
- 37** Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik IOF (2020): **Wie verschränkte Quanten unsere Kommunikation revolutionieren.** Online verfügbar unter <https://www.fraunhofer.de/de/forschung/aktuelles-aus-der-forschung/quantentechnologie/quantenkommunikation.html>, zuletzt geprüft am 04.11.2020.
- 38** Liao, S.-K., Cai, W.-Q., Handsteiner, J., Liu, B., Yin, J., Zhang, L., Rauch, D., Fink, M., Ren, J.-G., Liu, W.-Y., Li, Y., Shen, Q., Cao, Y., Li, F.-Z., Wang, J.-F., Huang, Y.-M., Deng, L., Xi, T., Ma, L., Hu, T., Li, L., Liu, N.-L., Koidl, F., Wang, P., Chen, Y.-A., Wang, X.-B., Steindorfer, M., Kirchner, G., Lu, C.-Y., Shu, R., Ursin, R., Scheidl, T., Peng, C.-Z., Wang, J.-Y., Zeilinger, A., Pan, J.-W. (2018): **Satellite-Relayed Intercontinental Quantum Network.** Physical review letters, 120(3):30501.
- 39** Kagermann, H., Süssenguth, F., Körner, J., Liepold, A. (2020): **Innovationspotenziale der Quantentechnologien der zweiten Generation** (acatech IMPULS), München.
- 40** Bundesministerium der Finanzen (2020): **Corona-Folgen bekämpfen, Wohlstand sichern, Zukunftsfähigkeit stärken.** Ergebnis Koalitionsausschuss 3. Juni 2020. Online verfügbar unter <https://www.bundesfinanzministerium.de/Content/DE/Standardartikel/Themen/Schlaglichter/Konjunkturpaket/2020-06-03-eckpunkt Papier.pdf>, zuletzt geprüft am 20.10.2020.

Interviewpartnerinnen und Interviewpartner

Die Festlegung der Inhalte und die Arbeit am Text erfolgten durch die auf Seite 62 vorgestellte Projektgruppe. acatech hat für diese Publikation telefonisch oder persönlich insgesamt 28 Experteninterviews mit Vertreterinnen und Vertretern aus Wissenschaft, Wirtschaft, Politik und Gesellschaft geführt. Die Gespräche fanden zwischen Januar und April 2020 statt. Einige ausgewählte Kerngedanken der Befragten sind im Text als anonymisierte Zitate aufgeführt.



Das acatech Präsidium dankt allen Beteiligten sehr herzlich für ihre Teilnahme an den Interviews:

Prof. Dr. Monika Aidelsburger, Gruppenleiterin, Max-Planck-Institut für Quantenoptik/Ludwig-Maximilians-Universität München

Prof. Dr. Stefanie Barz, Institut für Funktionelle Materie und Quantentechnologien, Leitung Quantum Information & Technology, Universität Stuttgart

Prof. Dr. Immanuel Bloch, Direktor, Max-Planck-Institut für Quantenoptik/Leiter Abteilung Quanten-Vielteilchensysteme, Quantum Optics Group, Ludwig-Maximilians-Universität München

Dr. Astrid Elbe, Managing Director, Intel Labs Europe, Intel Deutschland GmbH

Christin Eisenschmid, Managing Director, Vice-President und General Manager, Intel Deutschland GmbH

Prof. Dr. Claudia Felser, Direktorin, Max-Planck-Institut für Chemische Physik fester Stoffe/acatech

Jens Fuhrberg, Government Affairs/Public Affairs, Intel Deutschland GmbH

Verena Fulde, Pressesprecherin/Corporate Blogger, Deutsche Telekom AG

Dr. Marc Geitz, Innovation Architect, Telekom Innovation Laboratories

Dr. Markus Gräfe, Head of Quantum-Enhanced Imaging Group, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik/Co-Founder, Quantum Optics Jena GmbH

Prof. Dr. Michael J. Hartmann, Lehrstuhl für Theoretische Physik, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg

Prof. Dr. Stefan Kück, EURAMET TC-PR Chair, Leiter der Abteilung Optik, Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dr. Manfred Lochter, Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik (BSI)

Prof. Dr. Hilbert von Löhneysen, Emeritus, Physikalisches Institut, Karlsruher Institut für Technologie/acatech

Dr. Sebastian Luber, Leitung Quantum iCommunity, Infineon

Prof. Dr. Dieter Meschede, Gruppenleiter Quantentechnologie, Institut für Angewandte Physik, Universität Bonn

Prof. Dr. Stuart Parkin, Director, Max Planck Institute of Microstructure Physics

Dr. Thomas Pöppelmann, Senior Staff Engineer, Infineon Technologies AG

Dr. Heike Riel, IBM Fellow, Department Head Science & Technology, IBM Research

Prof. Dr. Martin Schell, Institutsleiter, Fraunhofer Heinrich-Hertz-Institut

Prof. Dr. Oliver Schmidt, Institutsdirektor, Institute for Integrative Nanosciences, Leibniz-Institut für Festkörper- und Werkstoffforschung Dresden e. V./acatech

Dr. Torsten Siebert, Quantum Technologies Programme, Fraunhofer-Gesellschaft | Think Tank

Dr. Thomas Strohm, Koordinator und Senior Research Scientist für Quantentechnologien, Robert Bosch GmbH

Dr. Michael Totzeck, Fellow, Corporate Research and Technology, Carl Zeiss AG

Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Institutsleiter, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik/acatech

Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Ullrich, Präsident, Physikalisch-Technische Bundesanstalt/acatech

Dr. Walter Weigel, Vice-President & CSO, European Research Institute, Huawei Technologies

Prof. Dr. Artur Zrenner, Department Physik, Universität Paderborn/acatech



Mitwirkende

Gesamtleitung acatech HORIZONTE:

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Vizepräsident acatech, Seniorprofessor Heinz Nixdorf Institut der Universität Paderborn

Leitung Innovationsforum:

Prof. Dr. Martina Schraudner, Vorstandsmitglied acatech, Leiterin Fraunhofer Center for Responsible Research and Innovation

Projektgruppe Quantentechnologien:

Prof. Dr. Stefanie Barz, Institut für Funktionelle Materie und Quantentechnologien, Leitung Quantum Information & Technology, Universität Stuttgart

Dr. Astrid Elbe, Managing Director, Intel Labs Europe, Intel Deutschland GmbH

Dr. Markus Gräfe, Head of Quantum-Enhanced Imaging Group, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik/Co-Founder, Quantum Optics Jena GmbH

Prof. Dr. Stefan Kück, EURAMET TC-PR Chair, Leiter der Abteilung Optik, Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Dr. Thomas Pöppelmann, Senior Staff Engineer, Infineon Technologies AG

Dr. Heike Riel, IBM Fellow, Department Head Science & Technology, IBM Research

Dr. Thomas Strohm, Koordinator und Senior Research Scientist für Quantentechnologien, Robert Bosch GmbH

Dr. Michael Totzeck, Fellow, Corporate Research and Technology, Carl Zeiss AG

Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Institutsleiter, Fraunhofer-Institut für Angewandte Optik und Feinmechanik/acatech

Prof. Dr. Dr. h. c. Joachim Ullrich, Präsident, Physikalisch-Technische Bundesanstalt/acatech

Prof. Dr. Artur Zrenner, Department Physik, Universität Paderborn/acatech (Leiter Projektgruppe)

Konzeption, Text und Experteninterviews:

Dr. Alexandra Heimisch-Röcker, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE (Autorin)

Christina Müller-Markus, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE (Autorin)

Vivian Würf, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE

Sebastian Grünwald, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE

Mit Unterstützung durch:

Iris Michalik, acatech Geschäftsstelle, HORIZONTE

Annette Wiedemann, acatech Geschäftsstelle, Kommunikation HORIZONTE

acatech -

Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

acatech berät Politik und Gesellschaft, unterstützt die innovationspolitische Willensbildung und vertritt die Technikwissenschaften international. Ihren von Bund und Ländern erteilten Beratungsauftrag erfüllt die Akademie unabhängig, wissenschaftsbasiert und gemeinwohlorientiert. acatech verdeutlicht Chancen und Risiken technologischer Entwicklungen und setzt sich dafür ein, dass aus Ideen Innovationen und aus Innovationen Wohlstand, Wohlfahrt und Lebensqualität erwachsen. acatech bringt Wissenschaft und Wirtschaft zusammen. Die Mitglieder der Akademie sind herausragende Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler aus den Ingenieur- und den Naturwissenschaften, der Medizin sowie aus den Geistes- und Sozialwissenschaften. Die Senatorinnen und Senatoren sind Persönlichkeiten aus technologieorientierten Unternehmen und Vereinigungen sowie den großen Wissenschaftsorganisationen. Neben dem acatech FORUM in München als Hauptsitz unterhält acatech Büros in Berlin und Brüssel.

Weitere Informationen unter www.acatech.de.



HERAUSGEBER:

acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

ADRESSEN STANDORTE**Geschäftsstelle**

Karolinenplatz 4

80333 München

T +49(0)89 / 520309-0

F +49(0)89 / 520309-900

Hauptstadtbüro

Pariser Platz 4a

10117 Berlin

T +49(0)30 / 2063096-0

F +49(0)30 / 2063096-11

Brüssel-Büro

Rue d'Egmont / Egmontstraat 13

B-1000 Brüssel

T +32(0)2 / 2 13 81-80

F +32(0)2 / 2 1381-89

horizonte@acatech.de

<https://www.acatech.de/horizonte>

Empfohlene Zitierweise:

acatech (Hrsg.): Quantentechnologien (acatech HORIZONTE),

München 2020

Redaktionelle Bearbeitung:

Karola Klatt

Lektorat:

Lektorat Berlin

Layout, Satz und Illustrationen:

Joseph & Sebastian – Grafikdesign, München

Druck:

Kern GmbH, Bexbach

Vorstand i. S. v. § 26 BGB:

Prof. Dr.-Ing. Dieter Spath, Karl-Heinz Streibich,

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Gausemeier, Prof. Dr. Reinhard F. Hüttl

(Amt ruht derzeit), Dr. Stefan Oschmann, Prof. Dr. Christoph

M. Schmidt, Prof. Dr.-Ing. Thomas Weber, Manfred Rauhmeier,

Prof. Dr. Martina Schraudner

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf fotomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben – auch bei nur auszugsweiser Verwendung – vorbehalten.

Copyright © acatech – Deutsche Akademie der Technikwissenschaften

• 2020

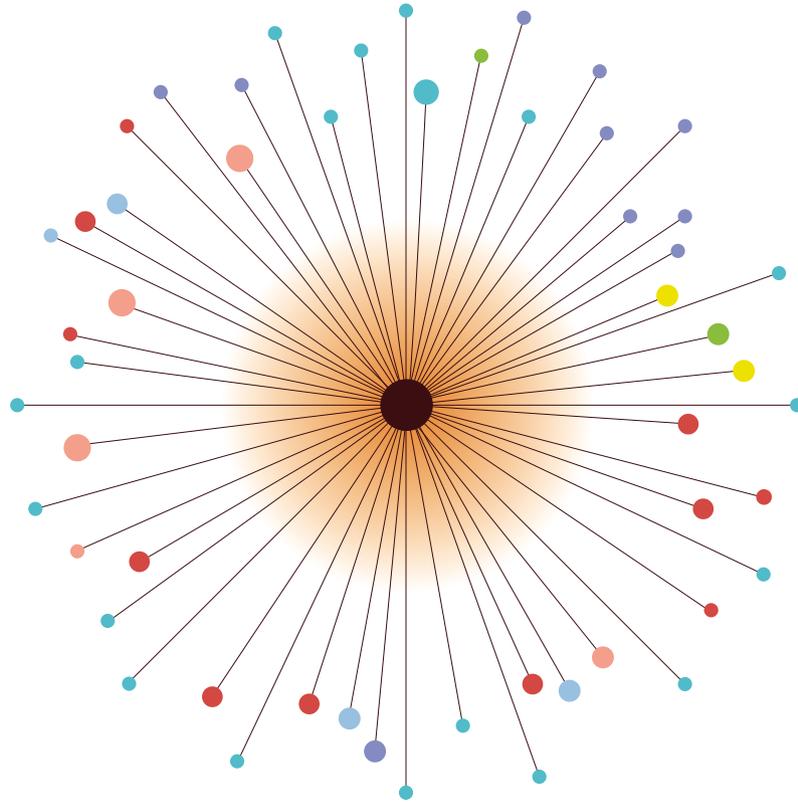
Mehr zu acatech HORIZONTE Quantentechnologien, inklusive der Grafiken, finden Sie auch unter:

<https://www.acatech.de/projekt/acatech-horizonte-quantentechnologien>



München 2020

acatech HORIZONTE ISSN 2625-9605



Über die zweite Generation der Quantentechnologien, zu denen auch der Quantencomputer gehört, kursieren viele Mythen. Auch deshalb, weil die Grundlagen dieser Technologie – die Quanten und deren Manipulation – ferner von unserer Alltagswelt kaum liegen könnten.

Was sind Quanten überhaupt? Was ist momentan technisch möglich? Was ist Hype, und wo liegen die Potenziale der Technologien? Auf diese und weitere Fragen möchte die vorliegende HORIZONTE-Ausgabe Antworten geben.